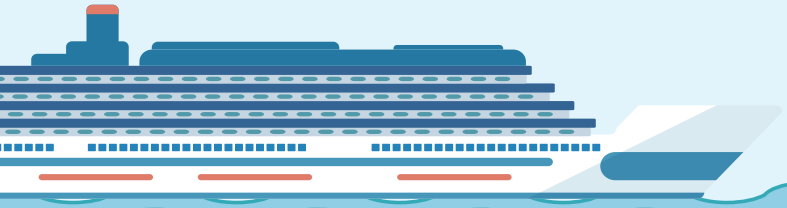
http://www.kim.or.kr/

2025 대한금속·재료학회 춘계학술대회 초록집

[초록집 QR]

2025.4.23WED - 25FRI

제주국제컨벤션센터



주최 : (사)대한금속 · 재료학회

후원 : POSCO, 현대제철, (재)현송교육문화재단, LS MnM, 아모그룹, 알앤비, 진우테크, 제주시, 제주컨벤션뷰로

KIM 대한금속·재료학회
THE KOREAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

KIM 대한금속·재료학회
THE KOREAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS
2025춘계학술대회
2025년 4월 23-25일

2025 Spring Conference of the Korean Institute of Metals and Materials

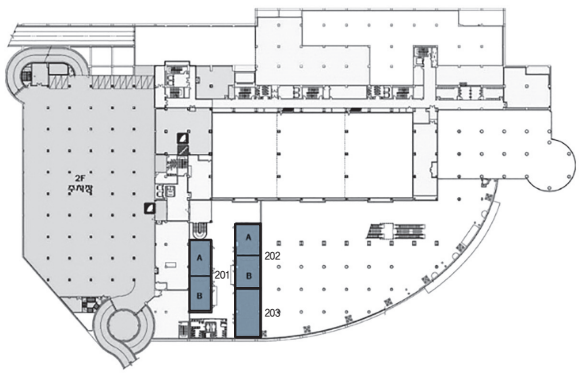
초록집 목차

+ 발표장 안내도 2
+ 행사 및 발표 진행 안내 3
+ 춘계학술행사 행사 일정 5
+ 구두 발표일정 20
+ 포스터 발표일정 67
+ 구두 발표 99
+ 포스터 발표 397
+ 발표자 색인 586
+ 2025년도 춘계 학회상 수상자 592
+ 포스터배치 594
+ 부스배치 595
+ 경품 추첨 안내 596

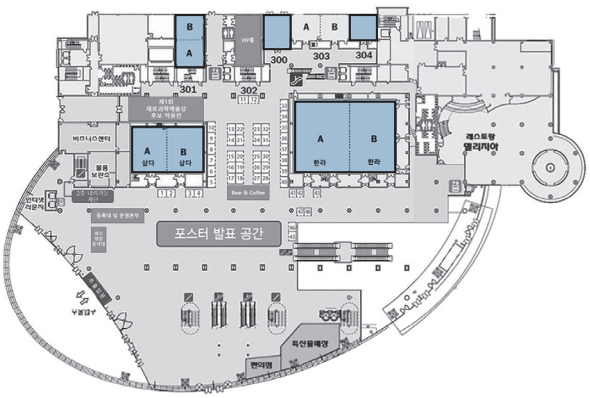
발표장 안내도

제주국제컨벤션센터

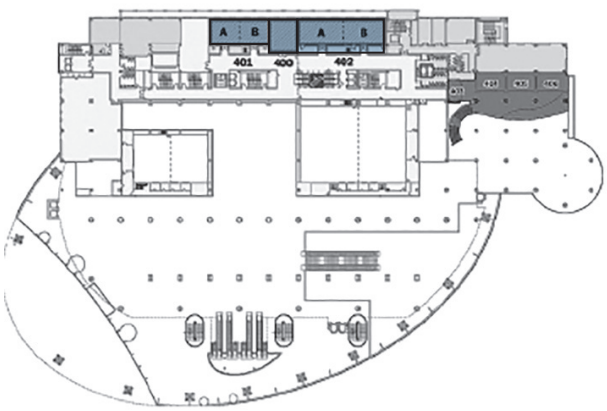
2F 201, 202, 203호



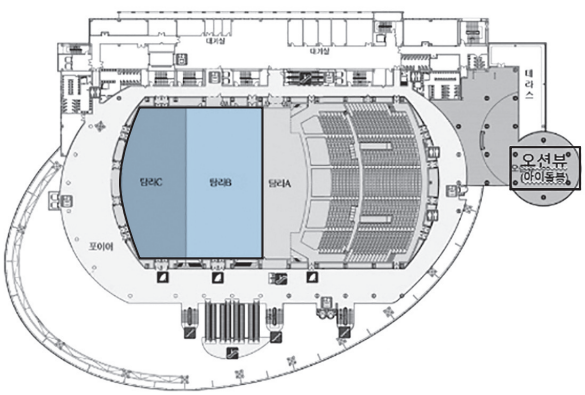
3F 300, 301, 303, 304호, 삼다, 한라홀, 로비 (등록 및 운영지원, 명찰출력데스크, 포스터발표, 전시부스, 경품추첨, Beer Party), 재료과학예술상 후보작품전 (투표)



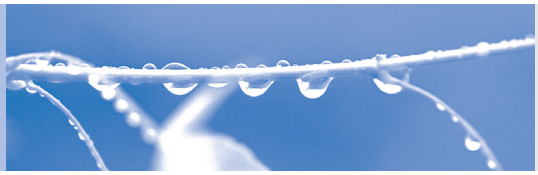
4F 400, 401, 402호



5F 탐라홀(중식, 임시총회/학회상 시상식/간친회), 오션뷰(아이돌봄)



행사 및 발표 진행 안내



❖ 대회 기간 : 2025년 4월 23일 수요일 ~ 4월 25일 금요일, 3일간
❖ 대회 장소 : 제주 국제컨벤션센터(ICC JEJU)
❖ 등록 기간 : 2025년 3월 4일(화) ~ 4월 18일(금) 17:00
– 위의 등록 기간 안에 신청 및 납부까지 완료 되셔야 합니다. 미납부 시 신청 내역은 삭제 됩니다.
– 온라인 등록만 진행하며, 당일 현장등록은 불가합니다.
❖ 학술대회 등록비
– 23일(수)~25일(금) 중식이 제공됩니다.

구분	1차등록 (3월 4일~4월 4일)		2차등록 (4월 7일~4월 18일)	
	회원	비회원	회원	비회원
일반	18만 원	25만 원	21만 원	28만 원
학생	12만 원	17만 원	15만 원	20만 원

※ 등록취소 및 환불은 4월 18일(금)까지 가능합니다. 이후 취소 및 환불이 불가합니다.
※ 만65세 이상 정회원은 등록비가 면제되오니, 참가를 희망하시는 분은 4월 11일까지 kimhak@kim.or.kr로 메일을 보내주시기 바랍니다.

구두세션 안내

❖ 구두 발표자료 준비
– 발표자료는 개인별로 이동용 저장 장치에 담아 오시기 바랍니다.(MS오피스)
– 발표자료는 휴게시간을 이용하여 발표장 노트북에 미리 옮겨 두시기 바랍니다.
– 강연장에는 연사용 노트북이 준비되어 있으며, 개인 노트북 연결 사용은 불가합니다.
– 발표자께서는 발표시간 20분 전까지 입장을 하셔야 합니다.

❖ 구두 발표 시간
– 일반발표: 15분 발표, 10분발표 후 5분간 질의응답으로 진행
– 초청강연: 20분~40분 (질의 및 응답 5분 포함)
※심포지엄의 발표시간은 심포지엄 별로 발표시간이 다르게 배정 됨.

포스터세션 안내

– 포스터 세션은 모두 대면 발표로 진행 됩니다.
– 포스터 발표 보드 부착 공간은 가로(폭) 100cm × 세로(높이) 120cm 크기로 준비하며, A4 기준으로 12장이 (가로 또는 세로로)부착 될 수 있습니다.
– 포스터 보드판 상단에 발표 번호가 마킹이 되어 있으므로 해당 포스터 번호에 포스터 부착물을 부착해주시기 바랍니다.
부착도구는 행사장 내에 비치된 부착물품을 이용 해 주시기 바랍니다.
– 발표부착물은 첫 장에(또는 서두에) 발표제목, 발표자 성명, 발표자 재직처가 명시될 수 있도록 준비 바랍니다.
– 포스터 질의 및 응답시간에는 본인 발표 포스터 앞에 정위치 하여야 합니다.
– 포스터 발표시간이 종료된 이후는 종료 후 10분 이내에 부착물을 탈착 하여야 하며 15분 이후 부착된 발표물은 학회 진행 요원에 의하여 임의 탈착되어 임의 처리 됩니다.
– 포스터발표자 출석체크는 질의 및 응답시간에 게시된 부착물 여부로 출석을 체크합니다.

학생구두발표 및 학생포스터발표 우수상 시상안내

– 학생구두발표에 대해서 심사를 거친 후 우수 구두발표를 선정하여 시상을 하게 됩니다.
– 학생포스터발표에 대해서 심사를 거친 후 우수 포스터발표를 선정하여 시상을 하게 됩니다.

좌장위원, 포스터 심사위원 출석 확인

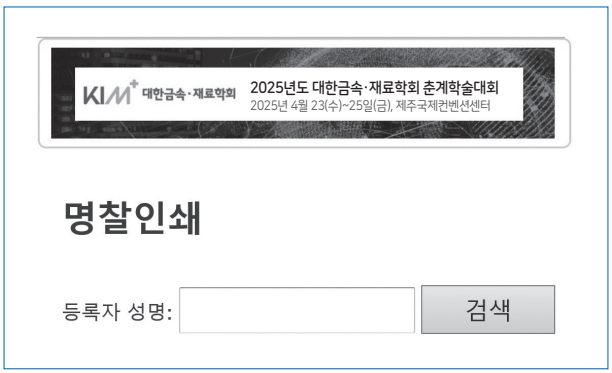
– 좌장위원 : 좌장위원은 해당 발표장에 20분전에 입실 해 주시고 발표장 운영 요원에게 출석을 확인 해 주시기 바랍니다.
– 포스터 심사위원: 포스터 심사위원은 3층 포스터 운영 부스로 오셔서 출석 확인 후 심사용지를 수령 해 주시기 바랍니다.

행사 및 발표 진행 안내

무인 셀프 명찰출력 데스크 운영 안내
(참가자 명찰 셀프 출력)

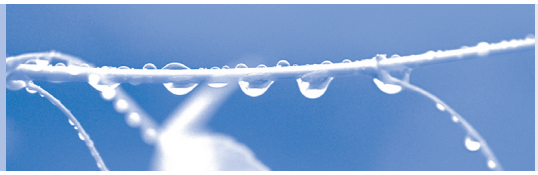
금번 춘계학술대회는 등록대 셀프 명찰 출력을 진행할 예정입니다. 참가 등록이 완료된 행사 참가자는 명찰 셀프 출력대로 오시면 총 6대의 셀프 등록대에서 명찰 출력이 가능 합니다. 각 PC에는 아래와 같이 명찰 검색 화면이 떠 있으며, 여기에 참가자 본인 성명을 입력 후 검색하시면 등록자 본인 이름이 검색되고, 인쇄 버튼을 클릭하면 명찰 인쇄가 완료됩니다. 명찰은 1번 인쇄 후 재출력이 불가하오니, 분실에 유의해 주시기 바랍니다. (현장 지원스텝 상주예정)

❖명찰 출력 PC 기본 화면



❖참가자명 검색 결과 화면

춘계학술행사 행사 일정



4월 23일 수요일

시간	행사 일정	비고
08:30–18:00	참가자 명찰수령(셀프 출력)	3층 등록대
08:30–17:00	아이돌봄 서비스 접수	3층 등록대
08:30–09:30	Coffee Break	3층 로비
09:00–18:00	제1회 재료과학예술상 후보 작품전 및 투표	3층 갤러리 ICCJEJU
09:00–12:00	구두세션 발표	각 발표장
10:00–17:00	포스터세션 발표	2층 로비
09:00–18:00	전시부스 홍보 진행	3층 로비
11:30–13:00	점심시간	5층 탐라홀
12:00–13:00	Beer party & Coffee Break	3층 로비
13:00–13:50	포스터 세션 질의 및 응답시간	3층 로비
14:00–18:00	구두세션 발표	각 발표장
18:30–20:00	역대회장 초청만찬	3층 델리지아

4월 24일 목요일

시간	행사 일정	비고
08:30–17:00	참가자 명찰수령(셀프 출력)	3층 등록대
08:30–17:00	아이돌봄 서비스 접수	3층 등록대
08:30–09:30	Coffee Break	3층 로비
09:00–17:00	제1회 재료과학예술상 후보 작품전 및 투표	3층 갤러리 ICCJEJU
09:00–12:00	구두세션 발표	각 발표장
09:00–18:00	전시부스 홍보 진행	3층 로비
10:00–17:00	포스터 세션 발표	3층 로비
11:30–13:00	점심시간	5층 탐라홀
12:00–13:00	Beer party & Coffee Break	3층 로비
12:30–13:00	경품 추첨	3층 로비
13:00–13:50	포스터 세션 질의 및 응답시간	3층 로비
14:00–17:20	구두세션 발표	각 발표장
17:30–18:30	총회 및 학회상 시상식	5층 탐라홀
18:30–20:00	간친회	5층 탐라홀

4월 25일 금요일

시간	행사 일정	비고
08:30–12:00	참가자 명찰수령(셀프 출력)	3층 등록대
08:30–09:30	Coffee Break	3층 로비
09:00–10:00	제1회 재료과학예술상 후보 작품전 및 투표	3층 갤러리 ICCJEJU
09:00–12:45	구두세션 발표	각 발표장
09:00–13:30	포스터 세션 발표	3층 로비
09:00–13:30	전시부스 홍보 진행	3층 로비
12:00–12:30	포스터 세션 질의 및 응답시간	3층 로비
12:30–13:30	점심 식사	5층 탐라홀
13:30–14:00	재료과학예술상 시상 및 경품 추첨	3층 로비

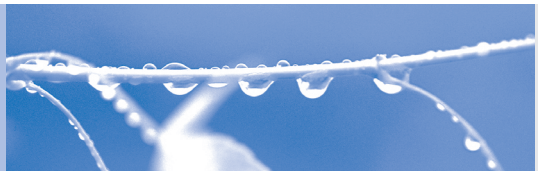
발표일정

4월 23일(수) 발표 일정

- 총 진행: 석현광, 이기안 학술부회장
- 구두 및 포스터세션 진행위원: 김영무, 심재혁 학술이사
- 학생구두발표 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 김영무, 심재혁 학술이사, 황병철, 김명균, 김용주 위원
- 튜토리얼 진행위원: 김주영, 박은수 학술이사

발표장 / 시간	201A	201B	202A	202B	203	삼다A	삼다B	300	301	303	304	한라A	한라B	400	401A	401B	402A	402B
08:30 ~18:00	행사 등록																	
09:00 ~12:00	비철금속	튜토리얼	초대형 PM-HIP 핵심기술 개발 심포지엄	한국형 소형모듈원 전용 소재 및 부품화 기술 심포지엄	제4회 수소경제 구현을 위한 수소 운송 및 저장 소재 심포지엄	열전 —— 학생 세션	철강A-압연, 강종개발, 후처리	표면처리	전산재료 과학	금속 적층제조에 의한 계층구조 제어기술 개발 심포지엄	역학측정		N,H 소재 실험 지능화 및 디지털화 심포지엄	고엔트로피 합금I	용접 및 접합	소프트 소재	제33회 피로 및 파괴 심포지엄	저탄소 알루미늄 소재 기술개발 심포지엄
11:30 ~13:00	점심 식사(5층 탐라홀)																	
13:00 ~13:50	포스터 발표 질의 및 응답시간(3층 로비)																	
14:00 ~18:00	비철금속 —— (16:00~) 고엔트로피 합금II	LFP 배터리 재활용 난제해결 심포지엄	초대형 PM-HIP 핵심기술 개발 심포지엄	한국형 소형모듈원 전용 소재 및 부품화 기술 심포지엄	수소재료I	학생 세션	철강A-압연, 강종개발, 후처리	재료강도	전산재료 과학	금속 적층제조에 의한 계층구조 제어기술 개발 심포지엄	제2회 산, 학, 연 여성 재료공학 리더 포럼 심포지엄	N,H 탄소중립 고도화를 위한 첨단 소재 가공기술 심포지엄	N,H 소재 실험 지능화 및 디지털화 심포지엄	희소금속 소재화 기술 (타이타늄 정제련 및 소재화 기술) 심포지엄	용접 및 접합	소프트 소재	제33회 피로 및 파괴 심포지엄	저탄소 알루미늄 소재 기술개발 심포지엄

발표일정



4월 24일(목) 발표일정

◈ 총 진행: 석현광, 이기안 학술부회장
◈ 구두 및 포스터세션 진행위원: 문준오, 박현순 학술이사
◈ 학생구두발표 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 문준오, 박현순 학술이사, 정은진, 이준민, 김문조 위원

발표장 / 시간	201A	201B	202A	202B	203	삼다A	삼다B	300	301	303	한라A	한라B	400	401A	401B	402A	402B
08:30 ~17:00	행사 등록																
09:00 ~12:00	인공지능 재료과학	표면계면	The 6th KIM-CSM Symposium	N,H -Inter national : Nano Conver gence Materials Symposium	철강B-제선, 제강, 환경, 에너지	재료정책 세션 세션 정부R&D사업 세션 정부R&D 사업기획의 개념과 실제	첨단 항공엔진 소재, 부품 기술개발 심포지엄	학생세션	타이타늄 전략소재 심포지엄	제12회 첨단 융복합 분석기술 심포지엄	제101회 철강기술 심포지엄	N,H 유기, 무기 및 페로브스카이트 광전자소자 심포지엄	알루미늄	상변태	자원순환형 알루미늄 합금 판재 심포지엄	수소재료II	적층 제조 및 분말
11:30 ~13:00	점심 식사(5층 탐라홀), 경품 추첨(12:30, 3층 로비)																
13:00 ~13:50	포스터 발표 질의 및 응답시간																
14:00-17:20	인공지능 재료과학	표면계면	The 6th KIM-CSM Symposium	N,H -Inter national : Nano Conver gence Materials Symposium	철강B-제선, 제강, 환경, 에너지	특별세션 학회상 수상자 강연 POSCO 학술상 현송공학상 LS학술상 아모공학상	첨단 항공엔진 소재, 부품 기술개발 심포지엄	학생세션	타이타늄 전략소재 심포지엄	제12회 첨단 융복합 분석기술 심포지엄	제101회 철강기술 심포지엄	N,H 유기, 무기 및 페로브스카이트 광전자소자 심포지엄	알루미늄	상변태	생체재료	이차전지용 니켈 원료소재 심포지엄	적층 제조 및 분말
17:30 ~18:30	임시총회 및 학회상 시상식 (5층 탐라홀) *정회원만 입장 가능하며, 학생회원은 입장이 제한됨을 양해 부탁드립니다.																
18:30 ~20:00	간친회(5층 탐라홀)																

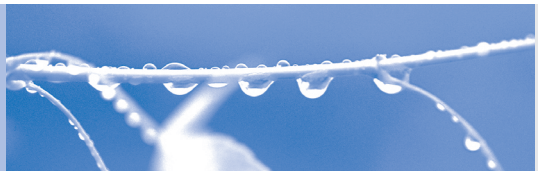
발표일정

4월 25일(금) 발표 일정

◈ 총 진행: 석현광, 이기안 학술부회장
◈ 구두 및 포스터세션 진행위원: 박원일, 정연식 학술이사
◈ 학생구두발표 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 박원일, 정연식 학술이사, 남대현, 김영천, 전종배 위원

발표장 / 시간	201A	201B	202A	202B	203	삼다A	삼다B	300	301	303	한라A	한라B	400	401A	401B	402A	402B
08:30 ~12:00	행사등록																
09:00 ~12:45	고온재료	타이타늄	대형 차체부품용 알루미늄 주조기술 심포지엄	소성가공	항공재료	이차전지 원료소재	에너지 재료	역학측정Ⅲ	집합조직	재료분석	반도체 —— 재료정책 세션Ⅲ 재료인 명사 초청강연	철강B- 제선, 제강, 환경, 에너지Ⅲ	나노융합 소재	복합재료	마그넷	마그네슘	적층제조 및 분말Ⅲ
12:00 ~12:30	포스터 발표 질의 및 응답(3층 로비)																
12:30 ~13:30	점심 식사(5층 탐라홀)																
13:30 ~14:00	재료과학예술상 시상 및 경품 추첨(3층 로비)																

발표일정



포스터 발표 일정

*포스터 배치는 일정집 107페이지 참고(발표장: 3층 로비)

날짜 / 시간	4월 23일 수요일	4월 24일 목요일	날짜 / 시간	4월 25일 금요일
발표시간 10:00 ~17:00 질의응답 13:00 ~13:50	P1 알루미늄 P2 고엔트로피합금 P3 소프트소재 P4 재료강도 P5 수소재료 P6 비철금속 P7 가공–표면처리 P8 철강–압연, 강종개발, 후처리 P9 가공–용접 및 접합 P10 열전 P11 생체재료	P12 나노융합소재 P13 적층제조 및 분말 P14 디스플레이재료 P15 상변태 P16 철강–제선, 제강, 환경, 에너지 P17 전산재료과학 P18 이차전지 원료소재 P19 표면계면 P20 인공지능재료과학	발표시간 09:00 ~13:30 질의응답 12:00 ~12:30	P21 에너지재료 P22 마그넷 P23 복합재료 P24 가공–소성가공 P25 재료분석 P26 가공–열처리 P27 고온재료 P28 반도체 P29 역학측정 P30 마그네슘 P31 집합조직 P32 타이타늄 P33 가공–주조 및 응고 P34 항공재료

학생세션

4월 23일(수)~24일(목) Room 삼다A홀, 300호

시간	4월 23일, 학생세션 진행(장소: 삼다A홀)	좌장
10:30~10:50	학생위원회 발대식	정은진 위원장
11:00~12:00	세션 I	박진웅 (국립한밭대학교), 한주연 (국민대학교)
12:00~13:00	점심시간	
14:00~15:30	세션 II	박진웅 (국립한밭대학교), 임진수랑 (부산대학교)
15:30~15:40	Break Time	
15:40~17:40	세션 III	이진영 (연세대학교), 이태윤 (고려대학교)

시간	4월 24일, 학생세션 진행(장소: 300호)	좌장
09:00~10:30	세션IV	이진영 (연세대학교), 한주연 (국민대학교)
10:30~10:40	Break Time	
10:40~12:00	세션V	이진영 (연세대학교), 이태윤 (고려대학교)
12:00~13:00	점심시간	
14:00~15:20	세션 VI	박진웅 (국립한밭대학교), 임진수랑 (부산대학교)
15:20~15:40	네트워킹, 설문조사	이진영 학생위원장
15:40~16:00	학생세션 우수발표자 시상식	정은진 위원장, 이진영 학생위원장

제2회 산·학·연 여성재료공학 리더 포럼 심포지엄

4월 23일(수), Room 304호

시간	내용	좌장
14:00~14:10	Opening : 장혜정 여성특별발전분과위원장	김미소 (KAIST)
14:10~14:40	A female, foreign professor in Korea, and her dedication in plasma engineering for sustainable energies : Li Oi Lun Helena (부산대)	
14:40~15:10	제일원리 계산을 이용한 합금 개발 : 최은애 (KIMS)	
15:10~15:40	Affordable, wireless, patch-type wearable transcutaneous oxygen sensor : 박진우 (연세대)	
15:40~15:50	마무리 & 단체 사진	
15:50~16:10	휴식	
16:10~16:20	학생 멘토링 세션 소개	정은진 (RIST) 최현주 (국민대)
16:20~17:20	테이블별 멘토링 진행	
17:20~17:30	마무리 & 단체 사진	

NEW-HORIZON: 탄소중립 고도화를 위한 첨단 소재 · 가공 기술 심포지엄

4월 23일(수), Room 한라A홀

시간	내용	발표자
14:00–14:10	Opening Remarks	배규열 분과위원장
세션1. 좌장: 이광석 (한국산업기술기획평가원)		
14:10–14:35	트램프 원소의 귀환 – 탄소 중립형 순환형 저탄소 생태계 모델	이준호 (고려대학교)
14:35–15:00	탄소중립을 위한 SMR 개발 가속화 및 SMR 혁신제작기술	김동수 (두산에너빌리티)
15:00–15:25	핵융합 발전용 철강소재 개발 현황	이창훈 (한국재료연구원)
15:25–15:50	친환경 발전용 가스터빈 블레이드 단결정 초내열합금의 TMF 변형기구와 제어	홍현욱 (국립창원대학교)
15:50–16:10	Break Time	
세션2. 좌장: 이제인 (부산대학교)		
16:10–16:35	국제 탄소규제 대응을 위한 제조업 발전 방향	최태훈 (한국생산기술연구원)
16:35–17:00	탄소중립 기반 용접기술 발전방향	박영도 (동의대학교)
17:00–17:25	PCR 기반 재활용 잉곳이 첨가된 자동차용 알루미늄 판재의 공정 및 부품화 기술개발	유창열 (현대자동차)
17:25–17:50	탄소중립 실현을 위한 첨단 소재 평가: SSMT(Small-Scale Mechanical Testing) 기반 원자력, 핵융합 및 용접부 물성 연구	신찬선 (명지대학교)

NEW-HORIZON: 소재 실험 지능화 및 디지털화 심포지엄

4월 23일(수), Room 한라B홀

시간	내용	발표자
좌장 : 이승철 (한국과학기술원)		
11:00–11:30	MARK: 나노소재 개발용 AI 재료공학자	한상수 (KIST)
11:30–12:00	지능형 로봇을 활용한 올레핀 생성용 촉매 조성 설계 최적화	신정호 (한국화학연구원)
12:00–14:00	Lunch Time	
좌장 : 이승철 (한국과학기술원)		
14:00–14:30	Data–Driven Discovery of Framework Materials for Our Planet: Challenges, Opportunities and Future Directions	최원영 (UNIST)
14:30–15:00	인공지능 및 실험 자동화를 통한 배터리 소재 개발 가속화	서동화 (KAIST)
15:00–15:15	Break Time	
좌장 : 김동훈 (한국과학기술연구원)		
15:15–15:45	협동로봇 기반 Self–Driving Lab 구축 전략	허영진 (뉴로메카)
15:45–16:15	Metals and Materials Lab Automation to boost R&D	윤상남 (씨엠코퍼레이션에이티)
16:15–16:30	Break time	
좌장 : 김동훈 (한국과학기술연구원)		
16:30–17:00	제조업에 바라보는 인공지능과 타이어 컴파운드 적용 사례	류명신 (한국타이어)
17:00–17:30	Methodology for accelerating materials research combining AI and robot technology	최윤석 (삼성전자 SAIT)
17:30–18:00	패널 토론	

The 6th KIM-CSM Symposium

Thursday, April 24, Room 202A

Time	Title	Presenters
Session Title : Process and evaluation I Session Chair: Hyoungwook Kim (Korea Institute of Materials Science), Rui Ge (Wuhan University of Science and Technology)		
09:10–09:30	Development and application of integrated hot stamping parts	Zijian Wang (Soochow University)
09:30–09:50	Enhancement of Hydrogen Delayed Fracture Resistance in High–Strength Hot–Stamped Boron Steel	Hye–Jin Kim (Tech. University of Korea)
09:50–10:10	Research and application of 1500 MPa free–coating and free–shot–blasting Nb–bearing press hardening steel for integrated door rings	Xiangxing Deng (Beijing Institute of Technology)
10:10–10:30	Laser–assisted Robotic Roller Forming of Ultrahigh Strength Steels	Junying Min (Tongji University)
10:30–10:40	Break Time	
Session Title : Process and evaluation II Session Chair: Hye–Jin Kim (Tech. University of Korea), Xiangxing Deng (Beijing Institute of Technology)		
10:40–11:00	Springback of high strength steels predicted by finite element simulations using self–consistent polycrystal model	Youngung Jeong (Changwon National University)
11:00–11:20	Lightweighting Technology and Application of Battery Packs for New Energy Commercial Vehicles	Rui Ge (WuhanUniversity of Science and Technology)
11:20–11:40	A new technology for determining plastic anisotropy in structural materials	Kyeongjae Jeong (Sungkyunkwan University)
11:40–12:00	Evaluation and modeling of the interfacial heat transfer coefficient between 1500MPa press hardening steel sheet and die surface in hot stamping	Kyungseok Oh (POSCO)
Session Title : New material for Light weight I Session Chair: Jae–Hwang Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Bo Liu (University of Science and Technology Beijing)		
14:00–14:20	High cycle fatigue properties of thick plate steel for seashore structure depending on microstructures	Yong–Nam Kwon (KIMS)
14:20–14:40	Nb–enhanced FNC low dust emission brake rotors––A potential solution for Euro7 brake dust regulation	Yanchun Shi (CITIC Metal Co.,Ltd)
14:40–15:00	Advanced Non–Flammable Ca/Y–Containing Magnesium Alloys for Lightweight Structural Applications	Young–Min Kim (KIMS)
15:00–15:20	Composite slippery liquid–infused porous surfaces for superior self–healing of Mg alloys	Wenhui Yao (Chongqing University)
15:20–15:40	Break Time	
Session Title : New material for Light weight II Session Chair: Young–Min Kim (Korea Institute of Materials Science)		
15:40–16:00	Effects of User–Defined Parameters on Cluster Analysis in Al–Mg–Si Alloys	Jae–Hwang Kim (KorealnstituteofIndustrial Technology)
16:00–16:20	Research on non–homogeneity of super–large thin–walled aluminum alloy die–casting vehicle structural parts	Bo Liu and Jian Yang (University of Science and Technology Beijing)

NEW-HORIZON: Nano Convergence Materials Symposium (International Symp.)

4월 24일(목), Room 202B

Time	Title	Presenters
09:00–09:10	Opening Remarks	Jae Yong Song (Chair, POSTECH)
Chair : YeonSik Jung(KAIST)		
09:10–09:40	Diamond and cubic Boron Nitride grown in new ways in metal Flux	Rodney Ruoff (UNIST IBS)
09:40–10:10	Ion transport within van der Waals crystals	Woo–Young Shim (Yonsei Univ.)
Chair: Youngmin Kim (Kookmin University)		
10:10–10:40	Development of two–dimensional nanomaterials for energy applications	Shintaro Ida (Kumamoto Univ.)
10:40–11:10	Ion beam induced high–aspect–ratio nanopatterns on metals for energy and environmental applications	Myoung–Woon Moon (KIST)
11:10–11:40	Empowering inorganic–organic hybrid crystallization for sustainable future	Bum Chul Park (Korea Univ.)
11:40–14:00	Lunch Time	
Chair : SoongJu Oh (Korea University)		
14:00–14:30	Metal, Oxides, and Hydrogen: The Chemistry and Function	Soshi Iimura (National Institute for Materials Science)
14:30–15:00	Single Atom Decorated MOF Nanosheet for Electrochemical Conversion of CO2 to CO	Soo Young Kim (Korea Univ.)
15:00–15:30	Development of graphene oxide fuel cell	Shinya Hayami (Kumamoto Univ.)
15:30–15:50	Break Time	
Chair : BumChul Park (Korea University)		
15:50–16:20	Composition and Interfacial regulation of photocatalytic heterostructures to promote hydrogen evolution performance	Junying Zhang (Beihang Univ.)
16:20–16:50	Development of a Catalyst for the Production of Higher Hydrocarbons Based on Carbon Dioxide Upcycling	Mi Gyoung Lee (Incheon Univ.)
16:50–17:20	U–GQD–Si–based framework: synthesis, characterization, and application	Adila Rani (Korea Univ.)

재료정책 세션 Ⅰ, Ⅱ

4월24일(목), Room 삼다A홀

시간	내용	발표자
	재료정책 세션 Ⅰ	좌장: 석현광 학술부회장 (KIST)
10:00–10:45	Key Projects of the Division of Information and Convergence Technology, NRF	강종윤 단장 (한국연구재단 국책연구본부 정보 · 융합기술단)
	재료정책 세션 Ⅱ	좌장: 석현광 학술부회장 (KIST)
10:45–11:30	과기정통부 소재 R&D 사업 발굴 및 기획	이상관 본부장 (한국재료연구원 소재혁신선도본부)
11:30–12:00	패널토의 (패널: 강종윤 한국연구재단 단장, 송재용 포항공대 교수, 이태우 서울대 교수)	

재료정책 세션 Ⅲ

4월25일(금), Room 한라A홀

시간	내용	발표자
	재료정책 세션 Ⅲ	좌장: 석현광 학술부회장 (KIST)
11:00–12:00	한국화학연구원의 탄소중립 연구분야 소개	이영국 원장 (한국화학연구원)

특별세션-학회상 수상기념 강연

4월 24일(목) Room 삼다A홀

시간	구분	내용	발표자
좌장: 석현광 (한국과학기술연구원), 이기안 (인하대학교)			
14:00~14:25	POSCO 학술상	전류/전하 하에서의 재료거동	한흥남 (서울대학교)
14:25~14:50	현송공학상	고온 밸브 디스크 하드페이싱부 파손 원인 분석	정우상 (한국과학기술연구원)
14:50~15:00	Break Time		
15:00~15:25	LS학술상	탄소 중립: 전기변색, 인공광합성 그리고 탄자니아	이선영 (한양대학교)
15:25~15:50	아모공학상	광학기반 3차원 나노구조 제작과 그 응용	전석우 (고려대학교)

제101회 철강기술 심포지엄
[스테인리스 산업의 새로운 도약을 위한 미래 전략]

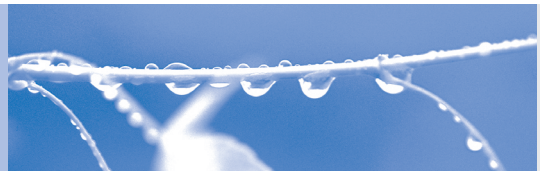
4월 24일(목), Room 한라A홀

시간	제목	발표자
10:00~10:10	개회사	포스코 김성연 기술연구원장 (철강분과위원장)
Session 1. 스테인리스 산업 동향 및 미래제품 개발방향 (좌장: 포스코 김상석STS연구그룹장)		
10:10~10:45	저탄소 철강 원료 · 공정 · 제품 관련 KEIT 사업 및 과제 기획현황	한국산업기술기획평가원 이광석 PD
10:45~11:20	글로벌 스테인리스 산업 동향 및 주요이슈	포스코경영연구원 이진우 수석연구원
11:20~11:55	미래를 개척하는 스테인리스강 개발 방향	포스텍 김성준 교수
12:00 ~14:00	Lunch Time	
Session 2. 에너지 산업 기술개발 동향 및 스테인리스 적용 현황 (좌장: 서울과학기술대학교 황병철 교수)		
14:00~14:20	차세대SMR 기술 및 적용 소재 전망	한국원자력연구원 김동진 부장
14:20~14:40	CCS 산업동향과 LCO2 수송/주입 유동라인 구축	한국지질자원연구원 김영주 실장
14:40~15:00	육상용 액화수소 저장탱크 시장 현황 및 전망	하이리움 주종흥 부사장
15:00~15:20	그린수소 생산 국내외 수전해 기술개발 현황	서강대학교 조현석 교수
15:20~15:40	발전용 연료전지 및 고온 수전해용 스테인리스 개발	포스코 김종희 수석연구원
15:40 ~ 16:00	Break Time	
Session 3. 모빌리티 산업 기술개발 동향 및 스테인리스/특수합금 적용 현황(좌장: 영남대학교 강지현 교수)		
16:00~16:20	자동차 차체용 스테인리스강 기술 개발 동향	현대자동차 정재규 책임연구원
16:20~16:40	전기차 배터리셀 케이스용 스테인리스 개발	포스코 김영호 수석연구원
16:40~17:00	전고체 배터리용 초극박 집전체 개발 현황 및 전망	프렘투 김기수 대표
17:00~17:20	항공소재 국산화의 필요성 및Ti64 합금 개발	포항산업과학연구원 최미선 수석연구원

NEW-HORIZON: 유기, 무기 및 페로브스카이트 광전자소자 심포지엄

4월 24일(목), Room 한라B홀

Time	Subject	Presenters
09:00–09:10	Opening Remark	이태우 분과위원장
좌장: 조힘찬(KAIST)		
09:10–09:40	Pathways to High-Performance Perovskite Nanocrystals for Optoelectronic Applications	Bo Ram Lee (Sungkyunkwan Univ.)
09:40–10:10	Tailoring metal oxide nanoparticles for efficient quantum dot electroluminescent devices	Jaehoon Lim (Sungkyunkwan Univ.)
10:10–10:40	OLED meets AI: Redefining Material and Device Design	Jae-Min Kim (Chung-Ang Univ.)
10:40–11:00	Break Time	
좌장: 이보람 (성균관대학교)		
11:00–11:30	Controlling Anisotropic Optical Properties from Single to Ensemble Semiconductor Nanocrystals	Dahin Kim (Univ. of Seoul)
11:30–12:00	Progress on Halide Perovskite Thin Film Based Lasing Emission	Kwangdong Roh (EwhaWomansUniversity)
좌장: 문제현(ETRI)		
14:00–14:30	Advancements in OLED Microdisplay Technology for Improved Luminance and Color gamut	Hyunsu Cho (ETRI)
14:30–15:00	Towards Next-generation OLED: Hyperfluorescence and Doublet Fluorescence	Hwan-Hee Cho (Yonsei Univ.)
15:00–15:30	풀컬러 디스플레이를 위한 양자점발광다이오드	곽정훈 (서울대학교)
15:30–15:50	Break Time	
좌장: 조현수(ETRI)		
15:50–16:20	Boron based materials for blue organic light-emitting diodes	Jun Yeob Lee (Sungkyunkwan Univ.)
16:20–16:50	Design Strategies for phosphor-sensitized thermally activated delayed fluorescence OLEDs (PSF OLED)	Yun-Hi Kim (Gyeongsang National Univ.)
16:50–17:20	High-Performance Display Applications Using Aerosol-Deposited Perovskite Quantum Dot/Metal Oxide Composites and Novel Blue OLEDs	Jongwook Park (KyungHee Univ.)
17:20	Closing Remark	



비철금속

위원장 : 김수경 (한국지질자원연구원)
총무간사 : 강정신 (서울대학교)
Room 201A, 04월 23일

좌장 : 권한중 (전북대학교)

비철1-1 | 09:00

균질화 처리 된 Cu-Ni-Si 합금의 기계적 특성에 미치는 Si 및 Mn 효과
정현우, 신지용 (한국재료연구원, 부산대학교), 정일석, 최은애 (한국재료연구원), 권세훈 (부산대학교), 한승전* (한국재료연구원)

비철1-2 | 09:15

Heat Transfer Effects on Impurities Removal Behavior in Zirconium Electron Beam Melting
Soosung Kim (Korea Institute of Industrial Technology, Kyung Hee University), Hyun-chul Kim, Myungsuk Kim, Yehui Kim (Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Bin Lee (Kyung Hee University), Kyoung-Tae Park, and Dong-Hyun Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)

비철1-3 | 09:30

알루미늄 합금계에서 Zr/Er 미세첨가를 통한 D0-stable Y원소의 $L1_2$ 상 활용 방안
김용유 (한국재료연구원), 어광준 (한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교), 김수현, 손현우* (한국재료연구원)

비철1-4 | 09:45

Preliminary Study for Engineering-Scale Flow Forming of High Purity Copper Overpack for Spent Nuclear Fuel Disposal Canisters
Jae-Deuk Kim*, Young-Ho Lee, Jeongmok Oh, Jin-Seop Kim (Korea Atomic Energy Research Institute), and Yeon-Oh Lee (SeAH Besteel Corp.)

Break Time | 10:00

좌장 : 최상훈 (고등기술연구원)

비철2-1 | 10:10

수소화 열처리를 통한 폐 NdFeB 스크랩의 효과적인 분쇄 및 산화 거동 분석
서보성, 강장원, 차은빈, 마승현, 박광석* (한국생산기술연구원)

비철2-2 | 10:25

Nd 용탕 내 Mg 제거를 위한 진공 정련 공정 연구
고의준, 김지은, 김현철 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 오승주 (고려대학교), 박경태*, 신재홍* (한국생산기술연구원)

비철2-3 | 10:40

수소 혼합 가스 분위기 내 마그네슘 열환원법에 의한 이산화타이타늄으로부터 고순도 타이타늄 수소화물 직접 제조 공정 개발
송영주 (서울대학교), 박성훈 (동국제강), 강정신* (서울대학교)

비철2-4 | 10:55

수소 환원 배소에 의한 NCM계 폐 리튬이온배터리 양극재의 Li 회수
황재호, 이상엽, 이소영, 손호상* (경북대학교)

비철2-5 | 11:10

NCM계 리튬이온 배터리 Black Mass의 CO 환원 거동
이상엽, 황재호, 이소영, 손호상* (경북대학교)

비철2-6 | 11:25

니켈 황화광의 선택적 탈철 공정을 이용한 고품위 니켈-코발트 황화물 제조공정 개발
이태혁, 강희남 (한국지질자원연구원), 이진영 (한국지질자원연구원, 과학기술연학대학교대학원), 강정신* (서울대학교)

좌장 : 이현주 (한국지질자원연구원)

비철3-1 | 14:00

황산제일철 전해질을 이용해 폐 영구자석 분말 내 철의 전해정련 회수 연구
허현재, 김선정* (울산대학교)

비철3-2 | 14:15

선택적 산화된 폐 Nd-Fe-B 영구자석 내 철 회수를 위한 전해정련 시스템 구축 및 전기화학적 거동 분석
조현산, 김선정* (울산대학교)

비철3-3 | 14:30

Phosphoric Acid Leaching of Laterite Ore: Mechanism and Kinetics Analysis of Ni and Co Extraction
Muhamad Nawawi Alif*, Seongjin Kim, Leonardo Tomas Da Rocha, and Sung-Mo Jung* (POSTECH)

비철3-4 | 14:45

Separation and Recovery of Gold and Palladium from Wasted Integrated Circuit Chip of Credit Card and Pre-Plated Lead frame by Ion Separation Process of Precipitation and Ion Exchange-Resin
Ji Seok Kim, Nam Hun Kwon (Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Mi Hye Lee, Ro Woon Lee, Kyoung Tae Park, and Jae Hong Shin* (Korea Institute of Industrial Technology)

비철3-5 | 15:00

용융 Cu와 $CaO-SiO_2-Fe_tO-MgO_{satd.}$ 슬래그 사이의 Ni 분배 거동
황수민, 박주현* (한양대학교)

비철3-6 | 15:15

반도체/디스플레이 산업 폐기물로부터 Mo 회수를 위한 고온 건식공정의 슬래그 조성 최적화 연구

배성욱 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 진호근 (한국생산기술연구원), 박주현 (한양대학교), 박경태, 신재홍* (한국생산기술연구원)

비철3-7 | 15:30

도금 슬러지로부터 니켈 · 크롬 선택적 회수를 위한 건/습식 복합 기술 연구

김명석 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 오승주 (고려대학교), 박경태*, 신재홍* (한국생산기술연구원)

고엔트로피합금 II

위원장 : 류호진 (한국과학기술원)
총무간사 : 설재복 (국민대학교), 손석수 (고려대학교)
Room 201A, 04월 23일

좌장 : 이수열 (충남대학교)

고엔3-1 | 16:00

$L1_2$-강화 고엔트로피 합금의 기계적 특성 향상을 위한 합금 설계 연구

남승진, 이창기, 장태진, 성민영, 김세호 (고려대학교), 박은수 (서울대학교), 손석수* (고려대학교)

고엔3-2 | 16:15

분말야금법으로 제조된 FeCrMnNiCo 합금의 미세조직과 기계적 특성

이상화 (전북대학교, 조선대학교), 박성현, 이석재, 정재길* (전북대학교)

고엔3-3 | 16:30

반도체 공정 장비용 물리/화학적 플라즈마 식각 저항성이 우수한 투명 고엔트로피 세라믹 신소재 개발

마호진* (한국재료연구원), 신유빈, 함수빈 (한국재료연구원, 부산대학교), 김하늘, 박영조, 고재웅, 이재욱, 김미주 (한국재료연구원), 김정형 (한국표준과학연구원), 이효창 (한국항공대학교), 정영화 (포항가속기연구소), 이정우 (부산대학교)

고엔3-4 | 16:45

Microstructure and Mechanical Properties of Precipitation-Hardened Fe-Rich Complex Concentrated Alloys

Vikas Shivam*, Dong Whan KIM, Jae Kwon Kim, and Eun Soo Park (Seoul National University)

LFP 배터리 재활용 난제해결 심포지엄

위원장 : 김수경 (한국지질자원연구원)
실무위원 : 권경중 (세종대학교)
Room 201B, 04월 23일

좌장 : 최종원 (한국지질자원연구원)

재활용1-1 | 14:00 초청강연

전기차용 LFP 배터리 재활용 산업 및 기술 현황

심현우*, 김홍인, 제진영 (한국지질자원연구원)

재활용1-2 | 14:25 초청강연

The Current Status of Direct Recycling of LFP Cathode Material

Kyungjung Kwon* (Sejong University)

재활용1-3 | 14:50 초청강연

Review on Wet Recycling Methods for Spent LiFePO4 Batteries

Daeweon kim* (Institute for Advanced Engineering) and Heeseon kim (Institute for Advanced Engineering)

Break Time | 15:15

좌장 : 이현주 (한국지질자원연구원)

재활용2-1 | 15:30 초청강연

A review on Sustainable Closed-Loop Hydrometallurgical Strategies to LiFePO4 Battery Recycling: Reuse of Raffinat

Jong-Won Choi*, Mooki Bae, Hyunju Lee, and Sookyung Kim (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM))

재활용2-2 | 15:55 초청강연

폐 이차전지 자원의 재활용 동향 및 건식 친환경 신공정을 통한 폐전지로 부터 리튬 화합물 회수

박경태* (한국생산기술연구원)

재활용2-3 | 16:20 초청강연

폐 리튬철인산(LFP) 배터리의 건식 재활용 공정 개발을 위한 열역학적 이해

김영재* (인하대학교)

재활용2-4 | 16:45 초청강연

Development of Sustainable Pretreatment Process for Spent Lithium-ion Battery Recycling

Hyunseok lee* (Korea battery industry association)

초대형 PM-HIP 핵심기술개발 심포지엄

위원장 : 김형섭 (POSTECH)
실무위원 : 김동수 (두산에너빌리티),
강민철 (3D프린팅연구조합), 홍순직 (공주대학교),
양상선 (한국재료연구원)
Room 202A, 04월 23일

좌장 : 김정길 (두산에너빌리티)

PM-HIP1-1 | 09:00

SMR 주기기 PM-HIP 기술 개발 현황

김동수*, 김정길, 안세환 (두산에너빌리티)

PM-HIP1-2 | 09:20

원자력발전소 적용을 위한 PM-HIP 기술 개발 및 적용 해외 동향

윤은섭*, 이호중 (한국수력원자력(주))

PM-HIP1-3 | 09:40

초대형 PM-HIP 성형 공정 해석 프로그램 개발

김재철*, 김동수, 김동영, 김정길, 김지현, 안세환 (두산에너빌리티)

Break Time | 10:00

좌장 : 김정길 (두산에너빌리티)

PM-HIP2-1 | 10:20

PM-HIP 전용 고청정-구형의 저탄소강 금속 분말 제조기술 개발
김응균, 전창우, 이주호, 박은수* ((주)이엠엘)

PM-HIP2-2 | 10:40

소형 모듈형 원자로 가압용기 제조를 위한 저합금분말 고밀도 벌크화 기술
서영택, 김기봉, 양상선* (한국재료연구원)

PM-HIP2-3 | 11:00

PM-HIP용 Capsule 제작 및 분말 Filling 기술
김용진*, 김상권, 김성기, 김규동 (코힙스테크)

PM-HIP2-4 | 11:20

PM-HIP 방식으로 제작된 저탄소강 소재의 열처리 거동 분석
박창수*, 박성민, 윤준원, 김효규 (한국생산기술연구원), 김정길, 김동영, 김동수 (두산에너빌리티)

좌장 : 안세환 (두산에너빌리티)

PM-HIP3-1 | 14:00 초청강연

Characterization of Oxygen and Non-Metallic Inclusions in SA508 Steel Powder for the Applications to PM-HIP Process
Yao Su, Sunghwan Park (Hanyang University), Dongsoo Kim (Doosan Enerbility), and Joo Hyun Park* (Hanyang University)

PM-HIP3-2 | 14:40

PM-HIP 공정을 통해 제작된 고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 미세조직 및 기계적 성질 변화에 대한 연구
문준오*, 이병찬, 홍현욱 (국립창원대학교), 김동수, 안세환 (두산에너빌리티)

PM-HIP3-3 | 15:00

PM-HIP 기술 적용 SMR 원자로 부품 제작을 위한 ASME Code Case 표준화
허성호, 윤오성, 안희성* (비즈(주))

Break Time | 15:20

좌장 : 안세환 (두산에너빌리티)

PM-HIP4-1 | 15:40

KEPIC/ASME PM-HIP Code Case 개발 방법론
김향아*, 손명성 (대한전기협회)

PM-HIP4-2 | 16:00

초대형 PM-HIP 모합금 제작을 위한 용해/정련/주입공정 개발
김지현*, 김동수, 김동영, 김재철, 김정길, 안세환 (두산에너빌리티)

PM-HIP4-3 | 16:20

대형 PM-HIP 소재 제조를 위한 Pilot Scale Mock-up 제작 결과
김동영*, 김동수, 김재철, 김정길, 김지현, 안세환 (두산에너빌리티)

한국형 소형모듈원전용 소재 및 부품화 기술심포지엄

위원장 : 마영화 (두산에너빌리티)
실무위원 : 송전영 (두산에너빌리티), 정재석 (두산에너빌리티), 이권영 (세아창원특수강), 남기정 (세아창원특수강), 진형하 (한국원자력연구원)
Room 202B, 04월 23일

좌장 : 이권영 (세아창원특수강)

소형1-1 | 09:00 초청강연

한국형 SMR 제조경쟁력 확보를 위한 다이오드 레이저 클래딩 혁신제작기술 개발 현황 소개
명상원*, 하종문, 박광용, 박재석, 조성우, 윤강준, 구남기 (두산에너빌리티)

소형1-2 | 09:15 초청강연

한국형 SMR 제조 경쟁력 확보를 위한 EBW 혁신제작기술 개발 현황 소개
박수정*, 임동용, 박재석, 조성우, 구남기, 윤강준 (두산에너빌리티)

소형1-3 | 09:30 초청강연

SiC 바인더 젯팅 3D프린팅 기술을 활용한 소형모듈원전용 핵연료 담체 제작
정영석*, 정영석, 오지원, 조신후 ((주)매이드)

Break Time | 09:45

좌장 : 진형하 (한국원자력연구원)

소형2-1 | 09:55 초청강연

탄소중립을 위한 소형모듈원전 기술개발 사례 및 동향
김영득*, 정재석 (두산에너빌리티)

소형2-2 | 10:10 초청강연

소형모듈원전용 XM19 압력용기강 개발현황
정재석*, 김영득 (두산에너빌리티), 장재훈, 이태호 (한국재료연구원), 한광식, 마영화, 송전영 (두산에너빌리티)

소형2-3 | 10:25 초청강연

고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 화학조성과 열처리 온도에 따른 석출거동 및 기계적 특성
김성훈, 권기환, 조효행, 이진종, 하헌영, 이창훈 (한국재료연구원), 정재석 (두산에너빌리티), 이태호* (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교)

소형2-4 | 10:40 초청강연

SMR용 오스테나이트계 스테인리스 합금 설계를 위한 GCN 기반 기계적 물성 예측 모델 개발
이재헌, 이승환* (한양대학교)

좌장 : 김성훈 (한국재료연구원)

소형3-1 | 14:00 초청강연

Nb 첨가에 따른 고질소 오스테나이트계 스테인리스강 열간성형성 변화
김정훈, 문준오*, 홍현욱 (국립창원대학교), 정재석 (두산에너빌리티)

소형3-2 | 14:15 초청강연

고질소 오스테나이트계 스테인리스강에서 Nb 함량이 결정립 성장에 미치는 영향
위영욱, 서동우* (포항공과대학교)

소형3-3 | 14:30 초청강연

ER209 용접봉용 선재 공정 기술 검토

이권영*, 남기정 (세아창원특수강)

소형3-4 | 14:45 초청강연

XM-19 고질소 스테인리스강 전자빔용접부의 미세조직 및 기계적물성 평가

권예진*, 장창희*, 김홍덕, 이근순 (한국과학기술원)

소형3-5 | 15:00 초청강연

고강도 오스테나이트계 스테인리스강 모재(XM-19) 및 용접재(ER209)의 용접 고온균열 민감도 평가

정혜은 (한국재료연구원, 국립부경대학교), 강용준*, 박기태, 송상우 (한국재료연구원), 천은준 (국립부경대학교)

Break Time | 15:15

좌장 : 송전영 (두산에너빌리티)

소형4-1 | 15:25 초청강연

ER209 MIG 용접재료 특성 평가

임희대*, 정재헌, 최창현, 길웅 (㈜세아ESAB)

소형4-2 | 15:40 초청강연

용접 조건에 따른 XM-19 소재용 ER209 용접 금속의 기계적 성질

서형석*, 하종문, 임동용 (두산에너빌리티)

소형4-3 | 15:55 초청강연

SMR용 고강도 오스테나이트 내식강의 조사취화 및 내환경 성능 평가 계획

진형하*, 김종민, 김민철, 심희상, 김성우 (한국원자력연구원)

소형4-4 | 16:10 초청강연

고질소 오스테나이트 스테인리스 강의 미세조직 변화에 미치는 열시효 효과

김성준, 함준혁, 김지현* (울산과학기술원)

소형4-5 | 16:25 초청강연

SMR 용 고강도 오스테나이트 내식강의 조사 영향 평가를 위한 고해상도 나노인덴테이션 전략

김대현, 한성희, 김병창, 김보규 (국립강릉원주대학교), 진형하 (한국원자력연구원), 신중호* (국립강릉원주대학교)

제4회 수소경제 구현을 위한 수소 운송 및 저장 소재 심포지엄

위원장 : 강남현 (부산대학교)
실무위원 : 천동원 (KIST), 박형기 (한국생산기술연구원), 김영민(한국재료연구원), 손석수(고려대학교)
Room 203, 04월 23일

좌장 : 강남현 (부산대학교)

수소경제1-1 | 09:00 초청강연

Hydrogen Embrittlement of High-Strength Martensitic Steel

Young-Kook Lee* (Yonsei University)

수소경제1-2 | 09:20 초청강연

AB계 수소저장합금의 미세조직과 초기 수소화 거동의 관계

황규빈 (한국과학기술연구원), 하태준 (한국생산기술연구원), 김윤석 (성균관대학교), 심재혁* (한국과학기술연구원)

수소경제1-3 | 09:40 초청강연

수소취성 관련 국내제도 도입현황 및 현장적용 사례

김정환* (한국가스안전공사 가스안전연구원)

수소경제1-4 | 10:00 초청강연

고압수소환경에서 소형펀치시험(SPT)을 사용한 API X80 배관강의 수소취성에 미치는 Pre-strain 및 결정방향의 영향 조사

신형섭*, Richard Pascua (안동대학교), 김기석 (포스코)

Break Time | 10:20

좌장 : 나태욱 (한국생산기술연구원)

수소경제2-1 | 10:30 초청강연

산업 현장에서 본 수소저장합금: 개발과 실증을 통한 적용 가능성

이승준* (원일티엔아이)

수소경제2-2 | 10:50 초청강연

초고강도강의 수소취성에 미치는 Nb 첨가의 영향

주석환 (포항공과대학교), 이세웅 (포스코 기술연구원), 서동우* (포항공과대학교)

수소경제2-3 | 11:10 초청강연

In-situ Synthesis of Metal Nanocatalysts for Ceramic Fuel Cells and Electrolysis Cells

WooChul Jung* (Seoul National University (SNU))

수소경제2-4 | 11:30 초청강연

Integrated Computational Framework for Simulating Microstructure-Deformation-Hydrogen Transport in Metals

Myoung-Gyu Lee* (Seoul National University), Jinheung Park (Seoul National University, The Ohio State University), and Geonjin Shin (Seoul National University)

수소재료 I

위원장: 강남현 (부산대학교)
총무간사: 김영민 (한국재료연구원),
박형기 (한국생산기술연구원), 천동원(포항공과대학교),
손석수 (고려대학교)
Room 203, 04월 23일

좌장 : 고원석 (인하대학교)

수소1-1 | 14:00

액화수소 저장탱크용 316L 스테인리스강의 초극저온 기계적 물성 및 수소취성에 관한 연구

김범철*, 이창민, 이재희 (HD한국조선해양)

수소1-2 | 14:15

수소 장입 및 극저온 조건이 304L 스테인리스강의 변형 조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

박한지*, 배경오, 박재영, 백운봉* (한국표준과학연구원)

수소1-3 | 14:30

Assessment of Hydrogen Embrittlement Susceptibility of STS304L Stainless Steel in External Hydrogen Environment over a Temperature Range from Cryogenic to Elevated Using Simple Testing Techniques

Richard Pascua, Seong-Bum Kang, Hyung-Seop Shin*, and Sang Heon Lee (Andong National University)

수소1-4 | 14:45

Assessment of Hydrogen Embrittlement in TIG Welded 304L Stainless Steel

Worakan Tongprapai, You Sub Kim, Jae Young Jung, Dong Hyun Lee (Chungnam National University), Ho Byung Chae, Wanchuk Woo (Korea Atomic Energy Research Institute), and Soo Yeol Lee* (Chungnam National University)

수소1-5 | 15:00

오스테나이트계 스테인리스강과 고망간강의 수소취성 비교

신승혁, 황병철* (서울과학기술대학교)

수소1-6 | 15:15

고압수소 장기 노출에 따른 API X70, X80급 소재의 샤르피 충격 인성 변화

김성환*, 정성수, 김병준, 이강호 (한국생산기술연구원)

수소1-7 | 15:30

수소 혼소 가스용 배관의 수소취성 및 피로 수명 안전성 평가

김동오, 이진영 (서울과학기술대학교), 이창희, 강성, 이정훈 (포항산업과학연구원), 권용남, 석무영 (한국재료연구원), 이창우 (포항금속소재산업진흥원), 김정환, 이화영 (한국가스안전공사), 변재원* (서울과학기술대학교)

Break Time | 15:45

좌장 : 하태준 (한국생산기술연구원)

수소2-1 | 15:55

수소저장합금의 수소 흡방출 거동 수식화 및 분석

강규병, 백민아, 석경찬, 홍성찬 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 하태준, 나태욱* (한국생산기술연구원)

수소2-2 | 16:10

V 기반 BCC계 수소저장합금에 첨가되는 원소가 수소 흡방출 거동에 미치는 영향

석경찬, 홍성찬, 강규병, 백민아 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 최병철 (한국생산기술연구원, 강릉원주대학교), 이준호* (고려대학교), 나태욱* (한국생산기술연구원)

수소2-3 | 16:25

Ferro 소재 기반 AB2계 수소저장합금 제조에 따른 수소 흡 · 방출 거동에 대한 불순물의 영향

백민아, 강규병, 석경찬, 홍성찬 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 배주호 (한국생산기술연구원), 김동회* (고려대학교), 나태욱* (한국생산기술연구원)

수소2-4 | 16:40

입자 크기 조절을 통한 TiZrCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 수소저장 속도 및 용량 거동 분석

하효정 (포항공과대학교), 정소진 (한국생산기술연구원), 정상국, 김래언 (포항공과대학교), 박형기 (한국생산기술연구원), 김형섭* (포항공과대학교)

수소2-5 | 16:55

전위원소로 치환된 $TiFe_{0.7}Mn_{0.2}X_{0.1}$ (X = V, Cr, Co, Ni, Cu) 수소저장합금의 수소저장특성

곽륜호, 정소진, 박성민, 박태윤 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 손석수* (고려대학교), 박형기* (한국생산기술연구원)

수소2-6 | 17:10

TEM investigation of Hydrogenation mechanism in Ceria added TiFe hydrogen storage alloy

최진형 (한국과학기술연구원 (KIST)), 이수민 (성균관대학교), 황규빈 (한국과학기술연구원 (KIST)), 유진영, 선창효 (성균관대학교), 하태준 (한국과학기술연구원 (KIST), 생산기술연구원 (KITECH)), 김준형, 이영수 (한국과학기술연구원 (KIST)), 심재혁* (한국과학기술연구원 (KIST), 성균관대학교, KIST-SKKU Carbon-Neutral Research Center), 김윤석* (성균관대학교), 장혜정* (한국과학기술연구원 (KIST))

수소2-7 | 17:25

V-Ni-Al-Cu 수소 분리막 합금의 냉간 가공성 및 수소 취성 저항성 향상

한정훈, 송상윤, 이건직, 김영목, 남승진, 이창기 (고려대학교), 백주현, 서진유 (한국과학기술연구원), 손석수* (고려대학교)

수소2-8 | 17:40

바나듐계 수소분리막의 투과 안정성 향상을 위한 합금 설계 및 평가

백주현 (한국과학기술연구원, 고려대학교), 이상민, 한승주 (한국과학기술연구원, 서울대학교), 한정훈 (고려대학교), 강민우 (현대자동차), 김진우, 심재혁, 서진유* (한국과학기술연구원), 손석수 (고려대학교)

열전

위원장: 박수동(한국전기연구원)
총무간사: 김일호(한국교통대학교), 이종수(경희대학교)
Room 삼다A, 04월 23일

좌장 : 박수동 (한국전기연구원)

열전1-1 | 09:00

Enhancing the Thermoelectric Performance of CuMnSb Alloys through Controlled Alloying with Magnetic MnSb and Cu

Park Jong Min, Jo Seungki, Jung Soo-ho, Bae Jinhee, Vu Ba Linh, Kwon Su A, Yu Jihun, and Kim Kyung Tae* (Korea Institute of Materials Science)

열전1-2 | 09:15

3차원 원자단층현미경을 활용한 열전재료의 나노구조-특성 관계 해석

정찬원* (부경대학교)

열전1-3 | 09:30

Co-Optimization of Electronic and Thermal Transport in Se-Free n-Type $(Bi,Sb)_2Te_3$ for Improved Thermoelectric Efficiency

Soo ho Jung, Seungki Jo, and Kyung Tae Kim* (Korea Institute of Materials Science)

열전1-4 | 09:45

Phonon Glass and Electron Crystal of Heavy Atomic High Entropy Alloy Nanoparticle Distributions in $Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$ by Enhancing Electrical Grain Connectivity

Anil Kumar, Saurabh Thoravat, Jae Hyun Yun, Rahmatul Hidayati (Kyung Hee University), Junyoung Park, Hyungyu Jin (Pohang University of Science and Technology), Jin-Hee Kim*, and Jong-Soo Rhyee1* (Kyung Hee University)

열전1-5 | 10:00

Enhancing Se-Free n-Type Bismuth Telluride Thermoelectrics with Edge-Oxidized Graphen

Jinhee Bae, Seungki Jo, Soo-ho Jung, Jong Min Park, Su A Kwon, and Kyung Tae Kim* (Korea Institute of Materials Science (KIMS))

Break Time | 10:15

학생세션 I

위원장 : 정은진 (포항산업과학연구원)
총무간사 : 이진영 (연세대학교)
Room 삼다A, 04월 23일

10:30~11:00

학생위원회 발대식

진행 : 정은진 학생분과 위원장 (포항산업과학연구원)

좌장 : 박진웅 (국립한밭대학교), 한주연 (국민대학교)

SS1-1 | 11:00

중망간강의 열처리 공정 최적화: 파레토 능동 학습에서의 쿼리 전략 비교

김승현, 이진영, 이영국* (연세대학교)

SS1-2 | 11:13

산화철-구리 나노자임의 향상된 과산화효소 활동에 따른 다중 중금속 이온의 비색 검지

김영근*, 김연범, 부홍은, 구명석, 정은진, 장영준 (고려대학교)

SS1-3 | 11:26

오스테나이트계 스테인리스강에서 Mg 탈산이 개재물의 진화 거동에 미치는 영향

장민관 (한양대학교), 정세지, 김지원 (세아창원특수강), 박주현* (한양대학교)

SS1-4 | 11:39

전기화학적 기법을 이용한 철강 슬래그에서의 인 회수

조영래, 손일* (연세대학교 신소재공학과), 이상훈* (연세대학교 산학협력단 중소기업산학협력센터)

좌장 : 박진웅 (국립한밭대학교), 임진수랑 (부산대학교)

SS2-1 | 14:00

고압수소용 API 라인파이프강의 미세조직과 수소취성의 상관관계

정민섭, 오동규, 황병철* (서울과학기술대학교)

SS2-2 | 14:13

고온 열처리된 Al-Mg-Si계 합금의 열안정성에 미치는 Ni 미량원소의 영향

남수민 (한국재료연구원, 경북대학교), 김용유, 이재석, 어광준 (한국재료연구원), 최명식 (경북대학교), 손현우* (한국재료연구원)

SS2-3 | 14:26

유한요소해석-머신러닝 통합 접근법을 통한 구멍확장비 예측

정든봄, 이승호 (서울대학교), 이제웅, 김성일 (포스코 기술연구소), 정경재 (성균관대학교), 한흥남* (서울대학교)

SS2-4 | 14:39

Fe_2O_3-RE_2O_3 (RE = Dy, Er, Yb) 이원계 시스템의 상태도에 관한 연구

이지원, 곽다희 (서울대학교 재료공학부), 정인호* (서울대학교 재료공학부, 서울대학교 신소재공동연구소)

SS2-5 | 14:52

In-situ 모니터링 기술 기반의 Fine Feature 기능이 부여된 재료 압출 적층제조 기술을 적용한 pure copper의 제조와 기계적 및 열/전기전도 특성 향상

이나윤, 박소연 (인하대학교), 백소령 (Markforged), 이기안* (인하대학교)

SS2-6 | 15:05

Co22.2Cr6.2Fe48.8Ni17.8Cu5.0 저열팽창 고엔트로피합금의 열처리 온도에 따른 물성변화 연구

이우영 (국민대학교), 최문수 (단국대학교), 이정완, 김형섭 (포항공과대학교), 최현주 (국민대학교), 주수현* (단국대학교)

SS2-7 | 15:18

소재 빅데이터 기반 고속 스크리닝을 통한 알루미늄 신합금 개발

전서연, 박수원 (국민대학교), 조아연, 김용주 (고려대학교), 김세훈 (한국자동차연구원), 최현주* (국민대학교)

Break Time | 15:30

좌장 : 이진영 (연세대학교), 이태윤 (고려대학교)

SS3-1 | 15:40

EAF 형 수 모델을 활용한 저취 모사 시, 균일 혼합시간에 따른 교반 에너지 도출

박지현, 김선중* (조선대학교)

SS3-2 | 15:53

재료 압출 적층 제조 기술을 이용한 신 SUS316L foam 소재의 제조, 압축 기계적 특성 및 물질 유동 특성

송노건, 박소연 (인하대학교), 윤중열 (한국재료연구원), 김주용 ((주)리프로텍), 이기안* (인하대학교)

SS3-3 | 16:06

Mutual solubility를 활용한 Mg 첨가 경량 고엔트로피 합금의 제조 및 합금화 거동 연구

송은효, 이용건 (아주대학교 에너지시스템학과), 이한성 (아주대학교 첨단신소재공학과), 안병민* (아주대학교 에너지시스템학과, 아주대학교 첨단신소재공학과)

SS3-4 | 16:19

LMD 공정 및 암모니아 반응 조건에 따른 Co-Mo 나노다공체의 활성상과 촉매효율 변화

최예원 (한국과학기술연구원(KIST)), 서울대학교), 서예본, 양성은* (한국과학기술연구원(KIST)), 박은수* (서울대학교), 김진우* (한국과학기술연구원(KIST))

SS3-5 | 16:32

미세조직의 변화에 따른 바나듐계 합금 분리막의 수소 투과 특성

이상민 (한국과학기술연구원, 서울대학교), 백주현 (한국과학기술연구원, 고려대학교), 한흥남 (서울대학교), 서진유* (한국과학기술연구원)

SS3-6 | 16:45

새로운 상온 열전소재로서 SrSb2의 합성 및 열전물성 연구

오민욱* (한밭대학교), 정연식*, 이강건, 장한휘 (한국과학기술원(KAIST))

SS3-7 | 16:58

유한 요소법과 Phase Field 모델을 결합한 압축 분말 소결체의 고상 소결에 관한 연구

차필령*, S.Sugathan, M.Dasari, 김기연, 최현주 (국민대학교), 김지훈, G.Menghgari (부산대학교)

SS3-8 | 17:11

β 상 준안정도 제어 기반 TRIP Ti-6Al-4V-X 합금 개발

서기완 (서울대학교 재료공학부), 김지영 (서울대학교 신소재공동연구소), 김도향 (연세대학교 신소재공학과), 박은수* (서울대학교 재료공학부)

SS3-9 | 17:24

열기계적 나노 성형 기법을 활용한 알루미늄 음극재의구조적 안정성 확보 및 리튬 이온 배터리 효율 향상

문준혁 (서울대학교), 류채우 (홍익대학교), 박은수* (서울대학교)

철강A-압연,강종개발,후처리

위원장 : 김성연 (포스코)
총무간사 : 김성규 (포스코), 박주현 (한양대학교), 황병철 (서울과학기술대학교)
Room 삼다B, 04월 23일

좌장 : 황병철 (서울과학기술대학교)

철강A1-1 | 09:00

이상역 소둔 열처리 온도가 다상 조직강의 인장특성과 충격특성에 미치는 영향

정창곤, T.T.T. Trang (포항공과대학교 친환경소재대학원 (POSTECH GIFT)), 우영윤, 윤은유, 이영선 (한국재료연구원 (KIMS)), 허윤욱* (포항공과대학교 친환경소재대학원 (POSTECH GIFT))

철강A1-2 | 09:15

구성방정식과 기계학습 기반 하이브리드 모델을 활용한 S355NL 강의 열간 변형거동 예측

이성호, 유진영, 천세호, 박동준 (부산대학교), 이진모, 이채훈 ((주) 태웅), 이태경* (부산대학교)

철강A1-3 | 09:30

후판 저탄소 TMCP 강재에서 Ni, Mn 함량 변화에 따른 저온변태조직 및 충격인성 특성 연구

최정현, 유성훈 (부산대학교), 김우준, 고성웅 ((주)포스코), 강남현* (부산대학교)

철강A1-4 | 09:45

템퍼드 마르텐사이트강의 수소취성 저항성에 미치는 Nb 및 Ti 복합 첨가의 영향

김상규, 황병철* (서울과학기술대학교)

철강A1-5 | 10:00

Cobalt가 9-12Cr 페라이트/마르텐사이트계 내열강의 미세조직 변화와 Creep 거동에 미치는 영향

박봉천 (한국재료연구원, 부산대학교), 김성대 (부경대학교), 석우영, 박이호, 장재훈* (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교)

Break Time | 10:15

좌장 : 이승준 (한국공학대학교)

철강A2-1 | 10:25

이상영역 열처리 및 항온 열처리된 3Mn TRIP강의 미세조직 및 기계적 물성

임용수, 김진경* (한양대학교)

철강A2-2 | 10:40

3Mn Q&P강의 퀜칭 온도가 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향

김규헌, 임용수 (한양대학교), 김지훈 (Tohoku University), 김진경* (한양대학교)

철강A2-3 | 10:55

Development of TRIP-maraging steel with exceptional J-integral fracture toughness through the segregation engineering and metastable phase separation

예정원, 김민석, 박은수* (서울대학교)

철강A2-4 | 11:10

고온 질화를 통한 304L 스테인리스강의 내수소취성 개선

권영제 (영남대학교), 김성준 (포항공과대학교), 강지현* (영남대학교)

철강A2-5 | 11:25

15-5PH 강종의 열처리 조건에 따른 영향분석

윤준원, 박성민, 이정찬, 안찬울 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 이민수 (한국생산기술연구원), 지성화 (Pumster), 손석수 (고려대학교), 박창수* (한국생산기술연구원)

철강A2-6 | 11:40

Effects of Paint Baking on Tensile Properties and Hydrogen Embrittlement of Martensitic Medium-Mn Steel

Jin-Young Lee (Yonsei Univ.), Won Hui Jo, Jae Bok Seol (Kookmin Univ.), and Young-Kook Lee* (Yonsei Univ.)

좌장 : 허윤욱 (포항공과대학교)

철강A3-1 | 14:00

39K급 고강도 BH강의 미세조직과 기계적 특성과의 상관관계

이정섭*, 한천하, 이승철, 황인석, 나광수 (현대제철연구소)

철강A3-2 | 14:15

Evaluation of the Effect of Titanium Content on Recrystallization and Precipitation Behavior in Ti-Nb Alloyed Cold-Rolled Ultra-High Strength Low Alloy Steels

Sang Hun Shin*, Jong Myeong Kim, Changgeun Lee (Hyundai Steel R&D Center), Asmaa Albeltagy, Alexander Gramlich (RWTH Aachen University), and Kwang Su Na (Hyundai Steel R&D Center)

철강A3-3 | 14:30

균일 및 국부 성형성을 향상시킨 고성형성 냉연 초고장력강 개발

이선규*, 홍진성, 이상욱, 한영철, 한성경, 권태우 (현대제철연구소)

철강A3-4 | 14:45

냉연 마르텐사이트(MS) 강의 기계적 성질과 수소취성에 미치는 텐션 레벨링의 영향

공종판*, 방찬우, 최강현, 류주현, 정연승, 황아인 (포스코 기술연구원)

철강A3-5 | 15:00

냉간 단조용 비조질강의 바우싱거 효과에 관한 연구

임재한* (현대제철연구소, 인하대학교), 이규호, 이상원 (현대제철연구소), 박문원, 이종혁, 장병록* (인하대학교 제조혁신전문대학원)

철강A3-6 | 15:15

법랑강의 재질 및 밀착성에 미치는 Tramp 원소 영향도 평가

이병호*, 조민호, 주형돈 (포스코 기술연구원)

철강A3-7 | 15:30

수소취성 물성이 향상된 고강도 볼트용 소재 개발

이봉희* (현대자동차 연구개발본부), 임재한, 노현배 (현대제철연구소)

Break Time | 15:45

좌장 : 김성진 (국립순천대학교)

철강A4-1 | 15:55

자동차용 PosMAC®1.5 고내식 용융도금 강판

Tae Chul Kim*, Ilryoung Sohn (포스코)

철강A4-2 | 16:10

Zn-Al-Mg 고내식 용융도금 흑화강판 미세조직 및 흑화처리 특성

홍문희* (포항공대 친환경소재대학원), 백두진, 백제훈, 김태철, 권문재 (포스코 자동차소재연구소), 이경황 (포스코 철강솔루션연구소)

철강A4-3 | 16:25

선박 및 화력발전 탈황설비용 초고내식 스테인리스강의 개발 및 적용

이계만*, 김지수, 홍승갑 (포스코 기술연구원)

철강A4-4 | 16:40

탄소 활용에 의한 경제형 2상 스테인리스강의 공식저항성 향상

하헌영*, 이태호, 조효행, 이진종 (한국재료연구원), 이지원 (한국재료연구원, 부산대학교)

철강A4-5 | 16:55

Lean duplex stainless steel의 HAZ부 인성에 미치는 조성 및 미세조직의 영향

최가영*, 김지수, 송석원 ((주)POSCO)

철강A4-6 | 17:10

페라이트계 고실리콘강과 오스테나이트계 고망간강에서의 열응력 형성과 열크랙 생성에 대한 연구

김연석, 김수현, 정창곤 (포항공과대학교), 조경철 (포스코기술연구원), 이재상, 허윤욱* (포항공과대학교)

철강A4-7 | 17:25

Optimizing Roll Pass Design: Integrating QKaliber and QForm UK for Enhanced Roll Stress Analysis on A Multi-Thread Wire Rod Mill

Sergey Stebunov*, Vitaliy Belugin, Igor Alimov, Evgeniy Kopylov, Pavel Maltsev (QForm Group FZ LLC), Nikolay Biba (Micas Simulation Ltd.), Hotaek Kwak, and Changsoon Jang (CAE Technology Inc.)

가공-표면처리

위원장 : 배규열 (POSCO)
총무간사 : 강용준 (한국재료연구원),
문경일 (한국생산기술연구원), 오세권 (한국생산기술연구원),
이광석 (한국재료연구원), 이제인 (부산대학교)
Room 300, 04월 23일

좌장 : 정찬원 (부경대학교)

표면처리1-1 | 09:00

Shot Peening 후 질화처리를 통한 Ti-12.1Mo-1Fe 합금의 기계적 및 전기화학적 특성 향상

이승우, 이동근* (순천대학교)

표면처리1-2 | 09:15

Investigation on Interfacial Adhesion Strength of Multi-Layered Al_2O_3 Coatings Manufactured by Laser Cladding

Sumin Song (Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang Univ.), Taebum Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Jeongho Han (Hanyang Univ.), and Kyuntaek Cho* (Korea Institute of Industrial Technology)

표면처리1-3 | 09:30

금속 제조현장 산업 안정성 향상 및 사고 예방 (Enhancing Industrial Safety and Accident Prevention in Metal Manufacturing Sites)

최순호*, 권희준, 임영석, 임혜경, 이지희, 이한찬* ((주)이엠에스)

표면처리1-4 | 09:45

금속 표면 결함 검출을 위한 YOLO 알고리즘의 비교 연구

권희준, 최순호, 이지희, 이한찬* ((주)이엠에스)

표면처리1-5 | 10:00

가스터빈 고온부품용 열차폐 코팅 개발 및 신뢰성 평가

장경익*, 박광용, 명상원 (두산에너빌리티), 김상훈, 고윤석 (국방과학연구소)

Break Time | 10:15

좌장 : 이창수 (한국에너지기술연구원)

표면처리2-1 | 10:25

발전용 가스터빈의 열차폐 코팅에서 Bond Coat 조성에 따른 TGO 성장 및 박리 거동 연구

박상현, 강용진, 김도현, 유연우, 박영진, 박훈관, 이성훈, 남욱희, 변응선 (한국재료연구원), 김세윤* (경남대학교), 권한솔* (한국재료연구원)

표면처리2-2 | 10:40

전주도금 전해액의 사카린농도에 따른 Fe-Ni 합금 미세조직과 열팽창계수 변화

김진범, 안다영, 김인경, 박용범, 신세은* (순천대학교)

표면처리2-3 | 10:55

알루미늄계 도금 종류에 따른 Hot Press Forming 강의 수소취화 특성 평가

천세영, 문병록 (부산대학교), 이석규 (포스코 기술연구원), 엄상호 (포스코 글로벌 R&D 센터), 백두진 (포스코 기술연구원), 강남현* (부산대학교)

표면처리2-4 | 11:10

Zn 도금 Si 첨가 강재에서 열처리에 따른 계면 Si-enrichment 기구와 Fe-Zn 합금화 억제 현상

박형권*, 김성훈, 이진종, 권기환, 김경원, 이창훈 (한국재료연구원), 박영도 (동의대학교), 이태호* (한국재료연구원)

표면처리2-5 | 11:25

발전용 가스터빈 고온부품 대상 열차폐코팅의 NiCoCrAlY계 본드코트 조성에 따른 장시간 산화거동 및 수명 연구

권한솔, 강용진, 유연우, 김도현, 박영진, 박훈관, 이성훈, 남욱희, 변응선* (한국재료연구원)

재료강도

위원장 : 어광준 (한국재료연구원)
총무간사 : 문준오 (국립창원대학교)
Room 300, 04월 23일

좌장 : 박형권 (한국재료연구원)

재료강도1-1 | 14:00

LNG 저장탱크용 9% Ni강의 화학조성에 따른 극저온 충격인성 변화

박정빈*, 소형섭, 김종철, 박민호, 천승환 (현대제철 기술연구소)

재료강도1-2 | 14:15

Influence of Irradiation Defects and RIS on the IASCC Behavior of 316 Stainless Steel in PWR Primary Water

Yun Soo Lim*, Sung Woo Kim, Min Jae Choi, Seong Sik Hwang, and Dong Jin Kim (Korea Atomic Energy Research Institute)

재료강도1-3 | 14:30

적층 제조된 316L 스테인리스강의 크리프 거동에 대한 결정학적 텍스처의 영향

임광혁, 배종수 (한국과학기술원(카이스트)), Shubham Chandra (Nanyang Technological University), Xipeng Tan (National University of Singapore), 이규민, 심기동* (한국과학기술원(카이스트))

재료강도1-4 | 14:45

조사취화에 따른 Fe-9Cr계 합금의 나노스케일 표면 경도 변화 분석

정회연 (UNIST), 전은채 (울산대학교), 김주영* (UNIST)

재료강도1-5 | 15:00

결함 동역학 모델을 활용한 파단의 메커니즘에 관한 연구

성준호, 심규장, 류일* (서울대학교)

재료강도1-6 | 15:15

초음파 공진피로강도 평가방법의 해석이론과 응용사례

조인식* ((주)엠브로지아)

재료강도1-7 | 15:30

A Novel Distortional Hardening Model for Predicting the Strength of Steel Pipes Under Elevated Temperatures and Complex Deformations

Seungwoo Kim, Seonghwan Choi (Seoul National University), Soo-Chang Kang (POSCO), and Myoung-Gyu Lee* (Seoul National University)

재료강도1-8 | 15:45

표면막에 의해 생성된 잔류응력이 Fe-Si계 합금의 철손에 미치는 영향

전지헌, 이소현 (UNIST), 유성현, 안용근, 강춘구 (현대제철연구소), 김주영* (UNIST)

좌장 : 박기태 (한국재료연구원)

재료강도2-1 | 16:00 초청강연

기가스틸 용접금속의 상변태 및 미소 기계적 물성 거동에 대한 Ti 및 Nb 첨가의 영향

배규열* (포스코 기술연구원), 문준오* (국립창원대학교), 신찬선 (명지대학교), 홍승갑 (포스코 기술연구원)

재료강도2-2 | 16:25

합금 원소 및 열처리 경화 깊이가 비틀림 내구에 미치는 영향

김민규* (현대자동차)

재료강도2-3 | 16:40

고망간강 용접부 상온/극저온 기계적 물성 평가

이태호, 정재원 (충남대학교), 강전연 (한국재료연구원), 이수열* (충남대학교)

재료강도2-4 | 16:55 Canceled

고강도 소재의 표면 오스테나이트화를 통한 우수한 성형성 획득 방안

김래언, 구강희, 이정아, 최연택, 박효진, 김재훈, 최주미, 김형섭* (포스텍)

재료강도2-5 | 17:10

Fe-Si계 합금의 미세구조와 자기 특성에 대한 최종소둔 기체분위기의 영향

이소현, 전지헌 (UNIST), 유성현, 안용근, 강춘구 (현대제철연구소), 김주영* (UNIST)

재료강도2-6 | 17:25

친환경차 구동 부품 최적화를 위한 철강 소재 물성 연구

최중길*, 조봉래 (현대자동차)

재료강도2-7 | 17:40

나노다공성 금의 리가먼트 크기 효과와 변형률 속도에 따른 기계적 물성 변화 분석

김영훈 (UNIST), 전한솔 (계명대학교), 김주영* (UNIST)

재료강도2-8 | 17:55

다층 복합재료에서 나타나는 서로 다른 두 가지 주름 형상 및 방지법

김재훈, 최연택, 김래언, 구강희, 권지혜 (포항공과대학교), 서민홍 (포스코 기술연구원), 김형섭* (포항공과대학교)

전산재료과학

위원장 : 권용우 (홍익대학교)
부위원장 : 이동화 (포항공과대학교)
총무간사 : 김형준 (한국과학기술원), 신정호 (한국화학연구원)
Room 301, 04월 23일

좌장 : 유수현 (한국화학연구원)

전산1-1 | 10:00 초청강연

Designing PtNi ORR Catalysts with Facet-Dependent Doping Techniques

Kihyun Shin* (Hanbat National University)

전산1-2 | 10:25

Computational Insights into the Design of Stable and Efficient Perovskite-Based OER Electrocatalysts

Jaekyum Kim, Jung Kyu Kim*, HyukSu Han* (Sungkyunkwan University), and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

전산1-3 | 10:40

Computational Study on Noble Metal-Catalyzed Topotactic Conversion of Mesoporous Molybdenum Carbide

Hayoung Jeong and Jeong Woo Han* (Seoul National University)

전산1-4 | 10:55

Strain-Tuned Schottky Barrier Modulation and Energy-Resolved Charge Redistribution in TMDC/Metal Interfaces

Ahn Hyochan and Joo-Hyoung Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology)

전산1-5 | 11:10

Revealing Interfacial Superionic Conduction Mechanisms of New Halide Nanocomposite Solid Electrolytes for All-Solid-State Batteries

Jae-Seung Kim and Dong-Hwa Seo* (KAIST)

좌장 : 김병현 (한양대학교)

전산2-1 | 14:00 초청강연

Deep learning-based calibration of material parameters for crystal plasticity simulations

Kyeongjae Jeong* (Sungkyunkwan University)

전산2-2 | 14:25

Development of Machine-Learning Interatomic Potential Models and Pressure-based Correction for Accurate Simulation of Binary Molten Chloride Salts

Hyunseok Lee and Takuji Oda* (Seoul National University)

전산2-3 | 14:40

Fast Generation of Radiation Damage Structure in Bcc Tungsten Using a Diffusion Model

JongHyeon Park and Takuji Oda* (Seoul National University)

전산2-4 | 14:55

Predicting density of states of a-IGZO using a rotation equivariant graph neural network model.

Minseok Moon (Seoul National University), Youngho Kang* (Incheon National University), and Seungwu Han* (Seoul National University)

전산2-5 | 15:10

Atomistic Simulations of Cu-Sn alloys using a Deep Neural Network Potential

Jae Hur and Won-Seok Ko* (Inha Univ.)

전산2-6 | 15:25

Integration of short-range interaction into pre-trained graph neural network potential for molecular dynamics simulations for dry etching.

Sangmin Oh, Changho Hong, Hyungmin An, and Seungwu Han* (Seoul National University)

Break Time | 15:40

좌장 : 신기현 (한밭대학교)

전산3-1 | 15:50 초청강연

Modeling carrier trapping at semiconductor/dielectric interfaces based on first-principles calculations of nonradiative capture

Yongjin Shin* (Dankook University)

전산3-2 | 16:15 Canceled

Unraveling the Re-entrant Magnetic Behavior of the Sigma (σ) Phase through First-Principle Calculations and HRTEM Analysis

Raj Narayan Hajra and Jeoung Han Kim* (Hanbat National University)

전산3-3 | 16:30

A study of defect and solute segregation mitigation in IN738LC Ni-base superalloy made by laser-powder bed fusion

SHAILENDRA KUMAR VERMA and Kyoungdoc Kim* (POSTECH)

전산3-4 | 16:45

A Deterministic Method to Construct a Common Supercell Between Two Similar Crystalline Surfaces

Weon-Gyu Lee* (Korean Institute of Science and Technology (KIST)) and Jung-Hoon Lee* (Korean Institute of Science and Technology (KIST), Korea University)

전산3-5 | 17:00

위상장모델을 활용한 기가캐스팅 소재의 응고 조직 분석

장형욱, 조휘재, 김동욱, 차필령* (국민대학교)

전산3-6 | 17:15

Pourbaix Diagram 모델링을 활용한 고내식 강재 개발

조현석, 김경덕* (포항공과대학교)

전산3-7 | 17:30

Q&P 강의 미세조직 형성에 대한 주요 매개변수 분석

조휘재, 장형욱, 김동욱, 차필령* (국민대학교)

금속 적층제조에 의한 계층구조 제어기술 개발 심포지엄

위원장 : 김형섭 (POSTECH)
실무위원 : 강민철 (3D프린팅연구조합), 홍순직 (공주대학교), 문종언 (공주대학교)
Room 303, 04월 23일

좌장 : 홍순직 (공주대학교)

계층구조1-1 | 10:00
국내외 적층제조기술의 동향과 기술 이슈
강민철*, 천혜랑 (3D프린팅연구조합), 성지현, 홍명표 (한국생산기술연구원), 윤오성, 안희성 ((주)비즈)

계층구조1-2 | 10:20
DED LP-DED 방식에 적용되는 Nb 합금 C103 분말의 재활용 가능성 평가를 위한 연구
신석진*, 장지현, 이선주, 고은하, 강태영 (주식회사인스텍), 임병직 (한국항공우주연구원)

계층구조1-3 | 10:40
헤테로제닉 적층제조기술 개발
김형섭* (포항공과대학교)

계층구조1-4 | 11:00
강화재 복합 적층제조된 내열합금의 고온 특성
정원종 (한국과학기술원), 이태규 (국립한밭대학교), 류호진* (한국과학기술원)

계층구조1-5 | 11:20
적층제조에 의한 원자력 부품의 계층구조 구현
김현길*, 홍종대, 오홍렬 (한국원자력연구원)

계층구조1-6 | 11:40
Joint Properties of LP-DED Additive Manufactured Ferritic Stainless Steel 430 on Martensitic Stainless Steel 410 Base Metal
Hyun-Ki Kang*, Sam Sub Byun, Jong Yeob Lee (Turbo Power Tech Co., Ltd.), and Eun-Joon Chun (Bukyong National University)

좌장 : 강민철 (3D프린팅연구조합)

계층구조2-1 | 14:00
적층제조용 분말 특성평가 및 분말특성이 적층제조 공정에 미치는 영향
홍순직* (국립공주대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 김현중, 조성재, 김인서 (국립공주대학교)

계층구조2-2 | 14:20
Additive Manufacturing of Hetero-Structures and its Improvement in Hydrogen Resistance
Jae Wung Bae* (Pukyong National University)

계층구조2-3 | 14:40
레이저 기반 적층제조를 통한 계층구조 제어기술
문종언* (국립공주대학교), 김래언, 김형섭 (포항공과대학교)

계층구조2-4 | 15:00
LPBF 기반 SS 304L 계층구조 및 영하 269도 기계적 물성
김영균*, 전승민 (한국재료연구원), 손광태, Brian K. Paul (Oregon State University), 나영상 (한국재료연구원)

계층구조2-5 | 15:20
와이어 아크 적층제조 기술을 이용한 Ti-6Al-4V 합금의 적층공정 연구
홍명표*, 정재우, 김다혜, 김우성, 성지현 (한국생산기술연구원)

계층구조2-6 | 15:40
멀티 로봇 와이어 아크 적층 제조(WAAM) 기반 알루미늄 합금 부품 제작 및 성능 분석
정영석*, 큐비카 보이타, 오지원, 조신후 (매이드)

계층구조2-7 | 16:00
적층제조된 계층구조를 통한 가스터빈 효율 향상
조현철*, 박상은, 최용혁, 류선우, 이재웅 (두산에너빌리티)

역학측정

위원장 : 한흥남 (서울대학교)
총무간사 : 김영천 (국립안동대학교)
Room 304, 04월 23일

좌장 : 김영천 (국립안동대학교)

역학1-1 | 10:00
유한요소해석을 활용한 고밀도 센서 배열 기반 전자소자 구조의 설계 및 최적화
김수민 (UNIST), 황경석 (Harvard University), 배재영, 강승균* (서울대학교), 김주영* (UNIST)

역학1-2 | 10:15
Macroscale Mechanical Behavior of Single Crystal Graphene
Anirban Kundu (IBS), Seyed Kamal Jalali (University of Trento), Minhyeok Kim (IBS, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Meihui Wang, Da Luo, Sun Hwa Lee (IBS), Nicola M. Pugno (University of Trento, Queen Mary University of London), Won Kyung Seong* (IBS), and Rodney S. Ruoff* (IBS, Republic of Korea, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

역학1-3 | 10:30
반도체 첨단 패키징용 구리 범프의 소성변형에 의한 미세조직 변화 분석
심영주, 곽지윤, 김동현, 김주영* (UNIST)

역학1-4 | 10:45 **Canceled**
Tensile Properties and Thermal Stability of Ni Thin Films with Dilute and Concentrated Mo and W Additions
JungHun Park, Yuhyun Park, Sunkyung Lee, and Gi-Dong Sim* (Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

역학1-5 | 11:00
생분해성 하이브리드 다층 봉지 재료의 적층 공정 최적화 및 특성 평가
유현지 (UNIST), 황경석 (Harvard University), 강승균 (서울대학교), 김주영* (UNIST)

역학1-6 | 11:15
DCB 시험법을 이용한 하이브리드 본딩의 유전체 접합력 평가
김동현, 곽지윤, 심영주 (UNIST), 김인주, 이시예, 김성동 (서울과학기술대학교), 김주영* (UNIST)

제2회 산·학·연 여성 재료공학 리더 포럼 심포지엄

위원장: 김미소 (성균관대학교), 장혜정 (한국과학기술연구원)
총무간사 : 최현주 (국민대학교), 정은진 (포항산업과학연구원)
Room 304, 04월 23일

좌장 : 김미소 (한국과학기술원)

Opening | 14:00
장혜정 위원장

여성1-1 | 14:10 초청강연
A Female, Foreign Professor in Korea, and Her Dedication in Plasma Engineering for Sustainable Energies
Li Oi Lun Helena* (Pusan National University)

여성1-2 | 14:40 초청강연
제일원리 계산을 이용한 합금 개발
최은애*, 한승전 (한국재료연구원)

여성1-3 | 15:10 초청강연
Affordable, Wireless, Patch-Type Wearable Transcutaneous Oxygen Sensor
Jin-Woo Park* (Yonsei University)

Wrap up & Photo Time | 15:40

Break Time | 15:50

좌장 : 정은진 (포항산업과학연구원), 최현주 (국민대학교)

멘토링 | 16:10

Wrap up & Photo Time | 17:30

New-Horizon : 탄소중립 고도화를 위한 첨단 소재·가공 기술 심포지엄

위원장 : 배규열 (POSCO)
실무위원 : 오세권 (한국생산기술연구원), 이제인 (부산대학교), 강용준 (한국재료연구원), 이광석 (한국재료연구원), 문경일 (한국생산기술연구원)
Room 한라A, 04월 23일

Opening | 14:00

좌장 : 이광석 (한국산업기술기획평가원)

탄소중립1-1 | 14:10 초청강연
트램프 원소의 귀환 – 탄소 중립형 순환형 저탄소 생태계 모델
이준호* (고려대학교)

탄소중립1-2 | 14:35 초청강연
탄소중립을 위한 SMR 개발 가속화 및 SMR 혁신제작기술
김동수* (두산에너빌리티)

탄소중립1-3 | 15:00 초청강연
핵융합 발전용 철강소재 개발 현황
이창훈*, 박형권, 김치원 (한국재료연구원), 문준오, 홍현욱 (국립창원대학교), 신찬선 (명지대학교)

탄소중립1-4 | 15:25 초청강연
친환경 발전용 가스터빈 블레이드 단결정 초내열합금의 TMF 변형기구와 제어
홍현욱* (국립창원대학교)

Break Time | 15:50

좌장 : 이제인 (부산대학교)

탄소중립2-1 | 16:10 초청강연
국제 탄소규제 대응을 위한 제조업 발전 방향
최태훈*, 조훈, 이종섭, 송람, 신호정, 안상준 (한국생산기술연구원)

탄소중립2-2 | 16:35 초청강연
탄소중립 기반 용접기술 발전방향
박영도* (동의대학교)

탄소중립2-3 | 17:00 초청강연
PCR 기반 재활용 잉곳이 첨가된 자동차용 알루미늄 판재의 공정 및 부품화 기술개발
유창열*, 정준영, 권혁민, 정연일 (현대자동차 AVP본부)

탄소중립2-4 | 17:25 초청강연
탄소중립 실현을 위한 첨단 소재 평가: SSMT(Small-Scale Mechanical Testing) 기반 원자력, 핵융합 및 용접부 물성 연구
신찬선* (명지대학교), 진형하 (한국원자력연구원), 이창훈 (한국재료연구원), 문준오 (창원대학교), 배규열 (포스코)

New-Horizon : 소재 실험지능화 및 디지털화 심포지엄

위원장 : 이승철 (한국과학기술원)
실무위원 : 김동훈 (한국과학기술연구원)
Room 한라B, 04월 23일

좌장 : 이승철 (한국과학기술원)

지능화1-1 | 11:00 초청강연
MARK: 나노소재 개발용 AI 재료공학자
한상수* (한국과학기술연구원)

지능화1-2 | 11:30 초청강연
지능형 로봇을 활용한 올레핀 생성용 촉매 조성 설계 및 최적화
신정호* (한국화학연구원)

좌장 : 이승철 (한국과학기술원)

지능화2-1 | 14:00 초청강연
Data-Driven Discovery of Framework Materials for Our Planet: Challenges, Opportunities, and Future Directions
Wonyoung Choe* (UNIST)

지능화2-2 | 14:30 초청강연

인공지능 및 실험 자동화를 통한 배터리 소재 개발 가속화

서동화* (한국과학기술원)

Break Time | 15:00

좌장 : 김동훈 (한국과학기술연구원)

지능화3-1 | 15:15 초청강연

협동로봇 기반 Self-Driving Lab 구축 전략

허영진* (뉴로메카)

지능화3-2 | 15:45 초청강연

Metals and Materials Lab Automation to Boost R&D

Sam Yoon* (CM Corporation Ltd.)

Break Time | 16:15

좌장 : 김동훈 (한국과학기술연구원)

지능화4-1 | 16:30 초청강연

제조업에 바라보는 인공지능과 타이어 컴파운드 적용 사례

류명신* (한국타이어앤테크놀로지)

지능화4-2 | 17:00 초청강연

Methodology for Accelerating Materials Research Combining AI and Robot Technology

Youn-Suk Choi*, Taesin Ha, and Hyundo Choi (SAIT)

패널 토론 | 17:30

고엔트로피합금 I

위원장 : 류호진 (한국과학기술원)
총무간사 : 설재복 (국민대학교), 손석수 (고려대학교)
Room 400, 04월 23일

좌장 : 배재웅 (부경대학교)

고엔1-1 | 09:00

고엔트로피합금의 고속 변형 조건에서의 동적 거동 분석

이소영, 김현수, 김윤호, 박은수* (서울대학교)

고엔1-2 | 09:15

Sintering Behavior of CoCrFeNi High-Entropy Alloy Using High Energy Milled Oxide

Gertrude Mugwe Mongella, Minjong Kim, Taehyeob Im, Nelson Bayi, and Caroline Sunyong Lee* (Hanyang Univ.)

고엔1-3 | 09:30

붕소 첨가가 철계 중엔트로피 합금의 인장 물성에 미치는 영향

구본우, 손수정*, 이재흥, 왕재민, 이병주, 김형섭* (포항공과대학교)

고엔1-4 | 09:45

고용강화 효과를 활용한 고엔트로피 합금 설계

정주리, 김종태, 전재열 (한국생산기술연구원), 이진규 (국립공주대학교), 강이승, 한준희* (한국생산기술연구원)

고엔1-5 | 10:00

Influence of Al Content on the Microstructure and Mechanical Behavior of $(CrFeNiCu)_{100-x}Al_x$ High Entropy Alloys

Dilshodbek Yusupov*, Abbas Muhammad Aoun, Gyeol Chan Kang, Hae Jin Park, Kiran Shinde, Sung Hwang Hong, and Ki Buem Kim* (Sejong University)

Break Time | 10:15

좌장 : 설재복 (국민대학교)

고엔2-1 | 10:25

FeCrMnNiCo 합금의 열처리 온도에 따른 미세조직과 부식 특성에 관한 연구

이주희, 김수빈, 이상화 (조선대학교), 정재길 (전북대학교), 장희진* (조선대학교)

고엔2-2 | 10:40

Hyperadaptor; Ni-기반 고엔트로피 합금의 광온도 범위에서의 온도 둔감한 인장 특성

박효진, 손수정, 안성열, 하효정, 김래언, 이재흥 (포항공과대학교), 주효문 (현대자동차), 김정기 (경상국립대학교), 김형섭* (포항공과대학교)

고엔2-3 | 10:55

The Phase Evolution and Mechanical Behavior of $FeCoNiCu_x$ High-Entropy Alloys Under Cold Rolling and Heat Treatment

Muhammad Aoun Abbas*, Dilshodbek Yusupov, Gyeol Chan Kang, Dong sung Hong, Ga Eun jo, Yu Jin Lee, Sung Hwan Hong, Hae Jin Park, and Ki Buem Kim* (Sejong University)

고엔2-4 | 11:10

Fe-Co-Ni-Cr-Mo계 중엔트로피 합금의 열처리 공정에 따른 석출 거동, 미세조직 변화 및 기계적 물성과 저열팽창 특성 연구

김태형, 이재혁 (단국대학교), 배재웅 (부경대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 문종언 (공주대학교), 주수현* (단국대학교)

고엔2-5 | 11:25

석출 제어가 Co-Cr-Fe-Ni-Mo-C 철계 중엔트로피 합금의 인장 물성 향상에 미치는 종합적 효과

이재흥, 권현석*, 구강희, 이지영 (포항공과대학교), 정상국 (도호쿠대학교), Emad Maawad (헬름홀츠 연구소), 하창완 (포항가속기연구소), 왕재민, 이병주 (포항공과대학교), 이상봉* (금오공과대학교), 김형섭* (포항공과대학교)

고엔2-6 | 11:40

고엔트로피 합금 조성을 위한 밀링 기반 Co_3O_4-Cr_2O_3-Fe_2O_3-NiO 금속 산화물 분말의 공정 변수 최적화에 대한 연구

김민종, 임태협, 몬젤라 거트루드 무웨, 넬선, 이선영* (한양대학교)

희소금속 소재화기술 (타이타늄정제련 및 소재화기술) 심포지엄

위원장 : 김수경 (한국지질자원연구원)
실무위원 : 박경태 (한국생산기술연구원)
Room 400, 04월 23일

좌장 : 박경태 (한국생산기술연구원)

희소1-1 | 14:00 초청강연
타이타늄의 제련과 리사이클링
손호상* (경북대학교)

희소1-2 | 14:15 초청강연
타이타늄 제련 및 리사이클링 기술개발
강정신* (서울대학교)

희소1-3 | 14:30 초청강연
Thermochemical Reduction of TiO_2 Using $CaMg_2$ for Low-Oxygen Titanium Powder Production
Jonghyeon Lee*, Hayk Nersisyan (Chungnam National University, Rapidly Solidified Materials Research Center), Kyuseok Lim (Chungnam National University), and Kwangmo Ku (Korean Strategic Materials Technology)

희소1-4 | 14:45 초청강연
7%급 초탄성 변형률을 갖는 Ti-Zr계 3D 프린팅용 구형분말 제조기술 개발
박지환*, 강민, 장지훈, 정원기 ((주)엠티아이지), 남태현, 임진환 (경상국립대학교), 박상오, 정시영 ((주)디오)

희소1-5 | 15:00 초청강연
일메나이트 제련 공정에서 TiO2 슬래그의 열물성 및 슬래그 구조와의 상관 관계 연구
김영재* (인하대학교)

희소1-6 | 15:15 초청강연
국내 타이타늄 산업의 원료소재 자립화 기술확보를 위한 야금학적 연구 접근 방안
정은진* (포항산업과학연구원)

Break Time | 15:30

좌장 : 강정신 (서울대학교)

희소2-1 | 15:40 초청강연
고순도 티타늄 금속 제조를 위한 전자빔 용융 최적화 연구
박경태* (한국생산기술연구원), 김현철, 권남훈, 이용관, 고의준 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 신재홍, 김동현 (한국생산기술연구원)

희소2-2 | 15:55 초청강연
타이타늄 스크랩으로부터 부품 제조를 위한 타이타늄 분말 제조 연구
윤진호*, 이지은, 이찬기 (고등기술연구원), 박지환, 강민 (엠티아이지(주))

희소2-3 | 16:10 초청강연
국내 타이타늄 광석으로부터 고순도 이산화타이타늄 제조 공정 개발
이태혁*, 이진영 (한국지질자원연구원), 강정신 (서울대학교)

희소2-4 | 16:25 초청강연
Off-grade 타이타늄 스폰지의 친환경 탈산 공정 개발
박성훈 (동국제강), 임경환 (현대제철), 정형준 (부산대학교), 송영주, 강정신* (서울대학교)

희소2-5 | 16:40 초청강연
An Introduction to the Recovery of high purity TiO_2 from Spent SCR Catalysts
In-Hyeok Choi*, Hongil So, and Byeong-Woo Kim (S3R Co., Ltd.)

희소2-6 | 16:55 초청강연
마그네슘 열환원법을 이용한 친환경 타이타늄 수소화물 직접 제조 공정 개발
송영주* (서울대학교), 박성훈 (서울대학교, 동국제강), 강정신 (서울대학교)

희소2-7 | 17:10 초청강연
건식 코팅 기술을 활용한 타이타늄 합금의 in-situ alloying 기술 및 ODS Ti-6Al-4V 합금 적층제조 기술
이빈*, 김욱주, 김세훈, 강태후, 이종익, 정상희, 한지민 (경희대학교)

희소2-8 | 17:25 초청강연
MgCl2 용융염건식제련을 활용한 저품위 Ti 스크랩의 재활용 탈산 공정 및 전기화학적 거동 분석
권남훈, 김현철 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 허성규, 이미혜, 신재홍, 박경태* (한국생산기술연구원)

가공-용접 및 접합

위원장 : 배규열 (POSCO)
총무간사 : 강용준 (한국재료연구원),
문경일 (한국생산기술연구원), 오세권 (한국생산기술연구원),
이광석 (한국재료연구원), 이제인 (부산대학교)
Room 401A, 04월 23일

좌장 : 이제인 (부산대학교)

용접1-1 | 09:00
Ag-Al-Mn계 나노 복합구조를 활용한 고방열, 고신뢰성 페이스트용 나노 다공성 Ag 개발
김민서 (인하대학교), 김상욱 (로터스머티리얼즈), 성재욱*, 현승균* (인하대학교)

용접1-2 | 09:15
고온 전력 모듈 패키징을 위한 일방향 다공성 금속 삽입 열 인터페이스 재료
신재호 (인하대학교제조혁신전문대학원), 김근수 (호서대학교), 현승균* (인하대학교제조혁신전문대학원)

용접1-3 | 09:30
양면 방열 파워모듈 패키징을 위한 소자 후면/스페이서 간 계면 다이렉트 본딩
김신일, 김동진* (한국생산기술연구원(KITECH))

용접1-4 | 09:45
초고장력 강판과 알루미늄 주조부품의 접합을 위한 국부연화 SPR 접합법 연구
고세진* (현대자동차 AVP본부)

용접1-5 | 10:00

Reactive Flux Assisted Dissimilar Arc Brazing of Galvannealed Steel to Al Alloys for Automotive Applications

John Sushil, Savyasachi Nellikode, Jae-hyeok Lee (Dong-Eui University), Dae-Geun Nam (Korea Institute of Industrial Technology), Ki-Soon Kim, Sang-Soo Jung, Do-Woon Cho (Hyundai Motor Group), and Yeong-Do Park* (Dong-Eui University)

용접1-6 | 10:15

Reversing Conventional Wisdom: Discovery of Welded Joints with Superior Cryogenic Strength-Ductility over Base Metals

이유나, 남지민 (부산대학교), 이종원, 박노근 (영남대학교), 박정민* (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교)

Break Time | 10:30

좌장 : 박기태 (한국재료연구원)

용접2-1 | 10:40

일방향 다공성 구리를 이용한 Cu-Sn계 천이액상확산접합부 특성

김홍석 (인하대학교제조혁신전문대학원), 김근수 (호서대학교), 현승균* (인하대학교제조혁신전문대학원)

용접2-2 | 10:55

항공용 타이타늄 합금의 마찰교반용접 물성 연구

황재윤 (현대자동차), 이승준*, 권교민, 김동규, 최효남, 김종훈 (한국공학대학교)

용접2-3 | 11:10

Enhancing Joint Strength of Dissimilar Friction Stir Welded Al-Ni Joints Using High-Entropy Interlayer and PWHT

최병욱, 이유나, 유성훈 (부산대학교), 천현필, 안중관 (한국생산기술원), 강남현* (부산대학교)

용접2-4 | 11:25

수소 환경에서 ERW 강관 용접부의 피로 저항성에 영향을 미치는 미세조직 인자 고찰

백종민, 이찬희 (국립창원대학교), 곽진섭 (현대스틸파이프 생산기술연구소), 전동현 (현대스틸파이프 대경생산팀), 홍현욱* (국립창원대학교)

용접2-5 | 11:40

인코넬 718 합금 단조품 미세조직 및 용접 고온균열 민감도에 미치는 열처리조건의 영향

정설빈, 강용준*, 박기태, 송상우 (한국재료연구원), 조일국 (동의대학교)

좌장 : 한도경 (포스코 기술연구원)

용접3-1 | 14:00

일방향 다공성 구리를 활용한 전력반도체용 AMB 기판 접합 특성 확인

조성민 (인하대학교제조혁신전문대학원), 김근수 (호서대학교), 현승균* (인하대학교제조혁신전문대학원)

용접3-2 | 14:15

Investigation of hydrogen embrittlement depending on deformation behaviour in FCC welds

최동현, 남지민 (부산대학교), 유재석 (한화오션), 강남현* (부산대학교)

용접3-3 | 14:30

듀얼 빔 레이저를 이용한 알루미늄-구리 박판 용접부의 미세조직 및 기계적 특성 평가

유채은, 윤성민 (부산대학교), 김용 (고등기술연구원), 이제인* (부산대학교)

용접3-4 | 14:45

IDC(Integrated DC-DC Converter) 제품의 Housing-Cover 間 마찰교반용접기술 연구 : 용접 RPM & Feed Speed가 미치는 용접 품질 상관 관계

정재훈* (HL Mando)

용접3-5 | 15:00

초고강도강/알루미늄합금의 Laser SPR 접합 및 피로특성

이목영* (㈜포스코)

용접3-6 | 15:15

샤시 용접부 내구 신뢰성 확보를 위한 머신러닝 활용 아크 용접 품질 예측 기술 개발

공호영*, 김대원* (현대자동차㈜), 박종규, 김상훈 ((주)화신), 유지영, 김동윤, 이솔미 (한국생산기술연구원)

용접3-7 | 15:30 **Canceled**

폭발용접에 의해 제조된 초고내식 다중금속판재의 용접성 기초 연구

박상원*, 권홍기 (포항소재산업진흥원), 유경훈 (우양에이치씨(주))

Break Time | 15:45

좌장 : 강용준 (한국재료연구원)

용접4-1 | 15:55

일방향 다공성 구리를 활용한 솔더 접합부의 기공 분석

이진관 (인하대학교), 김근수 (호서대학교), 현승균* (인하대학교)

용접4-2 | 16:10

Al/Cu 레이저 용접부의 기계적 특성 향상을 위한 금속간화합물 미세조직 제어

윤성민, 유채은 (부산대학교), 김용 (고등기술연구원), 이제인* (부산대학교)

용접4-3 | 16:25

최적 용접 조건 선정을 위하여 실험계획법을 활용한 용접형 볼스터드 개발

이봉희* (현대자동차 AVP본부)

용접4-4 | 16:40

상용차용 후열처리 초경량휠 용접부 수소민감도 저감기술 개발

한도경*, 배규열 (포스코 기술연구원)

용접4-5 | 16:55

전자세 용접용 플러스 코어드 와이어의 평가 방법에 따른 저온균열 발생 거동

유재석 (한화오션, 부산대학교), 윤광희, 박종민 (한화오션), 강남현* (부산대학교)

용접4-6 | 17:10

초대입열 용접용 HLSA 강의 Nb 미세 합금화가 상변태 및 저온 변태조직 특성 제어에 미치는 영향

유성훈, 강남현* (부산대학교)

용접4-7 | 17:25

비조질강 마찰용접부 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 Nb, Si의 영향

김봉준, 문준오* (국립창원대학교), 강전연 (한국재료연구원), 이정원, 김용현 (디와이파워(주))

소프트소재

위원장 : 박철민 (연세대학교)
총무간사 : 선정윤 (서울대학교), 강석주 (UNIST),
김수영 (고려대학교), 심우영 (연세대학교),
정성준 (POSTECH), 김연수 (POSTECH)
Room 401B, 04월 23일

좌장 : 선정윤 (서울대학교)

소프트1-1 | 09:00

Ionic Diode-Based Drug Delivery System

Hyunjae Yoo, Soon-Bo Kang (Seoul National University), Jeongsoo Kim (Korea University), Wonkyung Cho (Seoul National University), Hyojeong Ha, Seyoung Oh (Korea University), Seol-Ha Jeong, Sihwan Lee (Seoul National University), Hyemin Lee (Korea University), Chang Seo Park, Dong-yup Lee, Taek Dong Chung* (Seoul National University), Kyung-Mi Lee* (Korea University), and Jeong-Yun Sun* (Seoul National University)

소프트1-2 | 09:10

Effect of Chalcogen Atom Substitution on the Mixed Transport Properties of Donor-Accepter Polymers

Kim Tae Hoon (Seoul National University), Shinbee Oh (KAIST), Ji Hwan Kim (Seoul National University), Dahyun Jeong, Bumjoon Kim (KAIST), and Keehoon Kang* (Seoul National University)

소프트1-3 | 09:20

Thermal Annealing-Induced Phase Conversion in N-type Triple-Cation Lead-Based Perovskite Field Effect Transistors

Yongjin Kim, Taehyun Kong, Jaeyoon Cho, Hyeonmin Choi, Heebeom Ahn, Jaeyong Woo, Dohyun Kim, Jeongjae Lee, Takhee Lee, and Keehoon Kang* (Seoul National University)

소프트1-4 | 09:30

Self-assembly prediction of architecture-controlled bottlebrush copolymers in solution using graph convolutional networks

Wooseop Hwang (Korea Univ), Sangwoo Kwon, Won Bo Lee* (Seoul National Univ), and YongJoo Kim* (Korea Univ)

소프트1-5 | 09:40

Solvation Structure Modulation in Aqueous Electrolytes : Stabilizing Pyrazine Radicals and Facilitating Electrochemical Nitrate Reduction

MinYoung Seo and YongJoo Kim* (Korea Univ.)

Break Time | 09:50

좌장 : 선정윤 (서울대학교)

소프트2-1 | 10:00 초청강연

Directed Soft Materials Assembly for Post-AI Era

Sang Ouk Kim* (KAIST)

소프트2-2 | 10:25 초청강연

Material design Strategies for Intrinsically Stretchable Quantum Dot Light-Emitting Diodes

Moon Kee Choi* (Ulsan National Institute of Science & Technology (UNIST))

소프트2-3 | 10:50 초청강연

Revisiting Biomimetic Self-Assembling Nanomaterials for Cryoprotectants

Nayeong Jeon, Lee Seo Kim, and Eunji Lee* (Gwangju Institue of Science and Technology (GIST))

소프트2-4 | 11:15 초청강연

Self-Assembly of Bottlebrush Copolymers in Solution

YongJoo Kim* (Korea University)

좌장 : 이은지 (광주과학기술원)

소프트3-1 | 14:00 초청강연

Technological Issues and Solutions in Ionic Tactile Sensors

Unyong Jeong* (Pohang University of Science and Technology (POSTECH))

소프트3-2 | 14:25 초청강연

Centimeter- to Nanometer-Scale 3D Contact Sensing

Wooyoung Shim* (Yonsei University)

소프트3-3 | 14:50 초청강연

Bio-Inspired Self-Adaptive Materials and Their Applications to Reprogrammable Self-Folding Structures

Sung Hoon Kang* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

소프트3-4 | 15:15 초청강연

Magnetic Anisotropy of Materials for Selective Sensing and Actuation in Soft Robotics

Minjeong Ha* (Gwangju Institute of Science and Technology)

Break Time | 15:40

좌장 : 심우영 (연세대학교)

소프트4-1 | 16:00 초청강연

Soft Crafing for More Powerful and Rigid Electrocatalysts

Yeon Sik Jung* (KAIST)

소프트4-2 | 16:25 초청강연

Soft, Transparent, Elastic, Size-Adjustable Human Brain

Juhyuk Park* (Seoul National University)

소프트4-3 | 16:50 초청강연

Development of functional lignogel

YounSoo Kim* (POSTECH)

소프트4-4 | 17:15 초청강연

Next-Generation Biomedical and Neural Interfaces using Multifunctional Thermally Drawn Fibers with Soft Materials

Seongjun Park* (Seoul National University)

소프트4-5 | 17:40 초청강연

3D-Printed Modular Microrobots for Multi-Environment Navigation

Jeong-Yun Sun* (Seoul National University)

제33회 피로 및 파괴 심포지엄

위원장 : 이홍철 (공군 항공기술연구소)
실무위원 : 권용남 (한국재료연구원)
Room 402A, 04월 23일

좌장 : 강성규 (경상국립대학교)

피로1-1 | 09:00

파괴인성 인자 K1si에 미치는 시편 크기 및 균열 길이의 영향

김형규, 장현수, 최현선, 민기득* ((주)피레타)

피로1-2 | 09:15

KF-21 주익-동체 체결부의 손상허용 설계 요구도 검증을 위한 구조시험 및 평가

강효주*, 신재훈 (한국항공우주산업(주))

피로1-3 | 09:30

앨리먼트 손상허용 시험-해석 결과 분석을 통한 항공기 구조설계 적용 사례

추헌호*, 양성현, 배경동 ((주)한국항공우주산업), 석무영, 권용남 (한국재료연구원), 박태규 ((주)한국항공우주산업)

피로1-4 | 09:45 초청강연

센서나 게이지없이 피로균열성장 시험을 수행하는 혁신적 방법

이봉상* (한국원자력연구원)

Break Time | 10:10

좌장 : 이홍철 (공군 항공기술연구소)

피로2-1 | 10:20

항공기 구조 피로수명관리를 위한 표준비행데이터 적용 효과 연구

정민지*, 이호용, 박정규, 장문호, 박재민 (한국항공우주산업(주))

피로2-2 | 10:35

항공기 구조 수명관리 Airframe Digital Twin 적용을 위한 개발 전략 수립 – 무기체계 디지털 트윈 활용 지침 적용과 분석기법 위주로

장문호*, 박정규, 이호용 (한국항공우주산업(주))

피로2-3 | 10:50

항공기 구조물 변형률-수명 피로해석 기법 적용에 대한 검토

양대규, 권정식, 서창보 (한국항공우주산업(주))

피로2-4 | 11:05

인공지능 기반 F-15K 항공기 피로수명 예측 연구

양지민, 김남규, 이홍철 (공군 항공기술연구소)

피로2-5 | 11:20

변형률-수명 방법을 이용한 높은 인장 응력을 받는 항공기 구조물의 피로 수명 평가

김건욱*, 양대규, 권정식, 서창보 (한국항공우주산업(주))

좌장 : 김정기 (경상국립대학교)

피로3-1 | 14:00 초청강연

Approaches to Fatigue Life Estimation of Aircraft Structures Implementing Quantitative Fractography

Hongchul Lee* (Aero Technology Research Institute, Logistics Command)

피로3-2 | 14:25

Influences of Microstructure and Oxidation Processes on Fatigue Failure Mechanisms in Advanced Turbine Disc Ni-Based Superalloy

Donghyuk Kim* (Hanwha Aerospace)

피로3-3 | 14:40

고온 환경에서의 터빈 블레이드 수명 예측 연구

김홍석 (서울대학교), 김영찬 (공군 항공기술연구소), 김도년* (서울대학교)

피로3-4 | 14:55

KF-21 전기체 내구성 시험의 2배수 완료 결과 (2nd Life Result of the KF-21 Full Scale Durability Test)

이호혁*, 윤성진, 추헌호, 심호진, 박태규, 서창보 (한국항공우주산업(주))

Break Time | 15:10

좌장 : 석무영 (한국재료연구원)

피로4-1 | 15:20

육군 군용 헬기(AH-1S) Cross Tube 파단 발생원인 분석 연구

권혁준, 이홍철 (공군 항공기술연구소)

피로4-2 | 15:35

초음파 공진 피로시험편 형상에 따른 Al-Si 주조합금의 고주기 피로특성평가

윤상일, 최지석, 송호섭 ((주)삼기), 박재순 ((주)한국주조산업), 이지용, 강희삼 (현대자동차), 조인식* (선문대학교)

피로4-3 | 15:50

배열회수보일러 P92 배관 손상 분석 및 변형 모니터링

이한상*, 한수지 (한전 전력연구원), 이승욱 (한국서부발전), 이길재, 박진근 (한국동서발전)

피로4-4 | 16:05

PT-6A-62 엔진 CT 블레이드 고온 부식 발생 메커니즘 연구

조형진*, 이병현, 이홍철 (공군 항공기술연구소)

피로4-5 | 16:20

군용 항공기 주익 BL 0 Rib 부위 SCC 발생 메커니즘 연구

정회성, 이병현, 이홍철 (공군 항공기술연구소)

저탄소 알루미늄소재 기술개발 심포지엄

위원장 : 김형욱 (한국재료연구원)
실무위원 : 김명균(RIST), 조영희 (한국재료연구원), 김세훈 (한국자동차연구원)
Room 402B, 04월 23일

좌장 : 김명균 (포항산업과학연구원)

저탄소1-1 | 10:00 초청강연
데이터 기반 저탄소 재활용 알루미늄 소재의 용탕 품질 관리 방안
김진관, 강희삼* (현대 · 기아자동차)

저탄소1-2 | 10:25 초청강연
전기자동차에서 필요한 알루미늄 소재 부품 기술
성시영* (케이에이랩스)

저탄소1-3 | 10:50 초청강연
저탄소 · 다특성 알루미늄 합금소재 및 고성능 전기부품 개발
오승환*, 노주현 ((주)에이알알루미늄)

저탄소1-4 | 11:15 초청강연
내식성 및 냉각성능이 향상된 두께 50 μm 이하급 열교환기용 클래드재 국산화 기술개발
김민중* (㈜한국클래드텍)

좌장 : 김세훈 (한국자동차연구원)

저탄소2-1 | 14:00 초청강연
글로벌 탄소규제의 배경과 알루미늄 산업 대응 전략
오광명* (오후두시랩)

저탄소2-2 | 14:25 초청강연
재활용 친화형 알루미늄 합금설계 기술
조영희* (한국재료연구원)

저탄소2-3 | 14:50 초청강연
사용 후 스크랩 재활용 기반 신지금급 알루미늄 합금 소재화 기술개발
임재철*, 강태웅* ((주)알멕)

저탄소2-4 | 15:15 초청강연
알루미늄 스크랩 용탕제어 및 비금속개재물 품질 평가기술
김덕*, 김명균 (포항산업과학연구원)

Break Time | 15:40

좌장 : 조영희 (한국재료연구원)

저탄소3-1 | 15:50 초청강연
알루미늄 스크랩의 비금속 개재물 제거를 위한 플럭스 디자인
정인호* (서울대학교)

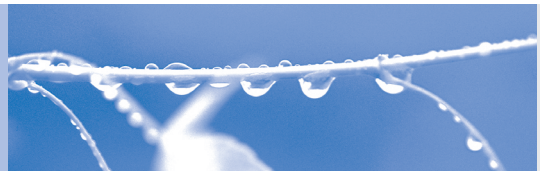
저탄소3-2 | 16:15 초청강연
LCA 기반 친환경 자동차 소재 부품 탄소배출량 평가기법 및 저탄소 소재-공정 활용 탄소배출량 25% 이상 저감 알루미늄 다이캐스팅 부품 제조기술 개발
윤상일*, 최지석 (삼기), 김동옥, 김진평 (한국자동차연구원)

저탄소3-3 | 16:40 초청강연
알루미늄 용탕의 Fe 저감 및 기능성 고방열 알루미늄 합금 개발
김용호*, 손현택, 유효상, 이병권, 고은찬 (한국생산기술연구원)

저탄소3-4 | 17:05 초청강연
PIR/PCR 스크랩 활용 저탄소 알루미늄 판재 부품화 기술
김용신*, 김병규, 신승현 ((주)동신모텍)

ORAL SESSION II

4월 24일



인공지능재료과학

위원장 : 이승철 (한국과학기술원)
부위원장 : 윤종필 (한국생산기술연구원),
김동훈 (한국과학기술연구원)
총무간사 : 김문조 (한국생산기술연구원),
김세종 (한국재료연구원), 김용주 (고려대학교)
Room 201A, 04월 24일

좌장 : 김문조 (한국생산기술연구원)

인공1-1 | 09:00

조립 모델 생성 AI를 이용한 다이캐스팅 품질 예측 모델 개발
이창선* (인하대학교)

인공1-2 | 09:15

인코딩 및 디코딩 작업을 위해 구현된 광학 행렬-벡터 곱 연산기를 활용한 이미지 처리
김예림, 김민주, 박원일* (한양대학교)

인공1-3 | 09:30

컬러 이미지 인식을 위한 광학 신경망 기반 컨볼루션 연산
김민주, 김예림, 박원일* (한양대학교)

인공1-4 | 09:45

Python을 활용한 이미지 일괄처리 기반 상분율 정량 분석의 자동화 연구
허성준*, 박노근*, 박재형, 천해영, 조진우 (영남대학교)

Break Time | 10:00

좌장 : 이승철 (한국과학기술원)

인공2-1 | 10:10

인공지능 활용한 자동차용 구상화 어닐링 강선의 기계적 물성 예측 기술
최중길*, 이중규 (현대자동차)

인공2-2 | 10:25

철근 재질 예측 모델 활용을 통한 항복강도 600MPa급 고강도 철근 개발
이주상*, 정준호 (현대제철)

인공2-3 | 10:40

TC-Python 기반 신속 열역학 데이터 생성 및 머신러닝 기법을 활용한 마르텐자이트 소재 역설계 비교 연구
김성환* (써모칼크소프트웨어코리아유한회사)

인공2-4 | 10:55

Unlocking the Synthesis Order for Bespoke Nanoparticle via Autonomous Laboratory
Hyuk Jun Yoo*, Donghun Kim*, and Sang Soo Han* (Korea Institute of Science and Technology)

인공2-5 | 11:10

You Only Put Your Nanoparticles : A Fully Automated Nanoparticle Washing System
Heeseung Lee (KIST, Korea Univ.), Seok Su Sohn* (Korea Univ.), Donghun Kim*, and Sang Soo Han* (KIST)

좌장 : 김동훈 (한국과학기술연구원)

인공3-1 | 14:00

머신러닝을 활용한 배터리 소재 설계 공간의 효율적 탐색
이선화, 예인수, 박인철* (포스코미래기술연구원)

인공3-2 | 14:15

An Interpretable Machine Learning Framework for Gaining Insights and Advancing Cathode Materials of Li-ion Batteries
Jieun Kim (POSCO N.EX.T Hub), Injun Choi (Research Institute of Industrial Science & Technology), and Inchul Park* (POSCO N.EX.T Hub)

인공3-3 | 14:30

User-Centric Machine Learning-Assisted Non-Destructive Prediction of Lithium-Ion Battery
Shin Seyeon, Nam Chihyun, and Lim Jongwoo* (Seoul National University)

인공3-4 | 14:45

From Text to Tech: AI-Driven Discovery of Soft Magnetic Materials
Sejin Park, YeonJoo Lee (Kookmin University), Youngsin Choi, HwiJun Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Hyunjoo Choi, and Kisub Cho* (Kookmin University)

인공3-5 | 15:00

물리식 기반 인공지능 모델을 활용한 Ti-Nb계 초탄성 거동 분석
유진영, 천세호, 이성호 (부산대학교), Shuanglei Li (Huaqiao University), 임진환, 남태현 (경상국립대학교), 이태경* (부산대학교)

Break Time | 15:15

좌장 : 조기섭 (국민대학교)

인공4-1 | 15:25

Design of green solvents for perovskite solar cells
Jin Soo Kim, Hyun-Sung Yun, Jae-won Kim, Juhwan Noh*, Jino Im*, and Nam Joong Jeon* (Korea Research Institute of Chemical Technology)

인공4-2 | 15:40

Atom Attention: Zero-Shot Approach for Improving Adsorption Energy Prediction
Wongyu Park and Jeong Woo Han* (Seoul National University)

인공4-3 | 15:55

Effective Design of High-Entropy Alloy Catalysts Using Combined Approach of Density Functional Theory and Active Learning
Kwangsoo Kim (Korea Institute of Energy Research, Yonsei University) and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

인공4-4 | 16:10

CatBench: Benchmark of Machine Learning Potentials for Adsorption Energy Predictions in Heterogeneous Catalysis
Jinuk Moon and Jeong Woo Han* (Seoul National University)

표면계면

위원장 : 박창규 (서울과학기술대학교)
총무간사 : 함명관 (인하대학교), 조지웅 (홍익대학교)
Room 201B, 04월 24일

좌장 : 박창규 (서울과학기술대학교)

표면계면1-1 | 09:00

자유형상 조명 장식을 위한 오간자-폴리에스터 메시 이종소재 접합 기술
배은혁, 박창규* (서울과학기술대학교)

표면계면1-2 | 09:15

나노초 레이저를 이용한 각형 배터리의 레이저 전해질 클리닝 기술 연구
박창규*, 성연수 (서울과학기술대학교)

표면계면1-3 | 09:30

알루미늄 프레스 금형 오염물질 레이저 클리닝 기술 개발
강현식, 박창규* (서울과학기술대학교)

표면계면1-4 | 09:45

Sensitive Hydrogen Gas Sensor based on Pd-decorated SWCNTs networks
Beom Joon Jung and Young Lae Kim* (Gangneung-Wonju National University)

표면계면1-5 | 10:00

원자층 반도체-초전도체 계면 형성 기반의 전계 효과 트랜지스터
김지연, 박규민, 김유나, 서강훈, Abhishek Patil, 윤아연, 이상진, 이문상, 함명관* (인하대학교)

표면계면1-6 | 10:15

화학기상증착법을 이용한 Atomic-layered 2D alloy의 합성과 전기화학적 특성
서강훈*, Abhishek C. Patil, 박규민, 김유나, 김지연, 윤아연, 이상진 (인하대학교), Narayanan T. Narayanan (Tata Institute of Fundamental Research Materials & Interface Engineering), 함명관* (인하대학교)

표면계면1-7 | 10:30

수열합성법을 이용한 원자층 Tellurene의 다양한 반도체 소자로의 응용
김유나, 김지연, 박규민, 서강훈, 윤아연, Abhishek Patil, 허지훈, 이상진, 이문상, 함명관* (인하대학교)

표면계면1-8 | 10:45

철강 소재의 계면특성과 계면물성 상관성 규명
송연균*, 조재동, 박중철, 유윤하 (㈜포스코)

표면계면1-9 | 11:00

자동차용 초고강도강의 인산염 처리성에 미치는 소둔 중 이슬점의 영향 연구
박중철 (포스코, 고려대학교), 박지우 (고려대학교), 허윤욱 (포항공과대학교), 이준호* (고려대학교)

표면계면1-10 | 11:15

절단방법에 따른 삼원계 (Zn-Mg-Al) 용융 도금 강판의 절단면 특성 연구
정현주*, 고정경 (POSCO)

표면계면1-11 | 11:30

The pickling process
HyunJong Kim* (POSCO)

좌장 : 김동영 (한국탄소산업진흥원)

표면계면2-1 | 14:00

Laser Induced Selective Etching 기술을 이용한 Through Glass Via (TGV) 제작 기술 개발
김해탄, 박창규* (서울과학기술대학교)

표면계면2-2 | 14:15

$LiCoO_2$ 침출수로부터 리튬 전구체 및 $LiFePO_4$ 합성
이준재, 안정빈 (서울과학기술대학교), 김재연 (재료연구원), 변재원, 박창규* (서울과학기술대학교)

표면계면2-3 | 14:30

용매가 담지된 알루미나 필터를 사용한 코발트 및 네오디뮴의 선택적 분리 및 추출 효과 분석
신동민, 윤소희, 정민성 (국립부경대학교), 김동현 (한국세라믹기술원), 문형석 (한국생산기술연구원), 이정훈* (국립부경대학교)

표면계면2-4 | 14:45

Composition-Driven Interphase Regulation for Li Metal Batteries Using Non-fluorinated LHCEs
허유민, 임종우* (서울대학교)

표면계면2-5 | 15:00

$LiCoO_2$ 침출수로부터 리튬 전구체 및 $LiFePO_4$ 합성
이준재 (서울과학기술대학교), 안정빈 (울산과학기술원), 김재연 (재료연구원), 변재원, 박창규* (서울과학기술대학교)

The 6th KIM-CSM Symposium

KIM side Organizer: Hyoungwook Kim (Korea Institute of Materials Science)
CSM side Organizer: Hongzhou Lu,(CITIC Metal Co., LTD)
Room 202A, 04/24

Opening | 09:00

Welcome address

Chair : Hyoungwook Kim (Korea Institute of Materials Science), Rui Ge (Wuhan University of Science and Technology)

KC1-1 | 09:10 **Invited Talk**

Development and Application of Integrated Hot Stamping Parts
Zijian Wang* (Soochow University), Xiao Liang, Ze Peng (Jiangxi Hot Stamping Automotive Component Co., Ltd.), Chongchen Xiang, and Hanlin Ding (Soochow University)

KC1-2 | 09:30 **Invited Talk**

Enhancement of Hydrogen Delayed Fracture Resistance in High-Strength Hot-Stamped Boron Steel
Hye-Jin Kim* (Tech. University of Korea), Seung-Pill Jung, Hee-Gun Shin, Seung-Chae Yoon, Jae-Yeul Gong, Byung-Gill Yoo, and Dong-Yeul Lee (Hyundai Steel Company)

KC1-3 | 09:50 **Invited Talk**

Research and application of 1500 MPa free-coating and free-shot-blasting Nb-bearing press hardening steel for integrated door rings
Xiangxing Deng*, Cong Long, Jiaqi Song, Shuangshuang Liu, Jian Wang, Lintao Gui, Yongsheng Gao, and Yan Zhao (Beijing Institute of Technology)

KC1-4 | 10:10 **Canceled**

Laser-assisted Robotic Roller Forming of Ultrahigh Strength Steels
Junying Min* (Tongji University), Songgang Zheng (MASTER), and Zeran Hou (Tongji University)

Break Time | 10:30

Chair : Hye-Jin Kim (Tech. University of Korea), Xiangxing Deng (Beijing Institute of Technology)

KC2-1 | 10:40 **Invited Talk**

Springback of High Strength Steels Predicted by Finite Element Simulations Using Self-Consistent Polycrystal Model
Youngung Jeong*, Bohye Jeon, and Jaeseong Lee (Changwon National University)

KC2-2 | 11:00 **Invited Talk**

Lightweighting Technology and Application of Battery Packs for New Energy Commercial Vehicles
Rui Ge* (Wuhan University of Science and Technology)

KC2-3 | 11:20 **Invited Talk**

A New Technology for Determining Plastic Anisotropy in Structural Materials
Kyeongjae Jeong* (Sungkyunkwan University) and Heung Nam Han* (Seoul National University)

KC2-4 | 11:40 **Invited Talk**

Evaluation and Modeling of the Interfacial Heat Transfer Coefficient Between 1500MPa Press Hardening Steel Sheet and Die Surface in Hot Stamping
Kyungseok Oh*, Hyunsung Son, and Honggee Kim (POSCO)

Chair: Jae-Hwang Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Bo Liu (University of Science and Technology Beijing)

KC3-1 | 14:00 **Invited Talk**

High Cycle Fatigue Properties of Thick Plate Steel for Seashore Structure Depending on Microstructures
Yong-Nam Kwon*, Hyunsung Choi (Korea Institute of Material Science), and W.Kim (Hyundai Steel)

KC3-2 | 14:20 **Invited Talk**

Nb-enhanced FNC Low Dust Emission Brake Rotors—A Potential Solution for Euro7 Brake Dust Regulation
Yanchun Shi* (CITIC Metal Co., Ltd.), Bernardo Barile (CBMM), Jianfeng Wang (General Motors China Science Lab), Mike Holly (CBMM), Hongzhou Lu, Wenjun Wang, and Aimin Guo (CITIC Metal Co., Ltd.)

KC3-3 | 14:40 **Invited Talk**

Advanced Non-Flammable Ca/Y-Containing Magnesium Alloys for Lightweight Structural Applications
Young Min Kim* (Korea Institute of Materials Science)

KC3-4 | 15:00 **Invited Talk**

Composite slippery liquid-Infused Porous Surfaces for Superior Self-Healing of Mg Alloys
Wenhui Yao*, Junyao Xu, Yan Yang, Jiangfeng Song, and Bin Jiang (Chongqing University)

Break Time | 15:20

Chair: Jae-Hwang Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Bo Liu (University of Science and Technology Beijing)

KC4-1 | 15:40 **Invited Talk**

Effects of User-Defined Parameters on Cluster Analysis in Al-Mg-Si Alloys
MiYoung Lee (Korea Institute of Industrial Technology, Jeonbuk National University, Korea Institute of Science and Technology), Sara Song (Korea Institute of Industrial Technology), JiWook Park (Korea Institute of Industrial Technology, University of Science & Technology), Dieter Isheim, David N Seidman (Northwestern University), Seok-Jae Lee (Jeonbuk National University), and JaeHwang Kim* (Korea Institute of Industrial Technology, Korea Institute of Science and Technology, University of Science & Technology)

KC4-2 | 16:00 **Invited Talk**

Research on Non-Homogeneity of Super-Large Thin-Walled Aluminum Alloy Die-Casting Vehicle Structural Parts

Bo Liu* (University of Science and Technology Beijing), Jian Yang (University of Science and Technology Beijing, Nanyang Technological University), and Dongwei Shu (Nanyang Technological University)

Closing | 16:20

New-Horizon International: Nano Convergence Materials Symposium

Symposium Chair : Jae Yong Song (POSTECH)
Committee Member : Seokwoo Jeon (Korea University), Soo Young Kim(Korea University), Ju Hun Lee (Hanyang University)
Room 202B, 04/24

Chair : YeonSik Jung (KAIST)

Opening Remarks | 09:00

Jae Yong Song (Symposium Chair, POSTECH)

Nano1-1 | 09:10 **Invited Talk**

Diamond and Cubic Boron Nitride Grown in New Ways in Metal Flux

Rodney Ruoff* (IBS CMCM and UNIST)

Nano1-2 | 09:40 **Invited Talk**

Ion Transport Within van der Waals Crystals

Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Chair: Youngmin Kim (Kookmin University)

Nano1-3 | 10:10 **Invited Talk**

Development of Two-Dimensional Nanomaterials for Energy Applications

Shintaro Ida* (Kumamoto University)

Nano1-4 | 10:40 **Invited Talk**

Ion Beam-Induced High-Aspect-Ratio Nanopatterns on Metals for Energy and Environmental Applications

Seohyun Cho, Eun Ji Seo, Chan Young Oh, Young A Lee, Sang Jin Park, and Myoung-Woon moon* (Korea Institute of Science and Technology)

Nano1-5 | 11:10 **Invited Talk**

Empowering Inorganic-Organic Hybrid Crystallization for Sustainable Future

Bumchul Park* (Korea University)

Break Time | 11:40

Chair : SoongJu Oh (Korea University)

Nano2-1 | 14:00 **Invited Talk**

Metals, Oxides, and Hydrogen: The Chemistry and Function

Soshi Iimura* (National Institute for Materials Science.)

Nano2-2 | 14:30 **Invited Talk**

Electrochemical Conversion of CO_2 using Single Atom Decorated Catalysts

Soo Young Kim* (Korea University)

Nano2-3 | 15:00 **Invited Talk**

Development of graphene oxide fuel cell and other applications

Shinya Hayami* (Kumamoto University)

Break Time | 15:30

Chair : BumChul Park (Korea University)

Nano3-1 | 15:50 **Invited Talk**

Composition and Interfacial regulation of photocatalytic heterostructures to promote hydrogen evolution performance

Junying Zhang* (Beihang University)

Nano3-2 | 16:20 **Invited Talk**

Development of cascade systems and novel catalysts for CO_2 upcycling to C_4 hydrocarbons

Mi Gyoung Lee* (Incheon National University)

Nano3-3 | 16:50 **Invited Talk**

U-GQD-Si- based framework: synthesis, characterization, and application

Adila Rani*, Jewook Kim, and Seokwoo Jeon (Korea University)

철강B | -제선,제강,환경,에너지

위원장 : 김성연 (포스코)
총무간사 : 김성규 (포스코), 박주현 (한양대학교), 황병철(서울과학기술대학교)
Room 203, 04월 24일

좌장 : 송민호 (POSCO)

철강B1-1 | 09:00

저탄소 연원료 사용을 통한 고로기반 CO2 저감기술 개발 현황

박지욱*, 이운재 (POSCO기술연구원), 이상호 (POSTECH 친환경소재대학원), 이영석, 라기호, 최규인 (POSCO기술연구원)

철강B1-2 | 09:15

Influence of Flowability and Sticking Behavior on Fluidized Bed Stability in Hydrogen Reduction Process

Jae Dong Kim (Pohang University of Science and Tech, POSCO), Tae Hyeon Kim, Chang Kuk Ko, Young Seok Lee* (POSCO), and Youn Bae Kang* (Pohang University of Science and Tech)

철강B1-3 | 09:30

함수소가스 취입 고로용 Coke 품질에 대한 원료탄 배합 및 사전처리 영향

이운재*, 이승재, 박지욱, 라기호 (포스코기술연구원)

철강B1-4 | 09:45

스테인리스 전로 슬래그 잔류량 예측 기술

정은주*, 하창수, 한승민 (포스코 기술연구원)

철강B1-5 | 10:00

Reoxidation and Inclusion Evolution in Ti-added Ultra Low C steel: Thermodynamic and Diffusion Study

Young-Joon Park (GIFT, POSTECH) and Youn-Bae Kang* (GIFT, POSTECH, DMSE, POSTECH)

철강B1-6 | 10:15

Corrosion of Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) by the CaF2-free mold flux

Jeong-Min Cheon (Seoul National University, Seoul, South Korea), Stephano Papadopoli Tonelli Piva, Zoé Bernard, Ata Fallah-Mehrjardi (Vesuvius, Ghlin, Belgium), and In-ho Jung* (Seoul National University, Seoul, South Korea)

Break Time | 10:30

좌장 : 정은진 ((재)포항산업과학연구원)

철강B2-1 | 10:40

MgO-C 내화물 내산화성 향상을 위한 B_4C의 효과

박찬근, 정용석* (한국공학대학교)

철강B2-2 | 10:55

Evaluating the Nitrogen Solubility in Iron with Ammonia Injection

GYOKHANG PARK, Wan Ho Kim, and Il Sohn* (Yonsei university)

철강B2-3 | 11:10

Coupled Thermodynamic Modeling and Experimental Phase Diagram Study of the ZrO2-B2O3-SiO2 System for the Refractory-Mold Flux Interaction

Seungjae Park and In-Ho Jung* (Seoul National University)

철강B2-4 | 11:25

BOF Slag-Based Glass Fertilizers for the Marine Ecosystem

Jisun Lee, Seon-jin Kim (Pohang University of Science and Technology), Tae-min Yeo (Seoul National University), and Jung-wook Cho* (Pohang University of Science and Technology)

철강B2-5 | 11:40

폐Al2O3 내화물 및 재활용 콘크리트 페이스트를 이용한 탈황 래들 플럭스 개발

김기원, 명재우, 차은환, 정용석* (한국공학대학교)

좌장 : 김선중 (조선대학교)

철강B3-1 | 14:00

Phase Transition of Silico-Ferrite of Calcium and Aluminum: Comparison between In-situ Observation and Thermodynamic Calculation

Haeun Kim and Joonho Lee* (Korea University)

철강B3-2 | 14:15

고로 슬래그의 점성 예측모델

신현우, 정택용, 강영조*, 이학성 (동아대학교), 이혜란 ((주)영풍 Green)

철강B3-3 | 14:30

고로 슬래그 중 CaO의 용해 속도와 용해 메커니즘 연구

이자성, 김영재* (인하대학교), 이성희 (포스코)

철강B3-4 | 14:45

H_2-DRI 용융 슬래그 내 FeO의 환원 속도에 미치는 맥석(MgO, Al_2O_3)의 영향

배성준, 박주현* (한양대학교)

철강B3-5 | 15:00

Investigations of Carburization and Melting Behavior of Various Reduced Iron Sources for Rapid Melting in the ESF Process

Won-Bum Park, Jooho Park (POSTECH), Sang-Chae Park (POSCO), and Youn-Bae Kang* (POSTECH)

철강B3-6 | 15:15

전기용융로(ESF) 내 탕면 특성과 아크 길이에 따른 아크 불안정성 분석

김현진, 양현진* (인하대학교)

Break Time | 15:30

좌장 : 정은주 (POSCO 기술연구원)

철강B4-1 | 15:40

Assessment of Iron Ore Reduction Behavior and Microstructure Evolution Using Turquoise Hydrogen

Jooho Park, Tae-Gyu Wi, and Youn-Bae Kang* (POSTECH)

철강B4-2 | 15:55

Pyrolysis char 활용 Mill-scale의 용융 환원 반응에 대한 염기도의 영향

김용우, 김선중* (조선대학교)

철강B4-3 | 16:10

MgO-C 내화재의 B_4C 첨가에 따른 내산화 특성 및 슬래그와의 계면특성 연구

조한울, 박찬근, 정용석* (한국공학대학교)

철강B4-4 | 16:25

Al 탈산 Ti-첨가 페라이트계 스테인리스강 내 비금속 개재물의 진화 거동

정동율, 전영진 (한양대학교), 박성진, 강수창 (POSCO), 박주현* (한양대학교)

철강B4-5 | 16:40

Liquidus of MgO and $MgAl_2O_4$ in the CaO-MgO-Al_2O_3 System at 1550-1650 °C

Dahee Gwak, Jaesung Lee, Seungjae Park, and In-Ho Jung* (Seoul National University)

철강B4-6 | 16:55

턴디쉬 슬래그 내 Al_2O_3 입자 크기 및 조성 변화에 따른 Al_2O_3 용해 거동 연구

곽태준, 정용석* (한국공학대학교)

재료정책 세션I

Room 삼다A, 04월 24일

좌장: 석현광 (한국과학기술연구원)

정책1-1 | 10:00 초청강연

Key Projects of the Division of Information and Convergence Technology, NRF

Chong-Yun Kang* (National Research Foundation of Korea)

재료정책 세션II

Room 삼다A, 04월 24일

좌장: 석현광 (한국과학기술연구원)

정책2-1 | 10:45 초청강연

과기정통부 소재 R&D 사업 발굴 및 기획

Sang-Kwan Lee*, Taeyeon Kim, and Jeongho Shin (Korea Institute of Materials Science)

패널토의 | 11:30

강종윤 (한국연구재단), 송재용 (POSTECH), 이태우 (서울대학교)

학회상 수상기념강연

Room 삼다A, 04월 24일

좌장 : 석현광 (한국과학기술연구원), 이기안 (인하대학교)

AW1-1 | 14:00 POSCO 학술상 수상기념강연

전류/전하 하에서의 재료거동

한흥남* (서울대학교)

AW1-2 | 14:25 현송공학상 수상기념강연

고온 밸브 디스크 하드페이싱부 파손 원인 분석

정우상* (한국과학기술연구원)

Break Time | 14:50

AW1-3 | 15:00 LS학술상 수상기념강연

탄소 중립: 전기변색, 인공광합성 그리고 탄자니아

이선영* (한양대학교)

AW1-4 | 15:25 아모공학상 수상기념강연

광학기반 3차원 나노구조 제작과 그 응용

전석우* (고려대학교)

첨단 항공엔진 소재 · 부품 기술개발 심포지엄

위원장 : 서성문 (한국재료연구원)

실무위원 : 손인수 (한화에어로스페이스)

Room 삼다B, 04월 24일

좌장 : 송덕용 (한화에어로스페이스)

항공엔진1-1 | 09:00

국내 항공엔진 소재 부품 산업 현황

손인수* (한화에어로스페이스)

항공엔진1-2 | 09:15 초청강연

첨단 항공엔진 개발 기본계획

심현석* (방위사업청)

항공엔진1-3 | 09:40 초청강연

항공엔진용 Ni/Co계 내열소재 기술개발 현황

이재현* (국립창원대학교)

항공엔진1-4 | 10:05 초청강연

DKIE-Powered Component-specific Gammalloy Development

Young-Won Kim and Sang-Lan Kim (Gamteck LLC)

Break Time | 10:30

좌장 : 김건희 (한국생산기술연구원)

항공엔진2-1 | 10:40

항공엔진용 초내열합금 인코넬 718 국산화 개발 진행 현황

황승욱*, 최주태, 손인수 (한화에어로스페이스)

항공엔진2-2 | 10:55

인코넬 718 Master Ingot 제조를 위한 진공 유도 용해 기술개발

유영근*, 이경석, 임광혁 ((주)한스코)

항공엔진2-3 | 11:10

항공용 Alloy 718 소재 제조 공정에서 발생하는 미세조직 결함 분석

나혜성*, 진인경, 김용근, 최재영* ((주)에이치브이엠)

항공엔진2-4 | 11:25

항공엔진용 Premium Quality Inconel 718 합금의 잉곳/단조재 개발 현황

김종식, 주경준, 권용혁, 금보경, 이기영* (케이피씨엠)

항공엔진2-5 | 11:40

터보팬 항공엔진 주요 구조물을 위한 정밀주조기술개발

이도훈*, 강경무, 배해광 ((주)성일터빈)

좌장 : 김승언 (한국재료연구원)

항공엔진3-1 | 14:00

국내 독자 TiAl 합금의 개발 및 항공엔진용 블레이드 제조 기술 개발

이슬*, 송덕용, 주영규, 손인수 (한화에어로스페이스)

항공엔진3-2 | 14:15 초청강연

TiAl 저압터빈 블레이드 진공정밀주조 제조 기술 개발

이만길*, 김성욱, 이준호, 민지후 (진성정밀금속(주))

항공엔진3-3 | 14:40

항공엔진용 가스터빈 TiAl 블레이드 제작을 위한 6,000톤 항온단조 장치 개발 및 공정기술 연구

김동권*, 이경훈 (한밭중공업)

항공엔진3-4 | 14:55

항공기 엔진용 TiAl 소재 특성 DB 구축

이관호, 손진일, 김효진* (테스코(주))

항공엔진3-5 | 15:10

TiAl 합금조성 및 미세조직이 기계적 특성에 미치는 영향

성효경*, 박윤지, 조기섭 (국민대학교)

Break Time | 15:25

좌장 : 조중욱 (포항공과대학교)

항공엔진4-1 | 15:35

항공기 엔진 부품 적층 제조 재생 핵심기술 개발

안성철*, 신충식*, 손인수 (한화에어로스페이스)

항공엔진4-2 | 15:50

항공우주 산업에서 적층제조 공법을 활용한 수리기술 개발

신충식*, 안성철, 손인수 (한화에어로스페이스)

항공엔진4-3 | 16:05

L-PBF 기반 IN718 초내열 합금 적층품의 특성 제어 열처리 연구

강현수*, 하정헌, 김원래, 이택우, 김형균, 김건희 (한국생산기술연구원)

항공엔진4-4 | 16:20

DED 기반의 금속 적층제조 기술의 연구개발 동향

서정훈* (화천기계주식회사)

항공엔진4-5 | 16:35

항공용 적층제조 소재 데이터 개발에 대한 MMPDS 연구현황

손진일*, 김효진, 은성진 (테스코(주))

학생세션 II

위원장 : 정은진 (포항산업과학연구원)
총무간사 : 이진영 (연세대학교)
Room 300, 04월 24일

좌장 : 이진영 (연세대학교), 한주연 (국민대학교)

SS4-1 | 09:00

다중 에이전트 논쟁형 LLM 기반 조건부 이중 페로브스카이트계 소재 탐색

이인효*, 이준형, 유승화 (한국과학기술원)

SS4-2 | 09:13

데이터 증강을 활용한 내열강의 크리프 수명 기계학습

조태현*, 최윤석 (부산대학교)

SS4-3 | 09:26

Grade 5 Ti와 AlTiCrVFe계 경량 고엔트로피 합금 하이브리드 구조체의 열처리 및 미세조직 변화 연구

이용건 (아주대학교 에너지시스템학과), 이한성 (아주대학교 첨단신소재공학과), 송은효 (아주대학교 에너지시스템학과), 윤교식 (아주대학교 첨단신소재공학과), 안병민* (아주대학교 에너지시스템학과, 아주대학교 첨단신소재공학과)

SS4-4 | 09:39

강 · 상유전체를 복합화한 LiCoO2의 고전압과 초고전압에서의 수명 및 용량 개선

허석하* (부산대학교), 최문희 (한국세라믹기술원), 김양도 (부산대학교)

SS4-5 | 09:52

적층 제조 공정을 통해 제작된 Ti-6Al-4V 합금 기반 산화물 분산강화 합금의 미세조직 및 기계적 특성 분석

김우혁 (국립한밭대학교), 고의준, 박형기 (한국생산기술연구원), 김한수 (KONASOL), 윤중열 (한국재료연구원), 김정한* (국립한밭대학교)

SS4-6 | 10:05

Core(Anatase)-Shell(Rutile) TiO2를 이용한 Ba(ZrxTi1-x)O3 유전체의 특성 향상

남월일* (부산대학교, 한국세라믹기술원), 최문희 (한국세라믹기술원), 김양도 (부산대학교)

SS4-7 | 10:18

금 단일원자가 증착된 이차원 페로브스카이트 광촉매를 통한 이산화탄소 환원

김수영*, 박성욱 (고려대학교)

Break Time | 10:30

좌장 : 이진영 (연세대학교), 이태윤 (고려대학교)

SS5-1 | 10:40

고강도 Al-Zn-Mg-Cu 합금에서 피로균열개시 및 성장에 미치는 과시효처리의 영향

이동윤 (한국재료연구원, 부산대학교), 김용유 (한국재료연구원), 황효진 (한국재료연구원, 부산대학교), 석무영 (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교), 김형욱*, 조용희* (한국재료연구원)

SS5-2 | 10:53

L-DED 공정으로 제조된 BN 강화 AlSi10Mg 알루미늄 복합재의 미세조직 및 기계적 물성 평가

김수민*, 최윤석, 이욱진 (부산대학교)

SS5-3 | 11:06

액체 금속 기반 화학 기상 증착법을 이용한 고품질 MoP 단결정 합성 및 결정면 조절

김서현 (성신여자대학교 청정신소재공학과), 김정현 (동국대학교 화공생물공학과), 박보근, 김병현 (한양대학교 응용화학과), 최민재 (동국대학교 화공생물공학과), 한혁진* (성신여자대학교 청정신소재공학과)

SS5-4 | 11:19

Fe-N 질화공정을 위한 Phase-field model의 개발 및 검증

김예림 (국민대학교), 김근우 (고려대학교 첨단소재부품개발연구소), 아리짓 로이 (미시간대학교), 차필령* (국민대학교)

SS5-5 | 11:32

Ni기 초내열합금 설계를 위한 Re-Nb, Re-Mo 이원계 시스템의 열역학 모델링

서정민, 정인호* (서울대학교)

SS5-6 | 11:45

금속-폴리머 이종소재 접합을 위한 레이저 표면 텍스처링 공정 최적화 및 접합 메커니즘 분석

김유신, 박창규* (서울과학기술대학교)

좌장 : 박진웅 (국립한밭대학교), 임진수랑 (부산대학교)

SS6-1 | 14:00 **Canceled**

3차원 나노 프린팅 기반 CNT 전극 제작 및 센서 응용

이예원, 김동욱, 김재민, 이슬이, 김태희, 박재훈* (한림대학교 나노융합스쿨)

SS6-2 | 14:13

워터 디벨롭 용액 공정을 이용한 IZO 박막 트랜지스터(TFT) 패터닝

이슬이, 김동욱, 김태희, 이예원, 윤영준, 박재훈* (한림대학교 반도체 디스플레이 스쿨)

SS6-3 | 14:26

Impact of Powder Size Distribution on the Flowability of Gas-Atomized Inconel 625 Powder for Directed Energy Deposition

Hyun Joong Kim, Sourabh Kumar Soni, Sung-Jae Jo, Jae Hong Kim, Ji-Woon Lee, Soon-Jik Hong* (Kongju National University)

SS6-4 | 14:39

젖음 투명성에 의해 유도된 전이금속 칼코겐화합물의 수분 안정성 향상

최선연, 김현호* (국립금오공과대학교)

SS6-5 | 14:52

DMF기반 전해질의 온도에 따른 빛 차단 효율 최적화

조민서, 문천우* (순천향대학교)

SS6-6 | 15:05

할라이드 페로브스카이트 성능 향상을 위한 첨가제 설계 및 열증발 진공증착법 기반 LED 소자 구현

김수영*, 김인향 (고려대학교)

네트워킹, 설문조사 | 15:20~15:40

진행: 이진영 학생위원장

우수발표자 시상식 | 15:40~16:00

진행: 정은진 위원장, 이진영 학생위원장

타이타늄 전략소재 심포지엄

위원장 : 홍재근 (한국재료연구원)
실무위원 : 이현석 (포항산업과학연구원), 김경민 (세아창원특수강), 이제인 (부산대학교), 이상원 (한국재료연구원)
Room 301, 04월 24일

좌장 : 염종택 (한국재료연구원)

전략1-1 | 09:00 초청강연

전략산업용 타이타늄합금 개발 및 적용 기술

홍재근*, 김재혁, 이상원, 양준하, 박찬희, 염종택 (한국재료연구원)

전략1-2 | 09:25 초청강연

마그네슘 열환원법을 이용한 이산화타이타늄으로부터 Grade 2급 Ti 금속 직접 제조기술

강정신* (서울대학교 에너지자원공학과, 서울대학교 에너지자원신기술연구소), 박성훈 (서울대학교 에너지자원신기술연구소), 송영주 (서울대학교 에너지자원공학과, 서울대학교 에너지자원신기술연구소), 오준오 (서울대학교 에너지자원신기술연구소)

전략1-3 | 09:50 초청강연

off-grade Ti 스크랩의 고순도화 및 이를 활용한 스퍼터링 타겟 소재 제조

김정한*, 김우혁 (국립한밭대학교 신소공학과), 고의준, 박경태 (한국생산기술연구원), 원종우 (한국재료연구원)

Break Time | 10:15

좌장 : 이현석 (포항산업과학연구원(RIST))

전략2-1 | 10:25 초청강연

티타늄 합금 품질 향상을 위한 첨단 용해 기술 : 공정 변수 제어 및 결함 발생 방지 사례

최재영*, 나혜성 ((주)에이치브이엠)

전략2-2 | 10:50 초청강연

α' 마르텐사이트 변태 유기 소성을 이용한 초고강도 타이타늄 합금 소개

이상원*, 심재원, 고성철, 남연우, 홍재근, 김재혁, 염종택 (한국재료연구원)

전략2-3 | 11:15 초청강연

첨단 산업 분야 적층 제조 티타늄 소재 적용 현황 및 재생 보수 기술 개발 동향

박기덕* (주식회사갓테크)

좌장 : 홍재근 (한국재료연구원)

전략3-1 | 14:00 초청강연

항공엔진 타이타늄 소재 국산화 현황 및 전략

손인수* (한화에어로스페이스)

전략3-2 | 14:25 초청강연

Development of Low-Cost Ti-6Al-4V Filler Wire for Wire Arc Additive Manufacturing

Jong Taek Yeom*, A.K. Maurya, Jae H. Kim, Junha Yang, Jae Ho Kim, and Jae Keun Hong (Korea Institute of Materials Science)

전략3-3 | 14:50 초청강연

Cold dwell fatigue of titanium alloys in aero-engine industry
Tea-Sung Jun* (Incheon National University)

전략3-4 | 15:15 초청강연

Hydrogen Absorption Kinetics and Microstructural Features of $TiFe_{0.8}Mn_{0.2}$ Alloy
Ryun-Ho Kwak (Korea Institute of Industrial Technology), Seok Su Sohn* (Korea University), Hyung-Ki Park*, and Taejun Ha* (Korea Institute of Industrial Technology)

Break Time | 15:40

좌장 : 이상원 (한국재료연구원)

전략4-1 | 15:50 초청강연

금속 3D 프린팅을 응용한 형상기억합금의 제조 및 특성
김도형 (영남대학교 신소재공학부), 박민수, 이욱진* (부산대학교 재료공학부)

전략4-2 | 16:15 초청강연

타이타늄 합금의 적층제조 후 후처리 조건에 따른 기계적 특성 변화
김정기* (경상국립대학교)

전략4-3 | 16:40 초청강연

미소스케일 시뮬레이션을 활용한 Ti-X계 형상기억합금 개발
고원석* (인하대학교)

전략4-4 | 17:05 초청강연

Manipulation of the Elastocaloric Effect via Cu Supersaturation in TiCuNi-Based Shape Memory Alloys
류욱하 (국립금오공과대학교), 박은수* (서울대학교)

제12회 첨단 융복합 분석기술 심포지엄

위원장 : 이수열 (충남대학교)
실무위원 : 강전연 (한국재료연구원), 송기안 (공주대학교), 채호병 (한국원자력연구원)
Room 303, 04월 24일

좌장 : 이수열 (충남대학교)

융복합1-1 | 09:00 초청강연

Microstructural Characterization of Materials by TEM (II): Defect Analysis
Yoon-Uk Heo* (POSTECH)

융복합1-2 | 10:00 초청강연

EBSD를 이용한 메조스케일 미세구조 분석
강주희* (웨이브센스)

융복합1-3 | 11:00 초청강연

중성자회절법을 이용한 금속재료의 응력, 변형, 미세구조 분석
우완측* (한국원자력연구원)

좌장 : 송기안 (공주대학교)

융복합2-1 | 14:00 초청강연

A combined STEM and APT observation of twinning-induced pipe diffusion from disordered to ordered
Jae Bok Seol* (Kookmin University)

융복합2-2 | 15:00 초청강연

나노인덴테이션을 이용한 금속재료의 기계적 물성 측정
김주영* (울산과학기술원)

융복합2-3 | 15:30 초청강연

Scale-bridging analysis of defects in fcc-based steel
이태호*, 하헌영, 김성훈 (한국재료연구원), 손광석 (동아대학교), 신은주, 우완측 (한국원자력연구원), 정재석 (두산에너빌리티)

좌장 : 채호병 (한국원자력연구원)

융복합3-1 | 16:00 초청강연

전자현미경-나노인덴터 활용 원자력 구조소재 조사손상 분석
진형하*, 임상엽, 김성우 (한국원자력연구원)

융복합3-2 | 16:30 초청강연

초내열 소재의 소개 및 연구 동향
송기안*, 박강현, 이강진 (공주대학교)

융복합3-3 | 16:55 초청강연

스테인리스강의 초극저온 불연속 변형 메커니즘 및 수소 취성 규명
김유섭, 강태욱 (한국원자력연구원), 홍순구, 이수열* (충남대학교)

제101회 철강기술 심포지엄: 스테인리스 산업의 새로운 도약을 위한 미래 전략

위원장 : 김성연 (포스코)
실무위원 : 김성규 (포스코)
Room 한라A, 04월 24일

좌장: 김상석 (포스코)

개회사 | 10:00

김성연 철강분과위원장 (포스코 기술연구원장)

기술1-1 | 10:10 초청강연

저탄소 철강 원료 · 공정 · 제품 관련 KEIT 사업 및 과제 기획현황
이광석* (한국산업기술기획평가원)

기술1-2 | 10:45 초청강연

글로벌 스테인리스 산업의 동향 및 주요 이슈
이진우* (포스코경영연구원)

기술1-3 | 11:20 초청강연

미래를 개척하는 스테인리스강 개발 동향
김성준* (포항공과대학교)

좌장: 황병철 (서울과학기술대학교)

기술2-1 | 14:00 초청강연

차세대 SMR 기술 및 적용 소재 전망

김동진*, 김민철, 황성식, 강석훈, 김대종, 진형하 (한국원자력연구원)

기술2-2 | 14:20 초청강연

CCS 산업동향과 LCO2 수송/주입 유동라인 구축

김영주*, 우남섭, 한상목, 이왕도, 조해진, 송영수, 박범철 (한국지질자원연구원)

기술2-3 | 14:40 초청강연

액화수소 저장탱크의 시장 및 기술동향

주종흥* (하이리움산업)

기술2-4 | 15:00 초청강연

그린수소 생산 국내외 수전해 기술개발 현황

조현석* (서강대학교)

기술2-5 | 15:20 초청강연

발전용 연료전지 및 고온 수전해용 스테인리스 개발

김종희*, 공정현, 손성강, 조기훈 (포스코), 안진수 (포스코홀딩스)

Break Time | 15:40

좌장: 강지현 (영남대학교)

기술3-1 | 16:00 초청강연

자동차 차체용 스테인리스강 기술 개발 동향

정재규* (현대자동차)

기술3-2 | 16:20 초청강연

전기차 배터리셀 케이스용 스테인리스강 개발적용

김영호*, 정양진, 정한용 (포스코), 엄지용 (자동차부품연구원)

기술3-3 | 16:40 초청강연

황화물계 전고체 배터리용 초극박 집전체 개발 현황 및 전망

김기수* ((주)프렘투, POSTECH), 유신 ((주)프렘투), 이종람 ((주)프렘투, 서울대학교)

기술3-4 | 17:00 초청강연

항공소재 국산화의 필요성 및 Ti64합금 개발

최미선*, 이현석 (포항산업과학연구원)

New-Horizon : 유기, 무기 및 페로브스카이트 광전자소자 심포지엄

위원장 : 이태우 (서울대학교)

실무위원 : 문제현 (한국전자통신연구원), 김수영 (고려대학교), 조힘찬 (한국과학기술원)

Room 한라B, 04월 24일

Opening Remark | 09:00

이태우 (분과위원장, 서울대학교)

좌장 : 조힘찬 (한국과학기술원)

광전자1-1 | 09:10 초청강연

Pathways to High-Performance Perovskite Nanocrystals for Optoelectronic Applications

Bo Ram Lee* (Sungkyunkwan University)

광전자1-2 | 09:40 초청강연

Tailoring Metal Oxide Nanoparticles for Efficient Quantum Dot Electroluminescent Devices

임재훈* (성균관대학교)

광전자1-3 | 10:10 초청강연

OLED meets AI: Redefining Material and Device Design

Jae-Min Kim* (Chung-Ang University)

Break Time | 10:40

좌장 : 이보람 (성균관대학교)

광전자2-1 | 11:00 초청강연

Controlling Anisotropic Optical Properties from Single to Ensemble Semiconductor Nanocrystals

Dahin Kim* (University of Seoul)

광전자2-2 | 11:30 초청강연

Progress on Halide Perovskite Thin Film Based Lasing Emission

Kwangdong Roh* (Ewha Womans University)

좌장 : 문제현 (한국전자통신연구원)

광전자3-1 | 14:00 초청강연

Advancements in OLED Microdisplay Technology for Improved Luminance and Color gamut

Hyunsu Cho*, Sukyung Choi, Chan-mo Kang, Jin-Wook Shin, Kukjoo Kim, Dae Hyun Ahn, Chul Woong Joo, Byoung-Hwa Kwon, Nam Sung Cho, Chun-Won Byun, Gi Heon Kim, and and Chi-Sun Hwang (Electronics and Telecommunications Research Institute)

광전자3-2 | 14:30 초청강연

Towards Next-generation OLED: Hyperfluorescence and Doublet Fluorescence

Hwan-Hee Cho* (Yonsei University)

광전자3-3 | 15:00 초청강연

풀컬러 디스플레이를 위한 양자점발광다이오드

곽정훈* (서울대학교)

Break Time | 15:30

좌장 : 조현수 (한국전자통신연구원)

광전자4-1 | 15:50 초청강연

Boron Based Materials for Blue Organic Light-Emitting Diodes

Jun Yeob Lee* (Sungkyunkwan University)

광전자4-2 | 16:20 초청강연

Design Strategies for Phosphor-Sensitized Thermally Activated Delayed Fluorescence OLEDs (PSF OLED)

Yun-Hi Kim* (Gyeongsang National University)

광전자4-3 | 16:50 초청강연

High-Performance Display Applications Using Aerosol-Deposited Perovskite Quantum Dot/Metal Oxide Composites and Novel Blue OLEDs

Jongwook Park* (Kyung Hee University)

Closing Remark | 17:20

알루미늄

위원장 : 김형욱 (한국재료연구원)
총무간사 : 김세훈 (한국자동차연구원),
김명균 (포항산업과학연구원), 조영희 (한국재료연구원)
Room 400, 04월 24일

좌장 : 김재황 (한국생산기술연구원)

알루미늄1-1 | 09:00

Effect of Cooling Rate on Zr Interactions in Al-10Si-0.35Mg Casting Alloys

saif Haider Kayani, Sang-Ik Lee, Yoon-Hoo Lee, Jung-Moo Lee, Kwangjun Euh, and Young-Hee Cho* (Lightweight Materials Research Division, Korea Institute of Materials Science)

알루미늄1-2 | 09:15

Synergistic Microstructure Refinement and Enhanced Mechanical Properties in Hypoeutectic Al-Si Based Alloys via High-Entropy Microstructure Refiner

Jae Kwon Kim (Seoul National University), Yagnesh Shadangi (Indian Institute of Technology Bhilai), Do Hyang Kim (Yonsei University), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

알루미늄1-3 | 09:30

냉각 속도에 따른 Al-6Mg-xCu 합금의 미세조직 및 기계적 특성 변화

장재철 (한국생산기술연구원, 서울대학교), 이강래, 송람, 최경환, 김봉환 (한국생산기술연구원), 정인호* (서울대학교)

알루미늄1-4 | 09:45

Thermodynamic Assessment of the Al-Fe-Si and Al-Mn-Si System

Chan Jeong and In-Ho Jung* (Seoul National University)

Break Time | 10:00

좌장 : 송람 (한국생산기술연구원)

알루미늄2-1 | 10:10

초대형 다이캐스팅 적용 가능한 국부 연화 열처리 공정 기술 개발

임재선*, 강동하, 임태성 (현대자동차 남양연구소)

알루미늄2-2 | 10:25

핫스탬핑 적용 Al-9.5Si 도금강의 부식 특성 연구

안경빈, 장희진* (조선대학교 신소재공학과)

알루미늄2-3 | 10:40

디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation, DIC)을 활용한 알루미늄 합금의 극저온 인장 시험 환경(298K~77K)변화 따른 변형 및 파괴 거동 변화

이종원, 허성준 (영남대학교), 김효민 ((주)머티리얼솔루션파크), 배문기, 권혁민, 김예름 (현대차), 박노근* (영남대학교, (주)머티리얼솔루션파크)

알루미늄2-4 | 10:55

RRA 열처리에 의한 Al-Zn-Mg-Cu계 합금의 미세조직 변화와 부식 및 기계적 특성의 상관관계 해석

황효진 (한국재료연구원, 부산대학교), 김원경, 세프 카야니 (한국재료연구원), 김세호 (고려대학교), 이제인 (부산대학교), 조용희* (한국재료연구원)

알루미늄2-5 | 11:10

Cu, Mg 첨가가 Al-Zn 합금의 마모 특성에 미치는 영향

신지용* (한국재료연구원, 부산대학교), 정현우, 정일석, 최은애 (한국재료연구원), 권세훈 (부산대학교), 한승전* (한국재료연구원)

좌장 : 이승준 (한국공학대학교)

알루미늄3-1 | 14:00

In-Situ Synchrotron X-Ray Observation of Intermetallic Compound Formation at the Interface of Al-Sn Alloy and Carbon Steel

Ahmad Zamanian Khorasgani*, Nam Hoon Goo, Dae Geun Hong (Pohang University of Science and Technology), Ho Jae Kwak (Pohang Accelerator Laboratory), and Chang Hee Yim (Pohang University of Science and Technology)

알루미늄3-2 | 14:15 **Canceled**

Effect of Process Parameters on Precipitate Evolution and Mechanical Properties for Frictional Stir Welded AA2219 Alloy

Gargi Roy, Raj Narayan Hajra (Hanbat National University), Sung Hoon Kim (Nambu University), Se-Hwan Lee (Agency for Defense Development), Park-Jeong Ung (Chosun University), and Jeoung Han Kim* (Hanbat National University)

알루미늄3-3 | 14:30

Ni 첨가에 따른 고강성 Al-18Si-xNi 주조 합금의 미세조직 변화와 물리적 특성의 상관관계

이윤호 (한국재료연구원, 한양대학교), 이정무, 세프 카야니, 이상익 (한국재료연구원), 장재일 (한양대학교), 조영희* (한국재료연구원)

알루미늄3-4 | 14:45

Al-Mg-Si 합금에서 Cu 첨가와 인공 시효 조건이 기계적 · 전기화학적 · 석출 특성에 미치는 영향

홍현빈, Raj Narayan Hajra (국립한밭대학교), 신은주 (한국원자력연구원), 김재국, 이종숙 (전남대학교), 김정한 (국립한밭대학교), 김재황 (한국생산기술연구원), 조훈희* (국립한밭대학교)

알루미늄3-5 | 15:00

Al-Mg-Si 합금에서 3DAP 및 TEM을 활용한 β" 석출상의 조성 및 구조분석

이미영 (한국생산기술연구원, 전북대학교, 한국과학기술연구원), 박지욱 (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), Dieter Isheim, David N. Seidman (Northwestern University), Calin D. Marioara (SINTEF Industry), Randi Holmestad (Norwegian University of Science and Technology), 이석재 (전북대학교), 최두영 (한국생산기술연구원, 한국과학기술연구원), 김재황* (한국생산기술연구원, 한국과학기술연구원, 과학기술연합대학원대학교)

Break Time | 15:15

좌장: 김명균 (포항산업과학연구원)

알루미늄4-1 | 15:25

비열처리형 Al-5Mg-2Si-Mn 주조용 합금의 개량화 기구 연구

강청아 (한국재료연구원, 부산대학교), 정수진 (포항산업과학연구원), 이윤호 (한국재료연구원), 이제인 (부산대학교), 조영희* (한국재료연구원)

알루미늄4-2 | 15:40

상용 7075 알루미늄 합금의 2단시효 열처리에 따른 기계적 특성 분석

송세라 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 박지욱 (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이미영 (한국생산기술연구원, 한국과학기술연구원, 전북대학교), 김재황* (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원)

알루미늄4-3 | 15:55 **Canceled**

고온 열처리된 Al-Mg-Si계 합금의 열안정성에 미치는 Ni 미량원소의 영향

남수민 (한국재료연구원, 경북대학교), 김용유, 이재석, 어광준 (한국재료연구원), 최명식 (경북대학교), 손현우* (한국재료연구원)

알루미늄4-4 | 16:10

Effect of alloy series and welding technology on cryogenic properties and hydrogen embrittlement of aluminum weld joints

남지민 (부산대학교), 이승건 (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교)

알루미늄4-5 | 16:25

Atom probe tomography의 검출효율이 Al 합금 클러스터 분석 결과에 미치는 영향

박지욱 (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이미영 (한국생산기술연구원, 한국과학기술연구원, 전북대학교), 송세라 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 김재황* (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원))

상변태

위원장 : 박은수 (서울대학교)
총무간사 : 류욱하 (국립금오공과대학교),
임가람 (한국재료연구원), 최현주 (국민대학교)
Room 401A, 04월 24일

좌장 : 류욱하 (국립금오공과대학교)

상변태1-1 | 09:00

Elastic Modulus and Inverse Hall-Petch Relationship in Pure Metals

Nam Heo* (I LINK)

상변태1-2 | 09:15

Frank-Reed Source and Fatigue Life in Metals

Nam Heo* (I LINK)

상변태1-3 | 09:30

Yield Drop and Lüders Strain Magnitude In Steels

Nam Heo* (I LINK)

Break Time | 09:45

좌장 : 류욱하 (국립금오공과대학교)

상변태2-1 | 10:00

Thermodynamic and Kinetic Behaviors in Gradient Rejuvenated Amorphous Microwires

Shuang Su (Harbin Institute of Technology, Seoul National University), Myeong Jun Lee (Seoul National University), Zhiliang Ning*, Yongjiang Huang (Harbin Institute of Technology), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

상변태2-2 | 10:15

Zr계 비정질 합금의 구조에 따른 헬륨 이온 조사 반응 연구

이명준, 유근희 (서울대학교), 윤국노, Medhi Balooch, Peter Hosemann (University of California Berkeley), 박은수* (서울대학교)

상변태2-3 | 10:30

Formation Behavior of Initial Medium-Range Order (MRO) in Amorphous Matrix with Multiple Immiscible Elements

Subin Ahn, Hyungi Min, and Eun Soo Park* (Seoul National University)

상변태2-4 | 10:45

Martensitic Transformation in Metastable Austenitic Stainless Steel during Electrochemical Process

채준영, 이귀형 (서울대학교), 조영근 (포항공과대학교), 정다믈, 권영균 (경희대학교), 정인호 (서울대학교), 김성준 (포항공과대학교), 한흥남* (서울대학교)

상변태2-5 | 11:00

적층결함 에너지 (Stacking Fault Energy) 조절을 통한 작은 결정립의 Fe-Mn-Si계 형상기억합금 조성설계

윤제인, 박은수*, 김지영 (서울대학교)

상변태2-6 | 11:15

분말야금 VC기반 공구강의 상 형성 거동에 미치는 탄소 함량의 영향

박성민 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 정소진 (한국생산기술연구원), 정야호 (코나솔), 박광석 (한국생산기술연구원), 고원석 (인하대학교), 서보성 (한국생산기술연구원), 김대하 (포항금속소재산업진흥원), 김동회* (고려대학교), 박형기* (한국생산기술연구원)

상변태2-7 | 11:30

Influence of Intercritial Annealing on the Microstructure and Tensile Properties of Extremely Low-Carbon Dual-Phase Steels

Wonhui Jo (Kookmin Univ.), Cho Hyeon Lee (Kookmin Univ.), Seonghyeon Yang (Kookmin Univ.), Taehyeong Kim (Pukyong National Univ.), Junseok Lee (Pukyong National Univ.), Seong-Tak Oh (Hyundai-steel), Yong-Min Hyun (Hyundai-steel), Jae Wung Bae (Pukyong National Univ.), and Jae Bok Seol* (Kookmin Univ.)

Break Time | 11:45

좌장 : 임가람 (한국재료연구원)

상변태3-1 | 14:00 초청강연

Control of Precipitates in 7xxx Aluminum Alloys through Optimized Heat Treatment

Hyunjoo Choi*, Dae-Young Kim, Cho Hyun Lee, and Jaebok Seol* (Kookmin University)

상변태3-2 | 14:25

Analysis of the gamma prime size effect on the cP4 to hP24 Phase Transformation behavior of a Co-based superalloy system

민현기 (서울대학교), W.Streit Cunningham (University of California, Santa Barbara), 윤국노 (University of California, Berkeley), 김민석 (서울대학교), 고원석 (인하대학교), Daniel S Gianola* (University of California, Santa Barbara), 박은수* (서울대학교)

상변태3-3 | 14:40

Atomistic Insights into the Additive Manufacturing of NiAl Shape-Memory Alloys via Molecular Dynamics

Jong-Hoon Park and Won-Seok Ko* (Inha University)

상변태3-4 | 14:55

Ga 및 Si 첨가에 따른 Cu 기반 컬러 합금의 광학적 • 기계적 특성 제어

조가은, 김기범*, 홍성환, 박혜진, 강결찬 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 장성문 (세종대학교)

상변태3-5 | 15:10

적층 결함 에너지 제어 기반 미세조직 변형 제어를 이용한 Cu-5Al-5Zn-1Sn 합금의 기계적 및 광학적 특성 거동 연구

강결찬, 조가은, 정의감, 조창희, Yusupov Dilshodbek, 박혜진, 홍성환 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범* (세종대학교)

상변태3-6 | 15:25

Effects of Precipitation Composition on Mechanical Properties in Lead-Free Brass Alloys

이지은, 박은수* (서울대학교), 이시연 (원진금속(주))

Break Time | 15:40

좌장 : 최현주 (국민대학교)

상변태4-1 | 15:50

CrMnFeCoNi계 고엔트로피합금의 FCC/HCP 마르텐사이트 변태 및 형상기억특성 제어를 위한 조성비 영향 분석

임진수랑, 이제인* (부산대학교)

상변태4-2 | 16:05

미세조직 제어를 통한 CrMnFeCoNi계 고엔트로피 합금의 형상기억 특성 향상

정휘윤, 임진수랑, 이제인* (부산대학교)

상변태4-3 | 16:20

CoCrNi계 중엔트로피 합금의 시효 열처리에 따른 석출 거동 및 강화 메커니즘 정량적 분석

한상윤, 류채우* (홍익대학교)

상변태4-4 | 16:35

MoNbTaTiV 고엔트로피 합금의 Si pack cementation 코팅에 대한 Al의 영향

박지니, 오정석, 김선진, 박준식* (국립한밭대학교)

상변태4-5 | 16:50

Al-Ti 비율 조절에 따른 AlTiVCr 고엔트로피 합금의 미세구조 변화와 변형 메커니즘 분석

홍동성, Yusupov Dilshodbek, 하준수, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, Kiran Shinde, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

상변태4-6 | 17:05

상 제어 기반 고엔트로피 합금 코팅의 미세조직 분석 및 다층구조 설계

이유진, 서진오, 현명우, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

자원순환형 알루미늄 합금 판재 심포지엄

위원장 : 김용신 (동신모텍)
실무위원 : 김명균 (포항산업과학연구원), 신승현 (동신모텍)
Room 401B, 04월 24일

좌장 : 강헌 (한국생산기술연구원)

순환1-1 | 09:00 초청강연

알루미늄 스크랩 재활용 주요기술 현황과 발전

김용신*, 김병규, 신승현 ((주)동신모텍)

순환1-2 | 09:20 초청강연

탄소 저감을 위한 재활용 알루미늄 잉곳 제조 기술 개발

김병철*, 김대영 ((주)디에스리퀴드 기술연구소)

순환1-3 | 09:40 초청강연

재활용 알루미늄 잉곳 활용에 따른 슬라브 연속주조

최성규*, 신종옥, 심현석 ((주)동산테크)

Break Time | 10:00

좌장 : 신재혁 (한국자동차연구원)

순환2-1 | 10:10 초청강연

저탄소 알루미늄 스크랩 재활용 산업 및 기술현황
김명균*, 하원 (포항산업과학연구원)

순환2-2 | 10:30 초청강연

자동차용 알루미늄 판재의 고정형 열처리 기술 개발
강헌*, 손석원 (한국생산기술연구원)

순환2-3 | 10:50 초청강연

6xxx계 알루미늄 합금판재의 생성상 및 기계적 물성 변화에 대한 미소 원소 함량 변화의 영향
주경석, 정영길, 신재혁* (한국자동차연구원)

Break Time | 11:10

좌장 : 임현규 (한국생산기술연구원)

순환3-1 | 11:20 초청강연

탄소배출저감을 위한 알루미늄 판재 적용기술 연구개발동향
정준영*, 권혁민, 김경보, 강성찬, 유창열, 정연일 (현대자동차 AVP본부)

순환3-2 | 11:40 초청강연

Advancing the Welding and Joining Technologies of Recycled Aluminum Sheets for Automotive Application
Jungyu Choi, Deepak Kumar (Incheon National University), Anupam Vivek (Applied Impulse Inc), and Taeseon Lee* (Incheon National University)

생체재료

위원장 : 김유찬 (한국과학기술연구원)
총무간사 : 이주헌 (한양대학교), 이준민 (POSTECH)
Room 401B, 04월 24일

좌장 : 이준민 (POSTECH)

생체1-1 | 14:00 초청강연

첨단분석기법을 활용한 생체 재료의 나노 구조 분석
정찬원* (부경대학교)

생체1-2 | 14:20 초청강연

High Throughput in-situ Spray Polymerization for Electronic Textiles
Taehoo Chang* (Incheon National University)

생체1-3 | 14:40 초청강연

인공지능 현장진단기술
이정훈* (고려대학교)

생체1-4 | 15:00

Mechanically Reinforced Cell Therapeutic Tool as a Multi-Scale Osteochondral Bioniche with Functional biominerals
Seongsoo Kim (KIST, Biomaterials Research Center), Myungchul Lee* (KIST, Medicinal Materials Research Center), and Hojeong Jeon* (KIST, Biomaterials Research Center)

생체1-5 | 15:15

Mechanical Modulation of Mesenchymal Stem Cell Differentiation to Osteoblast Using a Pressing Agarose gel
Si-Eun Moon and Hojeong Jeon* (Korea University, Korea Institute of Science and Technology (KIST))

생체1-6 | 15:30

Laser Direct Patterning of Cerium Oxide for Anti-Inflammatory Effect
Hojun Kim (Korea Institute of Science and Technology, Seoul National University), Johyun Yoon, Seung-Kyun Kang* (Seoul National University), Sangihn Han*, and Hojeong Jeon* (Korea Institute of Science and Technology)

좌장 : 정현도 (한양대학교)

생체2-1 | 15:45 초청강연

Ultrasound-driven Triboelectrification for Powering Electronics
Hong-Joon Yoon* (Gachon University)

생체2-2 | 16:05 초청강연

Biodegradable Multichannel Nerve Conduits for Peripheral Nerve Regeneration
Jahyun Koo* and Yerim Lee (Korea University)

생체2-3 | 16:25 초청강연

Bioelectronics for Physiological Fluid Monitoring
Jihye Kim* (Ajou University)

생체2-4 | 16:45

Metabolic Fragmentation of Bioactive Peptides: Mechanism and Implications for Bio-functional Stent Development
Khandoker Asiqur Rahaman and Hyung-Seop Han* (Korea Institute of Science and Technology)

생체2-5 | 17:00

High-Performance Biodegradable Fiber Electrodes for Sustainable Wearable and Implantable Electronics
Jinho Kim and Jaehong Lee* (Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology)

생체2-6 | 17:15

Fully Biodegradable Thermoelectric Device Based on Polycrystalline Mg_2Si Thin Film
Junseok Shim, Jiwoo Gu, and Seung-Kyun Kang* (Seoul National Univ.)

수소재료 II

위원장 : 강남현 (부산대학교)
총무간사 : 김영민 (한국재료연구원),
박형기 (한국생산기술연구원), 손석수 (고려대학교),
천동원 (포항공과대학교)
Room 402A, 04월 24일

좌장 : 이동현 (충남대학교)

수소3-1 | 09:00

Thermodynamic Modeling of Mn-Ti-X-H Quaternary Systems
오상호 (포항공과대학교), 백민아 (한국생산기술연구원), 노승효, 강민우, 박지혜 ((주)현대자동차), 나태욱 (한국생산기술연구원), 이병주* (포항공과대학교)

수소3-2 | 09:15

세차 전자 결정학을 활용한 Ti-Fe-O 합금 내 수소 결합위치 규명
강재동, 크리슈나모한 테케파트 (한국과학기술연구원), 윤영철, 전초록 (한국과학기술연구원, 서울대학교), 이승철, 김진우* (한국과학기술연구원)

수소3-3 | 09:30

A Unified Finite Element Framework for Hydrogen Embrittlement: Thermodynamic Formulation and Numerical Verification
Geonjin Shin, Jinheung Park (Seoul National University), Kijeong Kim, Seungchae Yoon, Hyejin Kim (Hyundai Steel Company), and Myoung-Gyu Lee* (Seoul National University)

수소3-4 | 09:45

Impact toughness and fracture behaviour of commercially pure titanium at cryogenic temperature
Min-Su Lee*, Jeong-Chan Lee (KITECH (Gangneung)), Sung-Hwan Kim (KITECH (Dongnam)), Dain Choi, Tea-Sung Jun (Incheon National University), and Chang-Soo Park (KITECH (Gangneung))

수소3-5 | 10:00

Fabrication-Dependent Hydrogen Embrittlement and Deformation Behavior of Ti6Al4V Alloy at 15 K
Nguyen Tien Dung, Taeho Lee, Keun Hyung Lee, Dong-Hyung Lee, and Soo Yeol Lee* (Chungnam National University)

수소3-6 | 10:15

산소 함량에 따른 산소 안정화 금속간 화합물 Ti_2FeO_x의 수소화 기구
윤영철 (한국과학기술연구원, 서울대학교), 강재동 (한국과학기술연구원), 크리쉬나모한 테케파트, 이승철 (한국과학기술연구원), 박은수* (서울대학교), 김진우* (한국과학기술연구원)

Break Time | 10:30

좌장 : 박창수 (한국생산기술연구원)

수소4-1 | 10:40

그린수소 생산을 위한 Zn 전기도금 기반 Raney Ni 전극 제작 및 촉매 성능 분석
신은경, 최윤일* (한국생산기술연구원)

수소4-2 | 10:55

Ni 수전해 촉매의 산소 농도에 따른 알칼라인 수전해 성능 변화 연구
박태윤, 박성민, 차은빈 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 서보성, 박형기*, 박광석* (한국생산기술연구원), 김동회* (고려대학교)

수소4-3 | 11:10

Capacitive-Nanogap Hybrid H_2 Sensor: Tunable and Reliable Monitoring Using Sonication-Induced Pd Cracks
Sang-kil Lee*, Joonho Lee, Jiwwo Hong, Kyu Hyoung Lee*, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

수소4-4 | 11:25

알칼라인 수전해용 Ni 촉매의 산화 온도 및 산화 시간에 따른 OER 거동
차은빈 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 서보성, 마승현 (한국생산기술연구원), 김동회 (고려대학교), 박광석* (한국생산기술연구원)

이차전지용 니켈 원료소재 심포지엄

위원장 : 손일 (연세대학교)
실무위원 : 이병필 (포항산업과학연구원)
Room 402A, 04월 24일

좌장 : 강영조 (동아대학교)

니켈1-1 | 14:00 초청강연

이차전지용 니켈 산업 트렌드, 공급망 재편 및 시장 전망
박재범* (포스코경영연구원)

니켈1-2 | 14:25 초청강연

니켈 산화광 선광 기술 현황 및 향후과제
한성수*, 이원재, 서주범 (한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터), 박태준 (한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원소재연구센)

니켈1-3 | 14:50 초청강연

니켈 산화광의 수소환원 거동에 대한 기초 연구 및 속도론적 해석
서민석*, 박진균, 이병필, 우광선 (포항산업과학연구원)

Break Time | 15:15

좌장: 박진균 (포항산업과학연구원)

니켈2-1 | 15:30 초청강연

효과적 니켈 회수를 위한 전처리 공정에 따른 니켈 선철의 미세조직 거동 변화
서보성, 차은빈, 마승현, 박광석* (한국생산기술연구원)

니켈2-2 | 15:55 초청강연

니켈-철 합금으로부터 황산니켈 제조 연구
김우진*, 김민철, 박상칠 (고려아연(주))

니켈2-3 | 16:20 초청강연

Development of EA-P and Solvent Extraction-Based Refining Technology for High-Purity Nickel Recovery from Nickel Pig Iron (NPI)
김명석 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 배성욱 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 박경태, 신재홍* (한국생산기술연구원)

니켈2-4 | 16:45 초청강연

MLCC공정 슬러지로부터 니켈회수 및 양극재 원료용 고순도황산니켈 제조
서장현*, 안덕규*, 김은혁* ((주)새빗켐)

적층제조 및 분말 I

위원장 : 김형섭 (포항공과대학교)
총무간사 : 홍순직 (공주대학교), 강민철 (3D프린팅연구조합)
Room 402B, 04월 24일

좌장 : 배재웅 (부경대학교)

적층1-1 | 09:00

Wire Arc Additive Manufacturing(WAAM)으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 및 고온 압축 기계적 특성
김수빈 (인하대학교), 감동혁 (한국생산기술연구원), 이기안* (인하대학교)

적층1-2 | 09:15

Thermomechanical Behaviour and Microstructural Evolution in Nodes and Sturts of Face-Cantered Cubic Lattice Structures During Laser Powder Bed Fusion Processing
Muhammad Raihan Hashmi, Soung Yeoul Ahn, Gitaek Lee (postech), Jae-il Jang, Zhe Gao (Hanyang university), Renhao Wu, and Hyoung Seop Kim* (postech)

적층1-3 | 09:30

열처리된 적층제조 Ti-6Al-4V 합금이 3.5 wt. % NaCl 수용액에서 나타내는 부식 거동
강창민, 장희진* (조선대학교)

적층1-4 | 09:45

재사용 횟수에 따른 Ti 분말 특성 변화가 Directed Energy Deposition 공정으로 제조된 코팅재 다공성 구조에 미치는 영향
김대현, 조성재 (국립공주대학교), 안승준, 고은하 ((주)인스텍), 홍순직* (국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터(CAMP²))

적층1-5 | 10:00

Thermal strain 해석을 통한 L-PBF 공정에서의 Non-contact supports 파라미터 연구
김오섭, 김민수, 이창열, 김정호* (인하대학교)

적층1-6 | 10:15

L-PBF 공정의 세라믹 절연 기판 적용을 통한 잔류응력 및 소성변형 제어
안성열* (포항공과대학교), 정상국 (Tohoku University), 이기택 (포항공과대학교), 채호병, 우완측 (한국원자력연구원), 김은성, Muhammad Raihan Hashmi, Levin Sebastian Cahyaputra (포항공과대학교), 홍순익 (충남대학교), 김형섭 (포항공과대학교)

Break Time | 10:30

좌장 : 문종언 (공주대학교)

적층2-1 | 10:45

최적 조성구배 Ni-Fe 경사기능재료의 설계 및 레이저 직접 적층 제조
조해주, 정종욱, 이욱진* (부산대학교 공대 재료공학부)

적층2-2 | 11:00

IN625 완충층 적용을 활용한 DED Hastelloy X / IN792 이종소재 접합간 미세균열 방지 전략
성예찬 (경상국립대학교), 김범준 (경상국립대학교, (주)갓테크), 박기덕 ((주)갓테크), 서성문, 이형수 (한국재료연구원), 김형섭 (포항공과대학교), 김정기* (경상국립대학교)

적층2-3 | 11:15

Laser Powder Bed Fusion 공정변수에 따른 Haynes 230 적층소재의 결함 형성 및 미세조직 변화
김지수 (한국생산기술연구원, 경북대학교), 성지현 (한국생산기술연구원), 이해민, 김균섭 (휴니드테크놀러지스), 박성혁 (경북대학교), 김다혜* (한국생산기술연구원)

적층2-4 | 11:30

DED 공정으로 제조된 Inconel 738LC 합금의 후열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화
강호성, 김정기* (경상국립대학교)

적층2-5 | 11:45

레이저 분말 베드 용융법 내 공정매개변수 미세 조정을 통한 순구리의 전기전도도 개선
김연우 (한국재료연구원, 부산대학교), 안소라 (한국재료연구원), 박하음 (한국재료연구원, 고려대학교), 박기철 (파트너스랩(주)), 김육진 (현대자동차), 최윤석* (부산대학교), 박정민* (한국재료연구원)

좌장 : 이지운 (공주대학교)

적층3-1 | 14:00 **Canceled**

Additive Manufacturing of SKD / 17-4PH Functionally Gradient Materials via Powder Bed Fusion: Enhancing the molding efficiency for casting Al-Si piston for Hybrid Vehicles
Raj Narayan Hajra, Woong Choo, Kyunsuk Choi, and Jeoung Han Kim* (Hanbat National University)

적층3-2 | 14:15

차량 대형 부품 적용을 위한 L-PBF 공법 AlSi10Mg 합금의 GMAW 용접 조건별 미세조직 및 기계적 특성 연구
주효문, 조영래, 장연하, 용왕현, 조영철, 김성진, 김한재* (현대자동차), 조정호* (충북대학교)

적층3-3 | 14:30

Peculiar Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of γ-TiAl Alloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion
Sung-Hyun Park, Ozkan Gokcekaya, and Takayoshi Nakano* (Osaka University)

적층3-4 | 14:45

DED 공정을 통해 알루미늄 합금에 코팅된 Al6061-TiB_2 금속 기지 복합재의 내마모 특성 평가
김형섭 (한국과학기술원), 김성진 (현대자동차), 유승찬 (한국원자력연구원), 이태규, 김우혁 (국립한밭대학교), 류호진* (한국과학기술원)

적층3-5 | 15:00

분말 표면 제어 및 강화재 이식을 활용한 적층제조 기반 야금 공정의 개념 확장
이태규* (국립한밭대학교)

적층3-6 | 15:15

인프로세스 모니터링 시스템을 활용한 적층 제조 양산 품질 제어
이우진* (이오에스지엠비에이치한국지사)

적층3-7 | 15:30

EIGA 공법을 활용한 Cu 분말 제조 공정 최적화 및 L-PBF 적층재 기계적 특성 평가
노구원, 박은수*, 기성후, 김영겸, 전창우 ((주)이엠엘)

Break Time | 15:45

좌장 : 박정민 (한국재료연구원)

적층4-1 | 16:00

Enhanced Cryogenic Tensile Properties of Additively Manufactured STS316L via Nano-Oxide Dispersion of Reusable Powder

Cho Hyeon Lee, Won Hui Jo (Kookmin University), Hyoung Seop Kim (Pohang University of Science and Technology), and Jae Bok Seol* (Kookmin University)

적층4-2 | 16:15

Wire Arc Additive Manufacturing으로 제조된 316L 스테인리스강의 미세조직 및 기계적 특성의 이방성

서예진, 황원구 (인하대학교), 김찬규, 송상우 (한국재료연구원), 이기안* (인하대학교)

적층4-3 | 16:30

미세조직 기반 열처리 최적화를 통한 적층 제조 및 단조 17-4PH 스테인리스 강 이종 용접부의 기계적 특성 개선

주하연, 김종훈 (국립창원대학교소), 이지원, 최용혁 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)

적층4-4 | 16:45

316L 스테인리스 강-구리 복합재의 3차원 격자 구조 제조 및 열 · 기계적 특성 분석

최동인, 조영환, 정경재, 김이재, 박민우, 이시환 (서울대학교), 최현주 (국민대학교), 최인석 (서울대학교), 강성규* (경상국립대학교), 한흥남* (서울대학교)

적층4-5 | 17:00

급속 냉각 열간 정수압 가압 처리(URQ-HIP)가 금속 재료 압출 적층 제조(MEX)로 제조된 17-4PH 석출경화형 스테인리스강의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향

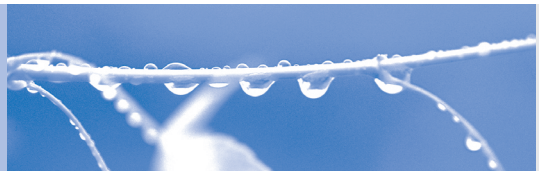
조용훈 (인하대학교), 전주현 (Quintus Technologies Korea), 김주용 (리프로텍), 윤중열 (한국재료연구원), 이기안* (인하대학교)

적층4-6 | 17:15

Optimization of Heat Treatment Conditions for Mechanical Properties in Heterogeneous Structures: A Study on L-PBF Fabricated 17-4 PH Stainless Steel

김영경 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 안소희 (한국생산기술연구원), 이승호 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 임하은 (한국생산기술연구원, 경희대학교), 윤종천 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 최균석 (한밭대학교), 어두림* (한국생산기술연구원)

ORAL SESSION III 4월 25일



고온재료

위원장 : 서성문 (한국재료연구원)
총무간사 : 김진우 (한국과학기술연구원), 전종배 (동아대학교), 윤대원 (한국재료연구원)
Room 201A, 04월 25일

좌장 : 윤대원 (한국재료연구원)

고온1-1 | 09:00

열간 단조 공정 시 고품질 단조품 생산을 위한 항공엔진 소재의 내부 기공 압착 모델 개발
김인서*, 박준희*, 김낙수* (서강대학교)

고온1-2 | 09:15

비대칭 단조품의 플래시 및 단조품 결함 저감을 위한 예비성형체 설계 방법
박준희, 박동휘, 김낙수* (서강대학교)

고온1-3 | 09:30

Effects of layer thickness and heat treatment conditions on creep elongation of L-PBF IN718
심영래 (한국재료연구원, 동아대학교), 도정현, 이상원, 최백규, 김인수 (한국재료연구원), 전종배* (동아대학교), 정중은* (한국재료연구원)

고온1-4 | 09:45

Additive Manufacturing of a High γ' Ni-Based Superalloy CW247 via EBM Process: Composition Optimization and its High Temperature Performance
Tae-Gyeong Kim (Changwon National University), Chan-Hee Lee (Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)), Hyun-Uk Hong* (Changwon National University), Byoung-Soo Lee, and Hae-Jin Lee (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH))

Break Time | 10:00

좌장 : 전종배 (동아대학교)

고온2-1 | 10:10

Inconel 718 합금의 석출경화 열처리에 따른 기계적 특성 연구
손명숙*, 강희재*, 안두홍*, 안성철*, 손인수* (한화에어로스페이스)

고온2-2 | 10:25

열처리 조건에 따른 Inconel 718의 석출상 제어와 고온 성형성 향상에 관한 연구
안지섭, 여승현, 조아라, 이나경 (한국생산기술연구원, 부산대학교), 정명식, 황선광* (한국생산기술연구원)

고온2-3 | 10:40

Meta-Model 기반 PQ IN718 소재 수침 위상배열초음파검사 적용을 위한 주요인자 최적화 연구
유일현, 박민혁, 박익근, 강동찬* (서울과학기술대학교)

고온2-4 | 10:55

인코넬 939 계열 니켈계 내열합금의 조성 제어에 따른 미세구조 및 기계적 특성 최적화 전략
김동환, 김민석, 박은수* (서울대학교)

고온2-5 | 11:10

Y_2O_3 첨가가 니켈 초합금의 미세구조와 기계적 특성에 미치는 영향
박성현, 최승혁, 이상화, 이석재, 정재길* (전북대학교)

Break Time | 11:25

좌장 : 홍현욱 (국립창원대학교)

고온3-1 | 11:35

Waspaloy 안정화열처리가 고온인장특성에 미치는 영향
강희재, 안두홍, 손명숙, 안성철, 손인수* (한화에어로스페이스)

고온3-2 | 11:50

석탄 화력 발전소 보일러 튜브 감육법 및 검사 장비
한수지*, 이한상*, 정진성 (한전전력연구원), 김정태 (한국중부발전), 이승욱 (한국서부발전), 정의민 (한국남부발전), 이길재 (한국동서발전)

고온3-3 | 12:05

원전 사고조건에서 사고저항성 핵연료용 코팅피복관의 고온산화 거동 평가
이성용*, 이충용, 임광영 (한전원자력연료)

고온3-4 | 12:20

High-Temperature Fatigue Behavior Characteristics of ARAA Steel, Advanced Reduced Activation Alloy for Structural Materials in Fusion Reactors
Yun-Seung Lee*, Hyeong-Yeon Lee, Ki-Ean nam (Korea Atomic Energy Research Institute), Hyoseong Gwon, Yi-Hyun Park, and Mu-Young Ahn (Korea Institute Fusion Energy)

고온3-5 | 12:35

H급 가스터빈 고온부품용 소재 물성 데이터베이스
윤희수, 박재영 (한국표준과학연구원), 윤대원, 유영수 (한국재료연구원), 정우상 (한국과학기술연구원), 송전영, 마영화 (두산에너빌리티), 김효진, 손진일 (테스코(주)), 남승훈 (한국표준과학연구원)

타이타늄

위원장 : 홍재근 (한국재료연구원)
총무간사 : 이현석 (RIST), 김경민 (세아창원특수강),
이제인 (부산대학교), 이상원 (한국재료연구원)
Room 201B, 04월 25일

좌장 : 김경민 (세아창원특수강)

타이타늄1-1 | 09:00

Ti-2Al-9.2Mo-2Fe 합금의 석출상 제어에 따른 준정적 인장 및 동적 피로 특성 분석
신수홍, 이동근* (순천대학교)

타이타늄1-2 | 09:15

Sn 첨가에 의한 미세 결정립 구조 타이타늄 합금
남연우, 고성철 (한국재료연구원, 부산대학교), 심재원 (한국재료연구원), 이제인* (부산대학교), 이상원* (한국재료연구원)

타이타늄1-3 | 09:30

미량원소 첨가를 통한 강산 환경에서의 타이타늄 부식저항성 향상 연구
박지원 (한국재료연구원, 부산대학교), 강남현 (부산대학교), 김재혁*, 홍재근* (한국재료연구원)

타이타늄1-4 | 09:45

양극산화 공정을 활용한 타이타늄의 알칼리, 해수 부식 저항성 향상 연구
박수빈* (한국재료연구원, 부산대학교), 이제인 (부산대학교), 홍재근*, 김재혁* (한국재료연구원)

타이타늄1-5 | 10:00

상온에서 초탄성 거동을 보이는 Ti-xNb-8Sn (x = 10, 11, 12, 13)(at. %) 합금의 탄성계수 및 recrystallization texture 에 미치는 Nb 의 영향.
김수영, 구태균, 남태현* (경상국립대학교)

Break Time | 10:15

좌장 : 이제인 (부산대학교)

타이타늄2-1 | 10:25

Commercially Pure Ti-Pd 합금의 고온 변형 거동 분석
이현석*, 장경현, 최미선* (포항산업과학연구원(RIST))

타이타늄2-2 | 10:40

Ti-5Mo-xFe 합금의 Fe함량에 따른 기계적 특성 평과와 변형 메커니즘 분석
김홍민, 이동근* (국립순천대학교)

타이타늄2-3 | 10:55

Ti-6Al-4V 합금의 열처리 온도 별 미세조직 변화에 따른 인장 특성 및 충격인성 분석
황정우 (한국재료연구원, 국립창원대학교), 양준하, 김재호 (한국재료연구원), 정영웅 (국립창원대학교), 염종택* (한국재료연구원)

타이타늄2-4 | 11:10

Al의 첨가가 TRIP Titanium 합금의 기계적 특성에 미치는 영향
고성철, 남연우 (한국재료연구원, 부산대학교), 심재원 (한국재료연구원), 최윤석* (부산대학교), 이상원* (한국재료연구원)

타이타늄2-5 | 11:25

Investigating Cryogenic Pre-Stain Behaviour of Pure Titanium
Ha-Seong Baek*, Hyun-Hak Kang (Incheon National University), Yong-Taek Hyun (Korea Institute of Materials Science), and Tea-Sung Jun (Incheon National University)

대형 차체부품용 알루미늄 주조기술 심포지엄

위원장 : 이형석 (㈜삼기)
실무위원 : 최지석(㈜삼기), 윤상일(㈜삼기)
Room 202A, 04월 25일

좌장 : 윤상일 (㈜삼기)

차체부품1-1 | 09:00 초청강연

컴팩트 가압주조용 고유동 · 고강도 알루미늄 매트릭스 합금설계
최승규 (한국자동차연구원, 전북대학교), 방현식, 김진평* (한국자동차연구원)

차체부품1-2 | 09:25 초청강연

금속분말 특성 제어를 위한 제조공정 연구
박성주 (주식회사에코파우더), 임영석, 손명균, 이한찬* (주식회사이엠에스)

차체부품1-3 | 09:50 초청강연

Door Inner Panel 생산을 위한 주조 공정 열 변형 해석
한도석*, 이승철, 도신혁 (서강대학교)

차체부품1-4 | 10:15 초청강연

컴팩트 가압주조 적용 다운사이징 최적화 고품질 일체형 도어 인너 프레임 개발
최지석 (삼기), 강동하, 강정민 (현대자동차), 김효섭 (한국생산기술연구원), 심종철 (인성), 윤상일* (삼기)

Break Time | 10:40

좌장 : 임영택 (서울대학교)

차체부품2-1 | 11:00 초청강연

다이캐스팅 설비 플런저 시스템내 Load-cell 센서를 활용한 사출압력 데이터 신뢰성 확보기술
이광희*, 최형규* ((주)세미코)

차체부품2-2 | 11:25 초청강연

대형 차체부품 알루미늄 주조 공정에서 진공밸브 공기 배출 단면적 변화가 진공 형성에 미치는 영향
최경한* (한국신소재산업(주))

차체부품2-3 | 11:50 초청강연

컴팩트 가압주조 다이캐스팅 금형의 열피로 및 용손 특성
윤국태*, 김주업, 홍창완, 이락규, 김선주 (대구기계부품연구원), 윤상일 ((주)삼기), 김형신 (세아창원특수강), 양상규 (대국정공(주))

차체부품2-4 | 12:15 초청강연

시뮬레이션을 활용한 컴팩트 가압주조 알루미늄 유동 해석
송호섭, 최지석, 윤상일* (삼기오토모티브)

가공-소성가공

위원장 : 배규열 (POSCO)
총무간사 : 강용준 (한국재료연구원),
문경일 (한국생산기술연구원), 오세권 (한국생산기술연구원),
이광석 (한국재료연구원), 이제인 (부산대학교)
Room 202B, 04월 25일

좌장 : 윤은유 (한국재료연구원)

소성1-1 | 09:00

Study of the Influence of Process Condition Parameters on the Press Forming on Zinc-Coated Steel Sheets
Jiyoung Kim*, Seung-Chae Yoon, Jin-Hwa Jeon (Hyundai steel company), and Myoung-Gyu Lee (Seoul national University)

소성1-2 | 09:15

Analysis of the Formability of Steel Sheets Considering Friction Effect in the Stamping Process
Seung-Chae Yoon*, Ji-Young Kim, Byong-Keuk Jin (Hyundai-Steel R&D Center), and Yun-Jun Song (Hyundai Motor Company)

소성1-3 | 09:30

Analysis of Mechanical Trimming Methods to Enhance the Performance of Aluminized Hot-Stamped Vehicle Parts
Seung-Chae Yoon* (Hyundai-Steel R&D Center), Seong-Guk Son (Hyundai · Kia Namyang R&D Center), Jea-Myoung Park, Kye-Jeong Park, Je-Youl Kong, and Kyoung-Ju Sohn (Hyundai-Steel R&D Center)

소성1-4 | 09:45

페라이트계 스테인리스 냉연강판의 리징(Ridging) 분석 방법 개발
정양진, 안덕찬 (㈜포스코), 박진흥 (Ohio State University), 이형림*, 이명규* (서울대학교)

소성1-5 | 10:00

3DQ 기술 및 부품 개발 연구
이석규*, 김소연 (현대자동차㈜), 박현경, 정지원 (㈜디에이치)

소성1-6 | 10:15

A Semi-Analytical Approach for Numerical Analysis of Residual Stress in Oxide Scale Grown on Hot-rolled Steels
Jigang Yoon, Yeongje Jun, Wooram Noh* (Andong National Univ.)

Break Time | 10:30

좌장 : 김정기 (경상국립대학교)

소성2-1 | 10:40

단조 휠의 원가절감을 위한 로타리 단조 기술 개발
배찬희*, 김영찬 (현대자동차기초소재연구센터), 최완희, 박동암, 이근길 ((주)알룩스)

소성2-2 | 10:55

Sedimentation of Fe-Containing Particle in Aluminum Melt via Electric Current
Jang Hyun Bae (Korea Institute of Industrial Technology, Seoul National University), Chan Gyeol Yun (Korea Institute of Industrial Technology, Inha University), Heung Nam Han (Seoul National University), and Moon-Jo Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)

소성2-3 | 11:10

SUS316L 금속 분말의 Bead Mill을 이용한 판상화(Flake) 가공 시 공정 변수에 따른 영향 분석 Analysis of the Effect of Process Parameters on Flake Processing of SUS316L Metal Powder Using a Bead Mill
이한찬*, 손명균, 임영석, 최순호, 권희준, 임혜경, 이지희 ((주)이엠에스 기술연구소)

소성2-4 | 11:25

마찰용접에 의한 이종소재 마찰용접부의 초음파 나노표면개질 공정에 따른 영향 분석
최언준 (한국재료연구원, 경상국립대학교), 우영윤 (한국재료연구원), 김정기 (경상국립대학교), 신재우, 조재현 (케이에스피), 윤은유* (한국재료연구원)

소성2-5 | 11:40

Reverse Engineering of Material Properties Using Bayesian Probability and Finite Element Analysis: Application and Validation on the Ring-Pull Test
Bohye Jeon (Changwon National Univ.), Carlos Tomé (MST-8, Los Alamos National Lab.), Youngung Jeong* (Changwon National Univ.), and Laurent Capolungo* (MST-8, Los Alamos National Lab.)

항공재료

위원장 : 이홍철 (공군 항공기술연구소)
총무간사 : 김시호 (공군 항공기술연구소),
석무영 (한국재료연구원), 송민환 (한국항공우주산업)
Room 203, 04월 25일

좌장 : 박현일 (한국재료연구원)

항공1-1 | 09:00

항공기 투명창 성형공정 개발
정대호, 김덕성, 안교진, 이재훈, 송민환* (한국항공우주산업(주))

항공1-2 | 09:15

전투기 캐노피용 투명 전도성 코팅에 대한 연구
윤영준* (한국세라믹기술원), 김용환 (인포비온), 홍익표 (공주대학교), 황민제, 최광식 (한국항공우주산업)

항공1-3 | 09:30

PMMA 진공 성형의 두께 균일성 확보를 위한 변형 메커니즘 분석
백민재, 신윤우, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남 (한국재료연구원), 김덕성, 정대호, 송민환, 정유인 (한국항공우주산업(주)), 최현성* (한국재료연구원)

항공1-4 | 09:45

항공용 알루미늄 압출재 기계가공 유한요소해석을 위한 이방성을 고려한 연성파단 물성 실험
심현보, 이승환, 신윤우 (한국재료연구원), 정찬욱 (동양AK), 오석근 (KAI), 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성* (한국재료연구원)

항공1-5 | 10:00

항공용 Aluminum 소재의 균열 개시해석에 따른 파단면 분석 사례
조은준* (한국항공우주산업(주)), 석무영, 권용남 (한국재료연구원), 손진일 (테스코(주)), 장영환 (한국항공우주산업(주))

Break Time | 10:15

좌장 : 석무영 (한국재료연구원)

항공2-1 | 10:25

항공기 엔진용 소재 개발을 위한 핵심 요구도 분석

안수진*, 송민환, 정유인 (한국항공우주산업(주))

항공2-2 | 10:40

항공기 제트 엔진 블레이드용 TiAl 4822 합금의 질화 처리에 따른 마모 및 피로 특성

정영훈, 이용재, 박정연, 김홍민 (국립순천대학교), 유주현 (한화에어로스페이스), 이동근* (국립순천대학교)

항공2-3 | 10:55

Ni일방향 초내열합금에서 Zr원소가 액적 젖음성과 주조성에 미치는 영향

진혜승 (국립창원대학교), 한승전, 최은애, 서성문, 정일석 (한국재료연구원), 구지호 (두산에너빌리티(주)), 이재현* (국립창원대학교)

항공2-4 | 11:10

장기간 지속되는 시험의 셋업 건전성 확인 방안

정근완, 이원석* (한국항공우주산업(주))

항공2-5 | 11:25

블록카운팅 기법을 적용한 항공기 구성품 수명 예측

정영훈 (경상국립대학교), 은성진 (경상국립대학교, (주)테스코), 노건우 (경상국립대학교), 손진일 ((주)테스코), 조은준 (한국항공우주산업), 김정기* (경상국립대학교)

Break Time | 11:40

좌장 : 최현성 (한국재료연구원)

항공3-1 | 11:50

적층 가공 기술을 활용한 인공결함 시편 제작 및 비파괴검사 신뢰성 추정

구현수 (국방대학교), 권혁준, 김영찬 (공군 항공기술연구소), 이두열* (국방대학교)

항공3-2 | 12:05

ML-DIC 이미지를 이용한 인공지능 기반의 Al 합금 과대하중 시 피로 균열전파 거동 분석

김도현, 최영원, 좌비오, 이승환, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남* (한국재료연구원)

항공3-3 | 12:20

ML-DIC 이미지를 활용한 알루미늄 합금에서의 피로 균열 전파의 인공지능 기반 분석

최영원, 좌비오, 김도현 (한국재료연구원, 경북대학교), 이승환 (한국재료연구원), 신윤우 (한국재료연구원, 경북대학교), 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남* (한국재료연구원)

항공3-4 | 12:35

항공용 금속소재의 피로 균열 치유를 위한 펄스전류 인가 공정설계

홍범락 (한국재료연구원, 부산대학교), 최현성, 석무영, 이동준, 권용남, 박현일* (한국재료연구원)

이차전지 원료소재

위원장 : 손일 (연세대학교)
총무간사 : 이병필 (포항산업과학연구원), 강영조 (동아대학교), 김영재 (인하대학교)
Room 삼다A, 04월 25일

좌장 : 서민석 (포항산업과학연구원)

이차전지1-1 | 09:30

FeO-rich 슬래그와 용융 Fe-Ni 합금 사이의 황 분배 거동: 라만 분광법을 활용한 구조적 이해

남세현 (한양대학교), 최준성, 박진균 (포항산업과학연구원), 박주현* (한양대학교)

이차전지1-2 | 09:45

이차전지 상공정 리사이클링 기술 개발

송현직*, 한상우, 이주승, 이환석, 박중길 (포스코홀딩스미래기술연구원)

이차전지1-3 | 10:00

Investigation of Li Penetration Mechanism in Sagger Oxides During Cathode Material Calcination

Young-Joon Park, Won-Bum Park (GIFT, POSTECH), Juhun Lee, Jaewon Kim, Inkyung Bae (POSCOFUTUREM), and Youn-Bae Kang* (GIFT, POSTECH, DMSE, POSTECH)

이차전지1-4 | 10:15

리튬광석 하소 공정 중 로터리 킬른 내부에 생성되는 클링커와 융착물의 생성 메커니즘 규명

박성환 (한양대학교), 이승석 (포스코 미래기술연구원), 박주현* (한양대학교)

Break Time | 10:30

좌장 : 김영재 (인하대학교)

이차전지2-1 | 10:40

메탄술폰산과 말릭산을 이용한 리튬이차전지 양극활물질의 전략금속 침출 및 메커니즘 분석

김유진 (서울과학기술대학교), 김재연 (한국재료연구원), 변재원* (서울과학기술대학교)

이차전지2-2 | 10:55

Investigation of Moisture-Induced Degradation Mechanism in Sulfide Solid Electrolytes and Reviving Strategies for Electrode Interface Stabilization

Yujeong Hwang, Hwiho Kim, and Jongwoo Lim* (Seoul National University)

이차전지2-3 | 11:10

Novel Surface Activation Treatment for Enhanced Direct Bonding Between Aluminum 8079 and Cast Polypropylene using Triazine Derivatives and their Mixtures

Emmanuel Appiah, Kim Jeoung Han*, Jin Woong Park, Byoung Jun Han, and Jung Hyun Kang (Hanbat National University, Materials Science and Engineering)

이차전지2-4 | 11:25

리튬 이차전지용 실리콘 음극재를 위한 Si-Al-Ti-Fe 합금 설계 및 미세조직 · 전기화학적 특성 평가

김지용 (인하대학교), 서종민, 양정윤, 석은 (강원대학교), 김상욱 (로터스머티리얼즈), 정구환* (강원대학교), 성재욱*, 현승균* (인하대학교)

에너지재료

위원장 : 신병하 (한국과학기술원)
부위원장 : 박찬진 (전남대학교)
총무간사 : 남대현 (고려대학교), 오지훈 (한국과학기술원), 유상우 (경기대학교)
Room 삼다B, 04월 25일

좌장 : 심욱 (한국에너지공과대학교)

에너지1-1 | 09:00

Facet Modulation of Cu_2O Nanoparticles for Selective CO_2 Reduction

Dong-Hyun Shin (Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology) and Dae-Hyun Nam* (Korea University)

에너지1-2 | 09:15

Ligand-Modified Cu Sulfide Catalysts for Selective CO_2 Reduction

Seo-June Park (Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), Jeong-Gyu Lee (Dongguk University), Seolha Lim (Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), Min-Jae Choi* (Dongguk University), and Dae-Hyun Nam* (Korea University)

에너지1-3 | 09:30

원자 단위 촉매를 활용한 전기화학적 탄소 포집 용액 전환 시스템

최현욱 (한국과학기술원), 송학현, Carlos A. Fernández, Po-Wei Huang, Marta C. Hatzell* (조지아공과대학교), 오지훈* (한국과학기술원)

에너지1-4 | 09:45

산성 환경에서의 효율적인 이산화탄소 환원 촉매 및 시스템

하태현, 오지훈* (한국과학기술원(KAIST))

Break Time | 10:00

좌장 : 남대현 (고려대학교)

에너지2-1 | 10:10 초청강연

Three-Dimensionally Nanofabricated Ir Nanoarchitecture Electrode for Highly Efficient and Robust PEMWE

Jong Min Kim* (Korea Institute of Science and Technology)

에너지2-2 | 10:35

Silicon Photocathode with Vertically Aligned TiO_2 Nanorods and CO Catalyst for Enhancing Photoelectrochemical Nitrate Reduction to Ammonia

Enok Lee and Sanghan Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology)

에너지2-3 | 10:50

탠덤 반응 기반 이중원자촉매를 이용한 전기화학적 암모니아 합성

서정원, 최현욱, 공유진, 오지훈* (한국과학기술원)

에너지2-4 | 11:05

Electrochemical Urea Oxidation Using High-Entropy Transition Metal Dichalcogenide Catalysts

Hyojung Lim, Jinuk Choi, Junho Shim (Korea Institute of Energy Technology (KENTECH)), and Uk Sim* (Korea Institute of Energy Technology (KENTECH), NEEL Sciences, Inc.)

에너지2-5 | 11:20

CoNiCuRu on MWCNT Catalyst for Electrochemical Ammonia Synthesis from Nitrate Under Ambient Conditions

Jinuk Choi, Gyoung Hwa Jeong, Hyojung Lim (Korea Institute of Energy Technology), Tae-Hoon Kim (Chonnam National University), Hyunjung Park (Chosun University), and Uk Sim* (Korea Institute of Energy Technology, NEEL Sciences, Inc.)

역학측정 II

위원장: 한흥남 (서울대학교)
총무간사: 김영천 (국립안동대학교)
Room 300, 04월 25일

좌장 : 김종형 (부경대학교)

역학2-1 | 09:00

Dual phase FeMnCoCr계 고엔트로피합금의 상분율에 따른 수소 영향 분석

정지윤, 정현, 이동현* (충남대학교)

역학2-2 | 09:15

전사 공정을 이용한 메타광소재 기반 디스플레이 소자의 메타패턴 유무 및 공정 온도에 따른 나노스케일 계면 특성 분석

박연경, 박민지, 신기승 (울산대학교), 정주연, 최준혁, 최대근 (한국기계연구원), 전은채* (울산대학교)

역학2-3 | 09:30

Ultra-sensitive Crack Sensors for Measuring Mechano-biological Signals

Do-Hoon Kwon, Jae-Hwan Lee, Yoon-Nam Kim (Seoul National Univ.), Jun-Sang Lee (Purdue Univ.), and Seung-Kyun Kang* (Seoul National Univ.)

역학2-4 | 09:45

나노스케일 MXene 박막 차폐재의 500시간 지속 굽힘 조건에서 시간 경과에 따른 저항 및 크랙 거동 분석

박민지, 조아름, 박연경, 박태원, 신기승, 손슬미 (울산대학교), 박재은, 진영호, 권순용 (울산과학기술원), 이정구, 전은채* (울산대학교)

역학2-5 | 10:00 초청강연

Micromechanical Properties of Additively Manufactured Copper Microarchitectures Under Extreme Loading Conditions

Sung-Gyu Kang* (Gyeongsang National University)

Break Time | 10:25

좌장 : 전한솔 (계명대학교)

역학3-1 | 10:35 초청강연

나노카드보드 구조의 역학적 특성과 공중 부양 장치로의 활용
김종형* (국립부경대학교), Benjamin Schafer, 황경석, Joost Vlassak (Harvard University)

역학3-2 | 11:00

Investigating the Carbon Effect on the Tensile Strength in 6061 Aluminum Alloy-C Thin Films
Zion Lee, Hojang Kim, Sunkun Choi, Injong Oh (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Jaehong Park (Hyundai Motors), and Gi-Dong sim* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

역학3-3 | 11:15

Exploring Micromechanical Behavior of Laser-Powder Bed Fusion Processed Multi-Layered Medium-Entropy Alloy
Zhe Gao (Hanyang University), Dong-Hyun Lee (Chungnam National University), Yakai Zhao (Institute of Materials Research Engineering), Hyoung Seop Kim (POSTECH), Upadrasta Ramamurty (Nanyang Technological University), and Jae-il Jang* (Hanyang University)

역학3-4 | 11:30

Prediction Convolutional Neural Network Based Residual Stress Prediction Using Indentation Plastometry
박민우, 정든봄 (서울대학교), 정경재 (성균관대학교), 한흥남* (서울대학교)

역학3-5 | 11:45

나노 석출물과 전위 상호작용의 마이크로 범위 모델링
연경미, 류일*, 심규장 (서울대학교)

집합조직

위원장: 김동익 (한국과학기술연구원)
총무간사: 전태성 (인천대학교)
Room 301, 04월 25일

좌장 : 김동익 (한국과학기술연구원)

집합1-1 | 09:00

Investigating deformation mechanism of AZ31 alloy in the temperature range of 25˚C ~ 200˚C
Dain Choi and Tea-Sung Jun* (Incheon National University)

집합1-2 | 09:15

점소성 다결정 결정 소성 모델을 활용한 동적 재결정 모사 및 검증
전보혜 (국립창원대학교), Carlos N Tomé (Los alamos national Laboratory, MST-8), 정영웅* (국립창원대학교)

집합1-3 | 09:30

고강도강판에서의 변형모드와 잔류응력에 따른 수소취성 특성
송상윤, 이건직 (고려대학교), 신건진 (서울대학교), 김기정, 엄호용, 정승필, 현주식 (현대제철), 이명규 (서울대학교), 손석수* (고려대학교)

집합1-4 | 09:45

Investigating creep anisotropy behaviour of pure titanium at cold creep temperature
Ha-Seong Baek (Incheon National University), Min-su Lee (Korea Institute of Industrial Technology), Jeong-Rim Lee (Korea Institute of Industrial Technology), Yong-Taek Hyun (Korea Institute of Materials Science), and Tea-Sung Jun* (Incheon National University)

집합1-5 | 10:00

Pattern matching indexing기법을 활용한 변형량 정량 분석
강주희*, 김민성 (웨이브센스)

집합1-6 | 10:15

고강도/저철손 무방향성 전기강판의 GGA중 결정성장 거동과 자성특성 변화
홍재완*, 김재훈 (POSCO 기술연구원), 박종태 (POSCO 기술연구원, 포항공과대학교)

Break Time | 10:30

좌장 : 신중호 (강릉원주대학교)

집합2-1 | 10:40

직접 암모니아 연료전지용 분리판 소재의 고온 암모니아 분위기 부식 거동 고찰
한지수 (한국과학기술연구원, 고려대학교), 허주열 (고려대학교), 김동익* (한국과학기술연구원)

집합2-2 | 10:55

구리 전해도금 시 유기첨가제에 따른 박막 내 불순물과 미세조직/집합조직 간의 관계
박현*, 신한균, 김정한, 이효종 (동아대학교)

집합2-3 | 11:10

Effects of the Schmid factor and strain compatibility on twin variant selections and twin transmissions of Mg alloys
Jaehyung Cho*, G.Y. Lee, H.S. Jang (Korea Institute of Materials Science), and S.H. Choi (Sunchon National University)

집합2-4 | 11:25

실시간 3D-XRD 시험을 이용한 마그네슘 합금의 변형기구 분석
이상봉* (국립금오공과대학교), 김영민 (한국재료연구원), Gaoming Zhu (Helmholtz-Zentrum Hereon), Ulrich Lienert (Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)), Dietmar Letzig (Helmholtz-Zentrum Hereon)

집합2-5 | 11:40

Role of recovery in Mg-Zn-Nd-Y-Zr alloy studied via ex-situ EBSD scans and crystal plasticity simulation with dislocation density model
Youngung Jeong* (Changwon National University) and Jose Victoria-Hernandez (Helmholtz-Zentrum Hereon)

집합2-6 | 11:55

강판 두께 변화에 따른 열이력이 핫스탬핑 공정을 모사한 고온 인장 특성에 미치는 영향
지민기 (인천대학교), 손현성 (포스코), 전태성* (인천대학교)

재료분석

위원장 : 허윤욱 (포항공과대학교)
총무간사 : 김성대 (국립부경대학교)
Room 303, 04월 25일

좌장 : 김성대 (국립부경대학교)

분석1-1 | 09:00

TEM 회절패턴 자동해석 프로그램 (REDI, RIST Electron Diffraction Interpreter)
강성* (포항산업과학연구원(RIST))

분석1-2 | 09:15

In-Situ μ-DIC Study of Strain Localization in B_4C-Reinforced Al Metal Matrix Composite at High Temperature
Min-Su Lee, Chan-Wool Ahn (Korea Institute of Industrial Technology), Tea-Sung Jun (Incheon National University), Donghyun Lee, Junghwan Kim, Seungchan Cho (Korea Institute of Materials Science), and Chang-Soo Park* (Korea Institute of Industrial Technology)

분석1-3 | 09:30

Rapid Synthesis of Large-Area and Super-Flat Single-Crystal Graphene
Yongqiang Meng (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Meihui Wang (Institute for Basic Science (IBS)), Minhyeok Kim (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Anirban Kundu (Institute for Basic Science (IBS)), Alisher Sultangaziyev (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong* (Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

분석1-4 | 09:45

아연욕 내의 Al이 융용 아연 도금 시 젖음성에 미치는 영향
신상훈 (포항공과대학교), 서신욱 (포스코), 정창곤 (포항공과대학교), 김영하 (포스코), 허윤욱* (포항공과대학교)

분석1-5 | 10:00

Thermal Aging Effect on the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of High-Nitrogen Austenitic Stainless Steel
Seongjun Kim, Junhyuk Ham, and Ji Hyun Kim* (Ulsan National Institute of Science and Technology)

분석1-6 | 10:15

4D-STEM 기반 전자회절 패턴 분석을 통한 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ 박막의 다형체 상의 정량 분석
성민찬, 정지훈, 이기용 (한국에너지공과대학교), 박범수 (삼성전자), 오상호* (한국에너지공과대학교)

분석1-7 | 10:30

High-Quality Graphite Films with Mirror-Like Surfaces from Ni-Mo Melts
Liyuan Zhang, Meihui Wang (Institute for Basic Science), Yongqiang Meng (Institute for Basic Science, UNIST), Sun Hwa Lee (Institute for Basic Science), Dongho Jeon, Myeonggi Choe, Zonghoon Lee (Institute for Basic Science, UNIST), Won Kyung Seong* (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, UNIST)

분석1-8 | 10:45 **Canceled**

In-situ STEM-DPC biasing을 이용한 OLED 소자 내 전기장 분포 이미징
윤진하, 이기용, 김종일 (한국에너지공과대학교), 신미향, 이용희, 한석규 (삼성디스플레이), 오상호* (한국에너지공과대학교)

Break Time | 11:00

좌장 : 허윤욱 (포항공과대학교)

분석2-1 | 11:10

슬라브 품질 등급 자동화 판정 방법에 관한 연구
박태창*, 김정관, 서용기 (현대제철연구소)

분석2-2 | 11:25

화력발전소 보일러 튜브 장시간 사용재 상태 분석
정진성*, 민혜련, 신동익, 김영대 (한전 전력연구원)

분석2-3 | 11:40

HR-XRD를 이용한 기능성 구조재료 내부응력 평가기술
홍은표, 유성주, 이의종, 최용규* (한국산업기술시험원)

분석2-4 | 11:55

폐리튬배터리 양극재를 수소 분위기에서 아크 플라즈마를 통한 합금을 제조 기술
노이준, 이창기, 김세호* (고려대학교)

분석2-5 | 12:10

Electric Current Driven Carbon Isotope Fractionation – Electromigration
Alisher Sultangaziyev (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Yongchul Kim (Institute for Basic Science (IBS)), Yongqiang Meng (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong* (Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

분석2-6 | 12:25

Large-Area Single Crystal Graphite using Metal Flux
Dongho Jeon (Institute for Basic Science, UNIST), Won Kyung Seong* (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, UNIST)

반도체

위원장 : 최창환 (한양대학교)
총무간사 : 이기영 (홍익대학교)
Room 한라A, 04월 25일

좌장 : 권용우 (홍익대학교)

반도체1-1 | 09:00

딥러닝 기반 원자이미지 분석을 활용한 Y-도핑된 HfO_2 에피택셜 박막의 미세구조 정량 분석
최하늘 (한국과학기술연구원(KIST)), 이근원 (국민대학교), 백승협 (한국과학기술연구원(KIST)), 조기섭 (국민대학교), 장혜정* (한국과학기술연구원(KIST))

반도체1-2 | 09:15

Cu to Cu Direct Bonding in the Air for Advanced Fine-Pitch 3D Packaging

Yu Hayoung, YehRi Kim, and Dongjin Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)

반도체1-3 | 09:30

Enhanced Memory Performance of Flash Memory Using TiN Metal-Dot embedded SiN_x Charge Trap Layer

Yun Seo Lim, San Park, Se Hyeon Choi, Bon Cheol Ku, Seong Ho Lee (Hanyang University), Hyung Jun Kim, Jae Hyun Yang, Bio Kim, Young Seon Son, Han Mei Choi (Samsung Electronics Co.Ltd.), and Chang Hwan Choi* (Hanyang University)

반도체1-4 | 09:45

Enhanced Conformality in ALD-based Cobalt Thin-Film in High-Aspect-Ratio Structures Using Plasma Pre-Treatment and Atomic Layer Etching

Yeh been Im, Young Seo Na, Hyun jin Lim, and Changhwan Choi* (Hanyang University)

반도체1-5 | 10:00

Exploring Substrate and Interlayer Effects in 2D vdW Heterostructure Growth

Lia Saptini Handriani, Suhee Jang, Hyuncheol Yun, and Won Il Park* (Hanyang University)

반도체1-6 | 10:15

Thermal Shock Reliability of Vertical Shunt Resistors for Double Side Cooling SiC Power Modules

Yeh Ri Kim (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Advanced Packaging Integration Center (APIC), Korea University), Kue Jin Han, Taeseong Han (KOSTECSYS Co., Ltd), and Dongjin Kim* (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Advanced Packaging Integration Center (APIC))

반도체1-7 | 10:30

양면방열 파워모듈용 고성능 방열 스페이서의 변형제어 구조설계에 따른 내열 성능 검증

김병찬, 김예리 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 한규진, 한태성 (코스텍시스), 김동진* (한국생산기술연구원)

재료정책 세션III

Room 한라A, 04월 25일

좌장: 석현광(한국과학기술연구원)

정책3-1 | 11:00

한국화학연구원의 탄소중립 연구분야 소개

이영국* (한국화학연구원)

철강B II-제선,제강,환경,에너지

위원장 : 김성연 (포스코)
총무간사 : 김성규 (포스코), 박주현 (한양대학교), 황병철 (서울과학기술대학교)
Room 한라B, 04월 25일

좌장 : 조성묵 (부경대학교)

철강B5-1 | 09:00

Modeling and Correlation Analysis for the Catalytic Activity of Binary Molten Alloy Catalysts in Methane Pyrolysis

Tae-Gyu Wi, Young-Joon Park (POSTECH), Uendo Lee (KITECH), and Youn-Bae Kang* (POSTECH)

철강B5-2 | 09:15

철광석 유동환원 공정의 sticking 현상 연구

김은주, 명다빈, Dereje Degefa Geleta, 서인국, 이준호* (고려대학교)

철강B5-3 | 09:30

수학적 모델링을 통한 분산판 유무에 따른 유동층 내 환원반응 거동 변화 모사

진봉민, 양현진* (인하대학교)

철강B5-4 | 09:45

Fundamental Research for Multi-Stage Hydrogen Reduction of Limonitic Ore

Seong-Jin Kim, Seongkyu Cho, Dohyeon Kim, Leonardo Rocha, and Sung-Mo Jung* (POSTECH)

철강B5-5 | 10:00

1073K에서 Fe의 침탄 반응속도에 미치는 CO-H_2 혼합가스 영향성 평가

조다한, 김영재* (인하대학교), 김혁 (현대제철)

철강B5-6 | 10:15

폐플라스틱 첨가 가탄재를 적용한 슬래그 포밍 특성 및 환원 반응 연구

안효주, 박노근* (영남대학교), 강영조, 심상철 (동아대학교), 이은진, 김효민 (머티리얼솔루션파크)

Break Time | 10:30

좌장 : 양현진 (인하대학교)

철강B6-1 | 10:40

Application of High-MgO Pellets as Raw Material for Blast Furnace Operations

Leonardo Rocha*, Dohyeon Kim, Seongkyu Cho (POSTECH), Hwanjae Kim (POSCO Ironmaking Engineering Group), Jung Ah Kim (POSCO Ironmaking Research Group), and Sung-Mo Jung* (POSTECH)

철강B6-2 | 10:55

제강-연주공정 연속 버블링 기술

김성줄* (㈜포스코 기술연구원 제강연구그룹)

철강B6-3 | 11:10

제강공장의 용강 물류 최적화를 위한 Crane 및 Ladle Tracking 기술

송민호*, 서성모, 장영환 ((주)POSCO)

철강B6-4 | 11:25

철강부산물 활용 복합소재용 무기장섬유 제조기술 개발 연구

정은진* ((재)포항산업과학연구원)

철강B6-5 | 11:40

Mn 함유 더스트 재활용 기술 개발

정용수*, 김현, 강순형, 김희원 (포항산업과학연구원(RIST)), 홍순곤 (POMIA)

나노융합소재

위원장 : 송재용 (POSTECH)
부위원장 : 김수영 (고려대학교)
총무간사 : 김정환 (국립한밭대학교), 이주헌 (한양대학교)
Room 400, 04월 25일

좌장 : 김효정 (세종대학교)

나노융합1-1 | 09:00 초청강연

Electrochemical Synthesis and Modification of Carbon-Based Materials

Sun Hwa Lee* (Institute for Basic Science, Ulsan National Instutute of Science and Technology), Won Kyung Seong (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Instutute of Science and Technology)

나노융합1-2 | 09:25 초청강연

Downscaling Effects on Resistivity of Topological Metal Nanowires for Interconnect Applications

Hyeuk Jin Han* (Sungshin Women's University)

나노융합1-3 | 09:50

AI-Integrated Woodpile SERS Substrates for Enhanced Noble Metal Nanostructure-Based classification

Young Woo Han (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering), Eojin Rho, Sungho Jo* (Korea Advanced Institute of Science and Technology, School of Computing), and Yeon Sik Jung* (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering)

나노융합1-4 | 10:05 **Canceled**

Liquid-Metal-Assisted Synthesis of Facet-Controlled MoP Single Crystals for Efficient Hydrogen Peroxide Production

Seo Hyun Kim (Sungshin Women's University), Jeong-Hyun Kim (Dongguk University), Bogeun Park, Byung-Hyun Kim (Hanyang University ERICA), Min-Jae Choi (Dongguk University), and Hyeuk Jin Han* (Sungshin Women's University)

나노융합1-5 | 10:20

Stoichiometry-Controlled Growth of 1T-VSe_2 Thin Films via Hybrid Deposition Method

Inhyeok Oh (Gwangju Institute of Science and Technology), Jung-woo Lee* (Hongik University), and Sanghan Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology)

Break Time | 10:35

좌장 : 한혁진 (성신여자대학교)

나노융합2-1 | 10:45 초청강연

Group-IV Semiconductor Nanowire Laser for Mid-Infrared Application

Youngmin Kim* (Kookmin University)

나노융합2-2 | 11:10 초청강연

Development of Non-Toxic Colloidal Quantum Dots for Infrared Sensing and Imaging

Min-Jae Choi* (Dongguk University)

나노융합2-3 | 11:35

Ultrafast and General Strategy for Direct Growth of Nanostructured Transition Metal Oxides on Substrates

Si Heon Lim (Kumoh National Institute of Technology), Geunwoo Kim (Korea University), Sungjin Cho (Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), University of Science and Technology (UST)), Yeong Kwon Kim (Kyungpook National University), Eun Bee Ko, Seon Yeon Choi, Jung A Heo (Kumoh National Institute of Technology), Daegun Kim, Hocheon Yoo (Gachon University), So-Yeon Lee (Kumoh National Institute of Technology), YongJoo Kim (Korea University), Pil-Ryung Cha (Kookmin University), Dong Yun Lee (Kyungpook National University), Sunghun Lee (Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DIGIST)), Byung Chul Jang (Kyungpook National University), Yeonhoo Kim (Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), University of Science and Technology (UST)), and Hyun Ho Kim* (Kumoh National Institute of Technology)

나노융합2-4 | 11:50

α-Al_2O_3/MLG 멤브레인을 이용한 지속 가능하고 친환경적인 인공 해수 기반 리튬 회수

정대엽, 김예림, 윤현철, 장수희, 박현수, 박원일* (한양대학교)

나노융합2-5 | 12:05

Morphology-Engineered ITO Nanotree Electrodes for Wide-Spectrum Modulated Smart Windows

Jae Han Chung, Yun-Haeng Cho, Ji-Hyeong Lee, Kwang-Mo Kang, Yoon-Chae Nah*, and Young-Seok Shim* (School of Energy, Materials and Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education)

복합재료

위원장 : 조승찬 (한국재료연구원)
총무간사 : 김정환 (한국재료연구원)
Room 401A, 04월 25일

좌장 : 조승찬 (한국재료연구원)

복합1-1 | 09:00

Synthesis of $Ti_3C_2T_x$ Nanoflake Reinforced Sn-58Bi Composite for Low-Temperature Solder Applications in Packaging

이재정, 쒸에한, 류혜지, 정두현, 우윤성* (단국대학교)

복합1-2 | 09:15

Effect of Zn or Ca Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Ti Composites Fabricated Through Liquid Metal Dealloying

Jang Jee-Eun, Hyun Jun Youn, Bo Hyun Park (Kyungpook National University), Soo-Hyun Joo (Dankook University), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

복합1-3 | 09:30

Al-Si 합금-질소 가스 간의 자발 반응을 통한 과공정 Al-Si 합금 기지 질화알루미늄 강화 복합재료 제조

최정원, 이제인* (부산대학교)

복합1-4 | 09:45

HP 및 SPS로 제조한 Al/B_4C 복합재료의 기지/입자 계면 및 강화기구 분석

권택규, 조의제* (순천대학교)

복합1-5 | 10:00

Al1100-B_4C-cBN 복합소재의 인장특성에 대한 압하율과 압연온도의 영향

안찬울 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 이민수 (한국생산기술연구원), 이동현, 김정환, 조승찬 (한국재료연구원), 손석수 (고려대학교), 박창수* (한국생산기술연구원)

복합1-6 | 10:15

진주층 구조 BMG-ZrO_2 복합소재의 기계적 특성에 미치는 침투온도의 영향

김태윤 (부산대학교), 오현석 (University of Wisconsin-Madison), 이제인* (부산대학교)

복합1-7 | 10:30

파괴인성이 향상된 핵융합로 플라즈마 대면부품용 W-Cr 복합재 제작 및 물성 평가

이성민, 김정석, 곽노준, 한흥남* (서울대학교)

복합1-8 | 10:45

Fe계 저열팽창 금속복합소재의 Ni 첨가 영향 및 열팽창 특성 Tailoring 연구

김민수, 신상민, 강민우, 조승찬, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 권한상 (부경대학교), 김정환* (한국재료연구원)

마그넷

위원장: 이우영 (연세대학교)
부위원장: 이정구 (한국재료연구원), 임혜인 (숙명여자대학교)
총무간사: 김태훈 (한국재료연구원), 이현숙 (연세대학교)
Room 401B, 04월 25일

좌장 : 이정구 (한국재료연구원)

마그넷1-1 | 10:30

Electrical Tuning of Compensation Temperature via Spin-Orbit Torque Induced Selective Exchange in HM/AFM/FIM Multilayers

WonChang Choi, Tae-Bo Sim, KwonJin Park, Tae-Hwan Kim, and Jung-Il Hong* (Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology (DGIST))

마그넷1-2 | 10:45

중희토류 합금리본활용 GBDP 공정의 보자력 향상에 대한 연구

주현빈 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 박승연, 정세린 (한국생산기술연구원), 오승주 (고려대학교), 임경묵* (한국생산기술연구원)

마그넷1-3 | 11:00

Micromagnetic Study on the Control of Chemically Induced Liquid Film Migration inside Nd-Fe-B Sintered Magnet

Ganghwi Kim (Ulsan National Institute of Science and Technology), Sujin Lee, Tae-Hoon Kim (Korea Institute of Materials Science), and Ki-suk Lee* (Ulsan National Institute of Science and Technology)

좌장 : 이정구 (한국재료연구원)

마그넷2-1 | 11:15

Fabrication of Fine-Grained Nd-Fe-B anisotropic magnets using single-crystalline particles synthesized by reduction-diffusion and oxidation-inhibited washing processes

Keunki Cho, Seol-mi Lee, Su-min Kim, Tae-Hoon Kim*, and Jung-Goo Lee (Department of Magnetic Materials, Korea Institute of Materials Science (KIMS))

마그넷2-2 | 11:30

Investigation of selection rules for the magnetocrystalline anisotropy (MCA) of permanent ferromagnets

Changhoon Lee* (Max Planck POSTECH Center for Complex Phase of Materials, Division of Advanced Materials Science, POTECH), Taesu Parrk (Department of Chemistry, POSTECH), Jae-Hoon Park (Max Planck POSTECH Center for Complex Phase of Materials, Department of Physics, POSTECH), Ji Hoon Shim (Department of Chemistry, POSTECH, Division of Advanced Materials Science, POTECH), and Myung-Hwan Whangbo (Department of Chemistry, North Carolina State University)

마그넷2-3 | 11:45

고포화자화 연자성분말 최적화 설계

김태영, 박언병 (RIST), 정재원 (KIMS), 최광덕 (서울대학교), 변지영 (KIST), 권기혁* (RIST)

마그네슘

위원장 : 임창동 (한국재료연구원)
총무간사: 이정훈 (경북대학교), 이내호 (다인경금속)
Room 402A, 04월 25일

좌장 : 김재연 (한국재료연구원)

마그네슘1-1 | 09:00

Effect of Al Content on Microstructure and Tensile Properties of Extruded SEN Magnesium Plates

Je Hyeong An, Hyung Jun Kim, Ji Yoon Lee (Kyungpook National University), Joung Sik Suh (Korea Institute of Materials Science), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

마그네슘1-2 | 09:15

열처리 방식에 따른 고강도 LPSO 합금의 미세조직 변화 메커니즘

이승엽, 유진영, 천세호, 이성호, 송종한, 박동준, 이정훈 (부산대학교), 김종현 (충칭대학교), 이태경* (부산대학교)

마그네슘1-3 | 09:30

다이캐스팅으로 제조된 AZ91계 고내식 마그네슘 합금
김정기, 민두원, 권재호, 박성수* (울산과학기술원)

마그네슘1-4 | 09:45

Low-Cycle Fatigue Properties of Extruded SEN Series Mg Alloys
Hyung Jun Kim, Ji-Yoon Lee (Kyungpook National University), Jun Ho Bae (Korea Institute of Materials Science), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

마그네슘1-5 | 10:00

금속 용탕 탈합금 공정 중 용탕 온도와 장입 시간이 Mg-Ti 복합재의 미세조직에 미치는 영향
윤현준, 장지은, 박보현 (경북대학교), 주수현 (단국대학교), 김영민 (한국재료연구원), 박성혁* (경북대학교)

마그네슘1-6 | 10:15

Strengthening 3D Interconnected Mg-Ti Composite Through Post-Al Alloying
Bo Hyun Park, Jang Jee-Eun, Hyun Jun Youn, In Sung Han (Kyungpook National University), Soo Hyun Joo (Dankook University), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

Break Time | 10:30

좌장 : 배준호 (한국재료연구원)

마그네슘2-1 | 10:40

미세조직 조절을 통한 마그네슘 합금판재의 전자기파 차폐능 향상
이상봉*, 강민혁, 김성제, 김경택 (국립금오공과대학교)

마그네슘2-2 | 10:55

탄도 충격에 노출된 AZ31 열연재의 소성 변형 및 파괴
이정훈, 유진영, 천세호, 이성호, 송종한, 박동준, 이승엽 (부산대학교), 이정훈 (경북대학교), 김현수, 김윤호 (서울대학교), 이태경* (부산대학교)

마그네슘2-3 | 11:10

Effects of Extrusion Ratio on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-5Bi-3Al Alloy
Gun Woong An, Sang-Cheol Jin, and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

마그네슘2-4 | 11:25

Mg합금/Cu의 재충전 이종 고상 마찰교반점용접
박시훈 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 김신일 (한국생산기술연구원), 김예리 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동진* (한국생산기술연구원)

마그네슘2-5 | 11:40

Density Functional Theory Investigation of Phase Transformation in Mg-Sc Shape Memory Alloys
Hye-Hyun Ahn and Won-Seok Ko* (Inha Univ.)

마그네슘2-6 | 11:55

스텐트용 2mm급 초정밀 고강도 마그네슘 미세튜브 제조기술 개발
서종식*, 임창동, 서병찬, 김하식, 이상은, 김재성 (한국재료연구원)

마그네슘2-7 | 12:10

이원계 Mg 합금에서 합금 조성 및 열처리 공정에 따른 비강도 및 열전도도 특성 변화
김재연*, 임창동, 강동현, 김정환, 장효선 (한국재료연구원)

적층제조 및 분말 II

위원장: 김형섭(포항공과대학교)
총무간사: 홍순직(공주대학교), 강민철(3D프린팅연구조합)
Room 402B, 04월 25일

좌장 : 김효섭 (한국생산기술연구원)

적층5-1 | 09:00

Laser Powder Bed Fusion으로 제조된 18Ni 마레이징 강의 시효 온도에 따른 마모 특성 분석
임승온, 공서윤, 김세희, 신세은* (순천대학교)

적층5-2 | 09:15

직접용융증착 중 스캔 전략 변화에 따른 18Ni300 마레이징 강의 미세조직 및 기계적 특성
주수빈, 노건우, 정영훈 (경상국립대학교), 백민재, 이동준 (한국재료연구원), 김정기* (경상국립대학교)

적층5-3 | 09:30

Uniform Rapid Quenching (URQ) HIP 공정을 활용한 M-MEX 적층제조 AISI D2 공구강의 인장 강도-연성 동시 향상
전민수, 박소연, 조용훈 (인하대학교), 백소령 (Markforged), Mathias Englund (Quintus Technologies), 이기안* (인하대학교)

적층5-4 | 09:45

Laser Powder Bed Fusion (LPBF) 로 제작된 Hastelloy X의 표면 거칠기 개선을 위한 전해연마 공정
조현빈, 권태진, 배진성 (국립부경대학교), 김현식 (한국세라믹기술원), 최용규 (한국산업기술시험원), 이정훈* (국립부경대학교)

적층5-5 | 10:00

Directed Energy Deposition 공정으로 제조된 CoCrFeMnNi 고 엔트로피 합금 적층재의 마모 조건에 따른 마모 거동 해석
백건우, 조성재, 김대현, 김현중, 홍순직* (국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

적층5-6 | 10:15

적층제조공정을 이용하여 제작된 경사기능형 내마모 경량철강 미세조직 및 기계적 성질에 대한 연구
박진수, 문준오* (국립창원대학교), 박성준, 권한솔 (한국재료연구원)

적층5-7 | 10:30

HVOF 공정으로 제조된 Fe계 비정질 합금과 WC 코팅층의 미세조직, 상온 및 고온 마모 특성
강민재, 원경운 (인하대학교), 함기수, 김폴 (코오롱 인더스트리), 이기안* (인하대학교)

Break Time | 10:45

좌장 : 주수현 (단국대학교)

적층6-1 | 11:00

Laser Powder Bed Fusion 공정으로 제조한 A20X 합금의 용체화 처리 온도에 따른 미세조직 및 물성변화

한규미 (포항공과대학교), 박하음, 조용희, 박정민 (한국재료연구원), 김정기* (경상국립대학교), 김형섭* (포항공과대학교)

적층6-2 | 11:15

L-PBF로 제조된 Ti-modified Al-Zn-Mg-Cu 합금의 미세조직과 기계적 특성

장동민, 김수빈 (인하대학교), 이마태 (포항공과대학교), 최중호, 김경태 (한국재료연구원), 이병주 (포항공과대학교), 이기안* (인하대학교)

적층6-3 | 11:30

균열 민감도 모델을 이용한 DED 및 PBF로 제조된 Al-Zn-Mg-Cu 합금의 균열 특성 비교

이마태 (포항공과대학교), 김수빈 (인하대학교), 사공만재 (포항공과대학교), 이기안 (인하대학교), 김형섭, 이병주* (포항공과대학교)

적층6-4 | 11:45

적층제조 AlSi10Mg 합금의 다양한 표면처리 공정 적용을 통한 표면조도 개선 및 기계적 특성 향상

박소연, R Kreethi (인하대학교), 박민재 ((주)쿠퍼시스템), 김경보 (인하공업전문대학), 이기안* (인하대학교)

적층6-5 | 12:00

레이저 분말 베드 용융법으로 적층제조된 탄소 첨가 CoCrFeMnNi 고엔트로피합금의 극저온 인장 거동

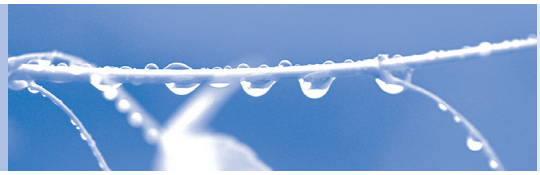
박하음 (한국재료연구원, 고려대학교), 권현석 (포항공과대학교), 김경태 (한국재료연구원, 한국재료연구원), 유지훈, 최중호 (한국재료연구원), 성효경 (국민대학교), 김형섭 (포항공과대학교, 도호쿠대학교), 손석수* (고려대학교), 김정기* (경상국립대학교), 박정민* (한국재료연구원, 고려대학교)

적층6-6 | 12:15

입자 성장 억제 및 HIP 공정을 통한 고밀도 Binderless WC 소결체 제조 및 특성 분석

곽종민 (한국재료연구원, 부산대학교), 박민수 (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교), 하국현* (한국재료연구원)

POSTER SESSIONS I 4월 23일



P1 : 알루미늄

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P1-1

전해질 내 전분 첨가가 알루미늄–공기전지 성능에 미치는 영향

박준엽, 박은하, 김정구* (성균관대학교)

P1-2

친환경 전해질 첨가제로서 호박씨 추출물의 알루미늄–공기 전지 적용 가능성

이근재, 손경호, 김정구* (성균관대학교)

P1-3

Al–Zn–Mg–Cu 합금의 고온 비틀림 시험에서 Zn이 미세조직 진화 및 고온 가공성에 미치는 영향

민병현 (인하대학교), 손태오 (HD한국조선해양), 이지운 (공주대학교), 박현순*, 현승균 (인하대학교)

P1-4

적층과 주조 공정을 통해 제조된 AlSi10Mg 합금의 열처리에 따른 미세구조 및 기계적 특성 분석

이희상 (홍익대학교), 문준혁 (서울대학교), 류채우* (홍익대학교)

P1-5

Investigation of Fatigue Properties of AA6061 Alloy at 15 K

Thanh Dat Nguyen, Taeho Lee, Tien-Dung Nguyen, and Soo Yeol Lee* (Chungnam National University)

P1-6

Al–Si 합금의 열처리에 따른 석출 거동 분석

문준혁 (서울대학교), 류채우* (홍익대학교), 박은수* (서울대학교)

P1-7

Al 클래드재의 브레이징 온도에 따른 접합 거동 및 특성 분석

고은찬*, 이병권 (한국생산기술연구원, 전남대학교), 유효상, 김용호, 손현택* (한국생산기술연구원), 김태훈 (전남대학교)

P1-8

박판주조공정으로 제조한 Al–Zn–Mg–Cu–Zr–Sc합금 판재의 인장특성

정대한 (한국재료연구원, 부산대학교), 임익범, 이윤수, 김원경 (한국재료연구원), 김양도* (부산대학교), 김형욱* (한국재료연구원)

P1-9

AA 2026 압출재의 냉간 변형 및 시효 처리에 따른 항복 강도 변화의 해석 방법에 대한 연구

김하늘, 강현우, 장병록*, 김희국* (인하대학교)

P1-10

개질화 원소 및 주조 온도에 따른 복합 주조 공정의 Al/Cu 바이메탈의 금속간화합물 미세화

임하윤 (한국재료연구원, 부산대학교), 김병주 (중소조선연구원), 천현석 (한국재료연구원, 부산대학교), 이윤수 (한국재료연구원), 이욱진 (부산대학교), 김수현* (한국재료연구원)

P1-11

Al–Mg_2Si–Cu–Zn 합금의 미세조직과 석출거동

전정민, 박성현, 이상화, 정재길* (전북대학교)

P1-12

Al–Si–Mn–Mg 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 합금 조성의 영향

김지수, 이혜인, 이민재, 김세훈* (한국자동차연구원)

P1-13

레이저 클래딩 적층 공정을 이용한 알루미늄 고압 다이캐스팅 금형 강화

최세원*, 김영찬, 김철우 (한국생산기술연구원)

P1-14

LED 헤드램프 방열판을 위한 고방열 · 고주조성 알루미늄 합금 개발 및 특성 평가

김철우*, 유효상, 김영찬, 최세원 (한국생산기술연구원)

P1-15

고용질 Al–Zn–Mg–Cu 합금의 고온변형거동 연구

정영길*, 신재혁, 김세훈, 주경석, 김진평, 한범석 (한국자동차연구원)

P1-16

소량의 Si을 첨가한 7075 알루미늄 합금의 적층 제조: 열처리를 통한 기계 및 전기화학적 특성 분석

채호병 (한국원자력연구원), 최가현, 김유섭, 홍순구 (충남대학교), 신은주 (한국원자력연구원), 이수열* (충남대학교)

P1-17

알루미늄 용탕 탈가스 거동에 미치는 교반 임펠러 및 불활성 가스 운용 조건의 영향

전해원, 김덕*, 하원, 김명균 (포항산업과학연구원)

P1-18

실험계획법을 이용한 모빌리티 헤드램프 알루미늄 방열판 고압주조 결함 정량화에 관한 연구

김영찬*, 김철우, 최세원 (한국생산기술연구원)

P1-19

Hillock 억제 및 전기적 특성 개선을 위한 Al 합금 타겟으로 제조된 박막 특성 평가

윤상민, 김정준, 김영균* (고등기술연구원)

P1-20

스크랩 첨가 비율 변화가 알루미늄 합금 소재 특성에 미치는 영향에 대한 연구

김선기*, 김경수, 이진욱 ((주)나이스엘엠에스), 이근효, 이상현, 정진아, 조대연, 김준현 (한국생산기술연구원), 양원석 (대한전선(주)), 구승현, 황종일 ((주)나이스엘엠에스)

P1-21

알루미늄 압출재의 결정립 제어를 위한 열처리 공정 조건 검토에 대한 연구

김선기* ((주)나이스엘엠에스), 김용호, 하성호, 이근효, 이상현, 조대연 (한국생산기술연구원), 윤상민, 김영균 (고등기술연구원), 구승현 ((주)나이스엘엠에스)

P1-22

EOL(End Of Life) 알루미늄 합금의 전이원소 제어를 위한 B 첨가 영향

장진혁, 김원호, 노정영, 연창한, 손정길, 김지혜* (포스코엠텍)

P1-23

4343/3003/4343 알루미늄 클래드재의 침식성에 미치는 냉간압연량의 영향

임익범 (한국재료연구원), 정대한 (한국재료연구원, 부산대학교), 김원경, 어광준, 김형욱* (한국재료연구원)

P1-24

알루미늄 합금의 Sr 원소 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가

유효상*, 김용호, 김철우, 이병권, 고은찬, 손현택 (한국생산기술연구원)

P1-25

공정조건에 따른 Al-Mg-Si계 합금 압연재의 미세조직 및 기계적 특성 비교 연구

이혜인, 김지수, 주경석, 정영길, 김세훈* (한국자동차연구원)

P1-26

Al-7Si-0.4Mg 주조 합금에서 용체화처리후 냉각속도가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

최예원, 손현우, 조영희, 이정무* (한국재료연구원)

P1-27

La 함량별 첨가가 Al-Si-Cu합금의 미세조직 및 부식특성에 미치는 영향

이현주, 정영민, 김경훈* (포항소재산업진흥원)

P1-28

주조 방법 및 La 첨가량에 따른 Al-Si계 합금의 특성 분석 연구

김대욱, 이현주, 김경훈* (포항소재산업진흥원), 김성탁* (한국생산기술연구원)

P1-29

고강도 알루미늄 합금 압출재의 인공 시효 조건에 따른 기계적 특성 평가

양현석, 윤상민, 정우철, 최광수, 공만식* (고등기술연구원)

P2 : 고엔트로피합금

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P2-1

철계 $L1_2$ 석출강화 합금의 냉간 압연 후 열처리 미세조직 및 기계적 물성

문광현, 김진경* (한양대학교)

P2-2

탄소 첨가 $L1_2$ 석출강화 철계 다성분계 합금의 미세조직 및 기계적 물성

윤주희, 김진경* (한양대학교)

P2-3

새로운 가공열처리 방식으로 미세구조를 제어한 $L1_2$석출강화 고엔트로피합금의 우수한 인장 물성

김진우, 이재흥, 이정완, 권현석, 박효진, 김은성, 허윤욱, 김형섭* (포항공과대학교)

P2-4

분말 강소성 가공을 통해 제작된 MEA-EHEA 다중 소재의 계층적 헤테로구조와 기계적 거동

하수빈, 손수정, 이정완, 김래언, 박효진, 김형섭* (포항공과대학교)

P2-5

$Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ 고엔트로피 합금의 저온 변형 거동 분석

김진섭, 김진경* (한양대학교)

P2-6

중엔트로피합금의 LPBF 후열처리를 통한 셀 네트워크 제어

정희재, 권현석, 김은성, 허윤욱 (포항공과대학교), 최중호, 김래언, 안성열, 오상호 (포항공과대학교), 박정민*, 이병주, 김형섭* (포항공과대학교)

P2-7

석출경화형 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금의 미세조직 및 전기화학적 부식 특성

이정민 (국립공주대학교), 배재웅 (부경대학교), 주수현 (단국대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 문종언* (국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

P2-8

정합 석출상 형성을 통한 초저온 강도 향상 및 불연속 소성 제어

장태진, 이건직, 송상윤, 성민영 (고려대학교), 이준호, 김영균 (한국재료연구원), 성효경 (국민대학교), Aparna Saksena, Baptiste Gault (Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH), 김세호 (고려대학교), Alireza Zargaran (포항공과대학교), 나영상* (한국재료연구원), 손석수* (고려대학교)

P2-9

Fe-Ni-Co super invar 합금에서의 Al, Ti 첨가 통한 석출강화 다원계 합금 설계

이상원, 정현 (고려대학교), 이태호 (한국재료연구원), 손석수* (고려대학교)

P2-10

Fe-Co-Ni-Cr-Mo계 중엔트로피 합금에서 V 첨가가 석출 거동, 미세조직, 기계적 물성에 미치는 영향 연구

박수정, 성지혜, 김태형 (단국대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 주수현* (단국대학교)

P2-11

CoCrNi계 중엔트로피 합금의 미세구조와 석출 거동에 따른 부식 특성 분석

강승연, 한상윤, 류채우* (홍익대학교)

P2-12

TiHfNb 기반 중엔트로피 합금의 상온 역학 특성 및 고온 산화 거동 규명

박태연, 이시연, 최인철* (국립금오공과대학교)

P2-13

In-situ TiC 강화형 NbTaVTi 고엔트로피 합금의 강화기구 및 기계적 특성

최혁재, 손도상, 유형규, 이진규* (공주대학교)

P2-14

$Fe(CoCrMnNi)_{100-x}$ 다성분계 합금에서 Fe 함량 변화가 마르텐사이트 형성 및 파괴 인성에 미치는 영향

정혜지 (국민대학교), 박상은 (두산에너빌리티), 박노근 (영남대학교), 설재복, 성효경* (국민대학교)

P2-15

Sustainable manufacturing and mechanical properties of $FeCrCoMnNiC_x$ high-entropy alloy (HEA) using ferroalloys feedstock

Yao Su, JinSeob Kim, JinKyung Kim, and JooHyun Park* (Hanyang University)

P2-16

내열 고엔트로피 합금의 격자 왜곡에 따른 전위 거동의 상관 관계 분석

이강진, 박강현, 정윤종 (공주대학교, 첨단분말소재부품센터), 한준희 (한국생산기술연구원), Peter K. Liaw (The University of Tennessee), 이찬호 (The University of Auburn), 송기안* (공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

P2-17

CrMnFeCoNi계 고엔트로피합금의 Ni 함량 조절에 따른 형상기억특성 제어

임진수랑, 정휘윤, 이제인* (부산대학교)

P2-18

Cr 및 Al 첨가에 따른 내열 고엔트로피 합금의 내산화성 및 기계적물성 영향 연구

신승환, 이강진 (공주대학교, 첨단분말소재부품센터), 이찬호 (The University of Auburn), 송기안* (공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

P2-19

Cr 함량 제어에 따른 $Al_{0.5}CoCr_{(1-x)}Fe_{(1+x)}NiTi_{0.1}$ 고엔트로피 합금의 부식 특성 및 기계적 특성 변화 연구

최순원, 박강현, 이정민, 권민철, 문종언, 송기안* (공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

P2-20

Ti-Zr-Hf-Ta-Mo 준안정 내열 고엔트로피 합금의 온도변화에 따른 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향

허민아, 정윤종, 이강진 (공주대학교, 첨단분말소재부품센터), 이찬호 (The University of Auburn), 송기안* (공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

P2-21

AlTiVCr 고엔트로피 합금의 Al-Ti 조성 변화에 따른 미세구조 및 변형 메커니즘 연구

홍동성, Yusupov Dilshodbbek, 하준수, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, Kiran Shinde, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

P2-22

Effect of Hydrogen-Reduced CoCrFeNi Nano Particle Addition on the Densification Behavior of Gas-Atomized CoCrFeNi High Entropy Alloy Powder for Free Furnace Sintering Process

Nelson Bayi, Minjong Kim, Taehyeob Im, Gertrude Mugwe Mongella, and Caroline Sunyong Lee* (Hanyang University)

P2-23

Ti 및 C 첨가가 FeCrNiMnCo 주조합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향

장성혁, 박성현, 이상화, 정재길* (전북대학교)

P2-24

Effect of Loading Conditions and Geometric Factors on Martensitic Transformation Tendency in Complex Concentrated Alloys (CCAs)

예정원, 민현기, 김동환, 이명규*, 박은수* (서울대학교)

P2-25

FCC 컴플렉스 고용 합금계의 조성-온도-결정립-강도 상관관계 구축

김동환, 안혜상 (서울대학교), 류욱하 (국립금오공과대학교), 정휘윤, 이제인 (부산대학교), 박은수* (서울대학교)

P2-26

다중 공형 압연된 $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$ 합금의 열처리에 따른 미세구조 변화

최지환, 임진수랑, 정휘윤, 이제인* (부산대학교)

P3 : 소프트소재

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P3-1

Rewritable Dual-Mode Optical Encryption Using Photoluminescence and Structural Color Modulation

Jong Gun Jung, Hyowon Han, Jin Woo Oh, Jiwon Kim, Gwanho Kim, Woojoong Kim, Minji Kwon, and Cheolmin Park* (Yonsei University)

P3-2

Light Emitting Tactile Visual Synapse Enabling Rehabilitation Monitoring

Woojoong Kim, Kyuho lee, Gwanho Kim, Minji Kwon, Jong Gun Jung, Jiwon Kim, and Cheolmin Park* (Yonsei University)

P3-3

MXene Aerogel-Based Moisture-Driven Energy Generator for Sustainable Power Production and Wearable Sensing

Minji Kwon, Kaiying Zhao, Gwanho Kim, Woojoong Kim, Jong Gun Jung, Jiwon Kim, and Cheolmin Park* (Yonsei University)

P3-4

Thermo-Adaptive Structural Color Display with an Artificial Synapse Based on MXene/PEDOT:PSS Transistor

Gwanho Kim, Seokyeong Lee, Woojoong Kim, Jiwon Kim, Jong Gun Jung, Mlnji Kwon, and Cheolmin Park* (Yonsei University)

P3-5

Triboelectric-Driven Structural Color Display for Finger-Motion Detection Enabled by Humidity-Responsive Photonic Crystal

Jiwon Kim, Taebin Kim, Jong Gun Jung, Gwanho Kim, Minji Kwon, Woojoong Kim, and Cheolmin Park* (Yonsei University)

P3-6

Unsorted Carbon Nanotube-Based Synaptic Transistor with Ion-Gel

Donghee Shin and Beomjin Jeong* (Pusan National University)

P3-7

Block Copolymer-Assisted Liquid Metal-Elastomer Composite Electrode Heater

Chanwoo Park and Beomjin Jeong* (Pusan National University)

P3-8

Nanoparticle-Embedded Microstructured Surface for Transparent Capacitive Pressure Sensing

Janghoon Choi and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P3-9

Pressure Sensor Using Conducting Polymer with Transparency and Tunable Plasma Frequency as an Organic Electrode

Jaehyeok Choi and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P3-10

Soft Tip Arrays for High-Throughput Scanning Probe Microscopy

Donghoon Oh and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P3-11

Enhancing Capacitive Pressure Sensors via surface Roughness Control

Bokyeong Kim and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P3-12

A Syringe-Type Hydrogel for Emergency Hemostasis and Rapid Adhesion in Sutureless Wound Repair

Kayoung Son, Tae Young Kim, and Jungmok Seo* (Yonsei University)

P3-13

Hydrogel-based Anisotropic Conductive Film for Highly Integrated Packaging in Soft Electronics

Yurim Lee, Yejin Jo, and Jungmok Seo* (Yonsei University)

P3-14

Highly Deformable Aluminum-Air Batteries with High Voltage Output

Hong Choi and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P3-15

Enhanced Insulation for Biometric Signal Monitoring Devices Using PDMS Vapor-Enhanced Deposition

Suhyeong lee, Soosang Chae* (Korea University of Technology and Education), and Jinhwan Kim (Korea Institute of Industrial Technology)

P3-16

The Effect of PDMS-Curing Agent Ratio on the Performance of PDMS Stamps in Contact Printing

Soyeon Kim* and Chaeyeon Moon* (Korea University of Technology and Education)

P3-17

Development of Stretchable Metal Thin-Film Electrodes on PDMS for Wearable and Biomedical Applications

Mincheol Kim* and SooSang Chae* (Korea University of Technology and Education)

P3-18

Human-Muscle-Inspired Fibre Actuator with Reversible Graphene Percolation

Sehwan Shin, Inho Kim, and Sangouk Kim* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

P3-19

Scalable 3D Graphene Hydrogel Fabrication via Interfacial Gelation of Graphene Oxide

Wonchul Choi, Uday Narayan Matti (Department of Physics, Indian Institute of Technology), and Sang Ouk Kim* (KAIST)

P3-20

Reconfiguring Polymer Network Topology via Photo-Tunable Crosslinkers

Sihwan Lee, Yong Eun Cho, Ho-Young Kim*, and Jeong-Yun Sun* (Seoul National University)

P3-21

Edge-Guided Directed Self-Assembly of Block Copolymers on 2D Flakes

Kyu Lim Kim, Jang Hwan Kim, andSang Ouk Kim* (KAIST)

P3-22

Wearable SERS-based Hydrogel Sweat Patch for Sensitive Biomarker Detection

Jiwoo Lim and Yeon Sik Jung* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

P3-23

Thermally Triggered Microbial Biodegradation for Sustainable Electronic Devices

Seokjun Cha and Yeon Sik Jung* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

P3-24

Multi-Layered Photonic Displays for Extremely High Fill Factors

김마가 (서울대학교), 공임보 (포항공과대학교), 김도윤, 선정윤* (서울대학교)

P4 : 재료강도

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P4-1

우수한 강도와 성형성을 위한 레이저 처리 합금의 국부적 오스테나이트화를 통한 표면 헤테로 구조 형성

최주미, 김래언, 구강희, 이정아, 최연택, 박효진, 김재훈, 김형섭* (포항공과대학교)

P4-2

SLM 공정으로 제조한 Ti-6Al-4V 합금의 β-stabilizer의 확산에 기반한 후열처리 조건 최적화

이아름, 한재연 (국립창원대학교), 김치원 (한국재료연구원), 이지원, 최용혁 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)

P4-3

기계적 모델링 기반의 능동전개형 생체 삽입 전자소자 설계

조지현, 황경석 (Harvard University), 배재영, 강승균 (서울대학교), 김주영* (UNIST)

P4-4

열처리를 통한 (111) 단결정 구리 박막 형성 메커니즘 분석

김수정, 곽지윤, 심영주, 김동현, 김주영* (UNIST)

P4-5

층상 미세구조 형성을 통한 9 wt% 니켈 강의 초저온 충격 인성 향상

홍석원, 김영훈, 이소현, 김주영* (UNIST)

P4-6

9%Ni강의 용접부 위치별 극저온 물성 평가

이근형, 송민지 (충남대학교), 김유섭 (한국원자력연구원), 이수열* (충남대학교)

P4-7

QST 공정으로 생산된 H 형강의 계장화 압입시험을 이용한 소성 쌓임과 기계적 물성의 상관관계 분석을 통한 잔류응력 측정

이소현, 김영훈, 전지헌, 김주영* (UNIST)

P4-8

Characteristics of Negative creep and Effect of Boron on the Creep Properties of IN617 Superalloy

Duhyun Kim, Gyeung-Ho Kim, Ehsan Norouzi* (Korea Institute of Science and Technology), Seok Su Sohn* (Korea University), Dong-Ik Kim, Jae-Hyeok Shim, Woo-Sang Jung, and Jin-Yoo Suh* (Korea Institute of Science and Technology)

P4-9

내화/내진 H형강재의 지진/화재 모사 시험시 나타나는 석출물과 클러스터 거동 고찰

박정현, 한재연, 양철혁 (국립창원대학교), 이봉호 (대구경북과학기술원), 이창훈 (한국재료연구원), 정준호 (현대제철), 홍현욱* (국립창원대학교)

P4-10

Ex situ 및 In-situ 전기화학적 수소 주입방식에 따른 API X70 라인파이프강의 수소취화 거동 비교

곽윤서, 오동규 (서울과학기술대학교), 유용재, 김규태 (현대제철), 황병철* (서울과학기술대학교)

P4-11

화학조성과 냉각속도 변화에 따른 오스테나이트계 경량철강의 석출거동 및 인장특성 변화에 대한 연구

권민지, 문준오* (국립창원대학교), 박성준 (한국재료연구원)

P4-12

고강도 원자로용기강 후판 전자빔용접재의 미세조직 및 인장특성 평가

김민철, 현세미, 홍석민, 김종민 (한국원자력연구원)

P4-13

저압터빈 블레이드용 Fe-Mn-Al-C 경량철강의 저주기 피로 변형 거동과 κ-carbide의 상관관계 고찰

김시연 (국립창원대학교), 고의석 (현대스틸파이프), 김치원, 박성준 (한국재료연구원), 홍현욱* (국립창원대학교)

P4-14

가공 공정의 재결정을 고려한 STS 주름관의 응력 개선 설계 및 피로수명 도출

박재현, 최윤석* (부산대학교), 김민규, 배성원 (LG전자)

P4-15

TRC로 제조된 AZMX1100 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 열처리의 영향

박태연, 최인철* (국립금오공과대학교)

P4-16

열교환기용 Ti 관의 온도 변화에 따른 화합물 및 균열 생성 메커니즘

김정우, 이홍구, 이아영 (울산대학교), 고광우, 박상환, 이채동, 방준영, 손병인 (울산소방본부), 신상용* (울산대학교)

P4-17

Fe-Mn-Ni-Al계 합금의 상온 및 극저온 기계적 특성

윤성준, 오선근, 나영상*, 김영균* (한국재료연구원)

P4-18

Al_3Zr 석출상의 결정구조에 따른 A356 합금의 피로 균열 성장 분석

우두현 (동국대학교), 송태웅 (HYUNDAI SUNGWOO), 박찬우, 윤영준, 조창훈, 정창열* (동국대학교)

P4-19

바나듐 첨가 고망간강의 항복강도 예측 모델 정밀화

송호정 (동아대학교), 박시욱, 김용진 (국방과학연구소), 박건우 (울산과학기술원), 이동호 (포스코 기술연구원), 장재훈 (한국재료연구원), 전종배* (동아대학교)

P4-20

Al-Si-Mg-(Cu)-(Zr) 합금의 초고주기 피로 파단 양상

조창훈, 박찬우, 우두현, 윤영준, 정창열* (동국대학교)

P4-21

Pure Ta 소재의 수소 장입 온도에 따른 수소화물 형성 및 미세구조 분석에 관한 연구

김민호 (국립한밭대학교), 조민철, 이근호, 박이주 (국방과학연구소), 이상엽, 조훈휘* (국립한밭대학교)

P4-22

Mn-Mo-Ni계 저합금강 전자빔용접부의 파괴인성에 미치는 후열처리 공정 영향 평가

현세미 (한국원자력연구원), 이승욱 ((주)동아특수금속), 홍석민, 김종민, 김민철* (한국원자력연구원)

P4-23

잠수함용 고강도강의 폭파변형 특성

김용진*, 함진희, 박시욱, 양성호 (국방과학연구소)

P4-24

SA372 소재의 수소 취성 EX-SITU 시험법 연구

신봉근 (한국건설생활환경시험연구원, 인하대학교), 김승욱, 손예지, 김효민, 정대용* (인하대학교)

P5 : 수소재료

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P5-1

탄소 첨가에 의한 TiFe계 수소저장합금의 초기수소화 성능 개선

황규빈 (한국과학기술연구원, 성균관대학교), 하태준 (한국생산기술연구원), 김윤석 (한국과학기술연구원, 성균관대학교), 이영수 (한국과학기술연구원), 심재혁* (한국과학기술연구원, 성균관대학교)

P5-2

고압수소배관 제조 시 316L 스테인리스강의 인장 물성 및 내수소취성 변화

고재훈 (영남대학교), 홍성모 ((주)세창스틸), 강지현* (영남대학교)

P5-3

수소 주입 방식과 온도 변화가 BCC 및 FCC 금속의 파괴 특성에 미치는 영향

최수환, 신승혁, 오동규, 황병철* (서울과학기술대학교)

P5-4

Mg-Ni 수소저장합금의 미세구조 특성과 초기 활성화 메커니즘에 대한 연구

정소진 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 이다혜 (한국생산기술연구원), 서병찬, 김영민 (한국재료연구원), 곽륜호 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 하태준 (한국생산기술연구원), 손석수* (고려대학교), 박형기* (한국생산기술연구원)

P5-5

Direct energy deposition (DED) 기반 metal repairing 후 austenitic stainless steel의 수소 취성 저항성 평가

정차희, 양대철 (고려대학교), 사공만재 (포항공과대학교), 백주현 (고려대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 손석수* (고려대학교)

P5-6

First-Principles Study on the Thermodynamic Analysis of Hydrogen Storage Alloys

Min Seok Yoon and Won-Seok Ko* (Inha University)

P5-7

STS316L과 STS316LN 강의 수소 환경 내구성 및 냉간 인발가공의 영향 분석

천하은, 홍성규, 손재한, 표수민 (리녹스 주식회사), 김성환 (한국생산기술연구원), 이경훈 (국립한국해양대학교), 이욱진* (부산대학교)

P5-8

In-situ SSRT (Slow Strain Rate Testing)를 이용한 고강도강의 수소취성 평가 시 장입 전류 밀도가 그 결과에 미치는 영향

이승한 (영남대학교), 김형섭 (현대제철), 강지현* (영남대학교)

P5-9

Development of an Ultra-Sensitive Resistive Sonication-Assisted Palladium Nanogap Hydrogen Sensor for Sub-ppm Detection in Breath Analysis

Jiwoo Hong, Sangkil Lee, Joonho Lee, Hyun-Sook Lee*, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P5-10

In-situ 기반 API 5L X70의 수소취성 평가

신희철 (한국재료연구원, 영남대학교), 박준호, 김태용, 이병주, 이승건* (한국재료연구원), 박노근 (영남대학교)

P5-11

Boron 함량에 따른 Ti-TiB 합금의 수소 취성 및 초극저온 거동 변화

정현, 정지윤, 이동현* (충남대학교)

P5-12

고항복강도 고엔트로피 합금 설계 및 수소취성 저항성 평가

정휘윤, 이제인* (부산대학교)

P5-13

FCC 재질의 수소 압력에 따른 나노 압입 후 ECCI 관찰을 통한 전위 거동 분석

김대현, 한성희, 정세은, 김병창, 김보규, 신중호* (국립강릉원주대학교), 윤희수, 백운봉 (한국표준과학연구원)

P5-14

Highly Sensitive and Selective CO Sensing Performance of SnO_2 Nanorod Array Sensor with Bimetallic Catalyst Application

Sanghyun Park, Hyun-Sook Lee, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P5-15

초극저온/수소환경모사 고망간강의 열피로 특성 연구

윤하은 (한국원자력연구원), 이태호, 이수열* (충남대학교)

P5-16

초극저온 산업 응용 316L 스테인리스 용접 강판의 수소 취성 평가

강태욱, 김유섭 (한국원자력연구원), 이수열* (충남대학교)

P5-17

AB2계 C14 Laves 상 합금의 저온 수소 흡장 및 탈장 특성에 치환 원소가 미치는 영향

이도성 (한국과학기술연구원), 황규빈 (한국과학기술연구원, 성균관대학교), 조영환 (한국과학기술연구원), 심재혁 (한국과학기술연구원, 성균관대학교), 이영수* (한국과학기술연구원)

P5-18

머신러닝을 이용한 AB_2계 수소저장합금의 PCT 곡선 예측

진시원 (한국과학기술연구원, 연세대학교), 이영국 (연세대학교), 심재혁* (한국과학기술연구원)

P5-19

Cr-Mo계 저합금강으로 제작된 고압 수소용기의 위치별 수소취성 영향

배동화, 김학현, 이영광, 정수진 (포항산업과학연구원), 조수미 (포항금속소재산업진흥원), 이창희, 오윤석, 이정훈* (포항산업과학연구원)

P5-20

Effect of Alloying Pd-Based Single and Bimetallic Catalysts on Hydrogen Sensing Properties of SnO_2 Nanorod Arrays

임태원, 이우영*, 이현숙 (연세대학교)

P5-21

Mg-Ni계 수소저장소재의 실시간 수소 흡착/탈착 거동 관찰 연구

유한준 (한국과학기술연구원, 연세대학교), 배지환 (한국과학기술연구원), 김영민, 서병찬 (한국재료연구원), 천동원* (포항공과대학교)

P6 : 비철금속

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P6-1

전해도금법을 통한 CFTS 박막태양전지 형성에 관한 연구

금동일, 정윤화, 김선정* (울산대학교)

P6-2

사용 후 폐 배터리로부터 회수된 블랙 파우더에서 리튬 금속 직접회수

주신형, 최우석, 이종현* (충남대학교)

P6-3

$CaMg_2$ 환원제를 이용한 TiO_2 금속열환원법을 통한 고순도 Ti 분말 제조

임규석, Hayk Nersisyan, 이종현* (충남대학교)

P6-4

$MgCl_2$를 활용한 마그네슘 전해제련을 위한 기초전기화학연구 및 음극재료 선별

이동희, Hayk Hacob Nersisyan, 이종현* (충남대학교)

P6-5

중성염 수용액 전해질에서 Fe_3O_4로 코팅된 STS304 배관의 전해제염

최우석, 박성현, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

P6-6

Cu-Ti-X 합금의 경도 변화에 미치는 첨가원소와 열처리 조건의 영향

최재훈, 김연서, 정동습, 송지용, 이소영 (울산대학교), 김정기, 박성수 (울산과학기술원), 이정구* (울산대학교)

P6-7

Cu-Al-Zn-Sn 합금의 기계적 특성 거동 분석을 위한 적층 결함 에너지 제어 기반 미세조직 변형 연구

강결찬, 조가은, 장성문, 손정호, 박혜진, 홍성환 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범* (세종대학교)

P6-8

Cu-Ga-Si 합금의 Ga, Si 함량 제어 기반 기계적 • 광학적 특성 거동에 관한 연구

조가은, 김기범*, 홍성환, 박혜진 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 강결찬, 장성문 (세종대학교)

P6-9

$CaCl_2$ - NaCl - CaO 계 용융염에서 도핑 된 $YCrO_3$ 기반 불활성 양극 소재의 고온 부식거동 연구

김완배, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

P6-10

습식 화학 공정으로부터 환원제와 첨가제 제어를 통한 니켈 나노 분말 제조 연구

이기혁 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 이용관, 유용연 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 허성규, 이미혜, 온지선, 심재진* (한국생산기술연구원)

P6-11

Development and Characterization of a Solid Electrolyte-Based Electrochemical System to Enhance Lithium Ion Extraction Efficiency

Seung-Hwan Lee, So Hyun Baek (Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang University), Hyun-Woo Lee, Yongbum Kwon, Kanghyuk Lee, Kee-Ryung Park, Yoseb Song, Bum Sung Kim, Yong-Ho Choa, and Da-Woon Jeong* (Korea Institute of Industrial Technology)

P6-12

용융염 전해질을 이용한 모의 방사화 Ni 합금의 전해 제염 및 전해질 재활용 가능성 평가

박성현, 최우석, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

P6-13

Strategies for Fe-Rich Precipitate Morphology Control via Unveiling the Solidification Behavior of Cu-Fe-Si Alloys

Jae Kwon Kim* (Seoul National University), Yagnesh Shadangi (Indian Institute of Technology Bhilai), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

P6-14

Zr합금과의 브레이징용 Al합금의 미세조직 및 부식특성

이준하, 김정민* (한밭대학교)

P6-15

Extraction and Characterization of Copper Using Ceramic Catalyst Reactions

HyoSang Yoo* (Korea Institute of Industrial Technology) and HuiMan Beom (ASIA T&C)

P6-16

바이폴라막 전기투석을 이용하여 친환경 망초(Na_2SO_4)폐수 처리에 관한 연구

안재우*, 이영재, 서민혁, 김준희, 장재혁, 김주희, 박혜인 (대진대학교)

P6-17

CRDM 노즐용 Alloy 690 단조재의 열처리 조건 제어가 균일한 결정립 미세조직 확보에 미치는 영향

김동욱, 최재영* ((주)에이치브이엠)

P6-18

황산리튬의 탄소열환원법을 이용한 황화리튬 제조 시 탄소 원료가 미치는 영향

송영주, 맹은석, 김병민, 한동진, 장건희, 강정신* (서울대학교)

P6-19

페스크랩을 활용한 Al-8Mg-6Si 주조 합금의 T6열처리 특성

김유경 ((주)피레타), 김정석* (조선대학교)

P6-20

진공증류 공정을 통한 고순도 마그네슘 제조

소윤지 (고등기술연구원), 김호병 (고등기술연구원), 최상훈* (고등기술연구원)

P6-21

석출 경화형 Cu-Ti 합금의 잉곳 건전성 평가와 열처리를 통한 시효 경화 거동

최광수, 양현석, 정항철, 공만식* (고등기술연구원)

P6-22

Influence of O_2 Potential on the MoS_2 Concentrate Oxidation Roasting to Produce MoO_3 in Rotary Kiln Operation

Jungho Heo (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), Jaehong Shin (Korea Institute of Industrial Technology), Seongsoo Han, and Joobeom Seo1* (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

P7 : 가공-표면처리

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P7-1

표면 경화된 기계 구조용 합금강의 마모 거동에 관한 연구

한수빈 (한국생산기술연구원), 이석규 (현대자동차), 신상윤 (에스비비테크), 장진석, 조용재, 김동혁, 최창영, 정유현, 이호진, 박동용, 송혜진* (한국생산기술연구원)

P7-2

Zn, Mg, Ca가 첨가된 핫스탬핑용 Al 기반 용융도금층의 오스테나이징 열처리 후 미세구조 및 전기화학적 특성 평가

왕은찬, 최윤일* (한국생산기술연구원)

P7-3

SPS와 Thioflavin T를 첨가한 구리 도금층의 표면 특성 및 전기화학적 거동 연구

김나영, 안서영, 손주한, 이선호, 손인준* (경북대학교)

P7-4

Zincate 아연-니켈 합금 도금에서 니켈 함량에 미치는 아민 착화제의 영향

김수아, 오세빈*, 손인준 (경북대학교)

P7-5

DC 마그네트론 스퍼터링 공정변수 제어에 따른 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 코팅의 미세조직 및 기계적 물성에 대한 연구

이유진, 서진오, 현명우, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

P7-6

PTFE 윤활제를 적용한 양극 산화 시편의 기계적 특성 향상과 그에 따른 마찰 저감 및 내마모성 개선 효과에 대한 연구

박충효*, 이성훈*, 손인준* (경북대학교)

P7-7

Ni-P 도금층의 인 함량 변화에 따른 특성 분석

이수진*, 도쿠엉둥, 도안티엔안, 손인준* (경북대학교)

P7-8

에딜렌디아민을 착화제로 사용하는 Pd-Co 합금도금

강다연, 신승희, 손인준* (경북대학교)

P7-9

펄스-역펄스 전류를 사용한 Ni/Zn-Ni 다층 도금 및 후처리를 통한 고내식성 구현

윤소희, 신동민, 정민성 (국립부경대학교), 정태형, 이학철, 박영민 ((주)화신볼트산업), 이정훈* (국립부경대학교)

P7-10

기계학습을 이용한 동전위분극실험 분석

정용주, 이주희, 장희진, 김희수* (조선대학교)

P7-11

Ni용사 클래딩의 고온 용융염에서의 부식 특성

윤지현*, 김채원 (한국원자력연구원)

P7-12

대면적 탄소섬유 부직포의 직접 연속전기도금 공정 적용 가능성 평가 연구

진광혁, 최윤일* (한국생산기술연구원)

P7-13

고내구성 전조 다이스 제조를 위한 하이브리드 코팅 공정 최적화에 관한 연구

김왕렬 (한국생산기술연구원), 이학철 (화신볼트산업), 박영민 (화신하이테크), 허성보* (한국생산기술연구원)

P7-14

표면특성 제어를 통한 질화물/산화물 코팅간의 기계적 물성 상관관계 고찰

김왕렬, 박인욱, 김준호, 허성보* (한국생산기술연구원)

P7-15

Surface Modification of Ti Doped with Hydroxyapatite Powders by Hydrothermal Process

Y.J. Jo and W.H. Lee* (Faculty of Nano-technology and Advanced Materials Engineering, Sejong University)

P7-16

아크 이온 플레이팅을 적용한 질화물 코팅 기계적 특성 및 수명 평가

김영석*, 정용, 신연철 (에이피스 주식회사)

P7-17

Ni-Cr-Mo계 금속의 전해연마 특성에 미치는 인산 계열 전해액 조성의 영향

양현석, 정우철, 한덕현, 최광수, 공만식* (고등기술연구원)

P8 : 철강-압연,강종개발,후처리

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P8-1

붕소 함유 스테인리스강의 전자빔용접부 및 열영향부에 미치는 용접후 열처리의 영향

김중훈 (한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 한종민 (한국생산기술연구원), 전종배 (동아대학교), 김병준, 김형찬, 남대근 (한국생산기술연구원), 박성수* (울산과학기술원), 김병구* (한국생산기술연구원)

P8-2

원자로 격납용기 소재의 열처리 후 carbide 크기 변화에 따른 충격 인성 분석

박동준, 유진영, 천세호, 이성호, 송종한, 이승엽, 이정훈 (부산대학교), 이진모, 이채훈 ((주) 태웅), 이태경* (부산대학교)

P8-3

고압수소 및 전기화학적 수소주입에 따른 고강도 API X80 라인파이프강의 수소취성 비교

오동규 (서울과학기술대학교), 박재영 (한국표준과학기술연구원), 유용재, 김규태 (현대제철), 황병철* (서울과학기술대학교)

P8-4

초고강도 단조 마르텐사이트계 경량철강에서의 페라이트 제어를 통한 미세조직-물성 상관관계 분석

정현, 이상원 (고려대학교), 고석우, 황선욱 (세아베스틸), Alireza Zargaran (포항공과대학교), 손석수* (고려대학교)

P8-5

Mo과 V이 첨가된 템퍼드 마르텐사이트강의 수소취성에 미치는 오스테나이트화 온도의 영향

이유진, 김상규 (서울과학기술대학교), 김용우, 정환교 (포스코), 황병철* (서울과학기술대학교)

P8-6

S31803 듀플렉스 스테인리스강의 어닐링 온도에 따른 수소 취성 민감도 변화

권동영, 강지현* (영남대학교)

P8-7

바나듐 첨가 고망간강의 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화

양승우, 송호정 (동아대학교), 박시욱, 김용진 (국방과학연구소), 박건우 (울산과학기술원), 이동호 (포스코 기술연구원), 장재훈 (한국재료연구원), 전종배* (동아대학교)

P8-8

Study of Corrosion Resistance of Cold Forged 316 Stainless Steel in Molten FLiNaK Salt

MinSung Hong (Korea Atomic Energy Research Institute, University of California at Berkeley), Shmuel Samuha, and Peter Hosemann* (University of California at Berkeley)

P8-9

슈퍼 듀플렉스 내식강의 부식특성에 미치는 미소원소의 영향

한윤기, 김정민* (한밭대학교)

P8-10

극저탄소강의 항복 거동에 미치는 Nb와 Ti의 영향에 대한 연구

원정훈, Tram T. T. Trang (포항공과대학교친환경소재대학원), 조재영 (포스코), 서인식 (H2 Corporation), 허윤욱* (포항공과대학교친환경소재대학원)

P8-11

첨단 분말야금 기술로 탄생한 고성능 압연롤 – 개재물 제어가 핵심

정휘근, 성기창, 길희진, 정야호, 김한수*, 이원혁* ((주)코나솔)

P8-12

VC 석출 강화 분말야금압연롤 – 미래 금속 산업을 선도하는 혁신 솔루션

정야호, 성기창, 길희진, 정휘근, 김한수, 이원혁* ((주)코나솔)

P8-13

혁신적인 마모 저항성 조압연롤 – 차세대 금속가공의 핵심 솔루션

길희진, 성기창, 정휘근, 정야호, 김한수*, 이원혁* ((주)코나솔)

P9 : 가공-용접 및 접합

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P9-1

입내 MX 석출에 따른 저방사화강 용접부의 고온 기계적 특성 비교

박정현, 한재연, 조윤환 (국립창원대학교), 김치원, 이창훈 (한국재료연구원), 정승진 (조선선재 기술연구소), 홍현욱* (국립창원대학교)

P9-2

석출물 형성원소 첨가에 따른 고망간강 용접부의 기계적 특성변화

박정빈 (부산대학교), 한일욱 (포항특수용접봉), 강남현* (부산대학교)

P9-3

폭발 압접으로 클래드된 Ta–10W/steel 튜브 계면의 미세조직 및 고온 열화 저항성

김시연, 김태경 (국립창원대학교), 장성진 (나노종합기술원), 김동훈, 양성호 (국방과학연구소), 홍현욱* (국립창원대학교)

P9-4

듀플렉스 스테인리스강의 마찰교반가공 처리 유무에 따른 전자빔 용접부 CISCC 개선

백종민, 이아름 (국립창원대학교), 하종문 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)

P9-5

적외선 카메라를 이용한 Haynes 282 레이저 용접부의 미세조직 및 기계적 물성 분석

양희평, 전종배* (동아대학교)

P9-6

M–A 상 및 미세조직 제어를 통한 ERW 강관 용접부의 저온 충격 인성 향상

백종민, 이찬희 (국립창원대학교), 곽진섭, 전동현 (현대스틸파이프), 홍현욱* (국립창원대학교)

P9-7

Effect of Welding Position and Heat Input on the microstructure and mechanical properties of SMAW welds of 9%Ni steel

Sanghyun BAE*, Yongchul Kim (KISWEL LTD.), and Stephen Liu (Colorado School of Mines)

P9-8

하나로핵연료 봉단마개 용접 현황 및 용접부 불량 저감에 관한 고찰

소원재*, 도정민, 신진건, 김종환, 김기남, 정용진 (한국원자력연구원)

P9-9

Ta-10W 합금의 미세조직 변화 및 상온 인장 거동에 미치는 폭발 압접의 영향

강태훈 (인하대학교), 황유진 (인하대학교, 현대제철(주)), 박정효, 김규식 (국방과학연구소), 이기안* (인하대학교)

P9-10

1GPa 급 고강도 리벳의 경도에 따른 접합 특성 연구

윤병현* (충남대학교)

P9-11

자동차용 GA강판과 알루미늄의 마찰교반 점용접 공정 최적화

장경현*, 천창근, 김성욱 (포항산업과학연구원), 김동권, 서종덕 ((주) 신영)

P9-12

고강도 SEN6 Mg 합금의 GTAW 용접 특성 연구

윤병현* (충남대학교)

P9-13

Si_3N_4/Cu 이종 접합 방열 기판 개발 및 특성 평가

권홍기 (포항소재산업진흥원), 김준태, 이경훈 (주식회사 코웰), 박상원* (포항소재산업진흥원)

P10 : 열전

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P10-1

하카이트 화합물의 상변화 및 열전특성에 미치는 전하보상 효과

박상준, 오현식, 김일호* (국립한국교통대학교)

P10-2

도핑된 에스케보르나이트 화합물의 열전특성

오혜민, 류재종, 최세현, 박상준, 김일호* (한국교통대학교)

P10-3

N형 칼코파이라이트 반도체의 열전특성

이승민, 권혁민, 김진솔, 박상준, 김일호* (한국교통대학교)

P10-4

Bornite Cu_5FeS_4의 고상합성과 열전특성

오현식, 박상준, 김일호* (국립한국교통대학교)

P10-5

Emplectite $CuBiS_2$의 고상합성과 열전특성

권혁민, 박상준, 김일호* (국립한국교통대학교)

P10-6

Grundmannite $CuBiSe_2$의 고상합성 및 열전특성

류재종, 박상준, 김일호* (국립한국교통대학교)

P10-7

나노카본 첨가를 통한 α-Cu_2Se의 열전 특성 향상

김현아 (한국세라믹기술원, 국립부경대학교), 강민지, Cao Xuan Truong, 김우현, 조중영 (한국세라믹기술원), 임영수 (국립부경대학교), 남우현* (한국세라믹기술원)

P10-8

Effect of Cu Contents on the Thermoelectric Properties of P-Type $Sn_{0.98}Na_{0.02}Cu_xSe$

Van Tuan Nguyen (Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Changwon National University), Vu Binh Nguyen (Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology), Min Su Heo (University of Seoul), Woo Hyun Nam (Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology), Soonil Lee (Changwon National University), Hyun Sik Kim (University of Seoul), and Jung Young Cho* (Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology)

P10-9

열전발전용 CoSb 금속간 화합물 개발

강민지 (한국세라믹기술원, 연세대학교), Cao Xuan Truong, 김우현, 김현아, 조중영 (한국세라믹기술원), 이규형 (연세대학교), 남우현* (한국세라믹기술원)

P10-10

Investigation of Optimized Ca Filling Fraction in Alkaline Earth Filled P-Type Skutterudites

Xuan Truong Cao (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Changwon National University), Min Ji Kang, Woo Hyun Kim, Hyun A Kim, Jung Young Cho (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology), Soonil Lee (Changwon National University), and Woo Hyun Nam* (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology)

P10-11

이중 충진 원자 조성 조절을 통한 p형 Skutterudite의 열전 특성 향상

김우현, 강민지, Cao Xuan Truong, 김현아 (한국세라믹기술원), 이순일 (국립창원대학교), 조중영, 남우현* (한국세라믹기술원)

P11 : 생체재료

Room 3층 로비, 04월 23일 10:00 - 17:00

P11-1

GelMA-Based Electronic Plant Arrows for Natural and Long-Term Physiological Monitoring of Plant Organs

Geonho Lee and Junmin Lee* (Pohang University of Science and Technology)

P11-2

Highly Stretchable and Biodegradable Molybdenum/Polybutylene Adipate Terephthalate Conductive Paste Composite Materials for Various Biodegradable Electronics

Junseok Shim, Kyung-Sub Kim, and Seung-Kyun Kang* (Seoul National University)

P11-3

Bi-Directional Cyclic Mechanical Stimulation Regulates Metastatic Behavior and Apoptosis in Melanoma Cells via Mechanotransduction Pathways

JunMin Lee* and TaeHoon Lee (POSTECH)

P11-4

Advanced Whitlockite Synthesis Using IPL-Induced Carbothermal Shock Technique

Minjung Kim, Hyung-Seop Han* (Korea Institute of Science and Technology), and Seung-Kyun Kang* (Seoul national University)

P11-5

Ultra-Sensitive Crack-Based Strain Sensor for Cortex Cerebral Dynamics

Do-Hoon Kwon, Jae-Hwan Lee, Yoon-Nam Kim (Seoul National University), Jun-Sang Lee (Purdue University), and Seung-Kyun Kang* (Seoul National University)

P11-6

Polydopamine Coating on the Porous Ti for Sustained Release of Bone Morphogenetic Protein2

Wonhee Lee and W.H. Lee* (Sejong University)

P11-7

Bone Morphogenetic Protein Releasing Behavior by Micropores Characteristics of Porous Ti

Y.H. Cho and W.H. Lee* (Sejong University)

P11-8

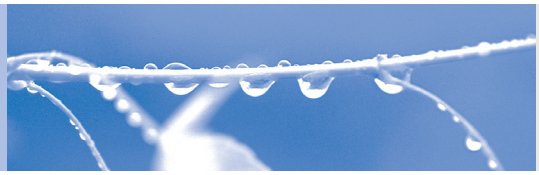
Stable and Miniatured In-Ear Sensor for Continuous Cardiopulmonary Monitoring

Seongu Kim, Minjoo Lee, Hyejun Kim, Yeonjae Yang, Jeonghun Lee, and Jeonghyun Kim* (Kwangwoon University)

P11-9

Development of Magnesium Surface Modification with Hydroxyapatite for Biodegradable Mini-Plates in Maxillofacial Surgery

Seo Yeon Lee, Patrick M. Bacirhonde, Joshua Lee, and Chan Hee Park* (Jeonbuk National University)



P12 : 나노융합소재

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P12-1

Synthesis of Two-dimensional van der Waals Material $TaOI_2$ and its Optoelectronical Properties

Yeong hyeop Kim, Jinsu Kang, and Jae-Young Choi* (Sungkyunkwan University)

P12-2

Layer-by-layer Fabrication of Graphene-Fullerene Nanostructures

Korlan Duisenova (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology), Sun Hwa Lee* (Institute for Basic Science(IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology)

P12-3

Highly Sensitive Detection of Xylene Gas with Cauliflower-shaped Au-TiO_2 Core-Shell Nanoparticles

Eun Bi Kim, Ka Yoon Shin, Wansik Oum, Seonwoo Jang, Sungjoon Moon, and Hyoun Woo Kim* (Hanyang University)

P12-4

One-pot Synthesis of Large area and Well-Ordered N-Doped Carbon Nanowalls (CNWs) on Cu(111) via High Temperature Electrochemistry

Dongwoo Kim, Minhyeok Kim (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology), Won Kyung Seong (Institute for Basic Science), Sun Hwa Lee*, and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology)

P12-5

Surface Ligand Engineering for High-Efficiency H_2O_2 Electrosynthesis Using Artificial Catalysts

Jeong-Gyu Lee (Dongguk university), Jae Won Choi, Jong Min Kim* (Korea Institute of Science and Technology), and Min-Jae Choi* (Dongguk university)

P12-6

Size and Optical Property Control for the Synthesis of Highly Monodisperse Ag_2Te Colloidal Quantum Dots for SWIR Photodetectors

Ha-Neul Kim and Min-Jae Choi* (Dongguk University)

P12-7

Synthesis of High-Quality Zeolite Templated Carbon at 20bar

Madi Arsakay (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology), Sun Hwa Lee, Won Kyung Seong (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology)

P12-8

철강산업부산물 밀스케일 (Mill Scale) 을 활용한 나노 자성유체 합성

박규민, 김세호* (고려대학교)

P12-9

Ultrasensitive Ethanol Sensor with Rapid Response: Effect of Pt catalyst for Enhanced Gas Detection

Eunsol Lee, Jae Han Chung, Zion Park, and Young-Seok shim* (Korea University of Technology and Education)

P12-10

High-Performance Stretchable Gasochromic Sensor with Pd-WO_3 Nanobamboos for Rapid Hydrogen Detection

Zion Park, Yun-Haeng Cho, Eunsol Lee, and Young-Seok Shim* (Korea University of Technology and Education)

P12-11

Advanced SnO_2 Nanohelix Sensors with Polymeric Filtration for Early-Stage Thermal Runaway Detection in Lithium-Ion Batteries

Sung Woo Sohn, Junho Hwang (Yonsei University), Yun-Haeng Cho, Jae Han Chung, Baek Song (Korea University of Technology and Education), Wooyoung Lee (Yonsei University), and Young-Seok Shim* (Korea University of Technology and Education)

P12-12

High Mobility $HfSe_2$ Thin Films Synthesized by Hybrid Deposition Method with Enhanced Stability

Jungdae Lee and Sanghan Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology)

P12-13

Study of Mesoporous Silica Templated Carbon from Different Synthetic Routes

Bayrammuhammet Annageldyyev (Ulsan National Institute of Science and Technology), Madi Arsakay, Ja Hun Kwak*, and Rodney S. Ruoff* (Ulsan National Institute of Science and Technology, Institute for Basic Science)

P12-14

Free-standing, Binder-free, High-loading Si Anode with Exceptional Stability via Formation of Interfacial Si-C bond

Junho Shin (Korea Electrotechnology Research Institute, Ulsan National Institute of Science and Technology), Jungeun Lee, Sangyong Lee (Korea Electrotechnology Research Institute), Ji-Yoon Song (Northwestern University), Jongwhan Park, and Jungmo Kim* (Korea Electrotechnology Research Institute)

P12-15

High Energy Density and Efficiency Aluminium–Air Batteries with Spark Reaction of Graphene Oxide

Geonwoo Lim and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-16

Graphene Oxide Membrane with Cation Selectivity for Scalable Energy Generation

Seokmin Park and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-17

High–Resolution Large–Area Patterning Using Scanning Probe Nano–Lithography

Jihoon Han and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-18

Rapid–Response Thermochromic Display via Molecular Printing

Taeyoung Kim and Wooyoung Shim* (Yonsei university)

P12-19

Bismuth–Assisted Wetting Control in Na– β Alumina Batteries

Junwoo Ko and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-20

Electromagnetic Wave Suppression Enhancement through Precisely Engineered Microstructured Aluminum Sheets

Jihun Yeom and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-21

Nanomaterial Assembly via Nano–Cymatic Control

Gyuhyeon Cho and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-22

Facile synthesis of SWCNT–Cu Hybrid Fiber via Wet–Spinning of Charged SWCNT Dispersion

SangYong Lee (Korea Electrotechnology Research Institute, University of Science and Technology), Junho SHin (Korea Electrotechnology Research Institute, Ulsan National Institute of Science and Technology), Jungeun Lee (Korea Electrotechnology Research Institute), and Jungmo Kim* (Korea Electrotechnology Research Institute, University of Science and Technology)

P12-23

Enhancing Charge–Trap Memory Performance via Electron–Dipole Interaction in Janus MoSSe Floating Gate

Eun Bee Ko, Seon Yeon Choi (Kumoh National Institute of Technology), Min Sup Choi (Chungnam National University), and Hyun Ho Kim* (Kumoh National Institute of Technology)

P12-24

Effects of PbO_2 Nanoparticle Size on Aging Mechanisms in Lead–Acid Batteries

Sunggeun Jo and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-25

Enhanced NO_2 gas sensing at room–temperature under visible light via 1D SnO_2 nanorods decorated with $CsPbBr_3$@SiO_2 core–shell photosensitizers

Yeonji Yuk, Dokyum Kim, Chang–Lyoul Lee, and Sanghan Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology (GIST))

P12-26

접촉투영면적 분석을 통한 유연기판 위 금속박막의 깊이에 따른 경도 평가

서희창, 김영천* (안동대학교)

P12-27

Preventing Plant Damage Via Real–Time Monitoring Platform with Light–Activated NO_2 Gas Sensors based on 3D TiO_2 Nanoarchitectures

Yun–Haeng Cho, Jae Han Chung, Eunsol Lee, Zion Park, and Young–Seok Shim* (Korea University of Technology and Education)

P12-28

Effect of Porosity and Morphology Balance in SnO2 Nanorod Arrays on Enhanced Hydrogen Gas Sensing Performance

Serin Choi, Hyun–Sook Lee, Wooyoung Lee* (연세대학교)

P12-29

Investigation of Melting Point Depression in Spiky Au Mesoparticles with Complex Dimensions

이지은, 박은수*, 김지영, 곽민경, 민현기 (서울대학교)

P12-30

Enhanced UVC Photodetectors via Surface–Passivated Wide–Bandgap Zirconium–Oxo Clusters in Asymmetrical MSM Configurations

Maro Kim, Jae–ho Park, Min–jun Kim, and Chung Wung Bark* (Gachon University)

P12-31

Synthesis and Dispersion of 1D Material V_2PS_{10}: Advancing Miniaturized Electronic Devices

Jeongsu Park, Jinsu Kang, Sooheon Cho, and Jae–Young Choi* (Sungkyunkwan University)

P12-32

Synthesis Of High–Density, High–Purity $Hf_{1-x}La_xO_2$(HLO) Ceramic Targets By Impurity Suppression

JaeHo Park, Yoon Same, MinJoon Kim, HyoungWook Kim, and ChungWung Bark* (Gachon University)

P12-33

Optimization of Si–Doped β–Ga_2O_3 Ceramic Targets for High–Performance Thin Film Deposition.

Minjun Kim, JaeHo Park, HyoungWook Kim, Same Yoon, and Chung Wung Bark* (Gachon University)

P12-34

Fluorine–Mediated Carbon Insertion Strategy for Potential Diamond Synthesis

Yang Liu, Won Kyung Seong*, Sun Hwa Lee* (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology)

P12-35

Controlling the Au/Cu_2O Interface for Selective Product Formation in Electrochemical CO_2 Reduction

Sanghyeok Lee, Gangbin Ryoo, and Hyosun Lee* (University of Seoul)

P12-36

RF 열플라즈마 분말제조 공정기반 고순도 알루미늄 질화물 복합소재 제조를 통한 방열 sheet 개발

양조화*, 박정몽*, 전경수 ((재)대구테크노파크)

P12-37

Perovskite Nanosheets as Efficient Catalysts for CO_2 Electroreduction

SeungHyun Chun, Jeongyeon Kim, Hyunsik Kim*, and Hyosun Lee* (University of Seoul)

P12-38

니켈 산화물을 사용하는 p형 투명 비정질 산화물 박막 트렌지스터

김형욱, 박정웅*, 김민준, 박재호, 윤샘 (가천대학교)

P12-39

Intensifying the Liquid Na/BASE Interface by Applied Spark–Reducing Graphene Oxide

Sukwoo Kang and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-40

Epitaxial Growth Of P–Type NiO Thin Films by RF Sputtering

Saem Yoon, JaeHo Park, MinJun Kim, HyoungWook Kim, and ChungWung Bark* (Gachon University)

P12-41

Polymorphic 2D FeAs with Tunable Stacking Symmetry and Highly Anisotropic Properties

Jongbum Won and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-42

Display and Pressure Sensor Coupling via Thermochromic Panel and Resistive Pressure Sensor

Gyuwon Kim and Wooyoung Shim* (Yonsei university)

P12-43

III–V–derived van der Waals Memtransistor via Cation–Eutaxy Structure Engineering

Jihong Bae and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-44

Non–conventional Wulff–Shape Silicon Nanosheets Along with High Catalytic Activity

minwoo lee and Wooyoung Shim* (Yonsei university)

P12-45

Fabrication of 3D Networked Isotropic Thermal Composite Using MWCNT–Based Core–Shell Hybrid Fillers

Jungeun Lee (Korea Electrotechnology Research Institute), Junho Shin (Korea Electrotechnology Research Institute, Ulsan National Institute of Science and Technology), Sangyong Lee, and Jungmo Kim* (Korea Electrotechnology Research Institute, University of Science and Technology)

P12-46

Three Dimensional Touch Device with Two Terminals

YoungJun Cho, Taehoon Kim, Gwangmook Kim, Hyung Wan Do, and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

P12-47

Enhanced On–Off Ratio in n–Type Vertical FETs with Defect–Engineered Bilayer $MoSe_2$ Channel

Daeun Choi (Kumoh National Institute of Technology), Hyokwang Park, Hyungyu Choi, Boseok Kang* (Sungkyunkwan University), and Hyun Ho Kim* (Kumoh National Institute of Technology)

P12-48

Sub–Diffraction Near–Field Lithography on Non–Planar Surfaces Using a Mechanically Tuned Elastomeric Photomask

Dongchul Seo and Wooyoung Shim* (Yonsei university)

P12-49

SERS Analysis of Microplastics Derived from Food Packaging Wraps

Minjeong Kim and Jung–Sub Wi* (Hanbat National University)

P13 : 적층제조 및 분말

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P13-1

헤테로구조 형성으로 Hot Isostatic Pressing 후처리된 LPBF 316L 스테인리스 강의 기계적 특성 향상

안영조, 김래언, 정상국, 하효정, 허윤욱 (포항공과대학교), Auezhan Amanov (선문대학교, Tampere University), 구강희 (포항공과대학교), 이동준 (한국재료연구원), 문종언 (공주대학교), 김형섭* (포항공과대학교)

P13-2

Toward Crack–Resistant, High–γ′ Ni–Based Superalloys: Leveraging Lattice Misfit Control for Enhanced High–Temperature Properties in Additive Manufacturing

Tae–Gyeong Kim (Changwon National University), Chan–Hee Lee (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Hyun–Uk Hong* (Changwon National University), Byoung–Soo Lee, and Hae–Jin Lee (Korea Institue of Industrial Technology)

P13-3

Engineering a Positive Lattice Misfit Superalloy for Additive Manufacturing: From Alloy Design to SAC Resistance

Tae–Gyeong Kim (Changwon National University), Chan–Hee Lee (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Hyun–Uk Hong* (Changwon National University), and Byoung–Soo Lee (Korea Institute of Industrial Technology)

P13-4

LPBF 316L 스테인리스 강의 초기 수증기 산화 거동에 미치는 잔류 응력의 영향

정창현 (국립순천대학교), 배기창 (한국세라믹기술원), 김도형 (영남대학교), 조의제* (국립순천대학교)

P13-5

직접용융증착법으로 제조된 Inconel 718의 열처리 조건에 따른 미세조직 및 물성 변화

권시은, 김정기* (경상국립대학교)

P13-6

L-DED 통해 제작한 CoCrFeMn 고엔트로피 합금의 미세조직 및 형상기억 특성에 미치는 탄소함량의 영향

박민수, 이주영, 이욱진* (부산대학교)

P13-7

직접용융증착법으로 제조된 Inconel625 / Al_2O_3 경사기능재의 단열 및 기계적 특성

유현용 (경상국립대학교), 유진영 (부산대학교), 안성열 (포항공과대학교), 이태경 (부산대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 김정기* (경상국립대학교)

P13-8

L-DED로 제작된 고망간강의 미세조직 및 기계적 특성에 Hf, Ce 첨가가 미치는 영향

김민기, 박찬호, 박지영, 이욱진* (부산대학교)

P13-9

L-DED로 제조한 AISI 316L 스테인리스 합금의 Ce 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화

박지영, 박민수, 정종욱, 이욱진* (부산대학교)

P13-10

SLM 기반 Ti-6Al-4V 다공성 추간체유합보형재의 열처리에 따른 기계적 물성 및 접촉각 특성 향상

성지원, 유휘근, 이충현 ((주)알파녹스, 아주대학교), 이한성, 송은효, 이용건, 안병민* (아주대학교)

P13-11

Sand blasting 시간에 따른 Ti-6Al-4V ELI Plate의 표면 조도 및 DLC 코팅 접합 특성 연구

이충현, 유휘근, 성지원 ((주)알파녹스, 아주대학교), 이한성, 송은효, 이용건, 안병민* (아주대학교)

P13-12

선택적 레이저 용융을 통해 제조된 순수 타이타늄의 down surface 공정 변수에 대한 에너지 밀도의 영향 연구

한승준 (한국생산기술연구원, 성균관대학교), 김원래, 김건희, 강현수, 이택우 (한국생산기술연구원), 한혁수 (성균관대학교), 김형균* (한국생산기술연구원)

P13-13

텅스텐 산과 텅스텐 산화물의 환원 특성 비교 및 미립 텅스텐 분말 제조

곽종민 (한국재료연구원, 부산대학교), 박민수 (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교), 하국현* (한국재료연구원)

P13-14

열처리 조건에 따른 Alloy 718 와이어 아크 적층부의 미세조직 변화 분석

임시은 (한국재료연구원, 부산대학교), 박기태*, 김찬규, 강용준, 오동진, 송상우 (한국재료연구원), 강남현 (부산대학교)

P13-15

Effects of Aging Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of LPBF-fabricated 17-4 PH Stainless Steel

Hyeok Hwangbo* (Yonsei University), Sohee An, Du-Rim Eo (Korea Institute of Industrial Technology), Kyunsuk Choi* (Hanbat National University), and Il Sohn* (Yonsei University)

P13-16

레이저 분말 베드 용융법으로 제작된 Hastelloy X 의 열처리에 따른 잔류응력 분석

정종욱, 김태윤, 이욱진* (부산대학교)

P13-17

CoCr 적층 제조 합금의 격자 구조 형상에 따른 압축 거동 및 미세조직 관찰

김려현 (국민대학교), 이경준 (가천대학교), 강성규 (경상국립대학교), 성효경* (국민대학교)

P13-18

Plasma spray 공정으로 제조된 Pure Mo 코팅층의 미세조직과 물성에 관한 연구

원경운, 박소연 (인하대학교), 박재성 (LT메탈), 이기안* (인하대학교)

P13-19

A Study on the Possibility of Producing Fe-2.7Mn-6.0Al-0.45C Lightweight Steel Using Direct Energy Deposition

Kwang Kyu Ko (Kookmin University), Eun Sung Kim (Pohang University of Science and Technology), Cha Hee Jung (Korea University), Haeum Park (Korea University, Korea Institute of Materials Science), JeongWoong Park, Dawon Kang, Hyeongin Park (Kookmin University), Jeongmin Park (Korea Institute of Materials Science), Hyun Joo Choi (Kookmin University), Hyoung Seop Kim (Pohang University of Science and Technology, Graduate Institute of Ferrous & Eco Materials Technology), and Jae Bok Seol* (Kookmin University)

P13-20

Directed Energy Deposition 공정의 급속 응고 모델 검증

박건우 (울산과학기술원), 김대중 ((주)에이엠솔루션즈), 구용모 ((주)창성), 김성욱 (포항산업과학연구원), 이기안 (인하대학교), 김병준 (한국생산기술연구원), 박성수 (울산과학기술원), 전종배* (동아대학교)

P13-21

전산유체역학 시뮬레이션을 활용한 인코넬 718 적층재의 용융풀 거동 분석

조덕현, 이학성, 전종배* (동아대학교)

P13-22

Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 구조 및 미세조직 변화에 따른 압축 변형 거동 분석

차다은, 박준영, Muhammad Ishtiaq, 강성규* (경상국립대학교)

P13-23

레이저 적층제조 공정이 적용된 무산소동 코팅층내 희석거동 평가

이영호*, 김재득, 윤석 (한국원자력연구원)

P13-24

Effect of Ni content on the wear and corrosion resistance of WC-Ni cemented carbides prepared by spark plasma sintering

Namhyuk Seo, Ji-Woo Park, and Min-Su Kim* (KITECH)

P13-25

Alloy 939 합금의 DED 공정 최적화 및 미세조직 · 기계적 특성 평가

김범준 (주식회사 갓테크), 김영우 (경상국립대학교), 이진수, 신현승, 박기덕 (주식회사 갓테크), 김정기* (경상국립대학교)

P13-26

Laser Powder Bed Fusion 공정으로 제조된 SA508 Gr.3 강의 인장 및 고주기 피로 특성

황원구 (인하대학교), 류호진 (한국과학기술원), 이기안* (인하대학교)

P13-27

Inconel 625 합금 적층재의 고온 압연 패스에 따른 미세조직 및 기계적 특성 분석

임민혁*, 김현중, 조성재, 신승환, 홍민기, 이지운*, 홍순직 (공주대학교)

P13-28

Directed Energy Deposition(DED) 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V와 산화물 분산 강화 합금의 적층 형상 및 물성 비교

정재우*, 이윤선, 성지현, 김건우, 김다혜* (한국생산기술연구원)

P13-29

Binder Jet 적층제조용 고탄소강 분말 제조 수율 향상 기술 연구

김영겸, 이주호, 채유빈, 박은수* (주식회사 이엠엘)

P13-30

In-situ 가스 분무법에 의한 Y_2O_3 산화물 분산 강화 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 합금 분말의 합성

임현태, 곽륜호, 박성민, 박창수, 박형기* (한국생산기술연구원)

P13-31

재료 압출 방식으로 적층 제조된 구리의 충격 거동 분석

홍민기, 임민혁, 배주은, 이지운*, 홍순직, 송기안, 문종언 (공주대학교)

P13-32

DED 공정으로 제작한 Inconel 718의 용체화 열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가

이윤선, 김다혜* (한국생산기술연구원)

P13-33

Ni계 내열 합금의 고온 특성

김송이, 권도훈, 김휘준* (한국생산기술연구원)

P13-34

DED 공정을 이용한 Advanced 625 합금제조 및 기계적 · 미세조직적 특성 평가

신현승 (주식회사 갓테크), 이욱진 (부산대학교), 김범준, 이진수, 박기덕* (주식회사 갓테크)

P13-35

DED 공정에 적합한 Alloy 230 합금 조성 개발 및 기계적 특성 평가

이진수, 김범준, 신현승, 박기덕 (주식회사 갓테크), 나혜성 ((주)헤이치브이엠), 박상원 (포항소재산업진흥원), 김세윤* (경남대학교)

P13-36

Tribological Behavior of STS316L Sintered Body and Cu/STS316L Composite Fabricated by Binder Jetting Process

Kyung Il Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)

P13-37

진공가스아토마이징 시스템을 활용한 고청정 Alloy 230 초내열 합금분말 제조 및 적층 특성

박상원*, 권홍기 (포항소재산업진흥원), 박기덕 ((주)갓테크), 나혜성 ((주)에이치브이엠)

P14 : 디스플레이재료

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P14-1

All-inorganic InP Quantum Dots with Chalcogenidometallate Ligands for Biosolar Catalysis

Jaehwan Lee, Yonghan Jo, and Himchan Cho* (KAIST)

P14-2

Bright Colloidal Blue-emissive Europium Halide Perovskite Nanocrystals

Jaeyeong Ha, Seongbeom Yeon, Jaehwan Lee, Hyungdoh Lee, and Himchan Cho* (KAIST)

P14-3

Interface-modified Nickel Oxide Hole Transport Layers for Low-operating Voltage Perovskite Light-emitting Diodes

Hyungdoh Lee and Himchan Cho* (KAIST)

P14-4

수열합성법으로 제조된 ZnO 분말의 나노구조 및 광학적 특성 변화

임채림 (인하대학교), 김효한 (동국대학교), 박현순* (인하대학교)

P14-5

Enhanced Detectivity in Infrared Quantum Dot Photodetectors via P-Type Ink-Based HTL and ALD-Induced Solvent Orthogonality

Hong Gu Kang* (Hanyang University), Ju Young Woo (Hanyang University, Korea Institute of Industrial Technology), and Seong-Yong Cho* (Hanyang University)

P14-6

Electrically Driven Amplified Spontaneous Emission in Perovskite Diodes

Changsoon Cho* and Jeonghwan You (Pohang University of Science and Technology)

P14-7

Influence of Organic Spacer Length on Quantum Well Structure and Carrier Dynamics in Quasi-2D Dion-Jacobson Lead Halide Perovskites

Hyeonji Lee and Kwangdong Roh* (Ewha Womans University)

P14-8

Primary-Blue Emitting Stretchable Color-conversion Layer with In-situ Synthesized Perovskite Nanocrystals Embedded in an Organic Matrix

Jun-Su Yeo, Eun-Ha Cho, Joo Yoon Woo, Yong Min Park, Joo Hyeong Han, Daehwan Kim, Won Bin Im, and Tae-Hee Han* (Hanyang University)

P14-9

High-Efficiency Perovskite Nanocrystal Light-Emitting Diodes Enabled by Multi-Site Coordinating Ligands

Jongho Park, Dae Hwan Kim, Ji Su Ha, Jun-Su Yeo (Hanyang University), Han Uk Lee, Hyeon Woo Kim, Sung Beom Cho (Ajou University), and Tae-Hee Han* (Hanyang University)

P14-10

Highly-Efficient Perovskite Nanocrystal Light-Emitting Diodes based on interior/exterior Strain Relaxation

Dae Hwan Kim, Jong Ho Park, Ji Su Ha, Jun-Su Yeo (Hanyang University), Han Uk Lee, Hyeon Woo Kim, Sung Beom Cho (Ajou University), and Tae-Hee Han* (Hanyang University)

P14-11

RF sputtering으로 증착된 SnO_2 전자 수송층을 적용한 QLEDs의 성능 향상 연구

최재휘, 김지완* (경기대학교)

P14-12

$P(DEA)_3$ 전구체를 이용한 균일한 크기 분포의 InP/ZnSe/ZnS 양자점 합성과 QLED 응용

조성현, 윤예닮, 김지완* (경기대학교)

P14-13

전주도금 공정에서 pH와 온도 제어에 따른 Invar 박판의 미세조직 상과 표면 형상의 변화

김선민, 김진범, 김인경, 박용범, 신세은* (순천대학교)

P14-14

Enhancing the Performance of Lead Halide Perovskite for Lasing via Halide Exchange Method

Yejin Jun and Kwangdong Roh* (Ewha Womans University)

P14-15

승온 속도 및 소결 온도가 MoO_2 소결체의 입성장과 치밀화에 미치는 영향에 대한 연구

정재훈 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 이종범* (한국생산기술연구원)

P14-16

Fabrication and Process Optimization of IZO Thin-Film Transistors Using a Slush-State Precursor in Solution Processing

soosang chea* and Jihyeok Jeong (Korea University of Technology and Education (KoreaTech))

P14-17

Eco-friendly Fabrication of Quantum Dot Light-emitting Diodes Using Bright and Stable Hydrophilic QDs

Jisu Han (Sungkyunkwan University), Jeongha Whang (Sungkyunkwan University, Gyeongsang National University), Byong Jae Kim, Hyeongjun Klm (Sungkyunkwan University), Donggu Lee (Gyeongsang National University), and Jaehoon Kim* (Sungkyunkwan University)

P14-18

InP 기반 양자점 발광 다이오드의 정공수송층 열화 분석

박강현, 황준연, 이광근, 곽정훈* (서울대학교, 반도체공동연구소(ISRC), 소프트파운드리연구소)

P14-19

Direct Photocatalytic Patterning for Efficient Perovskite Nanocrystal Light-Emitting Diodes

Seongkyu Maeng , Junho Kim, Taehyun Klm, Seyun Lee , Sun Jae Park, and Himchan Cho* (KAIST)

P14-20

PEALD를 이용한 Al_2O_3 박막의 Passivation 특성에 관한 연구

김성종, 김병량, 홍영규, 이규홍* (한국전자기술연구원)

P14-21

Modulation of Metal-ligand Complex for Balancing Reactivity in Formation of Homogeneous InGaP Quantum Dots

Doheon Yoo (DGIST, Dongguk University), Jongmin Choi (DGIST), and Min-Jae Choi* (Dongguk University)

P14-22

PI 기판을 활용한 유연 IGZO 박막 트랜지스터(TFT) 제작에 관한 연구

김시연, 김성종, 김재선, 이혁주, 강준호, 조인성, 박영민, 김병량, 이규홍, 홍영규* (한국전자기술연구원)

P14-23

Design and Optimization of Perovskite-Based Optical Lasers: Utilizing Amplified Spontaneous Emission and Distributed Feedback Structures

hyeonjung cho and changsoon cho* (Pohang University of Science and Technology)

P14-24

Precise Control of Ag_2Te Quantum Dot Synthesis via Alternative Tellurium Precursors for Enhanced Stability and Uniformity

Ga Yeon Kwon and Min-Jae Choi* (Dongguk Univ.)

P14-25

In-Situ Tailored Crystal Growth Termination for High-Efficiency and Stable Perovskite Nanocuboid LEDs

Joo Yoon Woo, Jeong Wook Jang, Min Gyo Kim, Jong Ho Park, Dae Hwan Kim, and Tae-Hee Han* (Hanyang University)

P14-26

Controlling Interfacial Defect Emission in $AgInGaS_2/AgGaS_2$ Core/Shell Quantum Dots via Metal Halide Treatment

이현준*, 박성경, 김병재, 정운호, 이강현, 임재훈* (성균관대학교)

P14-27

Polarity-driven Assembly for Multi-dimensional Quantum-Dot Nano-Architectures with Strong Optical Responses in Luminescence and Chirality

Geon Yeong Kim, Doohyoung Lee, and Yeon Sik Jung* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

P14-28 **Canceled**

In-situ STEM-DPC biasing을 이용한 OLED 소자 내 전기장 분포 이미징

윤진하, 이기용, 김종일 (한국에너지공과대학교), 신미향, 이용희, 한석규 (삼성디스플레이), 오상호* (한국에너지공과대학교)

P15 : 상변태

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P15-1

SCM435강의 템퍼링 온도/시간에 따른 기계적 특성 분석

김선진, 박지니, 오정석 (국립한밭대학교), 최정묵 ((주)진합), 박준식* (국립한밭대학교)

P15-2

Silicide 코팅된 Nb–16Si–22Ti–5Cr–3Al 합금의 산화 거동 및 Silicide 수명에 대한 고찰

오정석, 박지니, 김선진, 박준식* (국립한밭대학교)

P15-3

VC기반 분말야금 공구강의 상 형성 거동에 미치는 V 함량의 영향

박성민 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 김대하 (포항금속소재산업진흥원), 임현태 (한국생산기술연구원), 고원석 (인하대학교), 박광석, 서보성, 박창수 (한국생산기술연구원), 김동회* (고려대학교), 박형기* (한국생산기술연구원)

P15-4

Laser reflow 및 Mass reflow 공정을 이용한 SAC305 접합부의 특성 분석

장준호, 강승연, 조정원, 황진하*, 류채우* (홍익대학교)

P15-5

배기밸브 스핀들용 고강도-고연신 NiCrAl 합금 설계

윤성민, 김가영, 유채은, 이제인* (부산대학교)

P15-6

열처리 조건에 따른 Fe–Ni/Fe–Ni–3.2Mn 바이메탈 소재의 확산 거동 및 미세조직

노주림, 송유진 (국립공주대학교), 한준희, 전재열 (한국생산기술연구원), 김대근 (고등기술연구원), 이진규* (국립공주대학교)

P15-7

과포화고용체상 유도 기반 Cu–Ge 컬러합금의 색상범위 확대 및 기계적 물성 향상에 대한 연구

손정호, 심아진, 정의감, 강결찬, 박혜진, 홍성환 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범* (세종대학교)

P15-8

Cu–Ni–Cr 컬러합금의 변형량 제어를 통한 미세조직 변화 및 기계적 · 광학적 특성 연구

장성문, 정의감, 조가은, 강결찬, 박혜진, 홍성환 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범* (세종대학교)

P15-9

Influence of V on the Microstructure and Mechanical Characteristics of $(CrFeNiCu)_{100-x}V_x$ High Entropy Alloys

Dilshodbek Yusupov*, Abbas Muhammad Aoun, Gyeol Chan Kang, Dong Sung Hong, Hae Jin Park, Sung Hwan Hong, and Ki Buem Kim* (Sejong University)

P15-10

수소 배관용 심리스강관의 Mn/C 함량에 따른 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향

임성진, 이강진, 박상민, 송기안* (공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

P15-11

DC 마그네트론 스퍼터링용 고엔트로피 합금 타겟의 미세구조 및 특성 분석

현명우, 이유진, 서진오, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

P15-12

Development of Bulk Metallic Glass for Thermal Neutron Shielding with High B and Gd Content

Seonghoon Yi* and Hyeseong Choi (Kyungpook National University)

P15-13

Electrochemical Properties of Fe–Based Amorphous Ribbons

Moosung Kim (Kyungpook National University), Sangeon Jun (Seoul National University), Juneyoung Lee, Sejin Jang, Seonghoon Yi* (Kyungpook National University), and Howon Jang* (Seoul National University)

P15-14

Al 첨가에 따른 Cu–Al 합금의 광학적 특성 및 기계적 물성 변화 연구

조창희*, 조가은, 박혜진 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범 (세종대학교)

P15-15

Advancing Sharpness with Metallic Glass Blades

Sejin Jang, Moosung Kim, Juneyoung Lee, and Seonghoon Yi* (Kyungpook National University)

P15-16

열처리를 통한 Zr계 비정질 합금의 구조 튜닝과 그에 따른 기계적 반응

이명준, 유근희 (서울대학교), 류욱하 (국립금오공과대학교), Shuang Su (Harbin Institute of Technology), 박은수* (서울대학교)

P15-17

Analysis of Self–Healing Behavior in Co–Based Superalloys by Spontaneous Segregation of B and Y During In–Situ Tensile Test at Elevated Temperature

민현기 (서울대학교), 윤국노 (University of California Berkeley), 박은수* (서울대학교)

P15-18

AB_2계 수소저장합금의 라베스상 형성 거동 연구

이소영 (서울대학교), 박형기 (한국생산기술연구원), 박은수* (서울대학교)

P15-19

Influence of High–Entropy on the Mechanical Properties of Metallic Glasses Dynamical Mechanical Behavior and Nano–Indentation Properties

Yitian Yin (Northwestern Polytechnical University), Myeong Jun Lee (Seoul National University), Wook Ha Ryu (Kumoh National Institute of Technology), Jichao Qiao* (Northwestern Polytechnical University), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

P15-20

Nanomechanical Performance of Metallic Glasses Under Different Structural States

Shuang Su (Harbin Institute of Technology, Seoul National University), Myeong Jun Lee (Seoul National University), Zhiliang Ning*, Yongjiang Huang (Harbin Institute of Technology), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

P15-21

통전 처리에 따른 Cu–Ni–Si계 합금의 미세조직 및 경도 변화

정이화, 장정아, 강성규* (경상국립대학교)

P15-22

열처리에 따른 석출강화형 Cu–4.5Ni–0.95Si 합금의 미세조직, 전기적 및 기계적 특성 변화 분석

장정아 (경상국립대학교), 안지혁 (한국재료연구원), 강성규* (경상국립대학교)

P15-23

모사회절패턴을 이용한 준안정 β–Ti 합금의 ω상 이중회절 해석

김진하* ((주)피레타), 최병학 (국립강릉원주대학교)

P16 : 철강-제선,제강,환경,에너지

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P16-1

Single Hot Thermocouple Technique(SHTT)을 이용한 슬래그 중 Al_2O_3 함량에 따른 CaO의 용해속도 연구

이나경, 정용석* (한국공학대학교)

P16-2

열분해에 의한 폐타이어의 성분 및 열량 변화

명재욱, 김선중* (조선대학교), 김장열, 김영현 (포항산업과학연구원)

P16-3

유동층 계산 가속화를 위한 기계학습 기반 차수축소모델 개발

서승원, 진봉민, 양현진* (인하대학교)

P16-4

Investigation of Microstructure Evolution of Iron Ore Fines by Dehydration

DAVIN MYOUNG, Eunju Kim, Inkook Suh, and Joonho Lee* (Korea University)

P16-5

Novel Cu Equivalent Formula for Suppressing Hot Shortness Induced by Cu–Rich Liquid Phase Formation in EAF Steel

Cho Minseo and Joonho Lee* (Korea University)

P16-6

슬래그 내부 가스 발생 및 탈산 반응에 미치는 폐플라스틱 첨가 가탄재의 영향

안효주, 박노근* (영남대학교), 강영조, 심상철 (동아대학교), 이은진, 김효민 (머티리얼솔루션파크)

P16-7

철광석 펠렛의 가스 환원 속도상수 측정

이지언, 유홍재, 강영조* (동아대학교)

P16-8

다입경-다상유동모델을 이용한 유동층 내 유동화 특성 평가: 단일 입경 모델과의 비교 분석

심승현, 진봉민, 양현진* (인하대학교)

P16-9

폐콘크리트의 전기로 제강공정 활용 가능성 평가

윤누가, 서인국, 이준호* (고려대학교)

P16-10

Bottom–Blowing 가스 주입을 통한 용강 중 질소 제거반응의 속도론적 고찰

변근우, 박주현* (한양대학교)

P16-11

전기로 슬래그 포밍에 대한 조성, 온도, 가탄재 영향

김기현*, 임동혁, 차흥주 (고등기술연구원)

P16-12

수세 처리를 통한 철강 공정 부산물 內 유해 물질 제거 기술 개발

강순형, 정용수*, 김현, 김희원 (포항산업과학연구원), 홍순곤 (POMIA), 홍성표, 김정근 (베페사징크코리아(주))

P16-13

철강부산물을 이용한 합금철 전구체 제조 기술 개발

김희원*, 정용수*, 김현, 강순형 ((재)포항산업과학연구원), 홍순곤 ((재)포항소재산업진흥원(POMIA)), 성민경, 김중현 (베페사징크코리아(주))

P16-14

직접환원철 제조 공정에서의 펠렛 환원분화 특성 연구

박태준* (한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이동수, 김혁 (현대제철)

P16-15

전기로 공정 조건에서 열간압축철(HBI) 사용 비율 및 탄소함량 변화에 따른 용강, 슬래그 변화 예측

이민주, 박주현* (한양대학교)

P16-16

Development of Flux Manufacturing Technology for Inclusion Refining in the Use of Wasted–Refractories and Industrial By–products

김인아, 정은진* (포항산업과학연구원)

P16-17

Dissolving C in molten Fe

Sudipta Bag (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science & Technology), Vijay Gupta, Won Kyung Seong, Benjamin Cunning (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science & Technology)

P17 : 전산재료과학

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P17-1

Atomistic simulations of $TiMn_2$–based hydrogen storage alloys using a Machine–Learing–Based Deep Potential

Hun–Min Jo and Won–Seok Ko* (Inha University)

P17-2

Computational Insights into Engineered Linear Carbonates for Nonflammable Li–Ion Battery Electrolytes

Ukseon Shin (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Jina Lee, A–Re Jeon, Minah Lee* (Pohang University of Science and Technology), and Dong–Hwa Seo* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

P17-3

Enhancing Selective Hydrogen Peroxide Production Through Structural Tuning of Molybdenum Phosphide Catalysts: A Density Functional Theory Study

Bogeun Park (Hanyang University), Hyeuk Jin Han* (Sungshin Women's University), Min–Jae Choi* (Dongguk University), and Byung–Hyun Kim* (Hanyang University)

P17-4

네킹의 곡률을 활용한 재료의 변형률 속도 민감도 측정

고태영, 권지혜, 구강희, 김형섭* (포항공과대학교)

P17-5

나노 압입 시험을 통한 결정립 국부변형거동 측정과 CP–FEM을 활용한 인장 물성 예측 연구

신선호, 성효경* (국민대학교), 하상렬 (명지대학교)

P17-6

First–Principles Studies of the Stability, the Electronic Properties and the Optical Properties of the TiB_2(0001)/TiN(111) Interfaces

Seon Young Jeon and Won June Kim* (Changwon National University)

P17-7

First–Principles Studies on the Ferroelectric Switching of Hafnia: Effect of Oxygen Vacancy and Nitrogen Defects

Inhwan Oh and Won June Kim* (Changwon National University)

P17-8

Effect of Lattice Distortion on Hydrogen Diffusion in Hydrogen Storage Alloys : An atomistic simulation study

Ji–Su Lee and Byeong–Joo Lee* (POSTECH)

P17-9

A Computational Study of Copper Phthalocyanine as an Effective Catalyst for Li–CO_2 Batteries

Huncheol Seo and Byung–Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

P17-10

Exploring the Possibilities of Pt Nanostructure Size for Enhanced Oxygen Reduction Reaction Efficiency

Seokho Lee, Seohee Jang, Yeonwoo Do, Janghyeon Oh, and Kihyun Shin* (Hanbat National university)

P17-11

Enhanced Oxygen Evolution Reaction Performance of Co_4N via Al and Sn Substitution: A DFT Study

Minhyeok Choi (Hanyang University ERICA), Myeongjin Kim* (Kyungpook National University), and Byung–Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

P17-12

Pathway Analysis and Catalyst Design for Coke Mitigation in Dry Reforming of CH_4 and C_2H_6

Chaehyeon Moon and Byung–Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

P17-13

Enhancing Lithium Metal Battery Performance: Investigating the Role of Oxygen–Rich Nanodiamonds in Suppressing Dendrite Formation Using Density Functional Theory

Dongkyung Kim, Won Cheol Yoo*, and Byung–Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

P17-14

Fully–Coupled Simulation of Bipolar Filamentary Resistive Switching by Phase–field and Electrothermal Models

Jinwoo Oh, Dongmyung Jung, and Yongwoo Kwon* (Hongik University)

P18 : 이차전지 원료소재

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P18-1

Lithiophilic Metal–Coated Mesoporous Graphite for Enhanced Stability and Performance in Lithium–Ion Battery Anodes

Yehui Kim (Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Junghoon Yang (Korea Institute of Industrial Technology), Soongju Oh (Korea University), and Dong–Hyun Kim* (Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology)

P18-2

리사이클 실리콘 음극의 바인더 전해질 최적화 및 Mg 영향 평가

이효연, 네르시시얀 하이크 (충남대학교), 정경진 (주식회사 시리에너지), 이종현* (충남대학교)

P18-3

EoL LIB 황산 침출액 중 유가금속의 일괄 전해 기초연구

하륜, 강영조* (동아대학교), 류지훈 (에바싸이클)

P18-4

메탄술폰산계 심층 공융 용매를 이용한 양극활물질 침출

김유진 (서울과학기술대학교), 카인와이진, 김재연 (한국재료연구원), 변재원* (서울과학기술대학교)

P18-5

열처리 공정 변수에 따른 전해 동박 특성 영향

윤태환, 임효균, 윤준서, 강병재, 박일송*, 우태규* (전북대학교)

P18-6

전해동박 제조에서 MPSA와 PVP 첨가제의 물성에 대한 주효과 분석

임효균, 윤태환, 윤준서, 박일송*, 우태규*, 강병재 (전북대학교)

P18-7

Tailoring Phase Ratios in Partially Ordered Cathode Materials
김호준, 박상욱, 서동화* (한국과학기술원)

P18-8

Improving the Cyclability of Silicon Anodes for Li–ion Batteries Using Titanium Dioxide Nanosheets
Sol Han, Jeong Yun Hwang*, and Kyu Hyung Lee* (Yonsei University)

P18-9

Optimization of Carbonization Temperature for Enhancing the Electrochemical Properties of Monodisperse Carbon/SiO_2 Anodes in Lithium–Ion Batteries
Kyungin Kim, Xue Dong, Chaeheon Woo, and Jae–Young Choi* (Sungkyunkwan University)

P18-10

Microstructure–Guided Design of Co–precipitated Hydroxide Precursors using Diffusion Model
Changhwan Lee* (POSCO HOLDINGS)

P18-11

수계 아연–이온 전지용 음극재의 Al 첨가에 따른 전기화학적 특성 평가
곽대영 (한국생산기술연구원), 윤기혁, 안건형 (동국대학교), 한준희 (한국생산기술연구원), 전재열* (한국생산기술연구원)

P18-12

양극재 폐소성용기의 침출액(Li_2SO_4)으로부터의 수산화리튬(LiOH) 전환 연구
왕제필*, 김진성, 유주원, 임아진 (국립부경대학교 , BB21 사업단), 박종성, 맹지윤 (국립부경대학교)

P19 : 표면계면

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P19-1

STM을 활용한 $Ti_3C_2T_x$ MXene의 표면 및 전자 구조 측정
윤철환, 노준섭, 박재은, 권순용, 신형준* (울산과학기술원)

P19-2

이온결합물질의 표면 이온 탈착 메커니즘
유동엽, 김요한, 신형준* (울산과학기술원)

P19-3

원자탐침단층촬영법을 활용한 Ni계 고엔트로피 합금의 열처리에 따른 γ–γ' 형성 및 조성편석에 관한 연구
김유석, 김시현, 박서연, 이규호 (인하대학교), 신원상 (성균관대학교), 김윤준* (인하대학교)

P19-4

Study on Hydrophilic/Hydrophobic Conversion Mechanism on TiO_2 Surface via Graphene Transfer
YunJin Kim, Soosang Chae* (Korea University of Technology and Education),So Rim Lee, and Taeil Lee* (Gachon University)

P19-5

Characterization of Oxide Layer Formation under Accelerated Corrosion Conditions with Na–EDTA Assistance
Sang–Hun Lee, Mansoo Choi, Wang–Kyu Choi, Seon Byeong Kim, Byung–Seon Choi, and Seung Joo Lim* (Korea Atomic Energy Research Institute)

P19-6

Eco–Friendly and Sustainable Synthesis of Single–Walled Carbon Nanotubes from CO_2 via Fluidized Bed CVD
Hyeri Cho, Seung Hyun Nam, and Dong Young Kim* (Korea Carbon Industry Promotion Agency)

P19-7

Highly Selective Synthesis and Nanoporosity Analysis of Double–Walled Carbon Nanotubes via Fluidized Bed Chemical Vapor Deposition
Seung Hyun Nam, Hyeri Cho, and Dong Young Kim* (Korea Carbon Industry Promotion Agency)

P19-8

Tunable Nanoporosity in Single–Walled Carbon Nanotube Assemblies via Interfacial Engineering
Dong Young Kim* (Korea Carbon Industry Promotion Agency)

P19-9

분말 표면 코팅을 통한 고 기능성 표면 특성 구현
황세훈, 정다운, 이호년* (한국생산기술연구원)

P19-10

근접 스퍼터링 공정에 따른 CrN 박막의 물성 변화 연구
황세훈*, 정다운, 이호년 (한국생산기술연구원)

P19-11

단일 이온의 선택적 용해
한희준 (울산과학기술원), 박윤재 (기초과학연구원), 김요한 (울산과학기술원), Ding Feng (울산과학기술원, 선전기술연구원), 신형준* (울산과학기술원, 기초과학연구원)

P20 : 인공지능재료과학

Room 3층 로비, 04월 24일 10:00 - 17:00

P20-1

머신러닝을 활용한 인장 특성과 구멍확장율의 정량적 분석
서혜진 (포항공대철강대학원), 이정아 (포항공대), 박재정 (카이스트), 최연택 (포항공대), 김래언 (포항공대철강대학원), 정재면* (한국재료연구원), 이승철* (카이스트), 서민홍 (포스코), 김형섭* (포항공대철강대학원)

P20-2

Optimized Data Architectures for NLP Applications: A Case Study in Hydrogen Storage Research
이수민, 최혜경 (Sungkyunkwan University), 노민종* (Samsung SDI Co., Ltd), 심재혁* (Korea Institute of Science and Technology), 김윤석* (Sungkyunkwan University, Korea Institute of Science and Technology)

P20-3

ZK60 압출재의 재결정 여부 예측을 위한 기계학습 모델 개발

천세호, 유진영, 이성호, 이태경* (부산대학교)

P20-4

지능형 모델링을 통한 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 전위 기반 소성 거동 모사

임현빈, 이정민, 송영환, 문종언* (공주대학교)

P20-5

고특성 Ti 합금 설계를 위한 LangChain 기반 대형언어모델 알고리즘 개발

서기완, 박은수* (서울대학교)

P20-6

AI-Based Automatic Extraction and Analysis of CO_2 Capture Technologies in Large-Scale Literatures

So Yun Jeong (Pukyong National University), Kyuri Choi, Kisung Moon, Byeol Kang, Yeol Kyo Choi, Hong Woo Lee (POSCO HOLDINGS), and Byung Chul Yeo* (Pukyong National University)

P20-7

Python 기반 이미지 일괄처리를 통한 효율적인 상분율 측정 방법 비교 연구

허성준*, 박노근*, 박재형, 천해영, 조진우 (영남대학교)

P20-8

Identification of High-Entropy Nickel Manganese Cathode with High Energy Density and Structural Stability through Machine-learning Interatomic Potential

Jaejung Park, Jinyoung Jeong (Soongsil University), Bumsoo Park, Kyoungmin Min* (Soongsil University), and Seungchul Lee*

P20-9

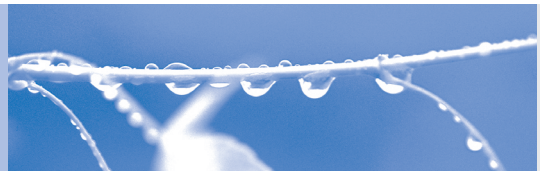
Fe-Mn-Si계 형상기억합금 성능 최적화 및 합금 설계 전략 구축을 위한 Large Language Model 활용

윤제인, 박은수* (서울대학교)

P20-10

Enhancing Nanoscale Resolution in AFM Images Using Deep Learning Algorithm

Jeongwoo Yang, Jintae Moon, Panithan Sriboriboon, and Yunseok Kim* (Sungkyunkwan University)



P21 : 에너지재료

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P21-1

가압경수로형 원전 2차 주요계통 부식생성물 특성 분석

강민정 (한국기술교육대학교, 한국원자력연구원), 하성준, 심희상 (한국원자력연구원), 권순우, 정소영, 김병훈, 권혁철 (한국수력원자력(주)), 전순혁* (한국원자력연구원)

P21-2

고이온전도도 $Li_7P_3S_{11}$ 고체전해질 개발을 위한 할로겐족 도핑 전략: 제일원리 및 분자동역학 계산 기반 연구

유승원, 최용석* (단국대학교)

P21-3

리튬 이온 배터리용 MS_2(M = Sn, Mo) 음극의 상반된 메커니즘과 동역학에 대한 원자 단위 계산 기반 해석

Song Jae-In, Yong-Seok Choi* (Dankook University)

P21-4

Activated Mn Through Controlled Structural Disorder Extends the Reversibility of Li/Mn-Rich Layered Cathodes

Seongkoo Kang, Dayeon Choi, Dahye Yoon, and Yong-Mook Kang* (Korea University)

P21-5

Deformation Mechanism Maps of Pure Lithium and Their Role in Stack Pressure Optimization for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries

Hee-Tae Jeong and Woo Jin Kim* (Hongik University)

P21-6

Electrochemical Properties of Aluminum-Magnesium Foils as the Anode Material for Rechargeable Batteries

Junoh Jung, Hee-Tae Jeong, and Woo-Jin Kim* (Hongik University)

P21-7

Effect of Carbon Nanotube Incorporation on Mechanical and Electrochemical Characteristics of Aluminum Foil Anodes in Lithium-Ion Batteries

JunYoung Kim, Hee-Tae Jeong, and WooJin Kim* (Hongik University)

P21-8

Controlling Interlayer Disorder Toward Reversible Phase Transition in a Layered Sodium Manganese Oxide Cathode

Seongkoo Kang, Jihyun Kim, and Yong-Mook Kang* (Korea University)

P21-9

Enhanced Zn Metal Anode Stability in Aqueous Zn-Ion Batteries via PVDF/Carbon Composite Passivation Layers

Annisaa Hayya Arundati, Najla Zulfikar (Pohang University of Science and Technology), Yeonwoo Seo (Korea Institute of Energy Research), Kyoungdoc Kim* (Pohang University of Science and Technology), and Segi Byun* (Korea Institute of Energy Research)

P21-10

이차전지 음극재용 TiX_2 (X = S, Se) 이차원 단결정 소재

유소현 (한국세라믹기술원, 연세대학교), Nguyen Vu Binh, 정용재, 남우현 (한국세라믹기술원), 이도근, 박종환 (한국전기연구원), 이규형 (연세대학교), 조중영* (한국세라믹기술원)

P21-11

할라이드 도핑 LLZO 전해질을 이용한 Li-Mg 대칭 셀의 전기화학적 안정성 평가

윤혜진, 염채연, 이승호, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

P21-12

Mo_2C 촉매를 이용한 CO_2 환원 촉매 반응 평가

이현주, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

P21-13

In-Situ Polymerized 3D $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ Nanowire Network as a Composite Solid Electrolyte for Solid-State Batteries

Seung-Ju Baek and Chan-Jin Park* (Chonnam National University)

P21-14

특정 결정면 성장 고엔트로피 탄화물 나노 촉매의 수전해 특성 평가 및 DFT를 통한 흡착에너지 계산

정준모, Hayk Nersisyan, 이종현* (충남대학교)

P21-15

$BaTiO_3$ 분말 크기 및 승온 속도 변화가 소결 거동에 미치는 영향

정재훈 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 이종범* (한국생산기술연구원)

P21-16

Hybrids of $NiFe_2S_4$ /MoS_2 as Efficient Catalyst for Water Splitting Applications

Karattadipalayam Periyasamy Nithyanandam, Perumal Naveenkumar, Munisamy Maniyazagan, Nayoung Kang, Hyeon-Woo Yang, and Sun-Jae Kim* (Sejong University)

P21-17

Surface Reconstruction Based on Hydrothermal Synthesis and Post-Treatment for Enhanced Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Water Electrolysis

Byeong-Chan Choi, Jinho Koo (Korea Institute of Industrial Technology, Pusan National University), Joosung Park, and Hyoung Chan Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)

P21-18

Intergranular Corrosion in Stabilized Ferritic Stainless Steel
JinHo Park* (Korea Atomic Energy Research Institute)

P21-19

슬러리 코팅 방법을 활용한 피복관 모사 크러드 층 제조 연구
하성준, 김기웅, 임상엽, 이종연, 전순혁, 심희상* (한국원자력연구원)

P21-20

균질화 온도에 따른 Zr 합금의 미세구조 변화 및 수소화물 석출거동 분석
임상엽, 이경근, 전순혁, 심희상* (한국원자력연구원)

P21-21

가압경수로형 원전 2차계통에서 복합불순물이 니켈기 합금의 일반부식에 미치는 영향 및 열역학적 고찰
임상엽, 심희상, 전순혁* (한국원자력연구원)

P21-22

TRU핵연료 공정수율 향상을 위한 반응방지 신소재 세라믹 도가니의 밀도 변화에 미치는 제조공정조건의 영향
박상규*, 안정수, 김기환, 송훈, 김준환 (한국원자력연구원)

P21-23

Oxide Purification in $MgCl_2$ Molten Salt by $SnCl_4$ gas Sparging
Dongjun Shin, Taeho Kim, and Changhwa Lee* (Korea Atomic Energy Research Institute)

P21-24

고농도 산소 공공이 도입된 Black TiO_{2-x} 나노입자 기반 고성능 태양광 증발 시스템 구현
전희연, 김정현, 이영인* (서울과학기술대학교)

P21-25

CTP 배터리용 방열소재를 위한 MgO 분말이 구상화 및 열처리 공정 개발
김지혜*, 박찬욱 ((재)대구기계부품연구원)

P21-26

Synthesized $SnSe_2$ via Salt Flux Method: Structure, Chemical, and Thermoelectric Characterization
Vu Binh Nguyen, So Hyeon Ryu, Yong-Jae Jung (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Yonsei University), Woo Hyun Nam (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology), Kyu Hyoung Lee (Yonsei University), and Jung Young Cho* (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology)

P21-27

A bimetal sulfide-rGO/NC as an anode material for Lithium-ion batteries
Naveenkumar Perumal, Munisamy Maniyazagan, Hyeon-Woo Yang, and Sun-Jae Kim* (Sejong University)

P21-28

A Study on the Cycle Test of ASS bettery Using Lithium Metal and Lithium Magnesium Alloy
김상우* (한국생산기술연구원)

P21-29

저분자 리그닌을 사용한 질소 도핑 활성탄의 제조 및 슈퍼커패시터 활물질로의 활용
박희진 (한국세라믹기술원), Md Rezaul Karim (영남대학교), 박소연 (광운대학교), 이태규, 남우현 (한국세라믹기술원), 최진우 ((주)이레사이언스), 임영수 (국립부경대학교), 신원호* (광운대학교), 조중영* (한국세라믹기술원)

P21-30

Cost-Effective Pt-Ce-Ni Catalyst with Ultra-Low Pt Loading for Industrial AEM Water Electrolyzers and PVEC Devices
양비룡*, Shahbaz Ahmed, Mallappa Mahanthappa, Debabrata Chanda, Gyung-gyun Park (Kumoh National Institute of Technology, GHS Co. Ltd.), Myung Seon Ryu (Pheonix Tech Co., Ltd.), Myung-sik Choi (S.J. Tech Co. Ltd.), Kweon Soon-Yong (Korea National University of Transportation)

P21-31

Improving PEM Water Electrolyzers with Surface-Engineered 1T'-Phase WS2 Nanosheets and Stabilized Ti_3C_2 MXene for Enhanced Performance and Cost-Efficiency
양비룡*, Debabrata Chanda, Ahmed Shahbaz, Mallappa Mahanthappa, Gyung-gyun Park (Kumoh National Institute of Technology, GHS Co. Ltd.), Myung Seon Ryu (Pheonix Tech Co., Ltd.), Myung-sik Choi (S.J. Tech Co. Ltd.), Kweon Soon-Yong (Korea National University of Transportation)

P21-32

Surface Interfacial Electronic Coupling-Driven Enhancement of HER and OER Performance in Cr-Mediated Ni_3Se_4/CoSe for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis
Bee Iyong Yang*, Mallappa Mahanthappa, Ahmed Shahbaz, Debabrata Chanda, Gyung-gyun Park (Kumoh National Institute of Technology, GHS Co. Ltd.), Myung Seon Ryu (Pheonix Tech Co., Ltd.), Myung-sik Choi (S.J. Tech Co. Ltd.), and Kweon Soon-Yong (Korea National University of Transportation)

P21-33

Enhancement of reactive performance in SnO_2 Nanorod-based gas sensor via room-temperature plasma surface treatment
Yoonhyeong Choi and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P21-34

MoO_2 분말 압축 밀도 변화에 따른 소결 특성 연구: 치밀화 속도 및 결정립 성장 분석
이종범, 정하국* (한국생산기술연구원)

P21-35

MoO_2 분말의 소결 과정이 미세구조 변화, 결정립 및 결정립 성장에 미치는 영향
이종범, 정하국* (한국생산기술연구원)

P21-36

Post-irradiation Examination (PIE) of reactor materials: EPMA Methods and the Need for Advanced Analytical Techniques
Gahyun Choi* and YangHong Jung (Korea Atomic Energy Research Institute)

P21-37

MOF-Derived Bimetallic Phosphoselenide Nanoparticles for an Efficient Bifunctional Electrocatalyst for Overall Water Splitting

Maniyazagan Munisamy, Perumal Naveenkumar, K. P. Nithyanandam, Hyeon Woo Yang, and Sun-Jae Kim* (Sejong University)

P21-38

Development of Rolling Process Model for U_3Si_2 Fuel Plate Using Finite Element Method

Kyeongmin Park, Gwanyoun Jung, Taewon Cho, Dongjun Park, Yongjin Jeong (Korea Atomic Energy Research Institute), Hyeongjin Kim, and Hojin Ryu* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

P22 : 마그넷

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P22-1

PLP 공정으로 제조한 Nd-Fe-B 소결자석에서 윤활제의 효과

김소연 (한국재료연구원, 울산과학기술원), 변재호, 이정구, 김태훈, 김수민* (한국재료연구원), 이기석* (울산과학기술원)

P22-2

Improvement of Magnetic Properties in Nd-Fe-B Sintered Magnets by Grain Boundary Diffusion Using Dry-Coated Pr-LRE-Tb-Al-Cu Alloys

Dong Hyun Lee (DGIST, Kyungpook National University), Seong Chan Kim, Hyeonjong Jeong, Ju-young Baek, Tae-Young Yun, Jong Tae Kim (DGIST), Donghwan Kim, Sang Hyub Lee (R&D Center, Star Group), Jong Wook Roh (Kyungpook National University), Dong Hwan Kim, and Jeongmin Kim* (DGIST)

P22-3

Influence of TbH_x Content on the Microstructural and Coercivity of Nd-Fe-B Sintered Magnets Processed by Spark Plasma Sintering and Internal Grain Boundary Diffusion

Seong Chan Kim (DGIST), Dong Hyun Lee (DGIST, Kyungpook National University), Jung Woo Ha (DGIST), Kyoung-Hoon Bae (R&D Center, Star Group), Jong Wook Roh (Kyungpook National University), Dalhyun Do (Keimyung University), Jong Tae Kim, Tae-Young Yun, Seok-Hwan Chung, Jeongmin Kim, and Dong Hwan Kim* (DGIST)

P22-4

Interrelation Between the Grain Structure and the Magnetic Properties of Melt-Spun Nd-Ce-Fe-B Ribbon

Jung Woo Ha, Hyeonjong Jeong, Seong Chan Kim (DGIST), Dong Hyun Lee (DGIST, Kyungpook National University), Ju-young Baek, Tae-Young Yun, Jong Tae Kim (DGIST), Jaehyuk Kim (Yonsei University), Seok-Hwan Chung, Jeongmin Kim, and Dong Hwan Kim* (DGIST)

P22-5

Effect of Heating Rate on the Soft Magnetic Properties of High-Fe Nanocrystalline Alloys

Eunjin Park, Jongil Lee, and Seonghoon Yi* (Kyungpook National University)

P22-6

Fe-based Soft Magnetic Composites for High-Frequency Power Applications Fabricated by Spark Plasma Sintering

Hyungjin Nam, Seongjun Kim, Mingyo Jeong, and Seonghoon Yi* (Kyungpook National University)

P22-7

Optimization of Dy-LRE-Zn-Cu Grain Boundary Diffusion for Enhancement of Magnetic Properties in Nd-Fe-B Sintered Magnets

Hyeonjong Jeong (DGIST), Dong Hyun Lee (DGIST, Kyungpook National University), Jung Woo Ha, Ju-young Baek, Tae-Young Yun, Jong Tae Kim (DGIST), Donghwan Kim, Sang Hyub Lee (R&D Center, Star Group), Seok-Hwan Chung, Dong Hwan Kim, and Jeongmin Kim* (DGIST)

P22-8

Effect of Cu Addition on the Thermal and Magnetic Properties of Fe-Based Amorphous Alloys

Seongjun Kim, Hyeongjin Nam, Mingyo Jeong, and Seonghoon Yi* (Kyungpook National University)

P22-9

Magnetic Properties and Microstructure Analysis of Hot-Deformed (Ce,La)-Fe-B Magnets with Eutectic Alloy Addition

Kyungmi Lee, Ye Ryeong Jang, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P22-10

Microstructural Optimization and Coercivity Enhancement in Nd-Ce-Fe-B Magnets through Grain boundary diffusion of Pr-La Mixed Alloy

Ye Ryeong Jang and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P22-11

Effect of Grain Boundary Diffusion with Tb-saving Tb-X-Cu (X=La or Ce) Sources on Microstructure and Coercivity of Nd-Fe-B Sintered Magnets: A Comparative Study with Tb-Cu Source

김혁중 (한국재료연구원, 포항공과대학교), 김수민, 김태훈* (한국재료연구원), 이준민* (포항공과대학교), 이정구 (한국재료연구원)

P22-12

Densification and Magnetic Properties of $Sm_2Fe_{17}N_3$ Bulk Magnets Processed via Spark Plasma Sintering and Hot Pressing

Jaehyuk Kim, Ye Ryeong Jang, Ho Jeong Kim, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P22-13

Microstructural Investigation of a Nanocrystalline Nd-Fe-B Magnet Prepared by Laser Powder Bed Fusion

Ho-Jeong Kim (Yonsei University), Taesuk Jang (Sunmoon University), Du-Rim Eo, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P22-14

Development of Ultra-High Performance Nanocrystalline Soft Magnetic Materials through Control of Precipitation Temperature of Alpha-Fe Phase

Subin Ahn (Seoul National University), Wook Ha Ryu (Kumoh National Intsitute of Technology), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

P22-15

NdFeB 제조를 위한 FeB 원료내에 존재하는 탄소 제어 열환원 공정 개발

김완규, 이병건, 김가민, 박선영, 구광모* ((주)케이에스엠테크놀로지)

P22-16

Packing Density Behavior of Amorphous Soft Magnetic Powder Using DEM Simulation

Jungjoon Kim, Sang-Min Yoon (Institute for Advanced Engineering), Hiw-Jun Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Dae-Weon Kim, Young-Kyun Kim* (Institute for Advanced Engineering), and Hyunjoo Choi* (Kookmin University)

P22-17

자기장 변조를 통한 자기 도메인 패턴 형성 기술의 산업적 응용 연구

이재웅*, 이효수, 이해중, 박태훈 (한국생산기술연구원)

P22-18

동적 디스플레이 구현을 위한 나노 입자 거동 예측 및 패턴 연구

홍정범, 박종관, 고병철* (인하대학교), 이효수, 이해중, 이재웅 (한국생산기술연구원), 황민영, 우종봉, 이종호 (데코벨리(주))

P23 : 복합재료

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P23-1

비금속 원자를 활용한 Al-Zn-Mg-Cu-O 합금에 MWCNT와 SiC의 첨가로 인한 석출물 거동에 따른 미세조직과 기계적 성질의 변화

박현우, 조운성 (순천대학교), 배동현, 이진원 (연세대학교), 신세은* (순천대학교)

P23-2

Delivering Carbon in Liquid Metal Flux at Ambient Pressure

Md Mahbubul Alam (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology), Vijay Gupta (Institute for Basic Science), Yousaf Adnan (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology), Benjamin Cunning, Won Kyung Seong (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology)

P23-3

Cu-Ag 합금 용탕을 이용한 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 내 3차원 연속연결 다상 헤테로구조 제작

조호근, 최문수 (단국대학교), 한승전 (한국재료연구원), 김형섭 (포항공과대학교), 주수현* (단국대학교)

P23-4

형상기억 $(CeO_2-ZrO_2)_p$ 강화 Al 복합재료의 RVE 모델을 통한 변형 거동 및 입자 형상 효과 분석

장정혁, 조의제* (국립순천대학교)

P23-5

탄소섬유의 배향에 따른 CF/Mg 금속복합소재 특성 변화 연구

이태호, 박현재 (한국재료연구원, 부산대학교), 신상민, 조승찬, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 김양도 (부산대학교), 김정환* (한국재료연구원)

P23-6

아크 플라즈마 용해공정을 통한 Ti-TiC 복합재료 제조

김태윤 (부산대학교), 김재혁 (한국재료연구원), 이제인* (부산대학교)

P23-7

고종횡비 TiC/Fe계 금속복합재를 활용한 초고속 가공용 샤프트 소재 개발 및 동적 특성 향상 연구

박현재 (한국재료연구원, 부산대학교), 신상민 (한국재료연구원), 이태호 (한국재료연구원, 부산대학교), 조승찬, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 김양도 (부산대학교), 김정환* (한국재료연구원)

P23-8

주조기반 고방열 저열팽창 마그네슘 금속복합재료 개발 및 열적 특성 평가

정다운, 김민수, 조은서, 신상민, 김정환, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 김양도 (부산대학교), 조승찬* (한국재료연구원)

P23-9 **Canceled**

방전 플라즈마 소결법을 이용한 Al-Gr 복합재료의 제조 및 열전도도 특성

박유균, 양민혁, 김영중 (한국생산기술연구원, 전남대학교), 박현국* (한국생산기술연구원)

P23-10

차량용 PVT 시스템에 의한 열영향도 분석 및 단열성능 접착 조건 확보를 위한 FEM 열전달 해석 평가

김재웅*, 하을용 (한국생산기술연구원)

P23-11

난연 성능이 개선된 복합재료 기반 배터리 팩 케이스 내구성 성능 평가

김재웅*, 김영현 (한국생산기술연구원)

P23-12

편상 자성합금 분말/폴리머 복합 필름의 제조와 자기장 차폐 특성

서지희, 유가인, 주성후, 이명복* (대진대학교)

P23-13

전기자동차의 NVH이슈를 최소화하기 위한 제진 접합 기술

이동준*, 김지훈, 손인아, 박주용 (디에스피)

P23-14

귀금속 기능화한 산화 텅스텐의 이산화탄소 감응 특성 연구

김진영, 박현준* (한국생산기술연구원)

P23-15

Enhancing High-Voltage Insulation Performance of Polypropylene with Polyvinylidene Fluoride Additive

Seunggun Yu* and Ohuk Lee (Korea Electrotechnology Research Institute)

P23-16

세라믹 입자 강화 알루미늄 복합소재의 중성자 흡수 및 열전도도 특성 연구

강민우, 이동현, 김정환, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 권한상 (부경대학교), 이태규 (국립한밭대학교), 조승찬* (한국재료연구원)

P23-17

Rapid and Selective Isoprene Detection: The Impact of Polystyrene Template Size and Gold Catalyst on In_2O_3 Gas Sensor Performance

Hwang Junho (Yonsei University), See-Hyung Park (KOREATECH), Sungwoo Sohn (Yonsei University), Jae Han Chung, Yun-Haeng Cho, Young-Seok Shim* (KOREATECH), and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P24 : 가공-소성가공

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P24-1

철도 차륜 소재 개발 및 고온 기계적 변형 거동 분석

이정용, 윤은유, 홍종화* (한국재료연구원)

P24-2

신선 가공이 고탄소 강선의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

이승희, 박형준 (동아대학교), 정진영 ((주)고려제강), 강신곤* (동아대학교)

P24-3

냉간압연접합공정 및 이주속압연접합공정에 의해 제조된 AA1050/AA5052 층상 판재의 미세조직 및 기계적 성질

허현준, 조상현, 임기현, 이성희* (국립목포대학교)

P24-4

Investigation on the Strain Path Dependency of Non-heat treatment Fe-Cr-Mn Steel for Cold Heading Quality Wire Rod

Lee Jong Hyeok, Park Moon Won (Inha Manufacturing Innovation School), Lim Jae Han (Hyundai-Steel, Inha University), Lee Kyu Ho (Hyundai-Steel), and Jang Byoung Lok* (Inha Manufacturing Innovation School)

P24-5

하이퍼캐스팅용 공구강의 고온 변형 거동 및 동적 재결정 거동 연구

유민기, 곽대영 (한국생산기술연구원), 송민철 (현대IFC), 이진규 (국립공주대학교), 전재열* (한국생산기술연구원)

P24-6

SS400 일반구조용강의 가공경화(work hardening)에 의한 강도 향상 메카니즘

백민숙*, 김란 ((주)승산팩), 김병일 (주식회사 에스에스지)

P24-7

니켈도금강판을 이용한 4680 배터리 셀 캔 다단 딥 드로잉 공정 개발

서예찬 (한국재료연구원), 지수민, 이세동, 성홍석 (LT정밀), 윤은유, 홍종화* (한국재료연구원)

P24-8

Taylor 공정으로 제조된 SUS316L 마이크로 금속섬유의 SiO_2 보호층 제거를 위한 에칭 공정 연구

김민수, 함솔, 김다정, 박성주* ((주)에코파우더)

P24-9

하나로 핵연료 집합체 압출 공정의 표면불량 발생 및 개선 현황

김종환*, 이주화, 소원재, 김기남, 정용진 (한국원자력연구원)

P24-10

시뮬레이션 프로그램을 통한 알루미늄 전선의 특성 향상을 위한 인발공정 개선

임기현, 조상현, 허현준, 이성희* (국립목포대학교)

P24-11

연속 와인딩 적용 와이어의 기계적 물성 분석 및 성형공정 유한요소 해석 기법 개발

조유진, 안지섭 (한국생산기술연구원, 부산대학교), 황선광 (한국생산기술연구원), 조아라 (한국생산기술연구원, 부산대학교), 정명식* (한국생산기술연구원)

P24-12

이속압연 속도비 제어를 통한 알루미늄 합금 판재 기계적 물성 향상

허우로, 정영민, 양해웅* (포항소재산업진흥원)

P24-13

철강材의 친환경 전처리 목적 유기산 기반 산세 용액 개발

허은주, 하유리, 김경훈* (포항소재산업진흥원)

P25 : 재료분석

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P25-1

Stress Corrosion Cracking Behavior of 316L Pressurizer Heater Sheath in Nuclear Power Plant

Ho Jung Lee* (KHNP CRI)

P25-2

Crystallographic Evolution of Electroplated Cu Pillar Bumps and Its Impact on Interfacial Delamination

Taek-Soo Shin (Sungkyunkwan University, Samsung Institute of Technology), Jaejun Yoon, Minjae Sung, and Seung-Boo Jung* (Sungkyunkwan University)

P25-3

Solid-State Carbon Diffusion for Controlled Growth of Graphitic Nanostructures

Dongwook Kwak (Institute for Basic Science), Minhyeok Kim, Dong Ho Jeon, Yongqiang Meng (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology), Won Kyung Seong* (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology)

P25-4

Ti-6Al-4V 합금의 가공경화 미세조직 분석을 위한 에칭 기법 개발

김학현*, 이정훈, 배동화, 정수진 (포항산업과학연구원)

P25-5

초저온/대기 비개방 cryo-APT/cryo-EM 연계분석 플랫폼 구축 및 활용

박재경, 신원상, 박재현, 주재선, 양철웅* (성균관대학교)

P25-6

분말제조 공정 일체형을 위한 이동형 분말 분석기기 개발 연구

권용범, 이정훈, 조인희* (한국생산기술연구원)

P25-7

국내 매설 배관의 손상 사례 분석

김진원, 이만재, 김성남* (포항산업과학연구원)

P25-8

7000계 알루미늄 합금의 석출물 및 미세조직 분석 방법

이만재, 김진원, 김성남* (포항산업과학연구원)

P25-9

In Situ Gas Cell TEM Study on Temperature-dependent Growth of Carbon Nanofiber and Nanotube from Ethanol Vapor

Handolsam Chung, Myeonggi Choe, Younggeun Jang, Wonjun Kim, and Zonghoon Lee* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology)

P25-10

항공기용 경량 TiAl 합금 미세 조직 및 조성 분석

이원형, 이창기, 노이준, 김세호* (고려대학교)

P25-11

Atomic Characterization of Li Incorporation in Amorphous SiO_2

정두효, 박규민 (고려대학교), 김원일 (서울대학교), 김세호* (고려대학교)

P25-12

The Long-Term Degradation of Zeolite 13X Desiccant in Glove Box with Atom Probe Tomography

Chang-Gi Lee, Won-Hyoung Lee, and Se-Ho Kim* (Korea University)

P25-13

노출 환경에 따른 Zn-Mg-Al 용융 합금 도금 강판의 내식성 분석

이수민, 이대희 (국립부경대학교), 김현식 (한국세라믹기술원), 최용규 (한국산업기술시험원), 이정훈* (국립부경대학교)

P26 : 가공-열처리

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P26-1

염수 분무 환경에서 STS304의 공식 형상 및 전기화학적 특성에 대한 열처리의 영향 분석

김지현, 남서우, 서희창, 함주빈, 김영천* (국립경국대학교)

P26-2

적층 제조된 $AlSi_{10}Mg$ 합금의 후열처리에 따른 미세조직 제어

김준혁, 한재연 (국립창원대학교), 이종훈, 이지원, 최용혁 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)

P26-3

열처리 조건에 따른 Invar 36 합금의 미세구조 및 물성 변화 분석

장준호, 한상윤, 류채우* (홍익대학교)

P26-4

Ti-6Al-4V 단조재의 단계별 열처리에 따른 Bi-Modal 조직 형성 및 Lamellar 조직 변화 거동 분석

김종훈, 한재연 (국립창원대학교), 김치원 (한국재료연구원), 구지호 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)

P26-5

용융염 원자로 적용을 위한 Alloy 709의 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 분석

남승주, 이원찬, 김정한* (국립한밭대학교)

P26-6 **Canceled**

중장비용 대형 주행 감속기 베어링의 열처리 변형률 감소와 물성 확보를 위한 최적 열처리 공정 개발

홍성준* (한국생산기술연구원, 순천대학교), 김태범 (한국생산기술연구원), 이동근 (순천대학교), 조균택* (한국생산기술연구원)

P26-7

마레이징강 소재의 특성 극대화를 위한 열처리 연구

최지원, 임병용, 김대근, 박재량* (고등기술연구원)

P26-8

열간금형 공구강 STD61 소재의 열처리 공정에 따른 잔류오스테나이트 분율 변화에 관한 연구

손석원*, 강헌, 최유리 (한국생산기술연구원)

P26-9

열에너지 수치를 이용한 다이아몬드 공구의 소결품질 예측 제어 장치 현장 적용 기술

전동술*, 안경준 (한국생산기술연구원)

P26-10

플라즈마 질화층 두께 예측 제어 장치 현장 적용 기술

전동술* (한국생산기술연구원)

P26-11

고합금계 초고장력강 도금 품질 확보를 위한 열처리 기술 연구

황석민, 라정현, 강재욱, 박민서, 한성경*, 권태우 (현대제철기술연구소)

P26-12

마르텐사이트 패킷 제어를 통한 저탄소강의 특성 변화 연구

이용환, 하유리, 양해웅* (포항소재산업진흥원)

P27 : 고온재료

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P27-1

DED 제조된 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 합금의 미세조직 및 인장 변형에 따른 slip transfer 특성 고찰

한재연, 김준혁 (국립창원대학교), 권영삼 (㈜쎄타텍), 박정효, 김규식 (국방과학연구소), 홍현욱* (국립창원대학교)

P27-2

Inconel 718의 입내 δ상 석출을 위한 열처리 연구 및 기계적 특성 분석

여승현, 안지섭, 조아라 (한국생산기술연구원, 부산대학교), 허수빈, 정명식, 황선광* (한국생산기술연구원)

P27-3

등온 열화 시험 데이터 기반 TBC 열피로 수명 예측 모델링

이상림, 최윤석* (부산대학교), 명상원, 김훈희 (두산에너빌리티(주))

P27-4

단결정 니켈기 초내열합금의 크리프 변형율별 수명 예측

이태주, 최윤석* (부산대학교)

P27-5

Constitutive Modeling of Fir-Tree Root Deformation of Single Crystal Superalloy Turbine Blades under Different Temperatures

Tae Yang Bang, Yoon Suk Choi* (Pusan National University), and Taejun Yun (Doosan Enerbility)

P27-6

650℃ NaCl-$MgCl_2$ 환경에서 Ni-201 부식 거동 연구

김정한*, 이원찬, 남승주 (국립한밭대학교), 윤지현, 황성식, 전순혁 (한국원자력연구원)

P27-7

Life Assessment of an 8% Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) Thermal Barrier Coating (TBC) Through Isothermal and Thermal Cycling Tests

Measnimol Kong, Yujin Kim, DongO Kim (Seoul National University of Science and Technology), Sanghun Kim, Younghun Choi, Kisoo Jang (KEPCO KPS), and Jaiwon Byeon* (Seoul National University of Science and Technology)

P27-8

초내열합금 Nimonic 80A의 열처리를 통한 파형입계 제어 및 크립 특성 평가

김가영 (부산대학교), 김연승 (LG 화학), 정희원, 윤대원, 이형수 (한국재료연구원), 이제인* (부산대학교)

P27-9

CM247LC 적층재의 Strain age cracking 균열 형성에 미치는 Ta, Ti, W 합금원소의 영향 분석

김봉철 (한국재료연구원, 동아대학교), 이상원, 정중은, 최백규, 김인수 (한국재료연구원), 전종배* (동아대학교), 도정현* (한국재료연구원)

P27-10

LPBF 공정에서 CM247LC의 고온 균열 형성에 영향을 미치는 공정 조건과 Zr의 영향

안동혁 (한국재료연구원, 부산대학교), 윤대원, 정희원, 유영수, 서성문 (한국재료연구원), 최윤석 (부산대학교), 이형수* (한국재료연구원)

P27-11

니켈기 초내열합금의 용체화 처리시 Incipient Melting에 미치는 B, Zr, Hf의 영향

여준기, 이형수, 윤대원, 정희원, 유영수 (한국재료연구원), 강남현 (부산대학교), 서성문* (한국재료연구원)

P27-12

관류보일러 증기관에서의 고온 부식 현상과 내식성 향상 방안에 관한 연구

김민지* (한국폴리텍대학)

P28 : 반도체

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P28-1

Ultra-Sensitive Hydrogen Detection Using a Redox-Reactive Concentration-Sensitive Metal Oxide Capacitive Sensor

Joonho Lee, Sang-Kil Lee, Jiwoo Hong, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P28-2

Validation of Finite Element Modeling Using Infrared Thermography and Temperature Prediction with Graph Convolutional Networks

Min-Jun Chun (Hanbat National University), Seong-Jin Kim, Jae-Yong Song (Pohang University of Science and Technology), Jung-Won Lee, Lewis Kang (Nepes Co.), Sung-Mo Kang (Asicland Co.,Ltd), In-hak Han (Baum Design and Systems Co.,Ltd), and Hoon-Hwe Cho* (Hanbat National University)

P28-3

레이저 비전도성 페이스트를 적용한 레이저 기반 상온 접합과 열 압착 접합의 인듐 솔더 신뢰성 분석

김성철, 이가은 (한국전자통신연구원, 국립한밭대학교), 주지호, 엄용성, 최광문, 신정호, 이찬미, 장기석, 오진혁 (한국전자통신연구원), 이승윤 (국립한밭대학교), 최광성* (한국전자통신연구원)

P28-4

상온 레이저 기반 접합 공정을 이용한 30μm-pitch SnAg 솔더 인터커넥션의 금속간화합물(IMC) 및 미세조직 신뢰성 분석

이가은 (한국전자통신연구원, 국립한밭대학교), 최광성, 엄용성, 최광문, 신정호, 이찬미, 장기석, 오진혁 (한국전자통신연구원), 김성철 (한국전자통신연구원, 국립한밭대학교), 이승윤 (국립한밭대학교), 주지호* (한국전자통신연구원)

P28-5

전해 조건에 따른 Cu 전기도금층의 (111) 면 우선 성장 제어

안성민, 남승주, 김정한* (한밭대학교)

P28-6

Complementary Lattice Phases in SnO_2/NiO Heterostructure Toward Extremely High Formaldehyde Selectivity

Jihyun Lee and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

P28-7

Enhanced Ethanol Gas Sensing Using Noble Metal-Decorated SnO_2 Nanorods

Seung Hyun Lee, Hyun Sook Lee, and Woo Young Lee* (Yonsei University)

P28-8

Al_2O_3 as a Dipole Shift Layer in Logic Devices for Enables Operational Evaluation through Large-Fine Vt Tuning in Multi – Vt Strategies

Won Jae Choi, Sang Kuk Han, Hyun Jin Lim, Hyo Jin Ahn, Yeh Been Im, Young Seo Na, and Chang Hwan Choi* (Hanyang University)

P28-9

Effects of Post-Annealing in $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Film-based Phase-Change Memory for the improvement of Reliability by Extreme High Unbalanced Magnetron Sputtering

JiSu Park, San Park, and Changhwan Choi* (Hanyang University)

P28-10

Fabrication and Characterization of UVC Photodetectors Using Triple Cation Perovskite

Junseo Kim* (Gachon university)

P28-11

광펄스 솔더링을 사용한 Sn-58Bi 솔더 조인트의 일렉트로마이그레이션 신뢰성 평가

고혜리, 손윤철* (조선대학교)

P28-12

Thermal Interface Material 적용을 위한 인듐 합금의 계면반응 연구

최정환, 손윤철* (조선대학교), 윤정원, 이동복 (충북대학교)

P29 : 역학측정

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P29-1

유한요소해석을 통한 압입각에 따른 하이브리드 본딩의 계면박리 모사

남서우, 김영천* (국립경국대학교)

P29-2

압입자 형상이 반영된 압입시험의 유한요소해석과 머신러닝 기법을 이용한 인장 특성 예측

함주빈, 김동엽 (국립경국대학교), 김종형 (국립부경대학교), 김영천* (국립경국대학교)

P29-3

평탄 압입시험을 이용한 리튬이온전지용 Ni-Rich NCM 양극재의 파괴거동 및 전기화학적 성능 분석

서세덕, 박지현 (국립경국대학교), 남승훈 (명지대학교), 김영천* (국립경국대학교)

P29-4

스트레처블 태양전지 및 디스플레이용 이축 변형 제어 신축 기판 제조 공정 개발

곽지윤, 전은채 (울산대학교), 김주영* (UNIST)

P29-5

일축 주름 구조를 적용한 고신축성 실리카 봉지 재료 개발

조지현, 유현지, 황경석 (Harvard University), 김주영* (UNIST)

P29-6

자가 전개 특성을 활용한 최소 침습형 전자소자의 구조 최적화

김수민, 황경석 (Harvard University), 배재영, 강승균* (서울대학교), 김주영* (UNIST)

P29-7

유연 태양전지용 고신축·저투습 비정질 알루미나 봉지 재료의 기계적 신뢰성

유현지 (UNIST), 우정현 (한국원자력연구원), 황경석 (Harvard University), 김주영* (UNIST)

P29-8

나노스크래치 시험을 통한 나노다층박막 광학 소자의 buffer층 유무에 따른 계면 접합력 및 박리 양상 분석

박태원, 박민지, 박연경, 손슬미, 전은채* (울산대학교)

P29-9

중엔트로피 합금의 나노압입 거동 연구: FCC vs. BCC

이시연, 최재혁, Zhe Gao, 장재일* (한양대학교)

P29-10

계층구조 다공성 형성에 따른 다공성 금의 기계적 거동 및 형상학적 분석

전한솔* (계명대학교)

P30 : 마그네슘

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P30-1

Mg-Ga 합금 압출재의 기계적 특성 및 부식 거동

민두원, 권재호, 김정기, 박성수* (울산과학기술원)

P30-2

비대칭 시편과 2D FEM을 활용한 EPT의 열/비열 효과 정량 분석

송종한, 이승엽, 유진영, 천세호, 이성호, 박동준, 이정훈 (부산대학교), 박성혁 (경북대학교), 이태경* (부산대학교)

P30-3 **Canceled**

Age hardening behaviors of extruded SEN6, SEN9, and SEN11 magnesium alloys

Ji-Yoon Lee (Kyungpook National University), Jun Ho Bae (Korea Institute of Materials Science), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

P30-4

Simultaneous Improvement in Strength and Ductility of Rolled AZ31 Mg Alloy via Combined UNSM and Electropulsing Treatment

Won Pyo Hong (Kyungpook National University), Hyun Ji Kim (Agency for Defense Development), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

P30-5

Dual phase를 갖는 초경량 Mg-Li 합금의 Zn 함량 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화

이병권*, 고은찬 (한국생산기술연구원, 전남대학교), 김용호, 유효상, 손현택* (한국생산기술연구원), 홍성길 (전남대학교)

P30-6

Li 함량 변화에 따른 Mg 합금의 미세조직 및 기계적 특성 연구

고은찬*, 이병권 (한국생산기술연구원, 전남대학교), 유효상, 김용호, 손현택* (한국생산기술연구원), 김태훈 (전남대학교)

P30-7

Mg–SiC 복합재의 부식 특성과 열전도도 변화: 기지 합금 종류의 영향

강동현, 배준호, 김영민, 문영훈, 김재연* (한국재료연구원)

P30-8

저압주조 공정을 통한 고내식 마그네슘 wheel 제조

김중훈 (한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 김정기, 오재영 (울산과학기술원), 전종배 (동아대학교), 김병구 (한국생산기술연구원), 박성수* (울산과학기술원)

P30-9

Influence of Pre–Deformation on Precipitation Behavior of Mg–8.0Al–0.5Zn–0.2Mn Alloy: Comparison of Slip– and Twinning–Dominant Deformation

Hyun Ji Kim (Agency for Defense Development) and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

P30-10

Variations in Microstructural Characteristics and Deformation Behavior of Pre–Twinned Mg Alloys with Annealing Temperature

Ye Jin Kim (Agency for Defense Development), Jong Un Lee (Korea Institute of Materials Science), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

P30-11

제강용 경소돌로마이트 대체를 위한 폐내화재 활용연구

왕제필*, 정평재, 허준성, 김창정, 정창호, 박정훈 (국립부경대학교)

P31 : 집합조직

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P31-1

전해도금 용액 유기첨가제에 따른 반도체 패키징 기판 Via의 Filling 거동과 미세조직/집합조직 분석

오은기, 이기영, 신한균, 박현, 김정한* (동아대학교)

P31-2

페라이트계 스테인리스 강 표면에 Co–Ni 합금 전기 도금된 박막의 고온 산화 특성 평가 및 기계적 물성과 미세조직의 상관관계 분석

이기영, 신한균, 박현, 김정한* (동아대학교)

P31-3

초미세전극 기반 이종 금속간 부식 거동에 대한 연구

최재훈, 조영준, 김영서, 신한균, 김정한* (동아대학교)

P31-4

온간 압축 과정에서 Zn–Al–Mg 합금의 동적 연화 거동에 미치는 Y 원소의 영향

서위걸, 이은세 (국립순천대학교), 양동주 ((주)하나스틸), 최시훈* (국립순천대학교)

P31-5

WO_3/WS_2 코어/셸 나노와이어의 합성과 네거티브 광반응 특성 분석

송유진, 김정한* (동아대학교)

P31-6

Ta–10W합금의 재결정 거동에 미치는 압하율 및 압연 온도의 영향 연구

박기성, 고경민 (국립순천대학교), 전재열 (한국생산기술연구원), 최시훈* (국립순천대학교)

P31-7

고해상도 전기화학 분석을 위한 초미세전극 제작 및 응용

조영준, 김영서, 신한균, 김정한* (동아대학교)

P32 : 타이타늄

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P32-1

Ti–Nb–Zr–X 합금에서의 Gum metal 특성 평가

이혜미, 김재일* (동아대학교)

P32-2

The Microstructural and Mechanical Evolution of Ti_{80} Cr_{20} Alloy During Cold Rolling

Muhammad Aoun Abbas, Dilshodbek Yusupov, Gyeol Chan Kang, Ga Eun jo, Yu Jin Lee, Dong sung Hong, Sung Hwan Hong, Hae Jin Park, and Ki Buem Kim* (Sejong University)

P32-3

저비용 고강도 Metastable β 타이타늄 합금 설계 및 미세조직 제어 연구

주재성 (한국재료연구원, 고려대학교), 홍재근, 김재혁* (한국재료연구원), 손석수* (고려대학교)

P32-4

적층제조 Ti–6Al–4V 합금의 격자 구조 및 제조 공정이 압축 특성에 미치는 영향

박윤지 (국민대학교), 강성규 (경상국립대학교), 성효경* (국민대학교)

P32-5

낮은 탄성계수를 가지는 Ti–(14–2x)Nb–(6+x)Sn (x=0.5, 1, 1.5) (at.%) 합금 설계

남태현*, 구태균, 김수영 (경상국립대학교)

P32-6

PEM 연료전지 분리판용 티타늄 판재의 전도성 탄소코팅 특성

김성욱*, 장경현, 천창근 (포항산업과학연구원), 고성훈, 김대성 (테라릭스), 이동준 (디에스피)

P32-7

유효변형량 및 열처리 조건에 따른 Ti–62222S 합금의 미세조직 평가

허형민, P.L. Narayana, 최재영* ((주)에이치브이엠)

P32-8

전자빔 용해 공정변수 제어를 통한 타이타늄 스크랩 불순물 제어 기술 개발

임연민, 김정균 ((주)에이치브이엠), 원종우, 현용택 (한국재료연구원), 최재영* ((주)에이치브이엠)

P33 : 가공-주조 및 응고

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P33-1

열간 단조에 의한 고망간 주조재의 미세구조 및 기계적 특성 변화 분석

이승희, 박지원 (동아대학교), 김용래 ((주)영신특수강), 강신곤* (동아대학교)

P33-2

주철의 몰드 재질 및 냉각 속도에 따른 미세조직과 기계적 특성 변화 연구

홍지우, 하진수, 장진석, 최창영, 송혜진, 정유현, 조용재* (한국생산기술연구원)

P33-3

아크멜팅 공정을 통한 3원계 불활성 전극 소재 제조 및 분석

이세영, 김현우, 김기홍, Ri Vladislav, 우화영, 김완규* ((주)케이에스엠테크놀로지)

P33-4

Ti 전해정련용 CuTi 합금 전극 제조를 위한 열환원 공정에서 발생되는 잉곳–몰드 간 융착 연구

박선영, 이세영, 김가민, 이병건, 김현우* ((주)케이에스엠테크놀로지)

P33-5

진공정밀–원심주조 방식으로 제작된 항공기용 TiAl 저압 터빈 블레이드 부품의 Flow–3D를 이용한 주조해석

이강래* (한국생산기술연구원)

P34 : 항공재료

Room 3층 로비, 04월 25일 09:00 - 14:00

P34-1

단결정 초내열합금 CMSX–8의 결정방위에 따른 크리프 거동

장익제, 조대현 (국립창원대학교), 구지호 (두산에너빌리티(주)), 정중은, 김인수 (한국재료연구원), 이재현* (국립창원대학교)

P34-2

Inconel 718 격자 구조의 기계적 특성 평가를 위한 압축 거동 및 미세조직 분석

정다은, 성효경* (국민대학교), 이경준, 강성민 (가천대학교)

P34-3

항공용 Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo Ingot/Billet 국산화에 대한 연구

주경준*, 손희영, 이기영* (케이피씨엠), 손인수, 주영규, 오승철 (한화에어로스페이스)

비철금속
Room 201A, 4월 23일

[비철1-1 | 09:00]
균질화 처리 된 Cu-Ni-Si 합금의 기계적 특성에 미치는 Si 및 Mn 효과: 정현우, 신지용 (한국재료연구원, 부산대학교), 정일석, 최은애 (한국재료연구원), 권세훈 (부산대학교), 한승전* (한국재료연구원)
Keywords: Cu-Ni-Si alloy, Inclusion, Ni2Si, Grain boundary phase, Ni16Mn6Si7

Cu-Ni-Si 합금의 주 원소인 Ni, Si 함량이 증가하게 되면 Ni2Si 강화상의 부피 분율이 증가하여 기계적 특성이 향상된다. 그러나 과도한 Ni, Si 첨가는 결정립계에 불균일 핵생성으로 인한 조대한 Ni2Si 개재물을 형성하고 결정립 내부에 Ni2Si 강화상의 분율을 감소시켜 강도가 저하되는 단점이 있다. 따라서 본 연구는 Cu-Ni-Si 합금에 Mn을 첨가하여 결정립계 개재물의 형상 및 구조를 변화시키고자 하였다. Cu-6Ni-Si (Si 함량: 1.2, 1.25, 1.3 wt.%)합금과 2.1Mn wt.%이 첨가된 합금을 대기 주조 후 균질화 처리(980ºC, 8 h)하였다. 균질화 처리 후, Cu-Ni-Si 합금은 결정립계에 부정형의 조대한 Ni2Si 개재물이 형성되었으며, Si 함량이 증가함에 따라 강도가 저하되는 특성을 보였다. 이러한 결과는 Si 첨가에 따른 개재물의 분율 증가 및 결정립 내부의 Ni2Si 강화상 분율 감소에 의한 것으로 판단하였다. 반면, Cu-Ni-Si-Mn 합금의 경우, 결정립계에 film 형상의 G-phase (grain boundary phase, Ni16Mn6Si7)이 관찰되었다. 결론적으로 film 형상의 G-phase 형성으로 인해 결정립계에 불규칙한 형상의 Ni2Si 개재물 생성이 제한되어 강도가 증가하였다. 또한, Cu-Ni-Si-Mn 합금은 Si 함량이 증가함에 따라 개재물의 분율은 유지되며, 결정립 내부에 강화상의 분율이 증가하여 강도가 점진적으로 향상되었다.

[비철1-2 | 09:15]
Heat Transfer Effects on Impurities Removal Behavior in Zirconium Electron Beam Melting: Soosung Kim (Korea Institute of Industrial Technology, Kyung Hee University), Hyun-chul Kim, Myungsuk Kim, Yehui Kim (Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Bin Lee (Kyung Hee University), Kyoung-Tae Park, and Dong-Hyun Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: Zirconium, Electron Beam Melting, Heat Transfer, Impurity Removal Behavior

Zirconium is a high-melting-point metal that is used to manufacture high-purity sputtering targets for the Physical Vapor Deposition (PVD) process. The high purity of these sputtering targets is essential for ensuring the electrical conductivity and permittivity of thin-film transistor structures produced via PVD. The Electron Beam Melting and Refining (EBMR) process has been employed to purify high-melting-point metals, achieving high purity levels for zirconium, titanium, and molybdenum. By operating in a high-vacuum environment and utilizing the high energy density of the electron beam, the EBMR process demonstrates superior performance in the purification of high-melting-point metals. In this study, the EBMR process was applied to zirconium by varying the beam power conditions. To predict the temperature distribution and heat convection during the EBMR process, Finite Element Analysis (FEA) was conducted. Phase diagram calculations were utilized to estimate the interactions between the metal and impurities. The separation factor of impurities was derived from the activity and partial pressure of the components to predict the impurity removal efficiency. The EBMR refining process was applied to an on-grade zirconium sponge using beam power ranging from 14 kW to 21 kW. Impurity removal from the ingot was verified using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). The distribution of impurities and the microstructure were analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), Electron Probe Micro-Analysis (EPMA), and X-ray Diffraction (XRD). The effects of heat transfer and the accompanying solidification during EBMR process on impurity distribution were discussed. By examining the correlation between heat transfer, convection, and impurity distribution, ultra-high-purity and uniform zirconium material can be produced.

[비철1-3 | 09:30]
알루미늄 합금계에서 Zr/Er 미세첨가를 통한 D0-stable Y원소의 $L1_2$상 활용 방안: 김용유 (한국재료연구원), 어광준 (한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교), 김수현, 손현우* (한국재료연구원)
Keywords: 알루미늄 합금, $L1_2$-결정구조상, 투과전자현미경

준안정 $L1_2$-결정구조를 갖는 Al_3M(M=천이 및 란탄족 원소)상은 열처리용 알루미늄 합금의 주요 석출물(θ-Al_2Cu, β-Mg_2Si, and η-$MgZn_2$)과 무관하게, 독립적으로 분산 강화 및 고온 특성 향상에 기여한다고 알려져 있다. $L1_2$상은 천이 원소와 란탄족 원소의 복합첨가로 시너지 효과를 갖는 것으로 보고되었으며, 특히 알루미늄 합금에 Y원소를 $L1_2$ 형성 원소와 복합첨가하면 $L1_2$상의 핵생성을 증가시키는 것으로 보고되었다. 그러나 D0-stable로 알려진 Y원소가 어떻게 $L1_2$로서 강화에 기여하는지에 대한 연구는 보고되지 않았다. 본 연구에서는 D0-stable Y원소를 알루미늄 합금에서 어떻게 $L1_2$상으로 활용할 수 있는지 매커니즘을 규명하기 위해, 경제적으로 활용 가능한 천이 원소인 Zr ($L1_2$ 안정화 원소) 및 란탄족 원소 Er ($L1_2$ 우선 형성 원소)을 첨가하여 Al_3Y상에 미치는 영향에 대해서 transmission electron microscopy (TEM)을 활용하여 조사하였다. 알루미늄 합금에 Y원소를 $L1_2$ 안정화 원소인 Zr과 복합첨가하면, as-cast 합금에서는 $D0_{19}$/$D0_{22}$-Al_3Y상으로 존재하였다. 고온(470 ºC)에서 인공시효가 진행됨에 따라, 시효 초기에는 $D0_{22}$-Al_3Y상 주위에 Zr이 확산되면서 core: $D0_{22}$-Al_3Y + shell: $L1_2$-Al_3Zr 형태가 되고, 추후 Zr이 $D0_{22}$-Al_3Y상 내부로 침투

하면서 $D0_{22}$에서 $L1_2$로 상변화가 진행되었다. 최종적으로 $D0_{22}$-Al_3Y상은 소멸하고 $L1_2$-Al_3(Zr, Y)상으로 존재하였다. 또한 Y원소를 $L1_2$ 우선 형성 원소인 Er과 복합첨가하면, as-cast 합금 상태부터 $D0_{22}$-Al_3Y상이 아닌, Y가 Er과 함께 결합되어 $L1_2$-Al_3(Y, Er)상으로 존재하였다. 마찬가지로 고온(470°C)에서 인공시효가 진행됨에 따라, 시효 초기에는 $L1_2$-Al_3(Y, Er)상 주위에 Zr이 확산되면서 core: $L1_2$-Al_3(Y, Er) + shell: $L1_2$-Al_3Zr 형태가 되고, 추후 core와 shell이 섞이며 최종적으로 $L1_2$-Al_3(Y, Er, Zr)상으로 존재하였다. 고온시효 시 발생하는 anti-phase boundary (APB)는 Al_3Y상의 상변화(Zr) 및 미세화(Er) 과정에 기여하며, Y원소로 구성된 선형 격자 불일치로서 dislocation pipe diffusion을 발생시켜 Si원소의 침투를 유도하였다. 특히 APB는 Zr이 Al_3M상 내부로 침투하는 과정에서, Al_3M상의 중심부에 남아있는 $D0_{22}$상을 $L1_2$상으로 국부적인 구조변화를 발생시켜 비가역적 상변화의 동역학을 가속하는데 기여하는 것을 확인하였다.

[비철1-4 | 09:45]

Preliminary Study for Engineering-Scale Flow Forming of High Purity Copper Overpack for Spent Nuclear Fuel Disposal Canisters: Jae-Deuk Kim*, Young-Ho Lee, Jeongmok Oh, Jin-Seop Kim (Korea Atomic Energy Research Institute), and Yeon-Oh Lee (SeAH Besteel Corp.)

Keywords: High purity oxygen free copper, Flow forming process, Copper overpack, Microstructural characteristic, Mechanical property

Most countries using atomic energy facilities have chosen deep geological disposal systems to separate spent nuclear fuels from human habitats. Disposal canisters play a key role in engineering barrier systems and are typically composed of an oxygen free copper overpack and a cast iron insert. Copper overpacks are made by casting, forging, and extrusion in general, but the high material cost and low material efficiency present challenges. In this study, the flow forming of engineering-scale copper overpack was conducted as a preliminary study. The feasibility of the flow forming process for engineering scale was evaluated. A 1.7-meter length and 0.5-meter inner diameter copper overpack was well fabricated. The microstructure and mechanical properties were evaluated to validate the potential of flow forming for industrial applications. It was found that the microstructural characteristics and mechanical properties varied along the thickness direction. It was well aligned with process history. Further, it was found that the grain size effect was significant on material hardening in engineering-scale flow forming of copper material. Based on the results from this study, it was validated the effectiveness of flow forming process for fabricating copper overpacks at the engineering scale.

[비철2-1 | 10:10]

수소화 열처리를 통한 폐 NdFeB 스크랩의 효과적인 분쇄 및 산화 거동 분석: 서보성, 강장원, 차은빈, 마승현, 박광석* (한국생산기술연구원)

Keywords: 폐 NdFeB 자석, 재활용, 수소화 열처리, 파쇄, 산화

본 연구에서는 폐 NdFeB 스크랩으로부터 Nd를 효율적으로 침출하기 위한 미세 분말화 공정 및 산화 반응 속도 향상에 대해 연구하였다. 일반적으로 NdFeB 스크랩을 미세하게 분쇄하기 위해서는 복잡한 기계적 파쇄 공정이 필요하지만, 수소화 열처리를 적용하면 자석 내 수소화 반응을 유도하여 쉽게 분쇄가 가능하다. 수소화된 분말을 볼 밀링(Ball Milling) 공정을 적용하여 밀링속도, 시간, 볼/분말 비율을 제어하여 입도를 조절하였으며, 이를 통해 효율적인 미세 분말화가 가능함을 확인하였다. 또한, 수소화 과정에서 형성된 Nd 수소화물(NdH_2)과 α-Fe 상이 대기 산화 공정에서 산화 반응을 촉진시키는 효과를 분석하였다. 특히, NdH_2의 불균등화 반응에 의해 형성된 미세구조 변화와 산화 속도 간의 관계를 속도론적 분석을 통해 평가하였다. 실험 결과, 수소화된 분말은 일반 분말보다 산화 속도가 빠르게 진행되었으며, 입도 크기가 작을수록 산화 반응성이 더욱 증가하는 경향을 보였다.

[비철2-2 | 10:25]

Nd 용탕 내 Mg 제거를 위한 진공 정련 공정 연구: 고의준, 김지은, 김현철 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 오승주 (고려대학교), 박경태*, 신재홍* (한국생산기술연구원)

Keywords: Electro-Chemical Recovery, Neodymium, Vacuum Distillation

본 연구에서는 희토류 원소인 네오디뮴(Nd)과 경금속인 마그네슘(Mg) 원소의 진공증류 및 정제를 진행하였다. Mg과 Nd은 1atm 분위기에서 각각 1090°C, 3074°C 의 끓는점을 갖으며 포화증기압 차이를 이용하여 Nd 내 Mg를 제거하였다. Mg을 1, 2, 3, 4, 5, 6 wt% 함유한 Nd 금속은 고주파 용해로를 사용하여 1200°C, 0.01atm 조건에서 30분, 60동안 진공 증류를 진행하였다. 이후 Inductively Coupled Plasma Optical Emission (ICP-OES) 분석을 통해 조성 정량 분석을 진행하였다. 진공증류 후 Nd 금속의 Mg 함량은 효과적으로 감소하였다. Nd 금속과 Mg 금속의 포화증기압을 계산하기 위한 활동도를 계산하였으며, 이를 FactSage 계산값과 비교 분석하였다. 분자동역학을 기반한 LAMMPS를 활용하여 Nd-Mg 원소 간 RDF(Radial Distribution Function) 그래프를 도출하였으며, 이를 기반으로 상호작용 및 열역학적 특성을 분석하여 Nd-Mg 합금 상태의 활동도를 계산하였다.

[비철2-3 | 10:40]

수소 혼합 가스 분위기 내 마그네슘 열환원법에 의한 이산화타이타늄으로부터 고순도 타이타늄 수소화물 직접 제조 공정 개발: 송영주 (서울대학교), 박성훈 (동국제강), 강정신* (서울대학교)

Keywords: titanium dioxide, reduction, magnesium, hydrogen, titanium hydride

타이타늄 (Ti) 금속의 상용 제조법인 크롤 (Kroll) 법은 낮은 생산성, 높은 에너지 소모 및 염소가스 (Cl_2) 사용 등 환경 부하가 크다. 이러한 상용 기술의 한계를 극복하기 위하여, 최근에는 이산화타이타늄 (TiO_2)를 수소 가스 (H_2) 분위기에서 마그네슘 (Mg) 금속을 이용한 환원 및 탈산을 통한 저산소 Ti 금속 제조법이 연구되고 있다. 본 연구에서는 TiO_2로부터 고순도 Ti 수소화물

(TiH_2) 분말을 직접 얻기 위한 단일 단계 환원법을 개발하였다. TiO_2의 환원 반응은 973 K의 아르곤 (Ar) 및 10 % H_2 혼합가스 분위기에서 $MgCl_2$ – KCl 용융염 중 Mg을 이용하여 수행되었다. 실험 결과, TiO_2 원료 입도가 45 – 300 μm 범위일 때, 원료 입도가 작아질수록 제조된 Ti 금속의 산소 농도가 감소하였으며, 45 – 75 μm의 입도를 가진 TiO_2 원료 사용 시 산소농도가 0.209 mass%인 TiH_2 분말이 직접적으로 얻어졌다. 따라서 본 연구결과로부터 973 K의 H_2 혼합 가스 분위기 내 Mg을 이용한 일단계 환원공정만으로 TiO_2로부터 ASTM Gr.2 (≤ 0.25 mass% O) TiH_2 분말의 직접 제조가 가능함을 알 수 있다.

[비철2-4 | 10:55]

수소 환원 배소에 의한 NCM계 폐 리튬이온배터리 양극재의 Li 회수: 황재호, 이상엽, 이소영, 손호상* (경북대학교)

Keywords: 리사이클링, NCM, 수소 환원, Li 회수

Ni, Co, Mn, Li 등을 포함하고 있는 리튬 이온 배터리 양극재를 재활용 할 수 있다면, 환경오염을 완화하고 자원 공급의 안정성을 높일 수 있을 것이다. 건식 처리 공정 중 수소를 이용한 환원배소는 사용 후 NCM계 양극재의 분해에 유리하고 높은 Li 회수율과 낮은 CO2 발생량 면에서 장점이 있다. 본 연구에서는 사용 후 NCM계 양극재를 수소 분위기 중 환원배소하고 수침출하여, Li 회수율에 미치는 환원 온도의 영향에 대하여 조사하였다. Ar 분위기 및 H2 분위기 각각에서 NCM계 black mass를 1,000 ºC까지 승온하는 동안 무게 변화를 관찰하고 배가스를 분석하였다. 등온 실험은 300~1,000ºC 범위이며, 목표 온도에 도달하면 Ar+H2 50 vol%로 설정하였다. 환원이 끝난 시료를 수침출하였고 침출 여액과 잔사를 분리하였다. 침출 여액은 Li 농도를 분석하여 회수율을 계산하였다. 또한 각 단계마다 시료를 XRD로 상분석하였다. Ar 분위기에서 승온 실험 시 온도가 증가함에따라 지속적인 무게 감소를 보였고 H2 분위기에서는 약 310ºC부터 무게가 감소하기 시작, 약 550ºC부터 2차 무게 감소를 보였다. XRD 결과로부터, H2 분위기에서 보다 낮은 온도에서 black mass의 열분해가 시작된 것으로 보인다. 등온 수소 환원 실험에서는 반응 온도가 높을수록 무게 감소율과 무게 감소량이 큰 경향을 보였고, 300ºC 이상에서 NiO가 전부 금속 Ni 상으로 환원된 것으로 생각된다. 또한 400ºC 이상에서 Li2CO3가 생성되었음을 확인하였다. Li 회수율은 400 ºC 이상에서 약 90 % 수준을 달성했다.

[비철2-5 | 11:10]

NCM계 리튬이온 배터리 Black Mass의 CO 환원 거동: 이상엽, 황재호, 이소영, 손호상* (경북대학교)

Keywords: NCM, Li2CO3, CO, 환원, Li회수

현재 전기자동차 시장은 캐즘 현상으로 인해 성장 정체를 겪고 있으나, 장기적으로 전기자동차 보급 확대는 불가피하다. 따라서 사용 후 폐배터리 발생량의 증가가 예상되고, 이의 효율적인 재활용 및 자원 회수 공정의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히, 희소금속인 Li, Ni, Co의 원자재 공급의 한계가 부각되면서 폐배터리로부터의 자원 회수가 필수적인 과제로 대두되고 있다. 배터리 리사이클링은 원자재 수급 안정성과 환경적 지속 가능성을 확보하는 핵심 기술로, 경제적?환경적 측면에서 필수적인 연구 분야로 자리 잡고 있다. 본 연구에서는 산업 공정에서 발생하는 CO 가스를 활용하여 폐 NCM계 배터리의 black mass를 환원하여, Li과 나머지 유가 금속을 효율적으로 분리 회수하는 방법에 관하여 고찰하였다. Ar-CO 혼합 가스 분위기로 제어하여 수직관상로에서 환원에 미치는 온도의 영향을 조사하였다. 환원한 시료는 증류수로 수침출하여 Li과 나머지 유가 금속을 분리 회수하였다. Li 함유 수용액에서 회수한 Li 화합물과 침출 잔사는 XRD 및 ICP 분석을 통해 생성상을 확인하고 순도를 평가하였다. 400 ºC 이상의 환원 온도부터 Li2CO3가 생성되었으며, 500 ºC 이상에서는 NiO 및 CoO가 금속상으로 환원되면서 시료의 무게 감소가 관찰되었다. 환원된 시료를 수침출하여 약 99% 순도의 Li_2CO_3를 회수할 수 있었으며, 침출 잔사에는 금속상의 Ni과 Co 및 미확인된 Mn 산화물이 존재하였다.

[비철2-6 | 11:25]

니켈 황화광의 선택적 탈철 공정을 이용한 고품위 니켈-코발트 황화물 제조공정 개발: 이태혁, 강희남 (한국지질자원연구원), 이진영 (한국지질자원연구원, 과학기술연학대학교대학원), 강정신* (서울대학교 에너지자원공학과)

Keywords: 니켈 황화광, 선택염화, 니켈황화물, 코발트황화물

니켈(Ni)은 우수한 물리화학적 특성으로 인해 다양한 분야에서 널리 사용되고 있으며, 특히 전기차용 배터리의 핵심 원료로 사용되고 있어 Ni의 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. Ni 상용 제련법은 니켈황화광($(Fe,Ni)_9S_8$), pentlandite)을 원료로 사용하여, 1473 - 1573 K에서 산소와의 반응에 의한 matte smelting 및 converting 단계를 통해 약 70 mass% Ni 품위의 matte를 제조 후, 습식 및 건식법을 이용한 정련 공정을 통해 Ni 금속을 생산하고 있다. 하지만 고품위 matte 제조공정 중 다량의 아황산가스(SO_2) 및 공정 슬래그가 발생하고, 이로 인한 환경부하가 큰 단점이 있으며, 이를 극복하기 위해 친환경 Ni 제련법 개발이 지속적으로 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 선택염화법 및 용융염 전해법을 이용한 친환경 Ni 제련 기술을 개발하였다. Ni 신 제련법은 900 - 1200 K의 Ar 분위기에서 염화코발트($CoCl_2$)와 pentlandite와의 반응을 통해 니켈-코발트 황화물(Ni_3S_2, Co_9S_8)을 제조하고, 673 K에서 용융염전해를 통해 Ni-Co 합금 및 단체황(S)을 회수하는 공정이다. 본 연구에서는 니켈정광 내 철(Fe)을 선택적으로 제거하여 니켈-코발트 황화물을 제조하기 위한 선택 염화 공정 시 공정 온도 및 시간이 탈철률에 미치는 영향을 분석하였다. $CoCl_2$를 이용한 니켈광의 선택적 탈철반응에 의해 원료 내 Fe은 $FeCl_2$로 제거되어 니켈-코발트 황화물이 제조되었고 탈철률은 97.3 - 99.7 %였다.

[비철3-1 | 14:00]

황산제일철 전해질을 이용해 폐 영구자석 분말 내 철의 전해정련 회수 연구: 허현재, 김선정* (울산대학교)

Keywords: Electrorefining, Nd-Fe-B permanent magnet waste, Ferrous sulfate, Fe recovery

첨단산업의 핵심 소재로 사용되는 네오디뮴 영구자석은 각종 전자제품, 첨단산업과 방위산업 등에서 경량화 및 효율화를 주도하고 있다, 특히 전기차의 구동 모터의 핵심부품으로 사용되는데, 세계 각국이 내연기관차를 전기차로 대체하고 풍력발전 설비를 확장하면서 그 수요는 급증할 것으로 예측되지만 공급의 확대 여부는 불확실하다. 우리나라는 현재 영구자석의 대부분을 중간재 형태로 수입하고 있으며, 수입의존도를 낮추고 공급망을 내재화하기 위해 영구자석의 재활용 및 재사용을 촉진하기 위한 기술이 개발되어야 한다. 영구자석의 재활용 및 재사용은 영구자석의 수입의존도 완화와 희토류 자원 확보 효과를 동시에 얻을 수 있을 뿐 아니라 영구자석 재활용 의무화에도 대비할 수 있다. 특히 희토류의 제련 및 가공 과정에서 발생하는 환경오염에 대한 문제가 대두되는 만큼 친환경적인 제련 기술을 확보하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 폐 네오디뮴 영구자석 내 희토류 및 금속 원소를 친환경적인 전해정련 방법을 통해 분리, 회수하는 것을 목표로 하였다. 네오디뮴만 선택적으로 산화된 폐 영구자석 분말을 소결하여 전극으로 사용하고, 3전극 셀을 구성하여 철의 전해정련 거동을 관찰하였다. 황산제일철과 황산칼륨으로 이루어진 전해질의 조성을 변화시키며 철의 전해환원 반응을 분석하였고, 이에 따른 전도도와 pH 변화를 측정하였다. 각 조성에서 환원된 철의 표면 특성과 수소 발생 반응을 분석하여 전해 조건의 최적화를 시도하였다.

[비철3-2 | 14:15]

선택적 산화된 폐 Nd-Fe-B 영구자석 내 철 회수를 위한 전해정련 시스템 구축 및 전기화학적 거동 분석: 조현산, 김선정* (울산대학교)

Keywords: Selective oxidation, Electrorefining, Recycling, Nd-Fe-B permanent magnet wastes, Electrochemical impedance spectroscopy

희토류란 자연계에 드물게 존재하는 원소로, 독특한 물리적, 화학적 성질로 인해 첨단산업에 필수적으로 사용된다. 소량 첨가만으로도 물질을 화학적, 전기적, 자성적 특성을 갖게 만들어 고부가가치산업에 필수적으로 사용된다. 전 세계적으로 매장량이 적지는 않으나 채굴 과정에서 일어나는 환경적인 문제와 좋지 않은 경제성으로 전 세계 희토류 생산의 80%를 중국이 담당하고 있다. 따라서 최근 전략 물자로서 희토류에 대한 관심이 증가하고 있고, 공급망 분산 및 탄소중립 달성을 위한 희토류 분리 회수 및 재활용 기술 개발의 중요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 폐 Nd-Fe-B 영구자석에서 철과 네오디뮴의 재생를 위한 전해정련 시스템을 구축하고, 네오디뮴을 회수하기 전 철의 분리, 회수를 선행공정으로 개발하였다. 기본 전해질은 염화제일철-염화칼륨으로 구성하였고, 유기산 첨가제인 석신산의 농도를 변수로 환원된 철의 산화 정도와 철의 전해환원 거동을 확인하였다. 특히 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy)을 통해 전극/전해질 계면에서 철의 전해환원 반응, 전해질 내에서 이온 전도성 등을 분석하여 철의 분리, 회수 효율 향상을 목표로 하였다.

[비철3-3 | 14:30]

Phosphoric Acid Leaching of Laterite Ore: Mechanism and Kinetics Analysis of Ni and Co Extraction: Muhamad Nawawi Alif*, Seongjin Kim, Leonardo Tomas Da Rocha, and Sung-Mo Jung* (POSTECH)

Keywords: limonite ore, phosphoric acid, iron phosphate, mechanism, kinetics

The phosphoric acid was used to investigate the extraction of nickel and cobalt from limonite ore while recovering iron in the residue in an atmospheric pressure. The current study aims to identify the leaching mechanism and kinetics. Thermodynamic analyses indicated that selective leaching of nickel and cobalt over iron occurs at a pH below 4.7, where iron remains as solid precipitates in the form of iron phosphate dihydrate. According to the phase and compositional analyses of the residue obtained during leaching, iron and phosphorus were analyzed to be 24.8 and 13.7%, respectively, as the primary elements. The content of minor elements summed up to 4.8% with silica being the major component. The kinetics analyses identified that the leaching process followed the product layer diffusion control of the shrinking core model where the activation energies were evaluated to be 31.9 kJ/mol for nickel and 8.5 kJ/mol for cobalt in the temperature range of 50 to 100 ºC.

[비철3-4 | 14:45]

Separation and Recovery of Gold and Palladium from Wasted Integrated Circuit Chip of Credit Card and Pre-Plated Lead frame by Ion Separation Process of Precipitation and Ion Exchange-Resin: Ji Seok Kim, Nam Hun Kwon (Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Mi Hye Lee, Ro Woon Lee, Kyoung Tae Park, and Jae Hong Shin* (Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Recovery, Gold, Palladium, Precipitation, Ion exchange-resin

The global generation of waste integrated circuit (IC) chips, containing precious metals such as gold and palladium, is estimated at 2.4 million tons. Due to the high value of these metals and heavy reliance on imports, recovering them from waste IC chips is crucial. Conventional recovery methods involve dissolving IC chips in aqua regia, followed by multi-step precipitation. However, this process generates severe environmental pollutants, and aqua regia can dissolve valuable metals, leading to resource loss. To address these issues, this study investigates the separation of gold and palladium using precipitation and ion exchange after leaching with sodium cyanate. Cyanide-based solutions, while harmful to the environment and human health, efficiently dissolve metal ions and can be reused, reducing environmental impact. In this study, gold ions in cyanide solution were precipitated by adding zinc at a 1:1 molar ratio. The process was conducted under nitrogen gas injection, maintaining dissolved oxygen levels below 1 mg/L to prevent unwanted oxidation, which could interfere with metal recovery. To enhance separation efficiency, an ion exchange process was also tested using both basic and acidic resins. Metal ion adsorption was achieved by simple mixing with the leachate solution. Further research focused on developing selective separation methods for gold and palladium. Metal concentrations and separation behaviors were analyzed using

Inductively Coupled Plasma (ICP) spectrometry and X-ray Fluorescence (XRF). Results showed that both precipitation and ion exchange achieved high recovery efficiency. However, metal reduction behavior varied depending on process conditions, including reaction time, temperature, and solid-to-liquid ratio. These factors were analyzed to optimize recovery efficiency and selectivity. This study demonstrates an effective and environmentally safer approach for recovering gold and palladium from waste IC chips, contributing to sustainable resource management

[비철3-5 | 15:00]

용융 Cu와 $CaO-SiO_2-Fe_tO-MgO_{satd.}$ 슬래그 사이의 Ni 분배 거동: 황수민, 박주현* (한양대학교)

Keywords: 니켈 용해 거동, 분배비, 메탈-슬래그 평형

1차 자원인 광석의 고갈로 인해 산업폐기물 등 2차 자원으로부터 구리를 재활용하는 방향이 모색되었고, 연간 구리 생산량의 약 30%가 재활용 자원으로부터 생산된다. 전자 폐기물(E-waste)에는 구리, 철, 알루미늄, 니켈 등 다양한 금속이 포함되어 있으며, 전자 폐기물을 처리하는 산업 경로 중 하나는 1차 및 2차 구리 제련 공정을 통한 것이다. 따라서 구리 스크랩의 재활용 효율을 높이기 위하여, 용융 구리 내 니켈 정련 가능성을 탐색하고자 Cu-1wt%Ni 합금과 $CaO-SiO_2-Fe_tO-MgO_{satd.}$ 슬래그 사이의 Ni 분배비(L_{Ni})를 측정하였다. 1598K~1673K의 온도 범위와 산소분압 $p(O_2)=10^{-6}$atm 조건 하에서 다양한 슬래그 조성에 대해 메탈-슬래그 평형 실험을 수행하였고, 온도와 슬래그 염기도 변화가 Ni 분배에 미치는 영향을 조사하였다. 실험 결과, Cu-1wt%Ni 합금과 $CaO-SiO_2-Fe_tO-MgO_{satd.}$ 슬래그 사이의 Ni 분배비는 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 슬래그로의 Ni 용해 반응에 대한 엔탈피 변화로부터, Ni 용해 반응은 발열반응임을 확인하였다. 한편, 일정한 온도와 산소분압 조건에서 L_{Ni}는 염기도(CaO/SiO_2 비율, CaO 활동도)에 대하여 V자 형태의 곡선을 나타냈다. 본 연구에서 수행된 슬래그 영역 중 상대적으로 산성 영역인 Olivine($(Mg,Fe)_2SiO_4$) 포화 슬래그에서는 염기도가 증가함에 따라 Ni 분배비가 감소하였다. 반면, 상대적으로 염기성 영역인 Monoxide((Mg,Fe)O) 포화 슬래그에서는 염기도가 증가함에 따라 Ni 분배비도 증가하였다. 따라서, $CaO-SiO_2-Fe_tO-MgO_{satd.}$ 슬래그로의 니켈 용해 메커니즘은 다음 두 가지 용해 반응식으로 설명할 수 있다. $[Ni]+1/2O_2(g)=(Ni^{2-})+(O^{2-})$ for Olivine saturated system $[Ni]+1/2O_2(g)+(O^{2-})=(NiO_2^{2-})$ for Monoxide saturated system $CaO-SiO_2-Fe_tO-MgO_{satd.}$ 슬래그에서 C/S 비에 대한 NiO의 활동도 계수는 니켈의 양쪽성 거동을 나타낸다. Olivine 포화 슬래그에서 NiO의 활동도 계수는 C/S 비가 증가함에 따라 증가하는 반면, Monoxide 포화 슬래그에서는 C/S 비가 증가할수록 감소한다. 또한, 관찰된 슬래그 조성에서 Olivine 포화 슬래그에서의 NiO 활동도 계수는 Monoxide 포화 슬래그보다 높은 값을 보였다. 따라서, 슬래그로의 구리 손실과 슬래그 내 니켈 산화물의 안정성을 고려하여 최적의 슬래그 조성을 설계해야 한다.

[비철3-6 | 15:15]

반도체/디스플레이 산업 폐기물로부터 Mo 회수를 위한 고온 건식공정의 슬래그 조성 최적화 연구: 배성욱 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 진호근 (한국생산기술연구원), 박주현 (한양대학교), 박경태, 신재홍* (한국생산기술연구원)

Keywords: 폐수처리, 재활용, 몰리브덴, 페로 몰리브덴, 건식공정

반도체 및 디스플레이 산업의 급속한 발전과 함께 제조 공정에서 발생하는 폐기물의 양도 증가하고 있으며, 특히 Mo 기반 박막 코팅 기술의 활용이 확대됨에 따라 폐기물 내 Mo 함량이 증가하고 있다. 그러나 현재 국내에서 발생하는 Mo 함유 폐기물은 주로 단순 매립되거나 저부가가치 자원화에 그쳐 환경적·경제적 비효율성이 심각한 문제로 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 반도체·디스플레이 산업 폐기물로부터 Mo를 회수하기 위한 고온 건식공정에서 슬래그의 물리·화학적 특성이 미치는 영향을 분석하여 최적의 슬래그 조성을 도출하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 1600°C 수직 관상로에서 탄소 열환원 반응을 유도하여 초기 Mo 슬래그 상($CaMoO_4$)을 Mo와 CaO로 분리·환원하였다. 실험 중 발생한 가스 분석 결과, 탄소 열환원 반응은 약 30분 내 종료되었으며, 반응물의 평형 도달을 위해 5시간 동안 실험을 유지하였다. 실험을 통해 제조된 생성물은 ICP-OES, XRD, C/S, SEM 분석을 실시하였다. 슬래그 조성 비율($CaMoO_4/SiO_2$)이 증가함에 따라 Fully-liquid slag phase의 점도가 감소하는 경향을 확인하였다. 이에 따라 Mo가 포집 금속인 용융철로 이동하는 Terminal velocity가 증가하여 Mo의 회수율이 증가하는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 Mo 회수를 극대화할 수 있는 최적 슬래그 조성($CaMoO_4/SiO_2$)비를 도출하였다.

[비철3-7 | 15:30]

도금 슬러지로부터 니켈·크롬 선택적 회수를 위한 건/습식 복합 기술 연구: 김명석 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 오승주 (고려대학교), 박경태*, 신재홍* (한국생산기술연구원)

Keywords: 도금 슬러지, 니켈, 크롬, 건/습식 공정, 알칼리 로스팅, 용매 추출

산업이 발전함에 따라 철강, 도금, 배터리 제조 등 다양한 분야에서 금속 소재의 사용이 증가하고 있다. 이러한 과정에서 대량의 슬러지가 부산물로 발생하며, 특히 도금 슬러지는 니켈과 크롬과 같은 고부가가치 금속을 포함되어 있다. 니켈은 배터리, 스테인리스강, 초내열 합금 등의 핵심 원료로, 크롬은 내식성과 내마모성이 요구되는 다양한 산업 소재의 필수적으로 활용된다. 그러나 이러한 금속 자원은 인도네시아, 중국, 남아프리카공화국 등 특정 국가에 집중되어 있어 원료 확보의 불균형이 존재한다. 최근에는 자원 무기화 현상이 가속화되면서 원자재 공급망 불안정성이 심화되고 있으며, 이에 대한 안정적인 자원 확보가 주요한 과제로 떠오르고 있다. 따라서, 원료의 안정적인 확보와 환경 보호를 위해, 국내에서 발생하는 폐기물의 재자원화 기술 개발이 필수적이다. 본 연구에는 도금 슬러지 내에서 니켈, 크롬 자원을 회수하는 연구를 수행하였다. 크롬의 선택적 추출을 위해 알칼리 로스팅 공정을 활용한 상전환 및 선택적 회수율을 비교 분석하였다. 이후 잔여 슬러지 분말에 대한 침출 공정을 진행하여 잔여 불순물을 제거하고, 이어진 용매추출 공정을 통해 다양한 추출제와 조성의 조절을 통해 니켈의 선택적 추출 및 농축 효율을 극대화하고자 하였다.

고엔트로피합금 Ⅱ
Room 201A, 4월 23일

[고엔3-1 | 16:00]
$L1_2$-강화 고엔트로피 합금의 기계적 특성 향상을 위한 합금 설계 연구: 남승진, 이창기, 장태진, 성민영, 김세호 (고려대학교), 박은수 (서울대학교), 손석수* (고려대학교)
Keywords: 고엔트로피 합금, L12 석출상, 합금 설계, 미세조직, 기계적 거동
금속 구조재료의 강도-인성 상반특성 극복을 위한 고엔트로피 합금 기반의 합금 설계가 활발히 연구되고 있다. 특히, 면심 입방 구조를 갖는 합금에서 적층 결함 에너지를 낮춰 준안정 변형 거동을 유도하면 인성을 크게 향상시킬 수 있지만, 상대적으로 낮은 항복강도를 갖는 한계가 있다. 한편, 기지 상과 정합성을 갖는 $L1_2$ 석출상은 연성 감소를 최소화하면서 강도를 효과적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 두 가지 합금 설계 전략의 장점을 결합하여 변형 거동을 제어한 CoCrFeNiAlTi-기반 $L1_2$ 나노 석출상 강화 고엔트로피 합금을 설계하여 강도 및 가공 경화 특성을 동시에 향상시키고자 하였다. 열역학 계산을 기반으로 합금 조성을 최적화한 후, 열처리를 통해 고용체 기지상에 10 nm 크기의 $(Co,Ni)_3(Al,Ti)$형 $L1_2$ 나노 석출상을 형성시켰다. 이로 인해 750 MPa의 높은 항복강도를 얻을 수 있었으며, 48 GPa%의 우수한 인성 (Strength-Elongation Product) 특성을 나타냈다. 이는 $L1_2$ 석출상 형성으로 인한 석출 강화 효과와 함께 기지상의 적층 결함 에너지가 감소함으로써 변형 중 미세화된 planar slip band에 의해 동적 Hall-Petch 효과가 향상되었기 때문이다. 본 연구를 통해 변형 거동을 제어한 $L1_2$ 강화 고엔트로피 합금 설계가 고강도 및 고인성 구조재료 개발에 유효한 전략임을 제시하고자 한다.

[고엔3-2 | 16:15]
분말야금법으로 제조된 FeCrMnNiCo 합금의 미세조직과 기계적 특성: 이상화 (전북대학교, 조선대학교), 박성현, 이석재, 정재길* (전북대학교)
Keywords: high-entropy alloys, powder metallurgy, microstructure, atom-probe tomography, mechanical property
높은 기계적 특성과 고온 안정성을 가진 등원자비 FeCrMnNiCo 고엔트로피 합금은 최근 10년 동안 미래산업 지향적인 구조용 재료로서 주목받아 왔다. 보다 우수한 기계적 특성을 얻기 위해 기계적 밀링, 소결 등 분말야금법을 통해 나노미터 크기의 치밀한 조직을 가진 합금을 제조하는 연구가 진행되었다. 분말야금법을 활용한 합금 제조는 단시간에 치밀한 조직을 얻을 수 있으나 기계적 밀링 또는 소결 중 유입된 C, O 등의 불순물에 의해 미세조직과 기계적 특성이 변화하는 이슈가 발생하고 있다. 고엔트로피 합금의 후속 열처리 중 결정립 크기 변화 및 이차상 생성에 관한 연구들이 보고되고 있으나, 분말야금 공정에서의 미세조직 변화와 기계적 특성에 관한 상관관계에 대한 추가 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고에너지볼밀링, 방전플라즈마소결 및 후속 열처리 동안 등원자비 FeCrMnNiCo 고엔트로피 소결합금의 미세조직을 X-선 회절, 주사전자현미경, 투과전자현미경, 원자탐침현미경을 활용하여 정량적으로 분석하였다. 또한, 기계적 합금화 시간과 후속 열처리 온도에 따른 미세조직 변화가 소결합금의 경도에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

[고엔3-3 | 16:30]
반도체 공정 장비용 물리/화학적 플라즈마 식각 저항성이 우수한 투명 고엔트로피 세라믹 신소재 개발: 마호진* (한국재료연구원), 신유빈, 함수빈 (한국재료연구원, 부산대학교), 김하늘, 박영조, 고재웅, 이재욱, 김미주 (한국재료연구원), 김정형 (한국표준과학연구원), 이효창 (한국항공대학교), 정영화 (포항가속기연구소), 이정우 (부산대학교)
Keywords: 고엔트로피 세라믹, 투명세라믹, 반도체공정, 소결, 식각
고엔트로피 세라믹스는 독특한 고유 특성을 나타내며, 열 차폐, 에너지 저장, 첨단 광학 부품 등 다양한 응용 분야에서 연구되어 왔다. 최근 반도체 산업에서는 고성능 칩에 대한 수요가 증가함에 따라 웨이퍼 제조에서 더 높은 종횡비와 더욱 미세한 선폭이 요구되고 있다. 이에 따라, 높은 플라즈마 식각 저항성과 오염 물질 생성을 최소화하는 새로운 소재 개발이 필수적이며, 고엔트로피 세라믹스가 보이는 플라즈마 식각 저항성은 이러한 새로운 과제에 대한 혁신적인 해결책이 될 수 있다. 본 연구에서는 높은 광학적 투명성을 가지며, 치밀한 미세구조와 최소한의 잔류 기공을 갖춘 단일상 고엔트로피 세스퀴옥사이드 세라믹스를 성공적으로 제조하였다. 제조된 시편의 구조 분석 결과, 단일상 구조와 우수한 상 균질성이 확인되었다. 또한, 고엔트로피 세라믹스의 플라즈마 식각 저항성을 최초로 평가한 결과, 기존의 플라즈마 저항성 소재와 비교하여 8 nm/h의 낮은 식각 속도를 나타냈다. 이러한 종합적인 특성 분석을 통해, 고엔트로피 세라믹스가 반도체 생산 수율을 획기적으로 향상시킬 수 있는 유망한 후보 소재이며, 차세대 능동 광학 세라믹스를 비롯한 다양한 응용 가능성을 지니고 있음을 제시한다.

[고엔3-4 | 16:45]
Microstructure and Mechanical Properties of Precipitation-hardened Fe-rich Complex Concentrated Alloys: Vikas Shivam*, Dong Whan KIM, Jae Kwon Kim, and Eun Soo Park (Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 08826- Korea)
Keywords: Complex concentrate alloys (CCAs), Alloy design, Microstructure, Precipitation strengthening, Mechanical properties
An optimum balance of strength and ductility is a vital requirement for most engineering applications for enhanced engineering reliability and energy efficiency. However, achieving these two properties simultaneously is generally exclusive. The alloy design

approach of complex concentrated alloys in a multi-component space with the concept of increased configurational entropy has provided new avenues with lots of opportunities. In the present work, we have designed a series of Fe-rich non-equiatomic alloy compositions (Fe ^{3} 40 at %) by following the semi-quantitative method based on the CALPHAD approach. The composition of the alloy is selected in such a way that it leads to the formation of a precipitation-hardened microstructure of FCC (matrix phase) and L12 phases. The alloys are prepared through arc melting and further subjected to homogenization and cold rolling treatment. The solution-treated alloys were aged at 600, 700, and 800 ºC at different holding times to understand the precipitation kinetics and microstructure evolution. The heterogeneous precipitation of the L12 phase in the FCC matrix helps in achieving an excellent combination of room-temperature mechanical properties. The yield and ultimate tensile strength of the developed alloys are ~1GPa and ~1.4 GPa, respectively, with appreciable ductility of ~20%. The high content of Fe shows excellent cost performance and mass density along with the possibilities of overcoming the strength ductility trade-off.

LFP 배터리 재활용 난제해결 심포지엄
Room 201B, 4월 23일

[재활용1-1 | 14:00] 초청강연

전기차용 LFP 배터리 재활용 산업 및 기술 현황: 심현우*, 김홍인, 제진영 (한국지질자원연구원)

Keywords: 리튬이차전지, 전기자동차, LFP 배터리, 재활용

전 세계적인 이차전지 캐즘 현상 및 성장 둔화에도 불구하고, 리튬이차전지 산업은 전기차, 신재생에너지 등 전방산업의 친화경화 기조 아래 지속가능한 성장의 핵심산업으로서 여전히 주목받고 있다. 특히, 전기차용 배터리의 폭발적 수요에 대응하기 위해서는 배터리 핵심원료(예: 리튬, 코발트, 니켈 등)의 안정적 확보가 필요하며, 이에 사용후 배터리로부터 유가금속 자원을 회수하는 배터리 재활용 산업은 원료 확보의 공급망 측면에서 여전히 중요한 인식과 더불어 관련 기술개발 또한 활발히 연구가 이루어지고 있다. 현재 국내외 배터리 재활용 상용화 기술은 배터리 제조 공정스크랩 및 NCM 삼원계 배터리를 중심으로 유가금속 자원을 회수하고 원료화하는 것으로 이루어지고 있다. 최근 중국 중심의 저가형 전기차 보급 확산으로 LFP 배터리 사용이 증가하면서, 향후 대량 발생이 예상되는 LFP 배터리에 대한 재활용 방안이 중요하게 대두되고 있으나 아직까지 LFP 배터리 재활용은 경제성의 이유로 상용화 기술개발이 이루어지고 있지 않은 실정이다. 이에 국내외 재활용 기업들은 관련 LFP 배터리 재활용 시장 선점을 위한 기술개발을 활발히 진행하고 있으며, 무엇보다도 경제성을 갖기 위한 전기차용 LFP 배터리 처리공정 개발이 필요하다. 본 발표에서는 이러한 전기차용 사용후 배터리 재활용 산업에 관한 전반적인 현황 및 LFP 배터리 재활용 중심의 처리공정 기술에 대한 소개를 진행하고자 한다.

[재활용1-2 | 14:25] 초청강연

The Current Status of Direct Recycling of LFP Cathode Material: Kyungjung Kwon* (Sejong University)

Keywords: Li-ion battery, cathode material, LFP, direct recyclin

The appropriate disposal of spent Li-ion batteries (LIBs) is critical considering the limited resources of strategic metals and negative impacts on the environment as well as economic profits from LIB recycling. The direct recycling process as one of LIB recycling schemes regenerates spent cathode materials through a series of liberation and relithiation processes without the destruction of active materials. The overall liberation and regeneration process for LiFePO4 (LFP) is covered first. Specifically, separation technologies that liberate LFP cathode materials are analyzed based on categorized methodologies including thermal treatment with single or multiple stages, chemical treatment through solvent- or mechanically-assisted dissolution methods, and the combined processes of chemo-thermal treatment. Next, the degradation mechanisms of LFP are summarized and regeneration methods that are mainly adopted in the LFP direct recycling process such as solid-state, hydrothermal, molten-salt methods are introduced. Further, the electrochemical performance of regenerated LFP is compared according to their regeneration process. The LIB performance of regenerated LFP is classified into initial discharge capacity, rate capability, and cycle performance. Specifically, the corrected values of discharge capacity based on the dependence of discharge capacity on C-rate are directly compared among different regeneration methods. Whereas there are more papers that employ the solid-state method among references on the LFP regeneration, regeneration results using the hydrothermal method show better electrochemical performance. For the fair performance comparison of regenerated LFP, the LIB performance of beginning-of-life (BOL), end-of-life (EOL), and regenerated LFP of identical specification is compared.

[재활용1-3 | 14:50] 초청강연

Review on Wet Recycling methods for Spent LiFePO4 Batteries: Daeweon Kim* (Institute for advanced engineering) and Heeseon Kim (Institute for advanced engineering)

Keywords: Waste LFP battery, soluble lithium compounds, selective lithium water-leaching, inorganic(organic) acid, oxidant

This paper provides a comprehensive review of the latest research trends in wet processing methods for recycling spent LiFePO4 batteries. In particular, it analyzes various chemical leaching methods for the selective recovery of lithium from these batteries, evaluating their efficiency. The study covers lithium recovery techniques using strong and weak acids, leaching processes utilizing strong oxidants, and lithium recovery through isomorphic substitution reactions involving salts. Additionally, this research explores optimal leaching conditions to maximize lithium recovery, discusses various chemical reactions for the selective recovery of lithium, iron, and phosphorus, and offers insights into their potential. Ultimately, the paper aims to serve as a valuable reference for the advancement and practical application of LiFePO4 battery recycling technologies

[재활용2-1 | 15:30] 초청강연

A review on Sustainable Closed-Loop Hydrometallurgical Strategies to LiFePO4 Battery Recycling: Reuse of Raffinat: Jong-Won Choi*, Mooki Bae, Hyunju Lee, and Sookyung Kim (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM))

Keywords: Lithium iron phosphate (LFP), Recycling, Circular hydrometallurgy, Raffinate reuse

The sustainable recycling of spent lithium iron phosphate (LiFePO4, LFP) batteries is essential for resource conservation and environmental protection. This review focuses on recent advancements in closed-loop hydrometallurgical processes that enable the reuse of wastewater, i.e., raffinate, as lixiviant, reducing chemical consumption and wastewater generation. Various methodologies for selective lithium leaching and reagent regeneration are discussed, including the transformation of Na2SO4 into Na2S2O8 via electrolysis, as well as the role of deep eutectic solvents and organic acids in environmentally friendly lithium recovery. The feasibility of integrating Na2S2O8, H3PO4, and NaOH recycling within the LFP leaching framework is examined, emphasizing efficiency and economic viability. Additionally, advancements in precipitation-based lithium separation and regeneration of battery-grade iron phosphate are explored. By analyzing these technologies, this review provides insights into the development of a fully circular hydrometallurgical process for LFP recycling, minimizing environmental impact while maximizing resource recovery.

[재활용2-2 | 15:55] 조청강연

폐 이차전지 자원의 재활용 동향 및 건식 친환경 신공정을 통한 폐전지로 부터 리튬 화합물 회수: 박경태* (한국생산기술연구원 국가희소금속센터)

Keywords: LiB, 폐배터리 재활용, 건식 친환경 재활용, 리튬 회수, 리튬 화합물

리튬이온배터리(LIBs)는 높은 전력 밀도로 인해 전기차 및 휴대용 전자기기에 널리 사용되고 있으며, 최근 그 활용도가 급격히 증가함에 따라 사용 후 폐배터리의 양도 함께 증가하고 있다. 폐 LIBs는 중금속과 유해 물질을 포함하고 있어 환경 및 인체 건강에 심각한 위협이 되고 많은 유가금속을 포함하고 있으므로 적절한 처리가 필수적이다. 이를 해결하기 위한 방안으로 재활용이 중요한 대안으로 고려되며, 이는 유해 물질로 인한 오염을 방지할 뿐만 아니라 천연 자원의 절약에도 기여할 수 있다. 따라서 본 발표에서는 폐 LIBs의 재활용 기술의 최신 동향을 정리하여 소개하며 특히, 수화학적 처리(hydrometallurgy), 건식 제련(pyrometallurgy), 직접 재활용(direct recycling) 기술의 연구 및 산업적 적용 사례를 분석하였다. 또한 기존의 습식 재활용 공정이 직면한 폐액 발생에 따른 환경적 문제를 해결하기 위한 대안으로서, 한국생산기술연구원에서 진행하고 있는 친환경 건식 리튬 회수 신공정에 대한 연구를 소개한다. 본 공정은 산성 용액을 사용하지 않는 용융탄산염 전해(Molten Carbonate Electrolysis, 이하 MCE) 공정 및 자전연소열환원(Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 이하 SHS) 공정을 활용하여 고순도의 리튬 화합물을 회수하는 데 중점을 둔다. MCE 공정에서는 니켈-코발트-망간(NCM) 계 복합 산화물을 전극 소재로 활용하여 전기화학적 환원 반응을 유도한다. 그 후, 환원된 리튬은 탄소 전극에서 발생한 이산화탄소와 반응시켜 탄산리튬(Li_2CO_3)을 형성 후 이를 수 침출하여 분별 회수하였다. 한편, SHS 공정에서는 마그네슘(Mg) 환원제와 NCM 폐 양극재 분말을 다양한 조건의 비율로 혼합한 후, 유도된 고온 연소반응을 통해 리튬을 산화 리튬(Li_2O) 형태로 환원하였다. 환원된 산화 리튬과 금속 종들은 물과 반응시켰으며, 이때 고순도의 수산화리튬(LiOH)이 형성된 후 용해되어 이를 다시 재결정화 하여 분별 회수하였다. 본 연구에서 제시된 공정을 통해 탄산리튬(Li_2CO_3) 및 수산화리튬(LiOH)의 회수율은 각각 95% 이상을 기록하였으며, 최종 생성물은 99% 이상의 고순도와 명확한 결정 특성을 보유하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 기존 습식 공정 대비 환경 친화적이고 고효율적인 리튬 회수 공정으로서의 우수성을 입증할 뿐만 아니라, 리튬의 선제적 회수를 통해 후속 유가금속 정제 공정의 부피를 효과적으로 축소할 수 있으며, 공정 전반에서 발생하는 환경적 부담을 완화할 수 있는 실질적인 대안으로서의 가능성을 제시한다.

[재활용2-3 | 16:20] 조청강연

폐 리튬철인산(LFP) 배터리의 건식 재활용 공정 개발을 위한 열역학적 이해: 김영재* (인하대학교)

Keywords: 리튬철인산 배터리, 재활용, 열역학, 건식 공정

배터리 전기차(BEV) 보급의 확대와 함께 리튬철인산(LFP) 배터리의 폐기량이 크게 증가할 것으로 예상된다. 리튬철인산 배터리는 상대적으로 저렴한 가격과 높은 안정성으로 배터리 전기차에서의 사용이 확대되고 있으며, 특히 중국 시장을 중심으로 널리 보급되고 있다. 2024년 기준 LFP 배터리의 글로벌 전기차 시장 점유율은 40%를 넘어섰으며, LFP 배터리의 시장 점유율을 고려할 때 2040년 LFP 폐배터리 발생량은 전체 폐배터리의 40% 이상을 차지할 것으로 예상된다. LFP 폐배터리의 재활용은 자원 회수와 폐기물 관리 측면에서 중요하지만, 코발트(Co)와 니켈(Ni)을 포함한 리튬이온배터리(LIB)와 비교하여 경제적 가치가 낮아 재활용 과정에서 어려움이 존재한다. 현재 LFP 배터리의 재활용 방식으로는 크게 습식 공정과 건식 공정이 연구/제안되고 있으며, 이 중 건식 공정은 높은 처리량, 다양한 배터리 화학 조성에 대한 유연한 적용성, 그리고 유기물 연소를 통한 에너지 회수 등의 장점을 가진다. 그러나 단순한 고온 건식 공정을 통해서는 리튬이 산화물 형태로 슬래그 중에 농축되는 문제가 있어, 경제성을 고려한 효율적인 회수 방법의 개발이 요구된다. LFP 배터리 재활용의 경제성과 효율성을 향상시키기 위해서는 고온 재활용 공정 중 배터리 구성 요소에 대한 열역학적 거동의 이해가 필수적이다. 본 발표에서는 LFP 배터리의 건식 재활용 공정 연구 현황을 살펴보고, 각 공정 반응의 열역학적 기초를 고찰하여 향후 공정 설계를 위한 전략을 탐색하고자 한다.

[재활용2-4 | 16:45] 조청강연

Development of Sustainable Pretreatment Process for Spent Lithium-ion Battery Recycling: hyunseok lee* (Korea battery industry association)

Keywords: Spent Lithium-ion Batteries, Direct recycling, blackmass

Conventional recycling methods for spent lithium-ion batteries typically involve shredding followed by black mass recovery, with valuable metals extracted through pyrometallurgical or hydrometallurgical processes. However, these traditional approaches require high-temperature equipment, resulting in significant CO2 emissions and industrial waste generation. This study presents a more sustainable approach through direct recycling, focusing on spent battery samples with State of Health (SoH) values of 90% and 66%.

The process utilizes triethyl phosphate (TEP), an environmentally friendly solvent, to achieve direct black powder recovery. The recovered materials were characterized using FT-IR, XRD, and TGA analyses, confirming the presence of PVDF and conductive materials in the disk-shaped films. This methodology demonstrates a more environmentally conscious alternative to conventional recycling processes, supporting the transition toward low-carbon renewable energy systems while minimizing industrial waste generation.

초대형 PM-HIP 핵심기술개발 심포지엄
Room 202A, 4월 23일

[PM-HIP1-1 | 09:00]
SMR 주기기 PM-HIP 기술 개발 현황: 김동수*, 김정길, 안세환 (두산에너빌리티)
Keywords: SMR, 주기기, 혁신제작기술, PM-HIP, 탄소중립

최근, 탄소중립 목표 달성 및 청정에너지원 증대 요구에 따라 SMR이 유력한 대안으로 떠오르고 있으며, 전 세계적으로 '35년까지 최대 97.4조원 규모의 시장이 전망되고 있다. 이로인해, 미국, 영국 등 SMR 설계를 선도하고 있는 주요 국가들은 SMR 제작기술의 중요성을 사전에 인지하고 제작분야에서도 경쟁 우위를 확보하기 위하여 정부차원에서 혁신 제작기술(PM-HIP, EBW, DLC)개발 및 설비투자를 적극적으로 지원하고 있다. 이는 SMR이 복잡한 설계와 더 커진 기자재 크기에도 불구하고 대형 원전 대비 시공기간 단축을 위해 기자재 제작기간 단축이 글로벌 SMR 경쟁에서 중요한 경쟁요소가 될 것으로 전망되기 때문이다. PM-HIP(Powder Metallurgy-Hot Isostaic Pressing) 기술은 복잡 형상의 부품을 최종제품과 매우 근접한 형상(Near Net Shape)으로 한번에 제조 가능한 기술로 혁신제작기술 중 적용효과가 가장 크다. PM-HIP 기술개발/상용화는 미국이 가장 빠르게 추진하고 있으며, 2016년 부터 EPRI 주관으로 SMR 부품대상 기술개발을 추진하여 1/2 Sclae까지 제작/검증 완료하였고, 현, 자국내 기업 컨소시엄을 통해 양산용 대형 HIP 설비도입 검토를 진행하고 있다. 따라서, 국내에서도 '22년 부터 초대형 PM-HIP 기술개발 및 양산용 설비 도입을 위한 국책과제를 기획하였고, 기술개발 국책과제를 '24년 부터 우선 추진하는 것으로 결정되었다. 본 발표에서는 초대형 PM-HIP 제작기술 개발 국책과제의 주요 추진내용을 소개하고자 한다.

[PM-HIP1-2 | 09:20]
원자력발전소 적용을 위한 PM-HIP 기술 개발 및 적용 해외 동향: 윤은섭*, 이호중 (한국수력원자력(주))
Keywords: PM-HIP, SMR, 원자력발전소

소형모듈형원전(SMR, Small Modular Reactor)의 핵심목표중 하나는 기존 대형원전 대비 건설공기 단축을 통한 경제성 확보인데, 기존의 제조방법으로는 달성이 불가능하다. 이를 극복하기 위해 미국은 EPRI(Electric Power Research Institute)를 중심으로 SMR 적용을 위한 첨단제조기술 개발을 수행하고 있으며, 여기에는 PM-HIP(Power Metallurgy-Hot Isostatic Pressing) 기술이 포함되어 있다. 원자력 산업계의 경우 새로운 방법으로 제작된 재료의 적용을 매우 보수적인 관점으로 바라보고 있으며, 아직까지 PM-HIP 소재는 비안전계통 극히 일부분에만 적용된 것으로 알려져있다. 본 논문에서는 EPRI에서 수행중인 PM-HIP 기술을 사용한 원전 기기 제작 경험 및 계획을 살펴보고, 국내에서 개발중인 혁신형 SMR에의 PM-HIP 기술 적용 방안에 대해 소개 한다.

[PM-HIP1-3 | 09:40]
초대형 PM-HIP 성형 공정 해석 프로그램 개발: 김재철*, 김동수, 김동영, 김정길, 김지현, 안세환 (두산에너빌리티)
Keywords: PM-HIP, SMR(Small Modular Reactor), NNS(Near Net Shape), 성형공정해석, 크리프(Creep)

최근 PM-HIP 공법이 SMR(Small Modular Reactor) 제작 적용을 위한 혁신제조기술의 일환으로 개발되고 있다. PM-HIP 공법의 원자력 SMR 적용을 위한 과제 중의 하나는 비용 및 제작 시간의 감축이며 이를 위하여 NNS(Near Net Shape) 달성이 필요하다. 분말의 압축을 통한 성형공정 특성상 초기 Capsule로부터 최종 제품까지는 체적 및 치수변화가 불가피 하며 NNS의 최종 형상을 얻기 위해서는 통상적으로는 경험에 의한 Trial and Error 방식으로 초기 Capsule의 형상이 결정되었다. 그러나 본 연구에서는 이를 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 달성하고자 PM-HIP 성형공정 해석 프로그램을 개발하였다. 주로 초기에 발생하는 시간비의존적(Time Independent) 소성변형(Plastic Deformation) 및 고온에서의 시간의존적(Time Dependent) 크리프(Creep) 변형을 고려한 Material Model을 선정하고 이에 필요한 물성 시험을 실시하였다. 범용요한요소 프로그램 ABAQUS의 User Subroutine을 이용하였으며 개발된 프로그램을 이용하여 해석과 실험을 비교하여 그 신뢰성을 검증하였다.

[PM-HIP2-1 | 10:20]
PM-HIP 전용 고청정-구형의 저탄소강 금속 분말 제조기술 개발: 김응균, 전창우, 이주호, 박은수* ((주)이엠엘)
Keywords: PM-HIP, SMR, Gas atomization, Metal powder, Classification

SMR은 기존 대형 원전과 달리 일체형 모듈화 설계로 인해 기자재는 더욱 커지고 고도의 제작 기술이 요구됨에도 불구하고, 각국의 발전사들은 대형원전 대비 더욱 짧은 제작 납기를 요구하고 있다. SMR 기자재 제작기간을 단축하고, 비용을 획기적으로 절감시키기 위해서는 PM-HIP 기술의 개발과 적용이 필수불가결하다. PM-HIP 기술은 금속분말을 최종제품과 매우 근접한 형상으로 한번에 제조가 가능한 차세대 혁신 공정 기술이며, 이에 적용되는 합금 분말의 경우, 입도 크기는 조대한 분말(53~500 um)이 주로 사용되고 표면 산화 방지가 필수적이다. 본 연구에서는 EIGA(Electrode Induction melting Gas Atomization) 공법을 활용하여 PM-HIP 전용 저탄소강 금속 분말을 제조하였다. 분말의 입도와 수율 제어를 위해 가스 분사 노즐을 설계(분사 각도, 분사량, 분사 압력 등) 및 적용하였으며, 가스 종류(Ar/N_2)와 분사 압력, 가스 온도를 공정 변수로 설정하였다. 또한, 제조된 분말의 산소 반응성을 고려하여 고진공 내에서 외부 대기에 노출되지 않고 분급할 수 있는 설비를 설계 및 제작하였으며, HIP 공정에 적용하기 위한 합금 분말 분급 공정에 활용하였다. 공정 변수 설계에 따른(분사 압력, 가스 종류, 가스 온도 등) 분말의 입도분포, 형상, 성분 등의 특성을 분석하였으며, 분말의 입도/수율 제어 기술 및 분말 표면 산화/오염 방지 기술을 소개하고자 한다. 제조된 저탄소강 금속분말을

HIP 공정에 적용하기 위해 분말의 특성에 따라 각 소재의 미세조직, 기계적 특성을 평가하여 소재에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 통해 PM-HIP 전용 저탄소강 금속 분말 제조 및 분급 거동에 대한 최적 조건을 제시한다. [사사문구] 본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원 현장 수요 대응 원전 첨단 제조 기술 및 부품장비 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00432289)

[PM-HIP2-2 | 10:40]

소형 모듈형 원자로 가압용기 제조를 위한 저합금분말 고밀도 벌크화 기술: 서영택, 김기봉, 양상선* (한국재료연구원)

Keywords: 소형모듈형원자로, 금속분말, 가스분무, 고온등방가압

차세대 원자력 발전 형태 중 하나로 소형 모듈형 원자로(Small Modular Reactor, SMR)가 주목받고 있으며, SMR의 가압용기 제조 공정의 납기와 가격경쟁력 확보를 위해서는 분말을 활용한 고온등방가압 공정인 분말야금(Powder Metallurgy Hot Isostatic Pressing, PM-HIP) 공정이 가장 합리적인 공정으로 여겨진다. 본 연구에서는 가스분무공정(Gas Atomizing)으로 제조된 다양한 입도의 SA508 분말을 활용하여 고온등방가압공정(Hot Isostatic Pressing, HIP)을 통해 고밀도화 연구를 수행하였다. HIP 공정 온도와 압력 변수에 따라 HIPed 소재의 밀도 및 미세구조를 파악하였고, HIP 후 열처리된 소재의 기계적 특성 평가를 통하여 최적 HIP 공정 조건을 도출하였으며, HIP 공정 중 치밀화 기구와 기계적 특성에 영향을 주는 인자에 대하여 발표하고자 한다

[PM-HIP2-3 | 11:00]

PM-HIP용 Capsule 제작 및 분말 Filling 기술: 김용진*, 김상권, 김성기, 김규동 (코힙스테크)

Keywords: 금속분말, 고온등방성형(HIP), HIP Capsule, 분말충진

산업이 다양화되고 고도화됨에 따라 새로운 소재의 등장과 기존 소재의 특성을 향상시킨 보다 우수한 소재에 대한 산업적 요구가 점차 증가되고 있다. 고온등압성형(Hot Isostatic Pressing, HIP)기술은 이러한 시대의 요구에 맞춰 신소재 개발과 기존 소재의 특성 향상을 위해 적용되는 중요한 공정 중의 하나로 산업적 적용 영역이 점차 넓어지고 있다. 특히 분말과 HIP공정을 결합시킨 PM-HIP공정은 SMR용 부품제작의 주요 공정으로 주목을 받고있다. 이는 PM-HIP이 Near Net Shaping이 가능하다는 특성을 가지기 때문에 소재에서 부품까지 제조되는 공정기간이 기존 공정에 비해 혁신적으로 단축되고, 제조된 부품의 신뢰도가 보증된다는 큰 장점을 가지기 때문이다. 또한 장비기술의 발전으로 HIP 장비의 대형화로 인해 SMR용 대형 부품제조에 보다 경제적 이점도 확보되고 있어, 소량 다품종의 특성을 가진 원자력 산업용 부품제조에 PM-HIP공정의 적용을 확대하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 PM-HIP공정에 있어서 중요한 특성 중의 하나인 Near Net Shape을 구현할 수 있는 분말을 하는 Capsule을 제작하는 기본적인 개념과 원리 및 방법과 고압 하에서 수축률을 고려한 최적의 형상 설계에 대한 방안을 소개하고자 한다. 또한 제작된 Capsule 안에 금속분말을 고밀도로 충진시키기 위한 적절한 충진 방법과 사용되는 분말의 요구조건 등에 대해 고찰하고 코힙스테크에서 본 연구를 위해 제작된 Capsule, 분말충진 장비 및 충진 결과를 소개하고자 한다

[PM-HIP2-4 | 11:20]

PM-HIP 방식으로 제작된 저탄소강 소재의 열처리 거동 분석: 박창수*, 박성민, 윤준원, 김효규 (한국생산기술연구원 강원기술실용화본부), 김정길, 김동영, 김동수 (두산에너빌리티)

Keywords: 저합금강, 분말야금, 열처리, 미세조직, 충격인성

원자력 산업에 적용되는 저합금강은 열처리 과정 중 발생하는 상 변태 및 석출거동에 따라 강도, 인성 및 내식 등의 특성이 달라지게 된다. 본 연구에서는 분말야금 및 등방가압성형 (PM-HIP) 방식으로 제조된 저합금강 분말의 품질 열처리(Normalizing-Quenching-Tempering) 조건에 따른 미세조직 및 물성 변화를 분석하고자 하였으며, 특히 동일 조성을 갖는 단조 소재와 비교함으로써, PM-HIP 방식으로 제조된 소재에서 나타나는 열처리 거동의 특징을 확인하고자 하였다. 이를 위해, Normalizing 및 Tempering 조건이 다른 시료를 제작 후 인장시험 및 충격시험을 통해 강도 및 충격인성을 측정하였으며, 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM) 및 투과전자현미경(TEM)을 활용하여 열처리 공정 단계에 따른 미세조직 변화를 분석하였다. 그 결과, Normalizing 조건은 최종적으로 형성되는 상의 조성 변화에 영향을 미치며, Tempering 조건은 석출상의 크기 분포에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 미세조직 변화가 단조재와 PM-HIP 소재에서 일부 차이가 존재하였는데, 이는 HIP 열처리 적용 여부에 따른 초기 미세조직의 차이가 원인으로 예상된다.

[PM-HIP3-1 | 14:00] 조정강연

Characterization of oxygen and non-metallic inclusions in SA508 steel powder for the applications to PM-HIP process: Yao Su, Sunghwan Park (Hanyang University), Dongsoo Kim (Doosan Enerbility), and JOO HYUN PARK* (Hanyang University)

Keywords: PM-HIP, Oxygen, Nitrogen, Inclusion, Oxide layer

Metal powder, as a unique form of metallic feedstock, has been extensively used in structural applications through powder metallurgy (PM) and the emerging field of additive manufacturing (AM). Vacuum induction melting gas atomization (VIGA) is a widely applied method for producing metal powders due to the efficiency and recovery rate. However, the influence of the atomizing conditions not only on the oxygen and nitrogen content but also on the composition of surface and internal oxides remains unclear, especially of the different powder size. The present study provides a comprehensive characterization of the oxygen and nitrogen content in SA508 powders of varying sizes, produced using Ar and N_2 gases during the atomization process. The relationship between powder size and impurity elements, such as oxygen and nitrogen, was systematically analyzed. Results indicate that the specific surface area and surface

oxidation layer significantly influence the total oxygen content in the powder samples. Consequently, the composition and thickness of oxide layer on the powder surface were evaluated through XPS analysis, and the mechanism of the formation of surface oxide layer was investigated using thermodynamic calculations. The correlation between powder size and oxide layer thickness was also explored, as it is critical for understanding and optimizing the properties of metal powders. Furthermore, non-metallic inclusions such as Al_2O_3, $MnSiO_3$, and MnS, were characterized in terms of their type and size using SEM. Thermodynamic software calculations elucidate the formation and evolution of the inclusions, offering critical insights for metal powders. These findings are essential for enhancing the production of high-performance powder metallurgy components through the Hot Isostatic Pressing (HIP) process.

[PM-HIP3-2 | 14:40]

PM-HIP 공정을 통해 제작된 고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 미세조직 및 기계적 성질 변화에 대한 연구: 문준오*, 이병찬, 홍현욱 (국립창원대학교), 김동수, 안세환 (두산에너빌리티)

Keywords: Small Modular Reactor (SMR), Powder metallurgy (PM), Hot Isostatic Pressing (HIP), High nitrogen austenitic stainless steel, Microstructure, Mechanical property

최근 들어 기존 대형 원자력 발전소와 비교하여 안전성이 우수한 Small Modular Reactor (SMR)가 주목받고 있다. SMR은 우수한 안전성과 함께 낮은 건설 비용, 짧은 건설 기간 등 다양한 장점을 바탕으로 활발히 연구되고 있다. SMR의 구성 요소들은 발전소 가동 중에 교체가 힘들고 장시간 극한 환경에 노출되기 때문에 우수한 내식성 및 기계적 성질이 요구된다. 이에 따라, 최근 SMR 구조용 후보소재로 우수한 성질을 가지고 있는 고질소 오스테나이트계 스테인리스강 (High nitrogen austenitic stainless steel, HNSS)이 주목받고 있다. 본 연구에서는 부품 제작기간 단축을 위해 적용되고 있는 Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing (PM-HIP) 공정을 이용하여 Nb, N 함량이 다른 HNSS 합금들을 제작하였으며, 이후 1050°C, 1100°C, 1150°C에서 각각 1시간동안 열처리를 수행하였다. 각 샘플의 미세조직 및 석출거동은 SEM, EBSD, TEM을 통해 분석하였다. 또한, 비커스 경도, 인장 및 충격 시험을 통해 각 샘플의 기계적 성질을 평가하였으며, 마지막으로 미세조직과 기계적 성질 간의 상관관계에 대해 고찰하였다.

[PM-HIP3-3 | 15:00]

PM-HIP 기술 적용 SMR 원자로 부품 제작을 위한 ASME Code Case 표준화: 허성호, 윤오성, 안희성* (비즈(주))

Keywords: SMR, PM-HIP, ASME Code Case, XM-19, SA508 Gr.3 Cl.2

소형 모듈러 타입 원자로 (SMR) 부품들의 제작은 주조, 단조들과 같은 고전적인 제작 기법들의 적용이 아닌 PM-HIP (분말야금 고온등압)의 신기술을 적용하여 제작한다. 그동안 PM-HIP 관련 기술 표준들이 ISO, ASTM을 중심으로 개발 및 발행되었고, ASME에선 보일러 및 압력용기들에 적용하는 신소재들의 승인을 위한 가이드라인을 2019 ASME Section II Part D에 발행하였다. 미국 원자력규제위원회(NRC)는§50.55a Codes & Standards를 통해 ASME Code 들을 2021년도 판까지 승인하였다. 따라서 NRC는 원자력 부품 제작에 신 제작 기술인 PM-HIP을 승인하였으며, PM-HIP으로 제작된 부품들은 기존 wrought 부품들의 ASME 소재 요건들을 만족할 경우 승인하는 것으로 하였다. 국내는 SMR 부품 소재들로 XM-19 및 SA508 Gr.3 Cl.2를 채택하였으며, 이들 소재들에 대한 PM-HIP 제작은 세계 최초로 아직 ASME 표준들이 없다. ASME Code Case는 기존 보일러 및 압력 용기 코드(BPVC) 규정에 포함되지 않은 재료, 제작 및 가동중검사 활동에 관한 대체 규칙이 긴급히 필요한 경우 발행된다. 따라서 국내는 XM-19 및 SA508 Gr.3 Cl.2 소재들의 PM-HIP 제작을 위한 대체 규칙이 긴급히 필요하여 ASME Code Case 표준화를 추진중이다.

[PM-HIP4-1 | 15:40]

KEPIC/ASME PM-HIP Code Case 개발 방법론: 김향아*, 손명성 (대한전기협회)

Keywords: PM-HIP, 분말

대한전기협회는 산업부 R&D 과제 중 다수의 원자력분야 표준화연계 과제에 참여하여 해당 개발기술에 기반한 신규 KEPIC(Korea Elctric Power Industry Code, 전력산업기술기준)을 개발 중에 있다. 미국의 NuScale, 우리나라의 i-SMR 등 다양한 SMR에 적용을 목표로 하는 '초대형 PM-HIP 핵심 제조공정기술 개발(주관기관 : 두산에너빌리티)' 과제에서는 사실상국제표준인 ASME(American Society of Mechanical Engineers)와 KEPIC을 동시에 개발하여 국제적인 적용성을 확보하고자 한다. 개발형태는 적용사례(Code Case)로 예상되며 ASME 위원회와 KEPIC SMR 특별위원회의 심사를 거친 후에 동일한 내용의 국영문(Bilingual)로 발행하고자 한다. 이를 위해서는 KIWG(Korea International Working Group) 산하에 운영될 첨단제조 TG(Task Group)에 적극적으로 활동할 예정이며, KEPIC SMR 특별위원회 산하의 기술검토 소위원회에 지속적인 보고를 진행할 계획이다. 신규 적용사례(Code Case)는 기존에 ASME에서 다른 재료에 대해 발행된 PM-HIP Code Case를 주로 참고하여 본 과제에서 대상으로 하는 SA508 Gr.3 Cl.2 및 XM-19 재료에 대해 개발하고자 한다. 향후 KEPIC과 ASME 소관 위원회의 검토 단계에서 서로 다른 의견이 개진되는 경우에 대한 반영 방법 등 KEPIC/ASME 적용사례(Code Case) 개발 과정에서 예상되는 문제를 해결하기 위한 전문가 네크워크 운영도 적극적으로 추진할 계획이다.

[PM-HIP4-2 | 16:00]

초대형 PM-HIP 모합금 제작을 위한 용해/정련/주입공정 개발: 김지현*, 김동수, 김동영, 김재철, 김정길, 안세환 (두산에너빌리티)

Keywords: PM-HIP, 모합금, 조괴, 주형

최근 PM-HIP 공법이 SMR(Small Modular Reactor) 제작 적용을 위한 혁신제조기술의 일환으로 개발되고 있다. PM-HIP 공법

의 원자력 SMR 적용을 위한 과제 중의 하나는 비용 및 제작 시간의 감축이며 이를 위하여 NNS(Near Net Shape) 달성이 필요하다. PM이 의미하는대로 (Powder metallurgy) 분말로 제작되는 공정상 품질 관리 및 가격 경쟁력 확보를 위하여 모합금의 자체 제작이 필요하다. 모합금은 용해/정련/주입의 공정을 거치며 SMR주요 재질인 SA508과 XM-19강종에 대하여 기존 단조품에 최적화된 공정을 분말용 모합금 제작에 최적화된 공정으로 변경하기 위하여 공정을 검토하였다. 용해/정련 공정의 경우 대형 단조품 대비 편석과 Mass effect 영향이 감소하고 공정차로 인한 물성특성을 고려하여 목표 조성 조정 및 그에 따른 Process 최적화를 진행중이다. 주입공정의 경우 기존 단조품을 만들기 위한 대형 단일 Ingot에서 Ingot내 조성편차가 적고, 회수율이 높이기 위하여 H/Di비를 높인 고경비 멀티 주입 주형을 검토하였다. 주입온도, 주입속도, 주형의 형상 및 개수등에 따른 유동응고해석을 통하여 최적 형상 및 주입조건을 도출하고 주입/인발조업을 실조업을 통하여 개선점을 확인 하였다. 주입공정은 조업표준을 정립, 현장 교육및 필요한 설비를 제작반영하였으며 용해/정련은 조성 검토후 성분 확보를 위한 상세 Process를 반영예정이다.

[PM-HIP4-3 | 16:20]

대형 PM-HIP 소재 제조를 위한 Pilot Scale Mock-up 제작 결과: 김동영*, 김동수, 김재철, 김정길, 김지현, 안세환 (두산에너빌리티)

Keywords: PM-HIP, SA508, Tensile, CVN, Heat treatment

최근 SMR 원전 부품 중 노즐 등이 붙어 있는 복잡한 형상의 헤드 및 대형 Shell의 제조 기간 단축을 위하여 대형 PM-HIP 적용 기술에 대한 연구가 미국 등을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 대형 PM-HIP 제작 기술의 일환으로 대형 원전 및 SMR 단강품에 사용되는 SA508 재질을 이용하여 Pilot Scale Mock-up을 제조하고 기계적 특성을 평가하였다. Pilot Scale Mock-up은 사각 Bar 형태로 Capsule을 제작하고 SA508 분말을 이용하여 HIP 공정으로 제작하였다. Pilot Scale Mock-up의 크기가 대형 원전품에 비하여 매우 작으므로 대형 원전 단강품에 적용하는 열처리 조건을 그대로 적용하지 않고 열처리 해석을 통한 모사 열처리 조건을 구한 뒤 열처리를 수행하였다. 물리 시편은 Pilot Scale Mock-up의 1/2T, 1/4T 위치에서 채취하였으며 인장, 충격 등의 시험을 수행한 결과 단조품과 동등 이상의 물성이 확보되는 것으로 조사되었다.

한국형 소형모듈원전용 소재 및 부품화 기술심포지엄
Room 202B, 4월 23일

[소형1-1 | 09:00] 초청강연

한국형 SMR 제조경쟁력 확보를 위한 다이오드 레이저 클래딩 혁신제작기술 개발 현황 소개: 명상원*, 하종문, 박광용, 박재석, 조성우, 윤강준, 구남기 (두산에너빌리티)

Keywords: SMR, 다이오드 레이저클래딩, 미세구조

미래 전력원으로 SMR이 각광받고 있는 가운데, 한국을 비롯하여 전 세계적으로 수십가지의 로형이 개발되고 있다. 한국은 경수로형 SMR을 개발 중이고, 이에 따라 수중환경의 원자로용기(SA508 소재)의 부식방지를 위한 STS 클래딩이 필요하다. SMR은 제작기간을 획기적으로 단축한 경제성 확보가 중요하다. 미국 및 영국의 경우 기존 클래딩 공정 대비 획기적인 제작시간 감소를 위해 다이오드 레이저 클래딩 양산기술을 개발 중 또는 일부 완료하였다. 다이오드 레이저는 높은 에너지변환 효율을 통해 고출력화가 용이하고 사각형 형태(Flat hat)의 고른 에너지 분포를 가지므로 대면적 클래딩화가 가능하고, 용입이 얕고 일정하여 모재와의 희석을 낮게 가져갈 수 있는 장점이 있다. 원자력 기술 선진국과의 제작 기술에 대한 격차 해소 및 경쟁력 확보를 위해 본 연구에서는 45 mm의 광폭비드를 형성하여 생산성을 획기적으로 증가시키는 다이오드 레이저 클래딩 시스템을 설계 및 개발하고, 한국형 SMR제작에 직접 적용가능한 양산공정 기술 개발현황과 한국형 SMR에 적용 및 상용화를 위한 KEPIC 적용사례 계획에 대해 소개하고자 한다.

[소형1-2 | 09:15] 초청강연

한국형 SMR 제조 경쟁력 확보를 위한 EBW 혁신제작기술 개발 현황 소개: 박수정*, 임동용, 박재석, 조성우, 구남기, 윤강준 (두산에너빌리티)

Keywords: SMR, EBW, One-pass welding

최근 전력 수요에 대한 관심과 더불어 소형 모듈 원자로(SMR)과 같은 원전 기술 개발이 주요국에서 활발히 진행되고 있다. 이러한 원전 압력기기 제작에는 신뢰성 높은 제작 기술과 공정 절차 적용이 중요하며, 특히 소재 제작 후 원주 이음을 통한 용접 공정 시 최적의 용접기술과 수행 절차를 설정하는 것이 기술 핵심 중 하나라고 할 수 있다. 전자빔 용접(Electron Beam Welding, EBW)은 후판 두께의 용접을 한 번에 가능하게 하여, 원전 주기기의 제작 기간과 비용을 단축할 수 있는 기술이다. 현재 영국과 미국은 SMR 원전기기 제작에 EBW 기술을 적용하기 위해 장비 개발과 시제품 시험을 진행하고 있는 단계로, 기술 격차를 극복하기 위해서는 단기간 내에 EBW 기술 개발이 필요하다. 본 발표에서는 EBW 후판 용접을 위한 전자총 및 시스템 구축에 관한 내용과, 적용 부위 확대를 위한 소재별 용접 공정기술 확보, 전산 해석 및 용접부 특성 평가, 진공 상태에서의 용접을 위한 예후열 삭제와 관련된 KEPIC 적용사례 (Code case) 개발 등 EBW 기술 확보를 위한 전반적인 계획을 소개하고자 한다.

[소형1-3 | 09:30] 초청강연

SiC 바인더 젯팅 3D프린팅 기술을 활용한 소형모듈원전용 핵연료 담체 제작: 정영석*, 정영석, 오지원, 조신후 ((주)매이드)

Keywords: 3D프린팅(3D Printing), 바인더 젯팅(Binder Jetting), 실리콘 카바이드(SiC), 소형모듈원전(Small Modular Reactor), FCM(Fully Ceramic Microencapsulated)

본 연구에서는 핵연료 입자가 실리콘 카바이드(SiC) 매트릭스 내에 포함된 완전 세라믹 마이크로캡슐화(FCM) 연료의 제조 방법을 연구하였다. 기존의 고온 가압 소결 방식은 TRISO 입자의 불균일한 분포로 인해 손상 가능성이 있으므로, 이를 해결하기 위해 바인더 젯팅(BJT) 기반의 적층 제조(AM) 및 화학 기상 침투(CVI) 공정을 이용한 SiC 매트릭스 밀도 증가 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 바인더젯 적층 제조를 통해 SiC 쉘 구조를 제작하고, 제작된 쉘 구조에 핵연료 모사품인 지르코니아 볼을 넣어 기본 형태를 구성하였다. 지르코니아 볼 사이의 공간을 SiC 파우더로 충전하고, 탭 공정을 활용하여 밀도를 향상시킨 후 CVI를 진행하여 최종 밀도를 증가시키는 프로세스를 진행하였다. 본 연구를 통해 적층 제조 및 CVI 공정을 최적화함으로써 FCM 연료의 균일한 밀도 증가를 실현할 수 있음을 확인하였다.

[소형2-1 | 09:55] 초청강연

탄소중립을 위한 소형모듈원전 기술개발 사례 및 동향: 김영득*, 정재석 (두산에너빌리티)

Keywords: 탄소중립(Carbon Neutral), 소형모듈원전(Small Modular Nuclear), 원자력발전소, 신소재, 단조공정(Forging Process), 개발동향

최초의 인류가 출현하고 약 100만년 전 불의 발견과 더불어 인류는 다양한 에너지원을 개발하고 진화해 왔다. 초기 화석연료의 사용은 비교적 큰 에너지원을 가지지만 탄소배출에 따른 지구 온난화로 기후 위기를 깨닫고 2050 탄소중립을 선포하고 지구환경을 보호하고자 하였다. 이를 위해 태양광, 풍력 등 여러 가지 친환경 에너지원이 출현하였으나, 이들이 가지는 기후 조건에 지배받는 치명적인 단점으로 인해 탄소중립은 현실적으로 요원하다 할 수 있다. 친환경적이고 안전성이 크면서도 상당한 수준의 대용량 에너지원을 얻을 수 있는 유일한 에너지원으로 원자력 에너지를 들 수 있으나 전 세계적으로 발생한 사고는 이에 대한 막연한 원전 공포와 사회적 수용성 이슈를 가지고 있다. 이에 인류는 안전을 담보로 하는 소형모듈원전(SMR) 에너지원을 개발 추진하고 있으며 에너지 선진국 주도로 개발 각축전을 벌이고 있다. 본 연구에서는 소형모듈원전용으로 출현한 신소재 및 제조에 대한 기술개발 사례를 살펴보았다. 사용 소재의 경우 기존의 소재보다 약 3배 이상의 고온 강도를 가지며 개발 대상품의 크기 및 중량은 4~5미터에 수십톤 이상이며 난해한 형상 조건으로 특수한 단조 공정 기술을 적용하여 제조 성공하였다. 또한 이러한 소형모듈원전은 다양한 기술적 진화를 거듭하고 있어 이에 따른 개발 동향에 대해 살펴보았다.

[소형2-2 | 10:10] 초청강연

소형모듈원전용 XM19 압력용기강 개발현황: 정재석*, 김영득 (두산에너빌리티), 장재훈, 이태호 (한국재료연구원), 한광식, 마영화, 송전영 (두산에너빌리티)

Keywords: 소형모듈원전, 고질소강, 소성공정지도

후쿠시마 원자력 발전소 사태 이후 안전한 원자력 발전요 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 높은 안전율을 갖는 소형모듈원전이 전세계적으로 활발하게 개발되고 있다. 소형모듈원전은 혁신적 재료 기술과 공정기술이 적용되어 모듈화 및 경량화된 일체형 원자로 구조의 특징을 갖는다. 또한, 기존 원전 대비 경쟁력과 안전성을 확보하기 위해 중성자 조사 취화 저항성 및 고강도 특성을 갖는 소재의 적용이 필요하다. FXM-19는 기존 오스테나이트계 스테인리스 강에 비해 더 많은 양의 질소를 활용하여 고강도와 우수한 내식성을 보이는 오스테나이트계 스테인리스 강이다. 최근 FXM-19는 원자력 산업의 소형 모듈형 원자로에 적용되어 주목을 받고 있다. 계산 열역학과 기계적 및 부식 특성의 특성화를 기반으로 화학 조성과 단조 후 열처리 조건의 최적 범위를 결정하였으며, 베이지안 인공 신경망을 채택하여 열간 성형 효율 등고선에 소성 불안정 영역과 소성 국부화 영역을 중첩시킨 소성공정지도를 구축하여 설정하여 최적의 열간 단조 조건을 확보하였다. 그 결과 Mock-Up Scale에서의 안정적인 제작 특성을 가질 수 있음이 논의될 예정이다.

[소형2-3 | 10:25] 초청강연

고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 화학조성과 열처리 온도에 따른 석출거동 및 기계적 특성: 김성훈, 권기환, 조효행, 이진종, 하헌영, 이창훈 (한국재료연구원), 정재석 (두산에너빌리티), 이태호* (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교)

Keywords: 오스테나이트계, 스테인리스강, 고질소, 석출, 용체화

오스테나이트계 스테인리스강은 뛰어난 기계적 성질, 내식성, 그리고 고온 환경에서의 산화 및 크리프 저항성을 갖추고 있어 발전소 소재로 널리 활용된다. 이러한 강재의 핵심 합금 원소 중 하나인 니켈은 가격 변동성이 크고 비용이 높은 특징이 있다. 이에 따라, 니켈을 질소로 대체함으로써 원가 절감과 동시에 우수한 성능을 유지할 수 있는 고질소 오스테나이트계 스테인리스강에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 고질소 오스테나이트계 스테인리스강에서는 Z-phase를 비롯하여 기계적 성질에 직접적인 영향을 미치는 다양한 석출상이 형성될 수 있다. 따라서, 높은 기계적 성능을 확보하기 위해서는 Z-phase와 같은 석출상의 형성과 거동을 효과적으로 제어하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 주요 석출상인 Z-phase에 영향을 주는 Nb, V, N 함량을 조절한 시험편을 대상으로, 용체화 처리 온도를 달리하여 화학 조성과 열처리 조건이 고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 석출 거동, 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

[소형2-4 | 10:40] 초청강연

SMR용 오스테나이트계 스테인리스 합금 설계를 위한 GCN 기반 기계적 물성 예측 모델 개발: 이재헌, 이승환* (한양대학교)

Keywords: 소형모듈원전(SMR), 오스테나이트계 스테인리스강, 그래프 합성곱 신경망, 기계적 물성 예측

소형모듈원전(SMR)은 차세대 원전 기술로 주목받으며, 이를 위한 구조 재료는 고강도, 내식성, 중성자 조사 취화 저항성이 요구된다. 오스테나이트계 스테인리스강은 기존 원자로용 소재 대비 우수한 고온 기계적 물성과 내식성을 가지지만, 이러한 합금을 설계하고 제조하는 과정에서는 다양한 합금 원소와 열처리 공정이 적용되기 때문에 이에 따른 기계적 물성을 정확하게 예측하는 것은 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 합금 원소의 조성과 열처리 공정 변수 간의 상관관계를 학습하여 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적 물성을 정확하게 예측할 수 있는 딥러닝 모델을 개발하였다. 오스테나이트계 스테인리스 강의 인장 강도에 영향을 미치는 상정보를 학습하기 위하여 오스테나이트계 스테인리스강을 이루는 합금 원소의 조성과 열처리 공정 변수와의 관계가 graph data의 형태로 변환되었으며, 이는 그래프 합성곱 신경망(Graph Convolutional Network, GCN) 모델을 학습하기 위한 데이터로 사용되었다. 학습된 GCN 모델은 R^2=0.95의 높은 예측 신뢰도로 오스테나이트계 스테인리스강의 인장 강도를 예측하였으며, 모델의 예측 결과에 대한 분석을 위하여 합금 원소의 조성과 열처리 공정변수가 인장 강도에 미치는 영향이 조사되었다.

[소형3-1 | 14:00] 초청강연

Nb 첨가에 따른 고질소 오스테나이트계 스테인리스강 열간성형성 변화: 김정훈, 문준오*, 홍현욱 (국립창원대학교), 정재석 (두산에너빌리티)

Keywords: 고질소 스테인리스강, 열간성형성, 석출, TTP 곡선, Cr_2N

최근 들어 기존 대형 원전 대비 안전성 및 경제성이 우수하다고 알려진 소형모듈원자로(SMR) 제작을 위한 기술개발이 활발하게 진행되고 있다. 고질소 오스테나이트계 스테인리스강(High-nitrogen austenitic stainless steel, HNSS)은 우수한 내식성 및 기계적 성질로 인해 이러한 SMR 부품의 구조용 후보소재로 주목받고 있으며, 이에 따라 HNSS 부품 제작을 위한 제강, 열간단조, 열처리 공정 기술개발이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 HNSS 합금조성 변화에 따른 열간성형성 변화에 대해 연구하였다. 이를 위해 Nb 함량이 다른 고질소강 샘플들을 제작하였으며, Gleeble simulator를 활용한 고온 압축시험을 통해 얻은 Flow curves를 분석하여 열간성형성 평가를 위한 Processing map을 작성하였다. 분석 결과, Nb 함량이 증가함에 따라 열간성형성이 개선되는 것으로 나타났으며, TTP 곡선을 통해 검증한 결과 이는 Nb 첨가량 증가에 따라 Intergranular Cr_2N 석출이 감소하기 때문인 것으로 확인되었다.

[소형3-2 | 14:15] 초청강연

고질소 오스테나이트계 스테인리스강에서 Nb 함량이 결정립 성장에 미치는 영향: 위영욱, 서동우* (포항공과대학교)

Keywords: 오스테나이트계 스테인리스강, Niobium, 결정립 미세화

고질소 오스테나이트계 스테인리스강은 질소 첨가를 통해 기존 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적 특성을 개선한 소재로 알려

져 있다. 그러나 제조 과정에서 질소 함량을 일정 수준 이상 증가시키는 것이 어려워, 질소를 통한 물성 향상에는 한계가 존재한다. 일반적으로 금속 재료의 기계적 특성은 미세조직에 큰 영향을 받으며, 특히 결정립 미세화는 강도와 인성을 향상시키는 효과적인 방법으로 알려져 있다. 결정립 크기는 합금 조성과 열처리 공정에 의해 크게 좌우되므로, 이를 효과적으로 제어하기 위해서는 관련 인자들의 영향을 체계적으로 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 고질소 오스테나이트계 스테인리스강에서 Nb 첨가가 결정립 성장 거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. Nb 함량이 각각 0.02, 0.11, 0.30 wt.%인 합금을 등온 열처리하여, 유지시간에 따른 결정립 성장 변화를 관찰하였다. 1100 ℃ 및 1150 ℃에서 8시간 열처리를 진행한 결과, Nb 함량이 증가할수록 결정립 성장이 억제되는 것으로 나타났다. 미세조직 분석을 통해 Nb가 0.11 wt.% 및 0.30 wt.% 첨가된 합금에서 Nb-Cr 기반 Z-phase 석출물이 형성됨을 확인하였고 이러한 결과를 바탕으로 Nb 첨가에 따른 결정립 성장 거동에 대해 고찰 하였다.

[소형3-3 | 14:30] 조청강연

ER209 용접봉용 선재 공정 기술 검토: 이권영*, 남기정 (세아창원특수강)

Keywords: 소형모듈원전, SMR, 용접재, 용접봉

소형모듈원전(SMR)은 원전 제조 기술의 혁신을 위해 구조재료로 XM-19 스테인리강 적용이 적극 검토되고 있다. SMR 구조물 제작을 위해선 고강도의 XM-19 소재 개발뿐만 아니라 XM-19에 적합한 용접재 및 용접 기술의 개발이 필요하나, 국내에서는 아직 XM-19에 적합한 용접재를 개발/생산한 경험이 전무한 실정이다. 본 과제에서는 상용 ER209 용접재를 분석하여 목표 품질을 설정하고 용접봉 제작에 사용될 스테인리스강 선재를 생산하기 위해 제강, 소성가공, 열처리 및 산세 등에 대한 제조 공정 기술에 대해 검토를 진행하였다.

[소형3-4 | 14:45] 조청강연

XM-19 고질소 스테인리스강 전자빔용접부의 미세조직 및 기계적물성 평가: 권예진*, 장창희*, 김홍덕, 이근순 (한국과학기술원(카이스트))

Keywords: 소형 모듈형 원자로, XM-19, 전자빔 용접

소형 모듈형 원자로(Small Modular Reactor, SMR)는 효율성, 경제성, 그리고 안전성을 동시에 달성할 수 있는 혁신적인 원자로 시스템으로 주목받고 있다. 원자로의 소형화를 실현하기 위해 XM-19가 원자로 압력용기 및 격납 용기용 금속 재료로 유망한 후보로 제시되고 있다. XM-19는 질소를 함유한 오스테나이트계 스테인리스강으로, 면심입방(Face-Centered Cubic, FCC) 구조를 가지므로, 취성-연성 천이온도(Ductile-Brittle Transition Temperature, DBTT) 거동을 나타내지 않는다. 이로 인해 중성자 조사 저항성이 우수하여 중성자 감시 시편을 필요로 하지 않는다. 이러한 특성으로 인해 저합금강에 비하여 SMR 설계에서 보다 유리한 재료로 평가된다. 또한, 전자빔 용접(Electron Beam Welding, EBW) 기술을 적용하면 제작 시간을 단축하고 비용을 절감할 수 있으며, 낮은 열 변형으로 인해 부품의 기계적 완성도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 EBW로 제작된 XM-19 용접부의 미세구조 및 기계적 특성을 평가하였다. 미세구조 분석 결과, 모재는 주로 오스테나이트 구조로 이루어져 있으며, 용융부에서는 용접 중 급속 냉각으로 인해 오스테나이트 내에 소량의 골격형 페라이트(Skeletal Ferrite)가 잔류하는 것이 확인되었다. X선 회절(X-ray Diffraction, XRD) 방법으로 페라이트 함량을 분석한 결과, 용융부에서 약 2~4%의 델타(δ) 페라이트가 존재하는 것으로 나타났다. 기계적 특성 평가 결과, 용융부의 경도 및 강도는 모재보다 낮았으며, 파괴인성(KJQ) 값 또한 감소하는 경향을 보였다. 이는 전자빔 용접이 진공 환경에서 수행됨에 따라 질소(N) 소실이 발생하고, 그로 인해 오스테나이트의 강도가 저하된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 파면 분석 결과, 모재에서는 연성 입내파괴(Transgranular Fracture)가 발생한 반면, 용융부에서는 입계파괴(Intergranular Fracture)가 관찰되었다. 특히, 용융부에서 KJQ 값이 모재보다 낮게 나타난 것은 균열이 오스테나이트-주상정(Columnar Grain) 경계를 따라 성장하면서 재료의 파괴인성을 저하시킨 것으로 분석된다. 본 연구는 XM-19의 EBW 적용에 따른 미세구조 변화 및 기계적 특성을 정량적으로 평가한 기초 연구로서, 향후 SMR 설계에서 XM-19의 적용 가능성을 검토하는 데 중요한 자료를 제공할 것으로 기대된다.

[소형3-5 | 15:00] 조청강연

고강도 오스테나이트계 스테인리스강 모재(XM-19) 및 용접재(ER209)의 용접 고온균열 민감도 평가: 정혜은 (한국재료연구원, 국립부경대학교), 강용준*, 박기태, 송상우 (한국재료연구원), 천은준 (국립부경대학교)

Keywords: High nitrogen austenitic stainless steel, XM-19, Hot cracking susceptibility, Varestraint test, Small modular reactor

소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)는 주요 기기 일체형 설계에 따른 높은 안정성 및 경제성으로 최근 전세계적으로 주목받고 있는 혁신적인 원자로 시스템이다. 대형 원전 대비 약 1/100 수준으로 축소시킨 소형모듈원자로는 제조 시 경량화가 핵심적인 부분이며, 구조재료에는 중성자 조사 취화 저항성이 우수한 고강도의 소재가 요구된다. XM-19은 0.2-0.4 wt%의 질소를 첨가하여 강도(인장강도 690 MPa, 항복강도 380 MPa 급)를 향상시킨 오스테나이트계 스테인리스강으로, 소형모듈원자로 압력용기 및 격납용기 소재로의 적용이 검토되고 있다. 그러나 부품 제조의 최종 단계에서는 용접 공정이 필수적으로 수반되는데, N의 첨가는 오스테나이트계 스테인리스강의 용접 고온균열(응고, 액화 등) 민감도를 향상시킨다는 연구가 다수 보고되고 있다. XM-19 소재의 부품화 및 용접부 건전성 확보를 위해서는 용접부 위치별 고온균열 현상의 평가 및 제어가 선행되어야 하지만, 관련 기초 연구는 상당히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 고질소 오스테나이트계 스테인리스강인 XM-19의 용접 고온균열 민감도를 정량화하고, 균열 발생에 대한 핵심 야금학적 인자를 도출하고자 하였다. XM-19 모재에 상용 용접재인 ER209 wire를 적용하여 GTA 및 GMA 용접부를 제작하였으며, 고온균열 민감도는 Varestraint 시험을 통해 평가하였다. 균열 발생 양상 및 미세조직은 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 투과전자현미경(TEM) 및 전자후방산란회절(EBSD)을 통해 균열부 미세조직의 결정립 크기 및 석출물 거동을 분석하였다.

[소형4-1 | 15:25] 초청강연

ER209 MIG 용접재료 특성 평가: 임희대*, 정재헌, 최창현, 길웅 (㈜세아ESAB)

Keywords: 용접, 용접재료, 스테인리스, ER209

소형 모듈 원자로(SMR) 압력 용기 후보 소재로 주목받는 Type XM-19 스테인리스강의 용접재료인 ER209의 특성을 분석하여 국내 생산 기반 마련에 필요한 기초 자료를 확보하고자 하였다. Type XM-19 스테인리스강은 Type 304L 및 316L 스테인리스강에 비해 뛰어난 내식성과 강도를 자랑하며, 극한 환경에서도 안정적인 성능을 유지하여 SMR 압력 용기의 핵심 소재로 검토되고 있다. ER209는 22Cr-11Ni-5.5Mn-2Mo-0.20N의 화학 성분계를 가진 스테인리스강 용접재료로, 넓은 온도 범위에서 높은 강도와 우수한 인성을 나타내는 것이 특징이다. 특히 입계 부식에 대한 저항성이 뛰어나며, 이종 금속 용접에도 활용될 수 있는 소재이다. 그러나 현재 국내에서는 ER209를 생산하는 업체가 전무한 실정이며, 전량 수입에 의존하고 있어 국산화가 필요하다. 이에 본 연구에서는 현재 상용중인 외산 ER209 MIG 용접재료를 사용하여 Wire자체 물리, 화학적 기초특성을 분석하였고, 또한 전용착금속의 물리, 화학적 특성과 용접작업성을 평가 하였다.

[소형4-2 | 15:40] 초청강연

용접 조건에 따른 XM-19 소재용 ER209 용접 금속의 기계적 성질: 서형석*, 하종문, 임동용 (두산에너빌리티)

Keywords: SMR, 용접, XM-19

Type XM-19 스테인리스강은 고질소 오스테나이트계 스테인리스강으로 기존에 많이 사용되어 온 Type 304L과 316L보다 내식성이 우수하고 강도가 높아 SMR 압력용기 후보소재로 고려되고 있는 소재이다. 이러한 XM-19 소재의 용접을 위해서는 주로 전용 용접재료인 ER209(UNS S20980, Nitronic 50W) 용접재료가 활용되고 있으나, 용접 시 고온균열이 쉽게 발생하는 문제로 인한 용접 품질 확보가 어려운 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 ER209 용접 재료의 용접성을 검증하고, 용접조건이 용접부 특성 및 미세조직에 미치는 영향을 검토해 보고자 하였다. 상용 XM-19 자재와 외산 용접자재(AWS/SFA 5.9 Class ER209)를 활용하여 용접 시편을 제작하였다. V-Groove 형태로 용접을 수행하였으며, GTAW 방식으로 용접 시편을 제작하였다. 제작된 시편에 대하여 용접금속 및 용접부에 대한 인장시험과 충격시험을 수행하여 공정조건에 따른 기계적 물성의 변화를 확인하였다. 용접 전류 150~220, 전압 15~20 V 내에서 제작된 시편의 경우 용접금속의 인장강도가 747 MPa, 연신률 40% 수준으로 소재의 요구물성을 만족하는 것으로 확인되었다. 용접금속 내에 조대한 결함은 확인되지 않았으며, 충격인성도 119 J 수준으로 양호한 값을 보였다. 다만 용접 전류 및 전압 조건에 따라 bead의 형상, 미세조직 및 기계적 물성의 차이를 보이는 것으로 확인되어, 제작 요건에 따른 최적화가 필요할 것으로 판단되었다.

[소형4-3 | 15:55] 초청강연

SMR용 고강도 오스테나이트 내식강의 조사취화 및 내환경 성능 평가 계획: 진형하*, 김종민, 김민철, 심희상, 김성우 (한국원자력연구원)

Keywords: 고강도 오스테나이트 내식강 (XM-19), 소형모듈형원자로(SMR), 연구로 조사시험, 조사취화, 부식특성평가

소형 모듈형 원자로(SMR)는 높은 안전성과 경제성을 갖춘 차세대 원자로로 주목받고 있으며, 이에 따라 원자로 내부 구조물 및 핵심 부품에는 고신뢰성 소재의 적용이 필수적이다. 본 발표에서는 SMR 환경에서 사용될 고강도 오스테나이트계 내식강의 방사선 조사 및 고온·고압 환경에서의 성능 평가 계획에 대해 설명하고자 한다. 오스테나이트계 내식강은 페라이트계 및 마르텐사이트계 강과 비교하여 우수한 내식성과 인성을 갖추고 있어 원자력, 화학, 해양 산업 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 특히, 높은 니켈(Ni) 및 크롬(Cr) 함량을 포함한 합금 설계를 통해 부식 저항성이 향상되어 SMR 운전 환경에서도 안정적인 성능을 발휘할 것으로 기대된다. 그러나 80년 이상의 장기 중성자 조사 환경에서는 미세조직 변화로 인해 기계적 특성 및 부식 저항성이 저하될 가능성이 있어 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 연구용 원자로를 활용하여 최대 운전 조사량(fluence) 조건에서 고강도 오스테나이트계 내식강 모재 및 용접부 시편을 조사한 후, 강도 변화, 충격 인성 저하, 상변태 거동을 분석하여 방사선 조사에 따른 성능 변화를 정량적으로 평가할 계획이다. 또한, 고온·고압 환경에서의 장기 신뢰성 평가를 위해 부식 및 균열 거동을 전기화학적 실험과 미세구조 분석을 통해 규명하고자 한다. 이를 위해 부식 특성 평가 장비를 구축하고, 조사된 시편을 체계적으로 분석할 수 있는 시험 환경을 확립할 예정이다. 2027년 상반기 연구로 조사 연구 진행을 목표로, 사전 단계에서는 개발된 모재 및 용접재에 대한 Baseline Test를 수행하여 기준 데이터베이스(DB)를 구축하고, 방사화 소재 부식 특성 평가 장비 확충 및 조사 시험 캡슐 설계를 통해 조사 시험 및 평가 역량을 강화할 계획이다. 또한, 공동 연구기관에서 진행하는 조사 모의재 평가 결과와의 연계를 통해 고강도 오스테나이트 내식강의 조사 성능 예측 기술을 고도화하고자 한다. 본 연구를 통해 조사 취화 저항성을 개선할 수 있는 최적의 합금 설계 및 열처리 방안을 제안하며, 연구용 원자로 기반의 조사시험 데이터를 바탕으로 국내에서 주도하는 혁신형 SMR용 구조재료의 신뢰성 향상을 위한 핵심 기초 자료를 제공하고자 한다.

[소형4-4 | 16:10] 초청강연

고질소 오스테나이트 스테인리스 강의 미세조직 변화에 미치는 열시효 효과: 김성준, 함준혁, 김지현* (울산과학기술원)

Keywords: 고질소 오스테나이트 스테인리스강, 열시효, 이차상

고질소 오스테나이트 스테인리스강은 우수한 강도, 연성 및 내식성으로 인해 소형모듈원자로(SMR) 구조재료로 적합한 소재로 활발히 연구되고 있다. 특히, 고온 및 부식성 환경에서의 내구성과 안전성은 SMR의 안전성과 효율성을 보장하기 위해 중요한 요소이다. 그러나, 운전 중 고온 환경에 장기간 노출되면 미세조직 변화가 발생하여 기계적 특성이 저하될 가능성이 있다. 따라서 고질소 오스테나이트 스테인리스강의 열시효 거동을 이해하고 분석하는 것은 SMR 환경에서 장기적 성능과 신뢰성을 확보하기 위해 필수적이다. SMR의 주요 작동 온도(285~300°C)에서 장기간 운전 시 Cr-rich 탄화물(M23C6) 및 질화물(Cr2N)이 입계에서 석출되어 입

계를 강화하지만, 동시에 크롬 고갈 현상으로 인해 감응(sensitization) 현상이 발생할 수 있다. 이는 고질소 오스테나이트 스테인리스강의 내구성과 부식 성능을 저하시킬 가능성이 있다. 그러나, 300ºC에서는 확산이 제한되어 석출물 형성 속도가 느리며, 이를 실험적으로 구현하기 위해 장시간 열시효가 필요하다. 이러한 문제를 해결하고 300ºC에서의 장기 미세조직 변화를 단축된 시간 내에 모사하기 위해 400ºC에서 가속 열시효를 수행하였다. 400ºC에서는 300ºC와 동일한 종류의 석출물(Cr-rich $M_{23}C_6$, Cr_2N)이 형성되지만, 생성 속도가 빨라 실험 시간을 효과적으로 단축할 수 있다. 본 연구에서는 질소 함량이 0.4 wt% 내외인 고질소 오스테나이트 스테인리스강의 열시효가 미세조직 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 시편을 400ºC에서 최대 5,000시간 동안 열처리할 예정이며, 모재 및 열화된 시편의 미세조직을 투과전자현미경(TEM) 및 전자후방산란회절(EBSD) 등을 이용하여 분석할 계획이다. 본 연구에서는 1,000시간까지의 초기 분석 결과를 포함하며, 열시효가 이차상 형성에 미치는 영향을 평가하여 SMR 구조재로서 고질소 오스테나이트 스테인리스강의 장기적 안정성을 평가하는데 필요한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

[소형4-5 | 16:25] 초청강연

SMR 용 고강도 오스테나이트 내식강의 조사 영향 평가를 위한 고해상도 나노인덴테이션 전략: 김대현, 한성희, 김병창, 김보규 (국립강릉원주대학교), 진형하 (한국원자력연구원), 신중호* (국립강릉원주대학교)

Keywords: 양성자 조사, 오스테나이트 강, 나노압입, 미세조직

소형 모듈 원자로(SMR) 응용 분야에서는 높은 방사선 저항성과 우수한 기계적 성능을 동시에 갖춘 소재가 요구되며, 방사선 조사로 인한 기계적 성능 변화는 안전과 직결된다. 양성자 조사는 고비용의 중성자 조사를 대체하여 유사한 dpa 수준의 손상을 유도할 수 있으나, 조사 깊이가 수십 마이크론 미만으로 제한된다는 특성이 있다. 이처럼 조사 깊이가 얕은 환경에서는 기존의 마이크로인덴테이션 기술만으로는 미세한 기계적 성질 변화를 정밀하게 포착하기가 어렵다. 본 발표에서는 이러한 문제를 극복하기 위해 MEMS 기반 로드셀 시스템을 활용한 고해상도 나노인덴테이션 전략을 제시한다. 고성능 나노인덴테이션 기법을 통해 경도와 탄성계수를 고밀도 준3차원 맵핑으로 측정함으로써, 조사에 따른 국부적 특성 변화를 세밀하게 파악할 수 있다. 또한 SMR용 고강도 오스테나이트 강을 사례로 들어, 방사선 조사에 따른 깊이별 미세조직 변화와 기계적 특성 간의 상관관계를 효과적으로 분석하는 방법을 소개한다. 이를 통해 차세대 SMR 응용 분야에서 요구되는 신뢰도와 내구성을 갖춘 소재 개발에 유용한 물성 데이터를 제공하고, 고방사선 환경에서의 소재 평가 및 설계 전략을 한층 발전시키는 데 기여하고자 한다.

제4회 수소경제 구현을 위한 수소 운송 및 저장 소재 심포지엄
Room 203, 4월 23일

[수소경제1-1 | 09:00] 초청강연

Hydrogen Embrittlement of High-Strength Martensitic Steel: Young-Kook Lee* (Yonsei University)

Keywords: High-strength steel, Martensite, Hydrogen embrittlement

High-strength, lightweight automotive components have garnered great attention to enhance fuel efficiency and passenger safety, especially with the growing popularity of electric vehicles. However, automotive components require high tensile strength as well as other properties, such as coating and spot weldability, to be considered simultaneously. Among these properties, hydrogen embrittlement (HE) is the most challenging issue in the development of high-strength, lightweight automotive components. In general, steel with higher tensile strength exhibits lower resistance to HE. Moreover, predicting the occurrence of HE is very difficult. Therefore, the development of high-strength steel is almost impossible without identifying the causes of HE and finding its solutions. In this presentation, why and how HE occurs in high-strength martensitic steel, as well as discuss studies on how to mitigate it.

[수소경제1-2 | 09:20] 초청강연

AB계 수소저장합금의 미세조직과 초기 수소화 거동의 관계: 황규빈 (한국과학기술연구원), 하태준 (한국생산기술연구원), 김윤석 (성균관대학교), 심재혁* (한국과학기술연구원)

Keywords: 수소저장합금, TiFe, 초기 수소화, 미세조직, 제2상

2050년 탄소중립 달성을 위해서는 현재보다 많은 재생에너지 활용과 함께 에너지 매개체로서의 수소에 대한 활용이 증대될 필요가 있다. 기벼운 기체 형태의 수소를 탄소를 기반으로하는 액체 또는 고체 화석연료 대신에 에너지 매개체로 활용하기 위해서는 수소를 효율적이며 안전하게 저장하는 기술의 개발이 필수적이다. 수소를 고체 형태, 특히 금속수소화물(수소저장합금)로 저장하는 방식은 부피에 대한 에너지 밀도가 우수하고 안전성이 높아서 차세대 수소저장 기술로 개발되고 있으며, 이미 부분적으로 시장에 진출하고 있는 상황이다. 다양한 수소저장합금 중에서 TiFe 기반의 AB계 수소저장합금의 경우 소재 가격 측면에서 가장 가격으로 시장에 공급되는 것이 예상되며, 향후 재생에너지 저장과 같은 대규모 수소저장이 이루어지는 곳에 적용될 것으로 기대된다. AB계 수소저장합금의 표면의 치밀한 산화층이 존재하여 초기 수소화에 큰 어려움이 있는 것으로 알려져 있어서, 이를 극복하기 위한 열처리, 강가공 및 합금화와 같은 다양한 시도가 이루어진 바 있다. 본 발표에서는 BCC 구조를 갖는 TiFe 기지에 제2상을 분산시켜 AB계 수소저장합금의 초기 수소화 거동을 향상 시키기 위한 연구를 소개하고자 한다.

[수소경제1-3 | 09:40] 초청강연

수소취성 관련 국내제도 도입현황 및 현장적용 사례: 김정환* (한국가스안전공사 가스안전연구원)

Keywords: 수소취성

수소취성(Hydrogen Embrittlement, HE)은 금속 내부에 수소가 침투하여 기계적 성질을 저하시켜 균열 및 파괴를 유발하는 현상으로, 수소 에너지 활용이 확대됨에 따라 이에 대한 신뢰성 확보가 필수적으로 요구된다. 이번 연구에서는 수소취성 평가 및 설계에 대한 주요 국제 코드 및 표준을 검토하고, 국내제도 도입 현황과 실제 산업 현장에서의 적용 사례를 분석하였다. 수소취성을 다루는 대표적인 국제 표준으로는 ASME, CSA, JPEC, KHKS, AD2000 및 ISO가 있으며, 이들 기준에서는 수소환경에서의 기계적 성질 평가를 위한 다양한 시험 방법을 제시하고 있다. ASME의 경우, 압력용기는 ASME Sec.VIII Div.3 KD-10을 따르며, API 579-1/ASME FFS-1을 참조하여 KIH(stress intensity factor)와 da/dN(균열 성장률)을 평가하여 한계수명을 산정한다. 배관 분야에서는 ASME B31.12에서 수소취성을 다루며, 북미에서는 CSA CHMC-1을 적용하며, ASME와 유사한 평가 기준을 적용하면서도 장비(apparatus)의 사양 및 SSRT(Slow Strain Rate Tensile Test) 시행 기준을 포함하고 있다. 일본의 JPEC TD-0003 및 KHKS-0220은 SSRT, KIH, da/dN 평가 외에도 경도를 측정하여 강도의 균일성을 검토하는 방법을 제공하며, 정해진 수명까지 사용할 수 있도록 규정한다. 독일의 AD2000 코드에서는 S2 파트에서 5000회 한정 조건으로 피로수명을 1/10로 제한하는 방식을 적용한다. 또한, ISO에서는 SSRT 방법과 disc test를 활용하여 수소취성 영향을 평가하는 다양한 시험 방법을 제시하고 있다. 국내에서는 수소취성 평가를 위한 제도 도입이 점진적으로 이루어지고 있으며, 기존의 ASME, ISO 및 일본, 독일 등의 코드 및 표준을 참고하여 국내 기준(KGS AC111)을 마련하고 있다. 산업 현장에서의 적용 사례로는 수소충전소, 고압 수소 저장용기, 수소 배관 시스템 등에 대한 안전성 평가가 있으며, SSRT 및 KIH, da/dN 기반의 수명 평가 기법이 적용되고 있다. 본 연구를 통해 국내 수소취성 관련 제도의 발전 방향을 모색하고, 국제 기준과의 정합성을 고려한 안전성 평가 및 설계 방안을 제안한다. 향후, 국내 기준의 독자적인 수립과 함께 신뢰성 높은 시험 방법 개발이 필요하며, 지속적인 연구 및 기술개발을 통해 수소경제의 안정적인 확산을 지원할 것으로 기대된다

[수소경제1-4 | 10:00] 초청강연

고압수소환경에서 소형펀치시험(SPT)을 사용한 API X80 배관강의 수소취성에 미치는 Pre-strain 및 결정방향의 영향 조사: 신형섭*, Richard Pascua (안동대학교), 김기석 (포스코)

Keywords: hydrogen embrittlement screening, small punch test (SPT), API X80 steel, pre-strain, TMCP, orientation.

신재생에너지 비율 확대에 따라 수소 및 천연가스 물질을 보다 안전하게 대량으로 운송하는 방법으로 배관망 활용에 관심이 주어

져오고 있다. 고강도강(high strength steel) 라인 파이프는 배관 벽 두께를 줄이고 작동압력을 높일 수 있어, 장거리, 대구경, 높은 작동압력의 파이프라인 구축에 활용이 기대된다. 기존의 천연가스용 API X52, X65, X70 등 배관강의 수소취성 연구가 수소 및 혼소용으로 활발히 진행되고 있다. 고강도강 API X80 및 X100강의 경우, 합금 원소와 TMCP공정을 적절히 혼합하여 강도, 인성 및 용접성 향상이 가능하도록 개발되어 오고 있다. 배관강에서 수소취성(HE)은 고강도강 라인 파이프에서 발생하는 주요 파손 모드로, 이는 강재 내부로 확산된 H원자로 인해 발생하고, 특히 미세조직은 확산성 수소의 이동 및 트랩에 크게 영향을 받는다는 것이 알려져 있다. 고강도 배관의 제조, 설치 및 운용 과정에서 배관강은 인위적 또는 부작위로 소성변형을 겪게되고, 특히 설치 중에도 1%-3%의 소성 변형율이 발생할 수 있다. 이러한 소성 변형은 전위밀도를 증가시켜 강도 변화뿐만 아니라 전위-수소 상호 작용에 영향을 미치게 된다. 그러나 API X80의 경우, 사전 변형률(pre-strain))과 HE 감수성의 관계 및 TMCP에 따른 조직방향에 따른 수소취성에 미치는 영향이 충분하게 조사되지 않았다. 따라서 HE 민감도에 미치는 소성변형율의 영향을 파악하는 것이 필요하다. 본 연구는 API X80강 후판에 대해 조관시 발생한 pre-strain과 TMCP처리재의 방향에 따른 금속조직 형상이 수소취화 거동에 미치는 영향을 고압수소환경에서 소형펀치시험(SPT)을 통해 평가하였다. Acknowledgment: This work was supported by the KETEP grants funded by the Korean Government (MOTIE) (Grant No.: RS-2024-00449309 and RS-2022-KP002825) and the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant No.: RS-2023-00245737). The authors thank POSCO Co. for supplying Samples.

[수소경제2-1 | 10:30] 조청강연

산업 현장에서 본 수소저장합금: 개발과 실증을 통한 적용 가능성: 이승준* (원일티엔아이)

Keywords: 수소저장합금, 금속수소화물

수소저장합금(Metal Hydride)은 높은 수소 저장 밀도와 안정성을 갖추고 있어 차세대 에너지 저장 소재로 주목받고 있다. 본 발표에서는 산업 현장에서의 수소저장합금 적용 가능성을 중심으로, 실제 개발 및 실증 사례를 소개하고자 한다. 다양한 합금 조성과 공정 최적화를 통해 성능을 개선한 연구 결과를 공유하며, 이를 기반으로 한 실증 프로젝트의 성과와 도전 과제를 논의한다.

[수소경제2-2 | 10:50] 조청강연

산업 현장에서 본 수소저장합금: 개발과 실증을 통한 적용 가능성: 주석환 (포항공과대학교), 이세웅 (포스코 기술연구원), 서동우* (포항공과대학교)

Keywords: 초고강도강, 수소, Nb

자동차용 초고강도강은 연비(또는 전비), 승객 안전확보를 위해 사용량이 점차 증가하는 추세이다. 초고강도강의 적용범위를 확대하기 위해서는 기계적 특성과 다양한 응용 물성의 확보가 선행되어야 하는데, 대표적인 난제 중의 하나가 수소취성이다. 수소취성 발생 원인에 대해서는 여러 가지 이론이 제안되어 있으나 수소 취성 발생을 예측하기는 여전히 어려워 초고강도강의 적용 범위를 확대하는데 있어서 큰 걸림돌이 되고 있다. 수소취성의 위험을 저감하는 방안으로는 강재 내의 확산성 수소량을 최소화하는 것이 가장 효과적인 것으로 알려져 있으며 이를 위해서 강재 제조 공정에 있어 수소 유입의 억제, 사용 중 강재 내로 흡장된 수소를 비확산성 수소로 제어하여 무해화하는 방법 등이 연구되고 있다. 특히 강재 내 흡장된 수소의 확산거동을 제어하기 위해서 수소와 강하게 상호작용(trapping)할 수 있는 여러 가지 탄화물과 금속간 화합물을 활용하여 수소의 mobility를 낮추는 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 강재의 미세조직 제어에 주로 활용되는 미세합금원소(microalloying elements)의 하나인 Nb 첨가가 초고강도강의 수소취성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 다양한 Nb 함량에 따른 강재 내 수소흡장, 확산, trapping 거동을 정량적으로 분석하여 Nb 활용에 의한 초고강도강의 수소취성 저감방안에 대해 논의하고자 한다.

[수소경제2-3 | 11:10] 조청강연

산업 현장에서 본 수소저장합금: 개발과 실증을 통한 적용 가능성: WooChul Jung* (Seoul National University (SNU))

Keywords: solid oxide fuel cells, solid oxide electrolysis cells, supported catalysts, ex-solution process

Solid oxide fuel cells (SOFCs) and solid oxide electrolysis cells (SOECs) are among the most efficient devices for utilizing and producing green hydrogen, offering significant technological and industrial value. These devices consist of ceramic-based electrolytes and two ceramic electrodes. Operating at temperatures above 600°C, they can efficiently generate power in fuel cell mode using hydrogen as fuel without the need for precious metal catalysts. In electrolyzer mode, they can produce green hydrogen by utilizing renewable energy. This presentation will discuss a real-time nanocatalyst fabrication technique, called ex-solution, which can activate the electrode reactions in both SOFCs and SOECs. Ex-solution is a phenomenon in which uniformly distributed metal nano-catalysts selectively and spontaneously grow on oxide supports upon partial reduction. This structural engineering advancement has resulted in significant improvements in catalysis, with numerous studies highlighting the benefits of the ex-solution process. In this presentation, I will introduce this process and present the latest research findings related to its application.

[수소경제2-4 | 11:30] 조청강연

Integrated Computational Framework for Simulating Microstructure-Deformation-Hydrogen Transport in Metals: Myoung-Gyu Lee* (Seoul National University), Jinheung Park (Seoul National University, The Ohio State University), and Geonjin Shin (Seoul National University)

Keywords: Hydrogen embrittlement, Finite element modeling, Crystal plasticity, Multi-physics simulation

Hydrogen embrittlement (HE) significantly affects the reliability of metallic materials by promoting microcrack initiation and fracture through hydrogen diffusion and microstructural interactions. Predicting HE requires integrated experimental and numerical approaches across various scales. This study presents a multi-scale finite element model to predict HE in TRIP-assisted steel, which is particularly susceptible due to γ-to-α' phase transformation. At the microscale, the model captures hydrogen diffusion, anomalous hydrogen release, and interactions with deformation and phase transformation, incorporating hydrogen-enhanced localized plasticity (HELP) and hydrogen-enhanced phase transformation (HEPT). At the macroscale, a thermodynamically-consistent finite element framework simulates hydrogen-induced fracture under ductile and brittle regimes, integrating HELP and hydrogen-enhanced decohesion (HEDE). Implemented as a user-defined element in ABAQUS, this model couples mechanical deformation, damage mechanics, and hydrogen diffusion in a unified formulation to identify HE-prone regions. This dual-scale approach provides a comprehensive framework for understanding HE and improving structural reliability in hydrogen-rich environments. The proposed numerical approach will aid in designing next-generation materials and developing strategies to mitigate HE in demanding applications.

수소재료 I
Room 203, 4월 23일

[수소1-1 | 14:00]
액화수소 저장탱크용 316L 스테인리스강의 초극저온 기계적 물성 및 수소취성에 관한 연구: 김범철*, 이창민, 이재희 (HD한국조선해양)
Keywords: 액화수소, 스테인리스강, 용접절차시방서, 수소취성, 극저온인성

국제해사기구(IMO)는 2050년까지 온실가스 순배출량 제로(net-zero)를 목표로 설정하였으며, 온실가스 배출량이 낮은 액화수소는 이러한 목표를 달성하기 위하여 가장 유망한 대체연료로 평가된다. 이에 따라 액화수소 대량 수송을 위한 운반선 개발이 빠르게 진행되고 있다. 그러나 수소는 금속재료를 투과 및 확산하는 속도가 매우 빠르며, 금속 내부의 미세 결함과 상호작용하여 취성을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 액화수소는 영하 253ºC의 초극저온에서 저장되므로, 이를 운반하는 압력용기는 수소취성 및 초극저온 환경에서의 기계적 안정성이 반드시 확보되어야 한다. 이에 본 연구에서는 상용 소재 중 액화수소 저장탱크에 가장 적합한 것으로 평가받고 있는 316L 스테인리스강을 대상으로, 강재 및 용접부의 액화수소 환경에 대한 적합성을 종합적으로 검증하였다. 우선 액화헬륨 분사를 통한 직접 냉각 방식과 액화헬륨 냉매를 이용한 냉동기 간접 냉각 방식을 통해 영하 253ºC 초극저온 충격 인성을 평가하여 냉각 방식에 따른 차이를 비교 분석하였다. 또한, Slow Strain Rate Test (SSRT)를 통해 수소취성을 평가하였다. 본 연구 결과를 기반으로 316L 스테인리스강의 용접절차시방서(WPS, Welding Procedure Specification) 선급 승인을 완료하였다.

[수소1-2 | 14:15]
수소 장입 및 극저온 조건이 304L 스테인리스강의 변형 조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 박한지*, 배경오, 박재영, 백운봉* (한국표준과학연구원)
Keywords: 스테인리스강, 극저온, EBSD, 수소취성

수소 경제 구현을 위해 수소의 대량 운송 및 저장이 필수적이며, 이를 위해 극저온 상태에서 기체 수소를 압축하거나 액화하는 방식이 유망한 해결책으로 주목받고 있다. 이러한 배경에서 높은 수소취성 저항성과 우수한 저온 특성을 갖는 304L 및 316L 스테인리스강 등의 오스테나이트계 스테인리스강이 주요 소재로 사용되고 있으며, 성능을 향상시키기 위한 고급 강종 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나 이러한 소재가 극저온 환경에서 변형 메커니즘 및 파단 거동에 미치는 수소의 영향에 대한 이해는 여전히 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 300ºC에서 수소를 가스 장입한 304L 스테인리스강을 대상으로 상온에서 20K까지의 온도 범위에서 저변형률 인장시험을 수행하여 기계적 성질 변화를 분석하였다. 또한, 전자 후방산란 회절(EBSD)을 이용해 온도 및 수소가 변형 조직 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

[수소1-3 | 14:30]
Assessment of Hydrogen Embrittlement Susceptibility of STS304L Stainless Steel in External Hydrogen Environment over a Temperature Range from Cryogenic to Elevated Using Simple Testing Techniques: Richard Pasua, Seong-Bum Kang, Hyung-Seop Shin*, and Sang Heon Lee (Andong National University)
Keywords: Hydrogen Embrittlement, in-situ Small Punch Test, hollow specimen SSRT, Austenitic stainless steels, Cryogenic and Elevated temperatures, Ferritic content.

Nowadays, austenitic stainless steels are widely used in hydrogen applications due to their excellent corrosion resistance, mechanical stability, and weldability, making them ideal for hydrogen storage, transport pipelines, pressure vessels, fuel cells, and turbines requiring resistance to both cryogenic and high-temperature under high-pressure hydrogen environments. However, at room and low temperatures, especially -40 to 60ºC, plastic deformation can induce martensitic transformation, potentially acting as a hydrogen diffusion channel along stress concentrations, which can cause hydrogen embrittlement (HE) and lead to a sudden failure. Thus, to ensure reliable performance across a wide temperature range, it is crucial to understand the temperature-dependent HE behavior of austenitic stainless steels at different strain rates, particularly at high temperatures where prolonged exposure may lead to creep deformation and sensitization-related degradation. This study meticulously employs two simplified test methods to evaluate the HE behaviors in STS304L at cryogenic and elevated temperatures in a high-pressure hydrogen (H_2) environment: the small punch testing (SPT) using the Relative Reduction of Thickness (RRT) as the HE index and the hollow specimen slow strain rate testing (SSRT) using the Relative Reduction of Area (RRA), respectively. Two different H_2 pressure conditions were applied based on temperature: 10 MPa from -196ºC to room temperature (RT) and 3 MPa from RT to 200ºC. The ferrite content was measured using a FERITSCOPE (FMP30) to check the extent of martensite transformation induced during each test. The results indicated a severe HE from RT to -100ºC at all punch velocities, attributed to martensitic transformation induced during testing, confirmed by a high ferrite content in the low-temperature ranges. On the other hand, a ductile-to-brittle transition behavior was observed between -120ºC and -150ºC, where punch velocity dependence became evident under hydrogen exposure. Intergranular fracture occurred at lower punch velocities, while dimple fracture was observed at higher punch velocities. However, no HE was observed at temperatures below -150ºC, despite ferrite content being comparable to the case at RT. Furthermore, low ferritic content was observed at both temperatures of 100ºC and 200ºC, indicating that any phase transformation to α'martensitic did not

occur, which did not produce hydrogen embrittlement, even under prolonged deformation. This suggests that STS304L steel maintains strong resistance to HE at these elevated temperatures. Therefore, this study confirms that STS304L steel exhibits robust HE resistance at both cryogenic temperatures below -130ºC and elevated temperatures up to 200ºC, making it a viable material for hydrogen applications. Acknowledgment: This work was supported by the KETEP grants funded by the Korean Government (MOTIE) (Grant No.: RS-2024-00449309 and RS-2022-KP002825). The authors thank POSCO Co. for supplying samples.

[수소1-4 | 14:45]

Assessment of Hydrogen Embrittlement in TIG Welded 304L Stainless Steel: Worakan Tongprapai, You Sub Kim, Jae Young Jung, Dong Hyun Lee (Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University), Ho Byung Chae, Wanchuk Woo (Neutron Science Division, Korea Atomic Energy Research Institute), and Soo Yeol Lee* (Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University)

Keywords: Stainless steel, Tungsten inert gas (TIG), Hydrogen embrittlement, Neutron diffraction

This study aims to obtain a hydrogen distribution map and predict the susceptibility to hydrogen embrittlement at various locations in a TIG-welded SS304L plate by correlating residual stress data from neutron diffraction with tensile test data from slow strain rate test (SSRT). SSRT tests were conducted under applied stress levels of 0%, 40%, and 80% of yield strength at different regions from the welding line. Z-score normalization was applied to standardize strain magnitudes for a consistent comparison across different weld regions. The results reveal that hydrogen diffusion in the BM leads to increased dislocation density without significantly affecting diffusivity, while the presence of hydrogen-induced α'-martensite increases strength but reduces ductility. In the HAZ, strain localization at grain boundaries enhances dislocation density, contributing to strength improvement and dynamic recrystallization. In contrast, the WZ exhibits higher hydrogen concentration due to δ-ferrite impeding dislocation mobility, while low binding energy in solidification substructures promotes hydrogen desorption. These findings offer valuable insights into hydrogen embrittlement in welded SS304L plates.

[수소1-5 | 15:00]

오스테나이트계 스테인리스강과 고망간강의 수소취성 비교: 신승혁, 황병철* (서울과학기술대학교)

Keywords: hydrogen embrittlement, austenitic stainless steels, high-manganese steels, electrochemical hydrogen charging, notch tensile behavior

오스테나이트계 스테인리스강과 고망간강은 오스테나이트 단상 미세조직을 가지며, 낮은 수소 확산 계수와 높은 수소 용해도로 인해 기존의 구조용 강재보다 우수한 수소취성 저항성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나 이들 강재에서도 수소취성이 발생할 수 있으며, 특히 마르텐사이트 변태, 변형 쌍정과 같은 미세조직적 변화는 두 강재의 수소취성 거동을 결정하는 주요 인자로 보고되고 있다. 변형에 따른 미세조직적 변화와 수소 간의 상관관계를 규명하기 위한 다양한 연구가 수행되었으나, 수소와의 복합적인 상호작용으로 인해 이러한 인자들이 두 강재의 수소취성 차이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 오스테나이트계 스테인리스강과 고망간강의 수소취성 저항성을 비교하고 변형 미세조직과 수소 간의 상호작용을 규명함으로써 두 강재의 수소취성 거동 차이를 체계적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 노치 시편을 활용하여 전기화학적 수소 주입과 동시에 저속변형률시험을 수행하였으며, 수소 주입 조건에 따른 두 강재의 노치 인장 거동과 파괴 양상을 비교하였다.

[수소1-6 | 15:15]

고압수소 장기 노출에 따른 API X70, X80급 소재의 샤르피 충격 인성 변화: 김성환*, 정성수, 김병준, 이강호 (한국생산기술연구원)

Keywords: 고압수소, API, 수소취성, Charpy 충격시험, Splitting

강재에 수소가 흡수되면 인성과 같은 기계적 특성이 저하되고 균열이 쉽게 발생하는 수소 취화 현상이 널리 알려져 있다. 특히, 100기압 이상의 고압 수소 가스를 운송하는 파이프라인의 경우 수소 취성은 극복해야 할 매우 중요한 과제이다. 수소 분위기에서 사용되는 금속 소재의 사용 적합성을 평가할 때에는 SSRT시험과 같이 느린 변형율 시험을 통해 정량 평가하는 것이 일반적이나, Charpy V-노치 시험은 파이프라인의 충격 인성을 정량화할 수 있는 빠르고 저렴하다는 장점에도 불구하고 굉장히 빠른 변형율 시험이라는 한계점으로 수소 취성 평가에 대한 유효성은 불확실하다. 본 연구에서는 고압 수소에 장기 반복 노출된 API 5L X70, X80 파이프라인 소재의 충격 인성에 미치는 영향을 조사하였다. 수소에 노출되지 않은 상태와 고온·고압의 수소에 30일 이상 노출시켜 30 wtppm 이상의 수소를 시편 내에 균일하게 사전 충전시킨 후, -80ºC에서 +20ºC 온도 범위에서 Charpy V-노치 충격 테스트를 수행하였다. 실험에 사용된 API X70, X80급 소재에서 수소 장입에 따라 연성-취성 천이 온도(DBTT)의 하락이 관찰되었으며, 특히 X80의 경우 수소 장입에 따라 Charpy upper shelf energy의 하락폭이 가장 크게 관찰되었다. Charpy V-노치 충격 시험 후 파단면에 대한 분석을 통해 BCC격자에 수소가 존재하면 파단 중 분리(Splitting, Separation) 형성을 도와 흡수 에너지를 낮추는 것으로 판단된다. 이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 RS-2024-00444679)

[수소1-7 | 15:30]

수소 혼소 가스용 배관의 수소취성 및 피로 수명 안전성 평가: 김동오, 이진영 (서울과학기술대학교), 이창희, 강성, 이정훈 (포항산업과학연구원), 권용남, 석무영 (한국재료연구원), 이창우 (포항금속소재산업진흥원), 김정환, 이화영 (한국가스안전공사), 변재원* (서울과학기술대학교)

Keywords: API 5L x42, In-situ SSRT, 수소취성, 수소피로

수소 경제가 도입되면서 수소의 생산, 활용, 저장, 운송에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 운송 분야에서는 기존 가스 배관을 모두 수소용 배관 소재로 교체하는 데 많은 비용이 필요하기 때문에, 기존 가스 배관을 활용하면서 천연가스에 일정량의 수소를 혼합해 운송하는 방법이 제안되고 있다. 그러나 수소는 재료와 접촉할 때 기계적 특성을 저하시키며 수소취성을 유발한다. 따라서 장시간 수소환경 및 주기적인 스트레스에 노출되는 환경에서 배관소재를 사용하기 위해서는 그 안전성을 평가하기 위해서 수소환경에서의 기계적 평가 및 피로 수명 평가가 필수적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서는 수소 혼소 이송 환경을 모사하여 배관용 소재의 기계적 물성 및 피로 수명을 평가하였다. 전기화학적 수소장입 챔버를 장착하여 전기화학적 수소 주입과 동시에 저속변형률 시험(Slow strain rate tensile test) 및 기계적 피로 시험을 수행하였다. 수소 주입에 따른 기계적 물성 및 피로수명의 저하를 조사하였으며, 파괴 파면을 통해 수소에 의한 파괴 메커니즘을 고찰하였다.

[수소2-1 | 15:55]

수소저장합금의 수소 흡방출 거동 수식화 및 분석: 강규병, 백민아, 석경찬, 홍성찬 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 하태준, 나태욱* (한국생산기술연구원)

Keywords: 수소, 수소저장합금, 수소흡방출, 비철금속, 모델링

수소저장합금은 수소와 반응하여 수소화물을 형성시킴으로써 수소를 저장하는 합금으로 소재기준으로 액화수소보다 높은 수소 부피저장밀도를 갖는다. 특히, AB_2계 수소저장합금은 수소를 침입형 자리에 침입하여 수소화물을 만들기 때문에 상변화 속도가 빨라 상온에서 단순 압력 변화만을 통해 흡수하고 방출할 수 있어 높은 효율을 요구하는 정치형 수소 저장시스템 등에 활용되고 있다. 수소 저장 시스템에 수소저장합금을 활용하기 위해서는 수소를 흡방출하는 압력과 온도에 따라 최적화된 수소저장합금을 개발하여야 하며 이를 위해서는 합금 원소에 따른 성능 예측이 요구된다. 수소저장합금의 수소 흡방출 거동은 합금 원소에 의해 결정되며 이런 수소 흡방출 거동은 Pressure-Concentration-Temperature 그래프(PCT 그래프)를 통해 나타난다. 한 수소저장합금의 성능은 수소가 주로 흡방출되는 구간인 평탄압 구간의 압력값 뿐만 아니라 평탄압 구간의 길이 등 PCT 그래프의 계형 전체가 영향을 미치기 때문에 이에 대한 수식화가 필요하다. 본 논문에서는 Regular solution 모델을 기반으로 한 수소 흡방출 모델을 작성하고 이를 기반으로 PCT 그래프의 수식화를 진행하였으며 수소 흡방출 거동의 다양한 현상을 해석해보았다.

[수소2-2 | 16:10]

V 기반 BCC계 수소저장합금에 첨가되는 원소가 수소 흡방출 거동에 미치는 영향: 석경찬, 홍성찬, 강규병, 백민아 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 최병철 (한국생산기술연구원, 강릉원주대학교), 이준호* (고려대학교), 나태욱* (한국생산기술연구원)

Keywords: 바나듐, 수소저장합금, 키네틱, 수소압축기

수소 에너지의 효율적인 저장과 운송은 차세대 에너지 시스템에서 핵심적인 과제이며, 특히 수소 모빌리티 확산에 따라 수소충전소 및 고압 수소압축기의 기술 개발이 요구되고 있다. 기존의 기계식 압축기는 높은 비용, 소음, 진동, 열 발생 및 윤활유 사용으로 인한 수소 순도 저하 등의 문제로 인해 한계를 가진다. 이에 따라 설치 및 유지 비용이 낮고, 에너지 손실을 최소화할 수 있는 비기계식 수소압축기를 개발할 필요가 있다. V기반 BCC계 수소저장합금은 다른 수소저장합금에 비해 더 높은 수소저장용량(~4 wt%)를 가지고 있으며, 높은 엔트로피 변화를 통해 상대적으로 낮은 온도 차에서도 높은 압축비를 확보할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 비 기계식 수소압축기용 수소저장합금으로 바나듐계 수소저장합금의 적용 가능성을 검토하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 V 기반 BCC계 수소저장합금에 다양한 합금원소의 정량에 따른 수소흡방출 거동을 분석하였다

[수소2-3 | 16:25]

Ferro 소재 기반 AB2계 수소저장합금 제조에 따른 수소 흡·방출 거동에 대한 불순물의 영향: 백민아, 강규병, 석경찬, 홍성찬 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 배주호 (한국생산기술연구원), 김동회* (고려대학교), 나태욱* (한국생산기술연구원)

Keywords: 수소저장합금, Ferro 소재, 불순물, PCT

수소저장합금은 특정 온도와 압력에서 수소를 흡수하거나 방출하는 금속으로 다른 수소 저장 기술과 비교했을 때 부피 저장 밀도가 높고 저장 중에 발생하는 에너지 손실이 적어 장기 저장이 가능한 미래의 수소 저장 방식으로 주목받고 있다. 수소저장합금에서 수소가 흡수되는 방식은 수소 기체가 합금 표면에서 해리되어 침입형 자리에 수소화물을 형성하며 수소가 저장되고, 반대로 수소 방출 시에는 수소화물이 수소 기체를 분해하여 다시 수소저장합금으로 돌아가며 수소가 방출된다. 이러한 수소저장합금의 흡·방출 거동은 PCT (Pressure-composition-temperature) 장비를 이용한 PCT 곡선으로 측정하여 분석이 가능하다. PCT 곡선에서 나타나는 plateau 구간은 수소의 압력 변화가 거의 없이 평탄하게 수소의 함량이 늘어나며 수소가 저장되는 구간으로 이때의 수소 압력을 평탄압 구간이라고 한다. 이 평탄압의 길이와 압력에 따라 수소의 흡·방출 거동을 확인 할 수 있다. AB2계 수소저장합금에 활용되는 원소재는 크게 Ti, Zr, Mn, Cr, Fe, V 등이 사용된다. 이 중 Zr, Cr, V 과 같은 원소재의 경우 상대적으로 높은 가격을 형성하고 있으므로 AB2계 수소저장합금의 실제 산업적 활용을 위해서는 불순물이 포함된 Ferro 소재를 사용한 소재 비용 절감이 필수적이다. 이를 위해 Ferro 소재를 활용하는 방안이 고려되지만 Ferro 소재에는 Fe 외에 다른 불순물들이 포함되어 있어 수소저장합금의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 불순물에 따른 AB2계 수소저장합금의 수소 흡·방출 거동 변화를 확인하였다. 기본 조성을 설정하여 불순물의 함량을 조정하여 AB2계 수소저장합금의 수소 흡·방출 거동 변화를 PCT 곡선을 통해 분석하였다. PCT 곡선을 활용하여 분술물이 AB2계 수소저장합금의 성능에 미치는 영향을 평가함으로써 수소저장합금 제조 시 불순물의 영향을 고려한 최적화 방안을 모색하기 위한 연구를 진행하였다.

[수소2-4 | 16:40]

입자 크기 조절을 통한 TiZrCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 수소저장 속도 및 용량 거동 분석: 하효정 (포항공과대학교), 정소진 (한국생산기술연구원), 정상국, 김래언 (포항공과대학교), 박형기 (한국생산기술연구원), 김형섭* (포항공과대학교)

Keywords: Hydrogen storage alloy, High-entropy alloy, C14 Laves phase, Metal hydrides, PCT curves

수소 저장 특성을 연구하는 데 있어 hand-crushing으로 분쇄한 분말이 일반적으로 사용된다. 그러나 이러한 분말의 입자 크기 분포는 명확하게 정의되지 않아, 입자 크기가 수소 저장 성능에 미치는 영향을 정확히 평가하는 데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 TiZrCrFeMnNi 고엔트로피 합금(HEA) 분말의 수소 저장 특성 최적화를 위해 입자 크기 변화가 미세구조에 미치는 영향과 수소 저장 성능을 분석하였다. 이를 위해 분말을 분쇄 및 체질하여 두 개의 명확히 구분된 입자 크기 그룹으로 나눈 후, 각각의 수소 저장 성능을 평가하였다. 분석 결과, 분말은 주로 C14 Laves 상으로 구성되어 있으며, 소량의 B2 상이 존재하는 것으로 확인되었다. 작은 입자 크기의 분말은 높은 압축력으로 인해 결함이 증가하여 격자 변형이 커졌으며, 이로 인해 수소 저장 용량이 감소하였다. 반면, 큰 입자 크기의 분말은 초기 및 활성화된 수소화 반응 속도가 빠르고, 최대 수소 저장 용량이 더 높은 특성을 보였다. 본 연구는 입자 크기 및 미세조직이 수소 저장 성능에 미치는 영향을 규명하는 데 중요한 통찰을 제공한다.

[수소2-5 | 16:55]

전위원소로 치환된 $TiFe_{0.7}Mn_{0.2}X_{0.1}$ (X = V, Cr, Co, Ni, Cu) 수소저장합금의 수소저장특성: 곽륜호, 정소진, 박성민, 박태윤 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 손석수* (고려대학교), 박형기* (한국생산기술연구원)

Keywords: 수소저장합금, Ti-Fe합금, 전위원소, PCT, Van't Hoff

수소는 기존의 배터리 기반 에너지 저장 시스템과 달리 반영구적으로 저장할 수 있으며, 높은 에너지 밀도를 지녀 차세대 에너지 저장 매체로 주목 받고 있다. 수소 저장 방식은 크게 물리적 저장 방식과 재료 기반 저장 방식으로 나뉜다. 그 중 대표적인 재료 기반 저장 방식인 수소저장합금은 금속이 수소와 결합하여 수소화물을 형성하고, 온도 또는 압력을 조절하여 수소를 흡수 및 방출하는 가역적 반응을 이용해 저장하는 방식이다. 수소저장합금은 화학 조성비에 따라 AB(TiFe), AB_2 ($MgZn_2$), AB_5($LaNi_5$) 계열로 분류되며, 이 중 AB 계열 합금은 저렴한 원소재 비용, 적절한 저장 용량, 우수한 내구성 등의 장점으로 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 AB 계열 수소저장합금인 TiFe에 Mn을 치환하여, 상온에서도 활성화가 가능한 C14 Laves 상을 형성함과 동시에 전위 원소 (V, Cr, Co, Ni, Cu) 를 치환하여 미세조직과 수소 저장 특성의 변화를 분석하였다. $TiFe_{0.7}Mn_{0.2}X_{0.1}$ (X = V, Cr, Co, Ni, Cu) 조성을 갖는 합금은 진공 아크 용해를 이용하여 제조되었고, 제조된 합금을 Scanning Electron Microscope (SEM) 및 X-ray diffraction (XRD) 분석을 통해 미세조직과 상분율을 비교하였다. 또한 치환 원소 별 합금에 대한 수소 저장 특성을 비교하기 위해서 Pressure-Composition-Temperature (PCT) curve를 분석하고, Van't Hoff 방정식을 이용하여 열역학적 분석을 수행하여 이를 토대로 최적의 합금 조성을 도출하였다.

[수소2-6 | 17:10]

TEM Investigation of Hydrogenation Mechanism in Ceria added TiFe Hydrogen Storage Alloy: 최진형 (한국과학기술연구원 (KIST)), 이수민 (성균관대학교), 황규빈 (한국과학기술연구원 (KIST)), 유진영, 선창효 (성균관대학교), 하태준 (한국과학기술연구원 (KIST), 생산기술연구원 (KITECH)), 김준형, 이영수 (한국과학기술연구원 (KIST)), 심재혁* (한국과학기술연구원 (KIST), 성균관대학교, KIST-SKKU Carbon-Neutral Research Center), 김윤석* (성균관대학교), 장혜정* (한국과학기술연구원 (KIST))

Keywords: Hydrogen Storage Alloy, Ceria, in-situ topography, TEM, Phase transition

AB형 수소저장합금인 TiFe 합금은 낮은 비용과 높은 수소 저장 용량으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 나아가 금속-수소 계면에서의 수소 흡착 및 확산을 촉진하기 위해, 높은 수소 친화성을 가진 세륨(Ce)과 같은 희토류 원소(REEs)를 첨가하는 것이 AB형 수소저장합금의 초기 수소화 성능을 향상시키는 유망한 전략으로 주목받고 있다. 이러한 접근이 수소저장 성능 향상에 긍정적으로 기여함을 여러 연구에서 보고되었음에도 불구하고 합금의 초기 수소 흡착 과정에서 희토류 원소가 수행하는 구체적인 역할은 여전히 명확하지 않다. 이는 대부분의 기존 연구가 간접적인 증거를 바탕으로 가능한 메커니즘을 제시하는 데 그쳤기 때문이다. 본 연구에서는 TiFe 수소저장합금에 첨가된 Ceria (CeO_2)의 수소화에 의해 유도된 미세구조 변화를 SEM, SPM, TEM 으로 분석하여 초기 수소화 메커니즘을 제안한다. 해당 합금은 30°C, 30 bar의 수소 기체 압력에서 충전되었으며, SEM-FIB (Helios G4. FEI)를 활용한 표면 및 단면 분석과 SPM (NX-10, Park System)의 in-situ topography 결과를 통해 수소화 과정에서 Ceria 를 중심으로 주변 합금 매트릭스의 팽창과 균열이 단계적으로 형성됨을 확인하였다. 해당 원인을 확인하기 위해 TEM (Titan 80-300, FEI)을 활용한 미세구조 정밀 분석을 진행하였다. SEM-FIB로 준비된 TEM 라멜라는 Vacuum Transfer TEM holder (648 Double-tilt holder, Gatan)을 활용하여 대기노출이 제한된 상태로 TEM에 전달되어 조사되었다. TEM 분석 결과 기존 HCP 구조의 Ceria가 수소화에 의해 FCC 구조의 Cerium Hydride로 상전이됨을 확인하였다. 결정구조 변화에 따라 격자 부피가 약 26.7% 팽창하게 되고, 그로 인해 Cerium hydride 근처 기지 영역에 변형 응력 발생시킴으로서 표면 크랙을 유도할 수 있음을 확인하였다. TEM 분석을 통해 SEM 및 in-situ topography에서 관찰된 Ceria 및 합금 매트릭스의 구조적 진화를 설명할 수 있었으며 본 연구의 결과는 수소저장합금에 첨가된 Ceria에서 발생하는 초기 수소화 과정에 대한 포괄적인 이해를 제공할 수 있었다.

[수소2-7 | 17:25]

V-Ni-Al-Cu 수소 분리막 합금의 냉간 가공성 및 수소 취성 저항성 향상: 한정훈, 송상윤, 이건직, 김영목, 남승진, 이창기 (고려대학교), 백주현, 서진유 (한국과학기술연구원), 손석수* (고려대학교)

Keywords: V-Ni-Al-Cu, 수소분리막, 냉간가공성, 수소투과, 수소취성

Palladium (Pd) 기반 합금은 수소 선택성과 가공성을 동시에 만족시키는 수소 분리막 소재로 사용되고 있지만, 매우 높은 비용의 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 높은 수소 투과성을 가진 Vanadium (V)을 이용해 유사한 수소 투과 특성을 보이면서도 상대적으로 경제적인 합금 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 V는 높은 수소 고용량으로 인해 수소 취성이 쉽게 발생하며, 이를 해결하기 위해 합금 원소를 첨가하면 냉간 가공성이 저하되는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 냉간 가공성을 향상하기 위해 BCC V와 혼합되지 않는 FCC Cu를 첨가하였으며, 또한 Ni, Al을 첨가하여 수소 취성 저항성이 우수한 합금을 개발하였다. Ni과 Al의 합금 비율에 따라 냉간 가공 중 균열 거동이 달라지는 것이 확인되었다. 특히, Al 함량이 많은 합금에서는 V와 Cu 각각의 경도 차이가 감소함을 확인하였고, Al이 V보다 Cu에 더 고용되면서 V-Cu dual phase의 기계적 안정성이 향상되고 냉간 가공성을 개선되었다. 수소 투과도 측정 결과, 673 K에서 2.0×10^{-8} mol mol $H_2 \cdot m^{-1} \cdot Pa^{-1/2} \cdot s^{-1}$ 수소 투과도를 달성하였으며, 온도가 감소하는 동안 지속적인 수소 투과 시험을 통해 파단이 발생하지 않음을 확인하였다. 따라서 본 연구는 Pd-based alloy과 유사한 성능을 가지면서 우수한 수소 취성 저항성을 가진 분리막 합금의 개발을 시사한다.

[수소2-8 | 17:40]

바나듐계 수소분리막의 투과 안정성 향상을 위한 합금 설계 및 평가: 백주현 (한국과학기술연구원, 고려대학교), 이상민, 한승주 (한국과학기술연구원, 서울대학교), 한정훈 (고려대학교), 강민우 (현대자동차), 김진우, 심재혁, 서진유* (한국과학기술연구원), 손석수 (고려대학교)

Keywords: Hydrogen separation membrane, Metallic hydrogen membrane, Hydrogen embrittlement

금속계 수소분리막은 수소 경제 구현을 위한 핵심 후보 기술로, 혼합 가스로부터 고순도 수소를 효율적으로 분리·정제할 수 있다. 특히 바나듐계 수소분리막은 높은 수소 용해도와 확산 계수 물성으로, 우수한 수소 투과도와 선택도를 동시에 만족시킬 수 있는 소재로 각광받고있다. 그러나 바나듐의 높은 수소 용해도에서 기인하는 심각한 격자팽창과 수소화물 형성으로 인해 투과 안정성이 저하되는 문제가 산업적 적용을 저해하는 중요한 요인이다. 이에 따라 바나듐의 투과 안정성을 높이는 합금 설계가 활발히 연구되고 있으나, 합금화는 투과 안정성을 향상시키는 동시에 투과도를 감소시킨다. 따라서 높은 수소 확산계수를 유지하면서 용해도를 감소시켜 격자팽창과 수소화물 형성을 최소화하는 방향으로 설계되어야 한다. 본 연구에서는 선행연구에서 제시된 3가지 합금원소(Cr, Al, Ni) 에 대해 time-lag 기법을 활용하여 투과도, 용해도, 확산계수를 평가하고 PCT, TDS 등으로 확산 수소와 비확산 수소에 대해 분석하였다. 연속운전시험을 통해 투과 안정성에 대해 평가하고 DSC, TG 등을 활용해 격자팽창 및 수소화물 형성/분해 거동을 분석하였으며, 그 결과 3가지 합금원소가 투과 안정성에 미치는 영향에 대해 심도 있게 분석하였다. 본 연구는 바나듐계 수소분리막의 투과 안정성 문제를 극복하기 위한 소재 설계 방향을 제시함으로써 향후 수소 분리·정제로서의 경제성을 확보하는 데 기여할 것으로 기대된다.

열전
Room 삼다A, 4월 23일

[열전1-1 | 09:00]
Enhancing the Thermoelectric Performance of CuMnSb Alloys through Controlled Alloying with Magnetic MnSb and Cu: Park Jong Min, Jo Seungki, Jung Soo-ho, Bae Jinhee, Vu Ba Linh, Kwon Su A, Yu Jihun, and Kim Kyung Tae* (Korea Institute of Materials Science)
Keywords: Thermoelectric, Transition metal, CuMnSb, Alloying

MnSb-based alloys have garnered attention for their high-temperature magnetic properties. When alloyed with transition metals such as Cu, these alloys can form half-Heusler-like structures, which are predicted to exhibit promising thermoelectric properties at elevated temperatures. In particular, Cu-based alloys can enhance electrical conductivity while reducing lattice thermal conductivity through strong phonon scattering. Despite the potential of CuMnSb alloys, research has primarily focused on their magnetic properties, leaving their thermoelectric performance above room temperature largely unexplored. In this presentation, CuMnSb alloys were synthesized to investigate the impact of Cu addition on the thermoelectric behavior of MnSb alloys above 300 K. The ingot was fabricated via arc melting, followed by powderization and sintering to achieve a polycrystalline microstructure. Thermoelectric characterization revealed a significant enhancement in the figure of merit (zT) at high temperatures compared to MnSb. These findings underscore the potential of transition metal alloying in magnetic materials for the development of high-temperature thermoelectric materials.

[열전1-2 | 09:15]
3차원 원자단층현미경을 활용한 열전재료의 나노구조-특성 관계 해석: 정찬원* (부경대학교)
Keywords: 3차원 원자단층현미경, 나노구조분석, 나노석출물, 결함, 열전재료

재료의 미세구조는 재료 특성에 직접적인 영향을 미치므로, 다양한 스케일로 존재하는 미세구조를 정밀하게 분석하고 이를 재료 특성과 연관 지어 해석하는 것이 중요하다. 특히 열전재료의 경우, 점결함, 모상 내 나노 석출물, 결정립계에 선택적으로 분포하는 이종 원자, 모상에 존재하는 적층 결함, 화학적 불균질성 등이 전자 및 포논의 이동 특성에 영향을 주고 결과적으로 열전 특성을 결정한다. 이러한 미세구조 요소들을 정확히 분석하고 이해하기 위해서는 다양한 분석 기법이 활용되는데, 그 중 3차원 원자단층현미경 (Atom probe tomography, APT)은 나노미터 이하의 공간 해상도로 모든 원자, 특히 경원소 (H, He, Li, Be, B)의 3차원 원자 분포를 분석할 수 있는 첨단 기술로, 나노 재료의 정밀 화학 분석에 널리 활용되고 있다. 본 발표에서는 3차원 원자단층현미경을 활용하여 열전재료의 나노구조를 분석하고 이를 특성과 연계하여 해석한 연구 사례들을 소개하고자 한다.

[열전1-3 | 09:30]
Co-Optimization of Electronic and Thermal Transport in Se-Free n-Type $(Bi,Sb)_2Te_3$ for Improved Thermoelectric Efficiency: Soo ho Jung, Seungki Jo, and Kyung Tae Kim* (Korea Institute of Materials Science)
Keywords: n-type $Bi_{2-x}Sb_xTe_3$ thermoelectric material, antisite defect, power factor, dislocation networks, lattice thermal conductivity
Se-free n-type $(Bi,Sb)_2Te_3$ thermoelectric materials have emerged as promising candidates for practical applications in recovering low-grade waste heat, outperforming conventional n-type $Bi_2(Te,Se)_3$. A remarkable 100% enhancement in the maximum ZT of n-type $Bi_{1.7}Sb_{0.3}Te_3$ has been achieved through a combination of melt-spinning and excess Te-assisted transient liquid phase sintering (LPS). The Te-rich sintering environment promotes the formation of intrinsic defects (Te_{Bi}), which increases carrier concentration and improves electrical conductivity. Additionally, melt-spinning with excess Te allows for precise tuning of the electronic band structure, leading to a high power factor of 0.35×10^{-3} $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}$ at 300 K. The rapid volume changes during sintering generate dislocation networks that effectively reduce lattice thermal conductivity to 0.4 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. As a result, the developed n-type legs achieve a maximum ZT of 1.0 at 450 K, contributing to a 70% increase in the output power of thermoelectric devices, reaching 7.7 W with a temperature difference of 250 K. This study underscores the synergistic effects of melt-spinning and transient LPS, enabling precise control over both electronic and thermal properties to advance thermoelectric technology.

[열전1-4 | 09:45]
Phonon Glass and Electron Crystal of Heavy Atomic High Entropy Alloy Nanoparticle Distributions in $Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$ by Enhancing Electrical Grain Connectivity: Anil Kumar, Saurabh Thoravat, Jae Hyun Yun, Rahmatul Hidayati (Kyung Hee University), Junyoung Park, Hyungyu Jin (Pohang University of Science and Technology), Jin-Hee Kim*, and Jong-Soo Rhyee1* (Kyung Hee University)
Keywords: Bismuth antimony telluride, high-entropy alloy, grain connectivity, mean free path, thermoelectrics.

We investigated the anisotropic thermoelectric properties of $Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$ (BST) composites with heavy metallic high-entropy alloy $TaNb_2HfZrTi$ (HEA_x) (x = 0, 0.1, 0.5, and 1.0 vol%), synthesized by ball-milling, mixing, and hot-press sintering method. The HEA additions below 1.0 vol% in the BST+HEA_x samples do not contribute to the change of Seebeck coefficients, carrier concentrations, and

Fermi energies. Besides, electrical conductivity in the parallel (Pa) direction to the press-direction was significantly enhanced due to an increased carrier mean free path (λ_e) from 10.4 nm (x = 0) to 13.6 nm (x = 0.5). This enhanced λ_e is attributed to metallic HEA nanoparticles that improve electrical grain connectivity, particularly in the Pa-direction. The lattice thermal conductivities (κ_L) in the Pa-direction of the BST+HEA_x samples decreased at x = 0.1 vol% by significant phonon scattering, followed by an increase at higher HEA concentrations (0.5 to 1.0 vol%), which is consistent with the values of the phonon mean free path (λ_{ph}). The phonon mean free path (λ_{ph}) and lattice thermal conductivity of the composites indicate the synergistic competition between the phonon scattering and the grain connectivity in the Pa-direction. As a result, the thermoelectric figure of merit (ZT) in the Pa-direction improved from 1.09 (x = 0) to 1.33 (x = 0.1 vol%) at 350 K. These findings suggest that incorporating heavy metallic HEA nanoparticles is a promising strategy to improve the performance of the anisotropic thermoelectric materials and other systems sensitive to grain connectivity.

[열전 1-5 | 10:00]

Enhancing Se-Free n-Type Bismuth Telluride Thermoelectrics with Edge-Oxidized Graphen: Jinhee Bae, Seungki Jo, Soo-ho Jung, Jong Min Park, Su A Kwon, and Kyung Tae Kim* (Korea Institute of Materials Science (KIMS))

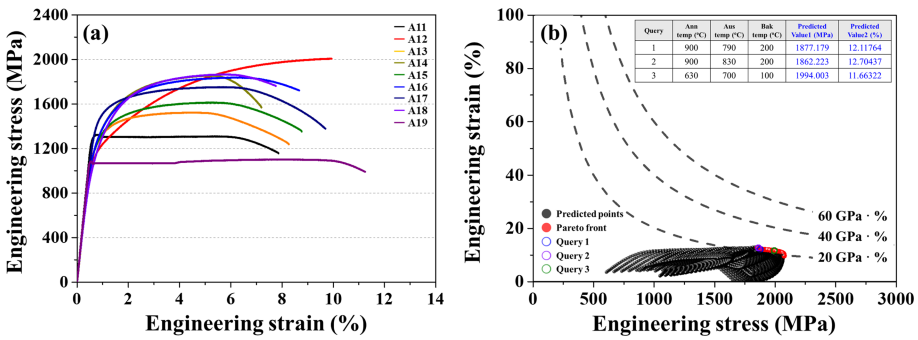
Keywords: n-type Bi1.7Sb0.3Te3, Material extrusion, Edge-oxidized graphene, thermoelectric performanc

The thermoelectric (TE) effect, which enables the conversion of waste heat into electrical energy (or vice versa), is emerging as a promising strategy for sustainable energy solutions. Bismuth telluride (Bi2Te3)-based materials show significant potential for thermoelectric applications, particularly near room temperature, where most waste heat is generated. Typically, n-type thermoelectric material are composed of Bi, Se, and Te atoms. However, the instability of highly volatile Se atom in n-type alloys leads to a relatively low ZT value and compositional discrepancies with p-type materials, reducing the durability of devices. To address this problem, researchers have developed Se-free n-type alloys comparable to p-type materials Meanwhile, the conventional manufacturing process for Bismuth telluride (Bi2Te3)-based materials faces challenges not only in shape limitations but also in process complexity. In contrast, 3D printing technology enables the fabrication of complex geometries, minimizes material consumption, and reduces construction time. However, material extrusion (ME), which is commonly used for TE materials, still has limitation, as it can lead to high porosity and organic residues, resulting in reduced performance compared to bulk TE materials. Here, we fabricated Se-free n-type Bi1.7Sb0.3Te3 (BST) using an ME process with the incorporation of edge-oxidized graphene (EOG). The incorporated EOG makes the bridges between separated grains, achieving a ZT value comparable to commercial bulk n-type materials. Furthermore, a single-element device composed of ME-printed EOG-incorporated BST exhibited a twofold enhancement in performance compared to pure-BST, demonstrating the potential of the ME process for manufacture selenium-free n-type Bi1.7Sb0.3Te.

학생세션 I
Room 삼다A, 4월 23일

[SS1-1 | 11:00]
중망간강의 열처리 공정 최적화: 파레토 능동 학습에서의 쿼리 전략 비교: 김승현, 이진영, 이영국* (연세대학교)
Keywords: .

To enhance the strength and ductility of medium-Mn steels, recent studies have employed machine learning (ML) approaches [1-4]. While these studies have primarily focused on achieving high UTS and TE through composition optimization, successful steel manufacturing also requires carefully designed heat treatment processes. Therefore, this study aimed at achieving global optimization through comprehensive multi-step heat treatment processes is necessary to realize the potential of medium-Mn steels. The optimization of multi-step heat treatments presents a unique challenge as it involves mutiple competing objectives (e.g., strength and ductility) and complex process parameters. Therefore, we apply pareto active learning (PAL) to optimize multi-step heat treatment processes for medium-Mn steels and systematically compare three widely used query strategies—Expected Improvement (EI), Upper Confidence Bound (UCB) and Greedy Search (GS)—to provide practical guidelines for selecting query strategy in heat treatment optimization. In multi objective optimization (MOO), defining the input variable space to create a search grid is an essential task. We have chosen to conduct our heat treatment process in three distinct steps: annealing (Ann), austenitizing (Aus), baking (Bak). The lower limit of Ann and Aus is 560 ºC, and the lower limit of Bak is 100 ºC. The upper limit of Ann and Aus is 900 ºC, and the upper limit of Bak is 300 ºC. The step sizes for Ann_temp and Aus_temp were set at 10 ºC, while that for Bak_temp was set at 50 ºC, resulting in a total of 7,350 unlabeled data points. The duration for each step has been set at 3, 5 and 20 min, respectively. From the unlabeled dataset, nine samples were randomly selected to form the initial dataset. These initial conditions were subjected to tensile testing at room temperature and the results were used to train a gaussian process (GP) model, which then selected the next samples for evaluation based on three query strategies: EI, UCB and GS (Fig. 1).



Query	Ann temp (°C)	Aus temp (°C)	Bak temp (°C)	Predicted Value1 (MPa)	Predicted Value2 (%)
1	900	790	200	1877.179	12.11764
2	900	830	200	1862.223	12.70437
3	630	700	100	1994.003	11.66322

Fig. 1. (a) Engineering stress-strain curves of the nine initial data set samples and (b) predicted Pareto front of the GP model with selected by Queries EI, UCB and GS.

Fig. 2 illustrates the progression of PAL for each query strategy, highlighting the difference in their respective optimization approaches.

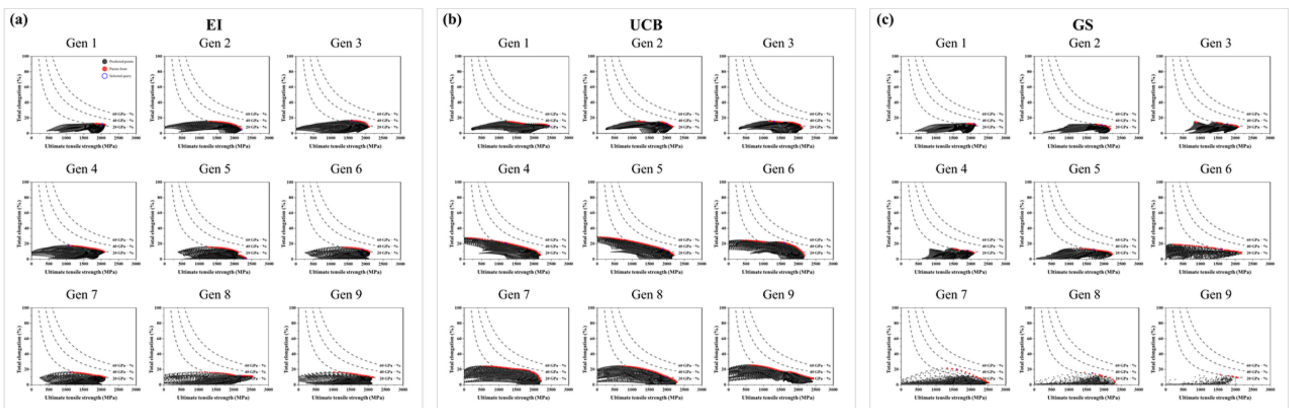


Fig. 2. Predicted points plots by queires (a) EI, (b) UCB and (c) GS for each generation.

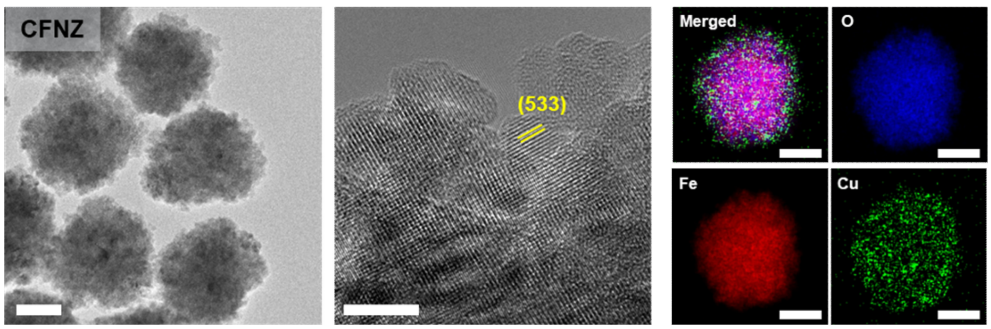
To evaluate the performance of Pareto Active Learning (PAL), we utilized hypervolume, coverage relation, uncertainty, and SHAP values. Comparative analysis of query strategies using comprehensive performance metrics demonstrated that the final generation obtained through UCB exhibited optimal performance within the given search space. This comparison not only enhances our understanding of PAL implementation but also contributes to the more efficient development of AHSSs through optimized multi-step heat treatments.

[SS1-2 | 11:13]

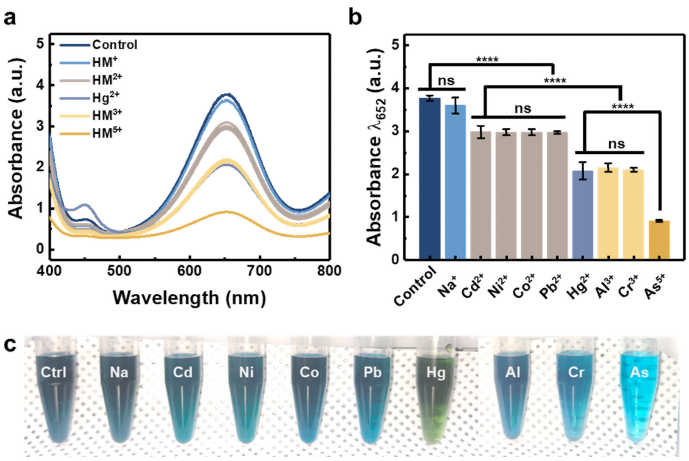
산화철-구리 나노자임의 향상된 과산화효소 활동에 따른 다중 중금속 이온의 비색 검지: 김영근*, 김연범, 부홍은, 구명석, 정은진, 장영준 (고려대학교)

Keywords: 산화철, 펜톤반응, 수질오염, 중금속, Peroxidase, Colorimmetric

수질 오염은 인구 증가와 산업화의 급속한 발전으로 인해 전세계적인 문제로 떠오르고있다. 음용수, 농업, 의료, 산업용으로 정제된 물에 대한 수요가 크게 증가함에 따라 오염 물질의 검출 및 제거는 인류의 건강과 안전을 보장하기 위해서는 필수적이다.[1] 이러한 오염 물질 중 납(Pb^{2+}), 수은(Hg^{2+}), 니켈(Ni^{2+}), 코발트(Co^{2+}), 카드뮴(Cd^{2+}), 알루미늄(Al^{3+}), 크롬(Cr^{3+}), 비소($As^{5|+}$)와 같은 중금속 이온은 독성 및 체내 축적 특성으로 인해 특히 위험하다. 이러한 이온들은 낮은 농도에서도 단백질의 티올(thiol) 그룹과 상호작용하여 세포의 생화학적 과정을 방해하고 심각한 건강 문제를 유발할 수 있다.[2] 따라서 수자원 내 중금속 이온의 장기적인 모니터링과 효율적인 검출 방법을 개발하는 것은 인류의 건강과 보존을 위해 매우 중요하다. 최근에는 나노자임(nanozyme) 기반의 중금속 이온 감지 플랫폼이 값싸며 간단한 검지법을 제공할 수 있어 주목받고 있다.[3] 특히 산화철 기반 나노자임의 펜톤 유사(Fenton-like) 반응을 활용하는 방법은 활성산소종(ROS)을 생성하여 3,3',5,5'-테트라메틸벤지딘(TMB)과 같은 기질을 산화시켜 색 변화를 유발하고, 이를 활용하여 중금속의 비색 검지에 활용될 수 있다. 또한, 기존 연구에서 구리가 항암 치료 및 유기 오염 물질 분해와 같은 응용 분야에서 펜톤 유사 반응을 촉진하는 것으로 보고된 바 있다.[4] 그러나 많은 구리 기반 시스템은 자성을 갖추지 못해 용액이나 생물학적 시스템에서 쉽게 제거하는 데 한계가 있다.



이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 개량된 폴리올(polyol) 방법을 이용한 원팟(one-pot) 합성법으로 Cu-Fe_3O_4 나노자임(CFNZ)을 합성하였다.[5] CFNZ는 초상자성 특성을 유지하면서도 Fe^{2+}/Fe^{3+} 및 Cu^{+}/Cu^{2+} 이온 간의 전자 전달 시너지 효과로 향상된 촉매 활성을 나타내어 TMB의 산화로 인한 비색 검지에 특화되는 특성을 보였다. 이후 중금속이 존재하는 수계에서 반응을 시켰을 때, 중금속 종류, 농도에 따라 촉매 활성도에 변화를 유발하고, 그 결과 ROS 생성 과정에 따른 TMB 산화 정도에 변화를 주어 중금속의 비색 검지가 가능할 것으로 가정하였다.



중금속이 존재하는 수계에 CFNZ를 반응시켜 TMB 산화 정도를 UV-vis spectroscopy를 통해 정량화하여 비교했을 때, 중금속 이온의 원자가(valency)가 증가함에 따라 파장 λ = 652 nm에서의 흡광도가 감소하였다. 특히 As^{5+}는 가장 낮은 흡광도를 나타냈으

며, Na^{+}는 대조군과 유의미한 차이를 보이지 않았다. Hg^{2+}의 경우 λ = 450 nm에서의 독특한 흡수 피크가 나타나 TMB의 과산화를 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 구리 이온과의 아말감화(amalgamation)를 통해 과산화수소(H_2O_2) 분해를 촉진하고 TMB의 과산화를 유도하는 것으로 확인되었으며, 이러한 현상은 다른 이가 금속 이온에서는 관찰되지 않았다. 결과적으로, 본 연구 결과를 통해 수계에 존재하는 다가 양이온 형태의 중금속 이온을 값싸고 효율적인 방법으로 검지할 수 있는 가능성을 제시하였다.

참고문헌(References) 1) A.H.-Najafabadi et al., Sci. total Environ. 824, 153844 (2022) 2) B. Ninwong et al., ACS Sens. 5, 3999 (2020 3) J. Xu et al., J. Hazard. Mater. 465, 133424 (2024) 4) S. Koo et al., ACS Nano 16, 2535 (2022) 5) M. J. Ko et al., Small 16, 202004696 (2020)

[SS1-3 | 11:26]

오스테나이트계 스테인리스강에서 Mg 탈산이 개재물의 진화 거동에 미치는 영향: 장민관 (한양대학교), 정세지, 김지원 (세아창원특수강), 박주현* (한양대학교)

Keywords: 스테인리스강, Mg, 탈산, 비금속 개재물

오스테나이트계 스테인리스강(Austenitic Stainless Steel, ASS)은 우수한 내식성, 내열성 및 기계적 특성으로 인해 다양한 산업 분야에서 널리 사용된다. 이러한 특성을 유지하기 위해서는 초고청정도가 필수적이며, 이를 위해 진공 유도 용해(Vacuum Induction Melting, VIM) 또는 진공 아크 재용해(Vacuum Arc Remelting, VAR) 공정을 통해 생산된다[1-3]. 특히, 강력한 탈산제인 Al 또는 Si를 사용하여 탈산 과정을 거치지만, 이 과정에서 불순물 유입, 용강의 재산화, 내화물-금속 반응 등에 의해 alumina(Al_2O_3), spinel($MgAl_2O_4$), aluminosilicate(Al_2SiO_5)와 같은 비금속 개재물(Non-Metallic Inclusion, NMI)이 형성될 수 있다. 이러한 NMI는 강재의 생산성과 품질에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.[4-6] 이를 고려할 때, NMI 입자의 수, 크기 및 상을 제어하기 위한 최적의 탈산제를 설계하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 고주파 유도 용해로를 사용하여 alumina 도가니에서 Ni-Mg 합금 형태로 Mg를 투입하여 1823 K의 ASS 용강을 탈산하였다. 이때 Ni-Mg의 함량은 각각 1, 5, 10 g으로 변화를 주었으며, Mg의 비산 방지를 위해 4 g의 Fe-foil(50×100×0.1 mm)로 Ni-Mg alloy를 감싼 후 투입해 주었다. 본 실험을 통해 Mg함량 변화에 따른 용강 내 O, Mg, Al, Si의 농도를 N/O 분석과 ICP-OES 분석한 결과를 그림 1에 나타내었다. 실험 결과로는 Mg 함량이 증가함에 따라 용강 내 O농도는 반응[1]에 의해 감소하였으며 용강 내 Al농도는 반응[2]에 의해 증가하였다. 이는 Mg 함량이 증가함에 따라 도가니에서 Al Pick-up되는 정도가 증가하였다고 판단된다.

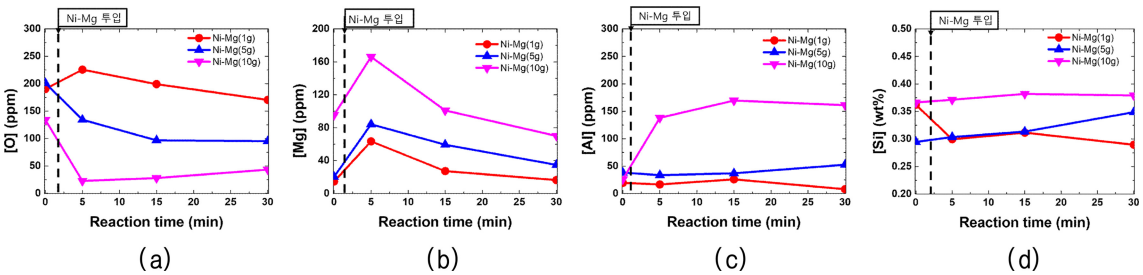


Fig. 1. Mg함량 변화에 따른 용강 내 O, Mg, Al, Si 농도 변화

$$[M_g]+[O]=(MgO) \quad (1)$$

$$(Al_2O_3)_{crucible}+3[Mg]=2[Al]+3(MgO) \quad (2)$$

Mg 함량 변화와 반응 시간에 따른 용강 내 개재물의 단위면적당 개재물 수, 면적 분율 (area fraction), PDF plot (Popular Density Function), 상 및 조성 변화를 분석하였다.

실험 결과 Mg 함량 변화와 반응 시간에 따른 단위면적 당 개재물 수 변화를 그림 2에 나타내었다. Mg 함량 증가와 반응 시간에 따라 비금속 개재물의 단위면적당 개재물 수와 면적 분율이 감소하였다.

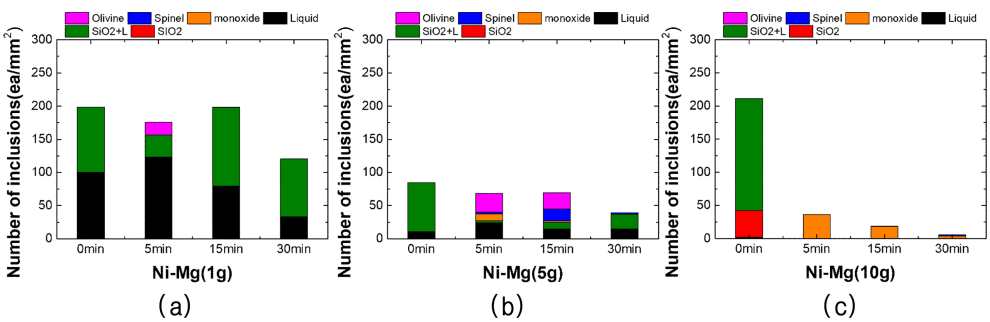


Fig. 2. Mg 함량 변화에 따른 단위 면적 당 개재물 수 (a) Ni-Mg 1g, (b) Ni-Mg 5g, (c) Ni-Mg 10g

Mg 함량 증가에 따라 NMI의 평균 조성에서 MgO 함량이 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 해당 결과를 그림 3에 나타내었다. NMI의 상은 Ni-Mg 투입 전 'SiO_2+Liquid'에서 Ni-Mg 투입 후 MgO를 포함하는 시스템으로 변화하였다. 그러나 Mg 함량이 증가함에 따라 도가니에서 Al Pick-up 정도가 증가하였고, Pick-up된 Al과 MgO가 반응하여 Spinel 유형의 개재물이 형성되었다.

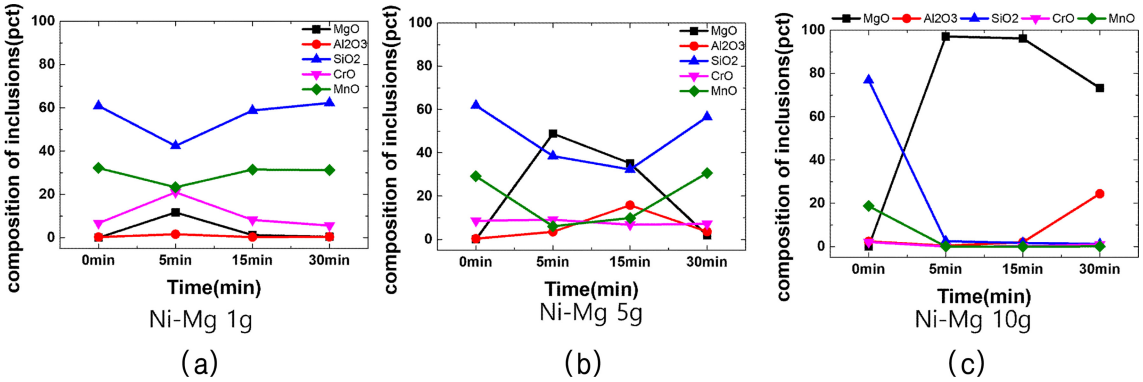


Fig. 3. Mg 함량 변화에 따른 개재물 평균 조성 변화 (a) Ni-Mg 1g, (b) Ni-Mg 5g, (c) Ni-Mg 10g

이러한 결과는 ASS의 청정도를 향상시키고 NMI의 수, 상 및 조성을 제어하기 위한 최적의 탈산제 설계에 중요한 기초 데이터를 제공한다.

참고문헌(References) 1) Ma, C., Du, Z., Wang, X., Zhou, P., Zhao, Y., Hua, Y., Su, C., Zhang, T., & Wang, F. Corrosion Reviews, 42(2), 127-161. (2024). 2) Tanahashi, M., Furuta, N., Yamauchi, C., & Fujisawa, T. ISIJ Int., 41(11), 1309-1315. (2001). 3) Liu, Q., Wang, M., Pang, W., Xing, L., & Bao, Y. JOM, 76, 7290-7303. (2024). 4) Li, Y., Yang, W., & Zhang, L. Metals, 10(4), 444. (2020). 5) Park, J. H., & Kang, Y. B. Steel Res Int., 95(11), 2300598. (2024). 6) Zhang, L., & Tomas, B. G.. ISIJ Int., 43(3), 271-291. (2003).

[SS1-4 | 11:39]

전기화학적 기법을 이용한 철강 슬래그에서의 인 회수: 조영래, 손일* (연세대학교 신소재공학과), 이상훈 (연세대학교 산학협력단 중소기업산학협력센터)

Keywords: P recovery, steelmaking slag, recycling, electrochemistry, volatilization

1. Introduction

The growing demand for phosphorus (P) in agriculture, semiconductor manufacturing, and lithium iron phosphate batteries underscores the need for sustainable recovery technologies. However, phosphate rock reserves are limited and unevenly distributed, raising concerns about depletion and supply security. Additionally, substantial phosphorus losses to landfills further disrupt sustainable circulation.[1-6] Steelmaking slag has gained attention as a secondary phosphorus source, but no industrially viable recovery technology exists. A key challenge is the co-reduction of iron oxides, which leads to phosphorus alloy formation and reduces recovery efficiency. Conventional methods, such as pre-concentration in slag or post-separation from alloys, add significant processing costs.[7-15] This study presents a novel electrochemical approach to directly extract high-purity phosphorus gas from steelmaking slag. By controlling the ionic state of phosphorus in the molten phase, this method enables selective volatilization and efficient separation, overcoming limitations of existing technologies.

2. Materials and procedure

The CaO-SiO_2-P_2O_5 slag system (2 wt% P) was prepared using CaO, obtained by calcining GR-grade $CaCO_3$ (Kanto Chemical, Tokyo, Japan) at 1273 K for 24 h, and SiO_2 (Kanto Chemical, Tokyo, Japan). Phosphorus was introduced as tricalcium phosphate (Sigma-Aldrich, Saint Louis, USA). The metal phase consisted of carbon-saturated iron, produced by melting electrolytic iron with graphite powder in a carbon crucible at 1773 K for 4 h. Electrochemical experiments were conducted using a two-electrode system with a graphite electrode (∅=1 mm, purity ≥ 99.5%) and a liquid carbon-saturated iron electrode, connected via molybdenum wire to a Keithley 2000 source meter (Tektronix, USA) with an alumina sleeve for insulation. A graphite crucible containing 10 g of slag and 10 g of carbon- saturated iron was placed in a vertical furnace, melted at 1773 K for 1 h under an UHP (6N) Ar atmosphere, and subjected to voltage application for 6 h. Samples were then argon - quenched and analyzed using ICP-OES (Agilent 735, Santa Clara, CA, USA). [16-21]

3. Results and discussions

3.1 Effect of applied potential on phosphorus partitioning

In this study, the interfacial oxygen partial pressure ($p_{O_2}<10^{-18}$ atm) stabilizes phosphorus in the slag as phosphide ion(P^{3-}), establishing chemical equilibrium in its partitioning between the slag and metal according to Equation (1)

$$P^{3-} + \frac{3}{4}O_2 = \frac{1}{2}P_2 + \frac{3}{2}O^{2-} \quad (1)$$

Therefore, the phosphorus partition ratio is determined by the basicity of the slag and the interfacial oxygen partial pressure. In the absence of an applied potential (0 V), most phosphorus migrates into the metal phase, resulting in a chemical equilibrium partition ratio (L_p) of approximately 0.0254. When an external potential is applied, the following reactions are induced at the working electrode interface depending on the potential direction, leading to changes in the phosphorus partition ratio.

$$\text{Cathodic reaction: } P + 3e^- = P^{3-} \quad (2)$$

$$\text{Anodic reaction: } P + 4O^{2-} = PO_4^{3-} + 5e^- \quad (3)$$

When a negative potential is applied to the working electrode, the cathodic reaction in Equation (2) occurs, reducing phosphorus in the metal to phosphide ions, which then migrate into the slag. Consequently, the partition ratio increases, as shown on the left side of Figure 1. Conversely, when a positive potential is applied, the anodic reaction in Equation (3) takes place, oxidizing phosphorus in the metal to phosphate ions, which also migrate into the slag, leading to an increase in the partition ratio, as observed in the right-side trend of Figure 1. These results can be interpreted by applying the Nernst equation to Equations (2) and (3), yielding the theoretical relationship between the applied potential and the partition ratio.

$$\ln L_p = \frac{3F}{RT}(E^0 - E_{cell}) \quad (4)$$

$$\ln L_p = \frac{5F}{RT}(E^0 - E_{cell}) + \frac{20F}{RT}\ln O^{2-} \quad (5)$$

Here, E^0 represents the standard electrode potential, while E_{cell} is the actual cell potential.

In Figure 1, the ratio of the slopes of the two trend lines is approximately 1.58 (1.25/0.79), which closely aligns with the theoretical ratio of 1.66 (5/3) derived from Equations (4) and (5). However, the absolute values of the slopes deviate significantly from the theoretical values due to the difference between the actual cell potential (E_{cell}) and the applied voltage ($E_{applied}$), caused by overpotential and IR drop in the system.

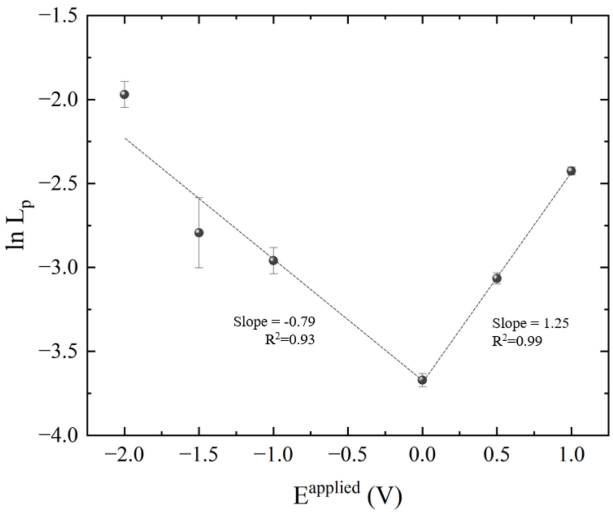


Fig. 1. Variation in phosphorus distribution(L_p) with applied potential

3.2 Effect of applied potential on phosphorus gas evolution

After evaluating the mass balance through quantitative analysis of phosphorus in slag and metal after the phosphorus recovery experiment, it was confirmed that the phosphorus recovery rate exceeded 95% under all conditions. As shown in Figure 2, the recovered phosphorus exists not only in the metal phase but also in the form of P_2 gas, with a trend of increasing gas-phase recovery as a positive potential is applied. According to Equation (3), this occurs because phosphate ions generated at the electrode interface transition into the stable phosphide phase, during which P_2 gas inevitably forms as an intermediate species and volatilizes. Future works will further quantify and elucidate this mechanism.

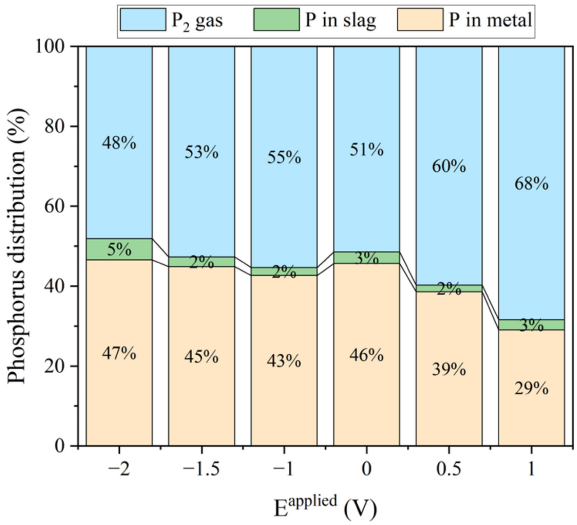


Fig. 2. Changes in phosphorus mass balance with applied potential

4. conclusion

This study confirms that interfacial electrochemical reactions govern phosphorus partitioning, as evidenced by changes in the partition ratio under applied potential. Depending on the potential direction, the recovered phosphorus distribution shifts between the metal and gas phases. These findings demonstrate the feasibility of electrochemically extracting phosphorus as a gas, highlighting a new approach for phosphorus recovery.

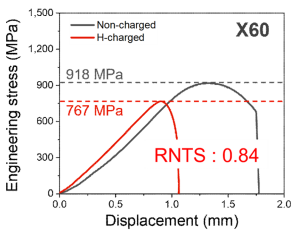
참고문헌(References) [1] Jasinski, S. Phosphate Rock Statistics and Information, https://pubs.usgs.gov/publication/mcs(2020). [2] Minpeng Chen, T.E. Graedel, A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts, Global Environmental Change,Volume 36, Pages 139-152, (2016) [3] N. Gilbert, The disappearing nutrient, Nature, 461 (2009), pp. 716-718 [4] Ma, W.Q. Ma, G.L. Velthof, F.H. Wang, W. Qin, F.S. Zhang, O. Oenema, Modeling nutrient flows in the food chain of China, J. Environ. Qual., 39 (2010), pp. 1279-1289 [5] Rostami, J. Valio, P. Tynjälä, U. Lassi, P. Suominen, Life cycle of LiFePO4 batteries: Production, recycling, and market trends, ChemPhysChem, Article e202400459 (2024). [6] Matsubae, K., Kajiyama, J., Hiraki, T., Nagasaka, T., 2011. Virtual phosphorus ore requirement of Japanese economy. Chemosphere 84, 767–772. [7] Kazuyo Matsubaea, Elizabeth Webecka, Hidden phosphorus flows related with non-agriculture industrial activities: A focus on steelmaking and metal surface treatment, [8] Matsubae-Yokoyama, K., Kubo, H., Nakajima, K., Nagasaka, T., 2009. A Material Flow [9] Guangheng Ji, Xu Gao, IL Sohn, Shigeru Ueda, Wanlin Wang, Review of beneficiation techniques and new thinking for comprehensive utilization of high-phosphorus iron ores, Minerals Engineering, Volume 223, 2025, 109176, [10] Ji, G., Xiao, C., Gao, X. et al. In-Situ Investigation of Phosphorus Transformation and Distribution During Gas-Based Reduction of High-Phosphorus Oolitic Hematite. Metall Mater Trans B 55, 4692–4707 (2024). [11] Y.-h. Yu, C.-m. Du, S.-l. Fan, W.-m. Yu, Acid-leaching separation of phosphorus from the BOF slag modified with Al2O3, Journal of Environmental Chemical Engineering, 10 (2022) 108394 [12] C.-M. Du, X. Gao, S. Ueda, S.-Y. Kitamura Recovery of phosphorus from modified steelmaking slag with high P2O5 content via leaching and precipitation ISIJ Int., 58 (2018), pp. 833-841 [13] Guangheng Ji, Cihong Xiao, Xu Gao, You Zhou, IL Sohn, Shigeru Ueda, Wanlin Wang, Mechanistic insight into phosphorus migration pathways from oolitic hematite using in-situ observations during roasting and reduction process,Separation and Purification Technology, Volume 348, 2024,127696 [14] H. Yu, T. Miki, Y. Sasaki, T. Nagasaka, Simultaneous reduction of P2O5 and FeO from CaO–SiO2–FeO–P2O5 synthesized slag by carbothermic reduction, Metallurgical and Materials Transactions B, 53 (2022) 1806-1815. [15] H. Yu, X. Lu, T. Miki, K. Matsubae, Y. Sasaki, T. Nagasaka, Sustainable phosphorus supply by phosphorus recovery from steelmaking slag: a critical review, Resources, Conservation and Recycling, 180 (2022) 106203.) [16] W.D. Judge, J. Paeng, G. Azimi, Electrorefining for direct decarburization of molten iron, Nature Materials, 21 (2022) 1130-1136. [17] S. Natsui, T. Sato, A. Ito, M. Hayasaka, T. Iwama, K. Mori, S. Ueda, H. Nogami, Molten Oxide Electrolysis Using Copper-Containing Carbon-Saturated Molten Iron Anode, Journal of The Electrochemical Society, 170, 023501(2023). [18] G.-H. Zhang, K.-C. Chou, F.-S. Li, Deoxidation of liquid steel with molten slag by using electrochemical method, ISIJ International, 54 (2014) 2767-2771. [19] D.-H. Kim, W. Kim, Y.-B. Kang, Electrochemical transfer of S between molten steel and molten slag, Metallurgical and Materials Transactions B, 49 (2018) 1311-1321. [20] S.H. Lee, D.J. Min, Effects of electrochemical potential on sulfur removal in the molten CaO-SiO2-Al2O3 system, Separation and Purification Technology, 236 (2020) 116231. [21] S.H. Lee, D.J. Min, A novel electrochemical process for desulfurization in the CaO-SiO2-Al2O3 system, Materials, 13 (2020) 2478.

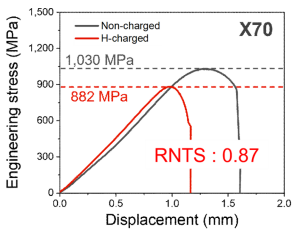
[SS2-1 | 14:00]

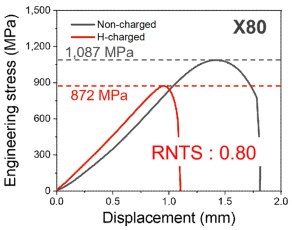
고압수소용 API 라인파이프강의 미세조직과 수소취성의 상관관계: 정민섭, 오동규, 황병철* (서울과학기술대학교)

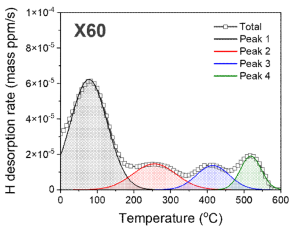
Keywords: API pipeline steels, Hydrogen embrittlement, Slow strain-rate test (SSRT), Notch tensile strength (RNTS)

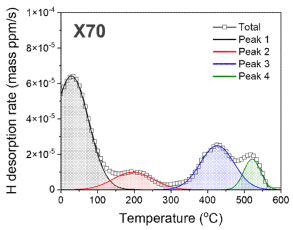
전세계적으로 탄소 배출 절감을 위해 순환 경제의 핵심인 수소 에너지 산업이 주목받으면서 수소 에너지를 효율적으로 활용하기 위해 다양한 이송 방법이 개발되고 있다. 그중 고압수소 가스를 장거리로 대량 수송하는 데 라인파이프가 활용되고 있으나, 라인파이프강과 같은 금속 재료 내부로 수소가 침투하게 되면 전위, 결정립계, 석출물 등 결함들과 상호작용하여 기계적 성질을 저하시키는 수소취성이 발생할 수 있다. 한편 라인파이프강은 고강도와 내수소취성을 비롯하여 용접성 및 저온인성 또한 주요 물성으로 여겨져 탄소를 포함한 합금원소의 첨가량을 낮추며 이에 따른 강도 저하를 보완하기 위해 가공열처리 제어 공정(thermo-mechanical control process, TMCP)으로 많이 제조되고 있다. TMCP로 제조된 라인파이프강은 제어압연 및 가속냉각 조건에 따라 다각형 페라이트(PF, polygonal ferrite), 침상형 페라이트(AF, acicular ferrite), 입상형 베이나이트(GB, granular bainite), 베이나이트형 페라이트(BF, bainitic ferrite) 등 다양한 페라이트 및 베이나이트계 미세조직을 가진다. 본 연구에서는 서로 다른 베이나이트계 미세조직을 갖는 라인파이프강에 대하여 전기화학적 수소주입과 동시에 저속변형률시험(SSRT, slow strain-rate test)을 수행하여 수소취성을 평가하였고 미세조직과의 상관관계를 고찰하였다. 본 연구에서 사용된 3종류의 라인파이프강은 서로 다른 화학조성과 TMCP를 통해 제조되었으며, 각각 413 MPa (60 ksi), 483 MPa (70 ksi), 그리고 552 MPa (80 ksi)의 항복 강도를 갖는 고강도 API 라인파이프강이다. 이들의 미세조직은 압연 판재의 L-T (longitudinal-transverse) 면을 연마하고, 3% 나이탈 용액으로 에칭한 후 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. 또한 큰 압하량과 가속냉각(accelerated cooling)에 의해 형성된 복잡한 베이나이트계 미세조직을 좀더 자세히 관찰하기 위해 EBSD 분석을 실시하였다. 인장 시편은 ASTM E8 표준 시험법에 따라 판재의 압연 방향으로 표점 거리 25.0 mm, 폭 6.3 mm 및 두께 2.0 mm의 판상 시편으로 가공한 후 10톤 용량의 만능 시험기 (UT-100E, MTDI, Korea)를 사용하여 3.0×10-3s-1의 변형률 속도 조건으로 상온에서 인장 시험을 실시하였다. 각 시편의 항복강도는 응력-변형률 곡선으로부터 변형률 0.5 %에 해당하는 유동 응력으로 정의하였다. 또한 전기화학적 수소주입 전후 인장 특성을 평가하기 위해 ASTM G142 규격에 따라 봉상 노치 시편을 가공한 후 수소주입과 동시에 0.03 mm/min 속도로 SSRT를 실시하였다. SSRT 중 전기화학적 수소 주입은 1M NaOH + 3 g/L NH4SCN 수용액 내에서 0.5 A/m2의 전류 밀도를 유지하였으며, 수소취성 저항성 비교를 위한 지표로는 RNTS (relative notch tensile strength)를 사용하였다. 이후 수소주입에 따른 파괴 거동 변화를 분석하기 위해 SSRT 이후 시편의 파면을 SEM으로 분석하였다. 또한 API 라인파이프강의 균열 전파를 분석하기 위해 SSRT 후 인장시편의 파단면을 무전해 Ni 도금 후 SEM 및 EBSD를 통해 분석하였다. 수소주입 후 시편별 내부에 주입된 수소의 트랩 거동을 분석하기 위해 열탈착 분석 (TDA, thermal desorption analysis)을 실시하였다. 수소 주입은 전기화학적 방법으로 동일한 수용액 내에서 0.5 A/m2의 전류 밀도로 24 시간 동안 주입하였고 100 ºC/h의 승온 속도로 600 ºC까지의 수소 탈착 속도 피크를 분석하였다. 본 연구에서 사용된 3종류의 라인파이프강에 대한 OM 및 SEM 관찰 결과 모든 강재들은 페라이트와 베이나이트계 미세조직이 혼재된 미세조직을 나타내었으며 API grade가 증가함에 따라 미세한 결정립 구조를 보였다. X80 강의 경우 제어압연 후 상대적으로 느린 냉각속도로 인해 일부 펄라이트를 형성하였다. EBSD GOS (grain orientation spread) map을 바탕으로 각각의 미세조직 분율 측정 결과 X60강은 가속냉각 시작 온도 및 냉각 속도가 높아 GB와 BF가 잘 발달하였다. 그러나 오스테나이트 재결정 영역에서의 압하로 인해 오스테나이트 변형 밴드의 분율이 적어 AF의 형성은 용이하지 않았다. X70강은 오스테나이트 비재결정 영역에서의 압하로 인해 AF 형성이 용이하여 X60강보다 미세한 유효결정립도를 나타내었다. 낮은 가속냉각 종료 온도로 인해 펄라이트는 관찰되지 않았다. X80강은 낮은 가속냉각 시작 온도로 인해 높은 분율의 PF가 형성되었으며 가장 낮은 베이나이트계 미세조직 분율을 보였다. 강재별 수소주입 전후 SSRT 결과 API grade가 증가함에 따라 유효결정립도가 감소하여 노치인장강도가 증가하였다. X80강에서 가장 낮은 RNTS를 보였는데 이는 펄라이트로부터 균열 개시로 인한 것으로 판단된다. 반면 X70강은 가장 높은 RNTS를 나타내었다. 균열의 개시점으로 작용하는 경한 상의 분율이 적고 유효결정립도가 미세하여 수소취성 저항성이 우수한 것으로 판단된다. 강재별 수소 트랩 거동을 분석하기 위해 TDS 분석 및 피크별 수소함량 측정 결과 X70, X60, X80강 순으로 총 수소함량이 증가하였으며 이는 RNTS 경향과 일치하였다. 일반적으로 300 ºC 이하의 저온 피크는 수소취성에 직접적인 영향을 미치는 확산성 수소로 볼 수 있는데, RNTS가 낮은 X80강이 피크 1과 피크 2의 총 수소함량이 가장 높았으며 X70강이 가장 낮았다.

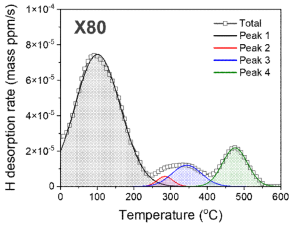












Steels	Hydrogen content (ppm)				
	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Total
X60	0.26	0.08	0.06	0.05	**0.45**
X70	0.20	0.05	0.10	0.03	**0.38**
X80	0.39	0.01	0.05	0.07	**0.52**

참고문헌(References) 1) S. W. Lee, S. I. Lee and B. Hwang, Korean J. Met. Mater. 58, 293 (2020). 2) D. K. Oh, S. G. Kim, S. H. Shin and B. Hwang, Materials 17, 4887 (2024). 3) E. Oharei, J. Omale, K M. M. Rahman and J. Szpunar, Mater. Charact. 161 (2020).

[SS2-2 | 14:13]

고온 열처리된 Al-Mg-Si계 합금의 열안정성에 미치는 Ni 미량원소의 영향: 남수민 (한국재료연구원, 경북대학교), 김용유, 이재석, 어광준 (한국재료연구원), 최명식 (경북대학교), 손현우* (한국재료연구원)

Keywords: Al-Mg-Si alloy, Precipitation, TEM, APT

Al-Mg-Si 합금(6000계 알루미늄 합금)은 높은 비강도와 우수한 성형성을 가져 전기자동차 배터리 외장재 등 경량구조재료로 널리 사용되고 있다.[1] Al-Mg-Si 합금은 열처리형 합금으로, 용체화처리 후 인공시효를 거치는 T6 열처리를 통해 β-type 석출물을 형성한다. 용체화처리를 통해 알루미늄 기지에 과포화 고용된 용질은 인공시효 시 확산하여 클러스터링되고 나노 사이즈 석출물로 성장한다. Al-Mg-Si계 합금의 주 강화상인 β″은 기지와 반정합 계면을 형성하는 바늘 모양의 석출물로, 전위의 이동을 효과적으로 억제하여 재료 강도 증가에 기여한다. 그러나 과시효로 인해 β′과 β상으로 전이되면서 석출물이 조대화되고, 기지와의 정합성이 감소하여 기계적 특성이 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 β-type 석출물의 열안정성을 향상하기 위하여 연구들이 보고되고 있다.[2] 한편 알루미늄 합금에서 Ni은 고용도가 매우 낮아 전신재 합금에서는 거의 연구되지 않았다. 그러나 선행 연구에서 T6 열처리 후 β″상의 Si 네트워크에 Ni이 치환되어 편석되는 현상이 관찰되었으며, 이를 통해 Ni이 석출물의 형성 및 열안정성에 영향을 미칠 가능성을 확인하였다.[3] 이러한 결과를 바탕으로 Ni을 효과적으로 활용하기 위해 Factsage 열역학 계산을 수행하였다. 그 결과 상용 6000계 알루미늄 합금의 통상적인 용체화 처리 온도인 500 ℃에서는 Ni의 고용도가 0.02 at.%에 불과하지만, 600 ℃로 상승시키면 고용도가 0.13 at.%로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는, Al-Mg-Si계 합금에 Ni을 미량 첨가 후 고온 열처리를 수행하여 기지 내 Ni의 고용도를 증가시키고, 이를 통해 Ni의 석출물 미세화 및 계면 편석을 유도함으로써 열안정성과 기계적 물성을 향상시키고자 하였다. 합금 제조를 위해 유도 용해로에서 850 ℃로 가열한 용탕을 200 ℃로 예열된 몰드에 주입하여 as-cast 합금을 제작하였다. 주조 편석 제거를 위해 합금을 550 ℃에서 24시간 균질화 처리한 후 상온에서 공냉하였으며, 96%의 압하율로 냉간 압연을 실시하였다. Ni의 충분한 고용도를 확보하기 위해 600 ℃에서 4시간 용체화 처리한 후, 200 ℃와 260 ℃에서 각각 200시간까지 인공시효하였다. 시효 거동은 비커스 경도기를 이용해 0.1 kgf 하중 하에서 경도를 측정함으로써 평가하였다. 나노 사이즈 석출물의 구조 및 정량 분석을 위하여 β-type 석출물의 habit plane인 {001} 분석에 유리한 [001]Al 정대축에서 투과전자현미경(TEM) 관찰하고, 알루미늄 기지 내 석출물 분포와 각 원소 간 상호작용을 분석하기 위하여 원자 탐침 단층 촬영(APT) 분석을 실시하였다.[4] 그림 1(a) 상단에서 확인할 수 있듯이, 200 ℃에서 2시간 인공시효 시 Ni-added 합금의 경도가 Base 합금보다 약 30 HV 높게 측정되었다. 이는 Ni 첨가로 석출물의 개수밀도가 증가하였기 때문이며, 그림 1(b)의 APT 분석 결과에서 확인할 수 있다. 퀜칭 직후, Ni-vacancy의 결합 에너지는 Mg-vacancy와 Si-vacancy의 결합 에너지보다 높다.

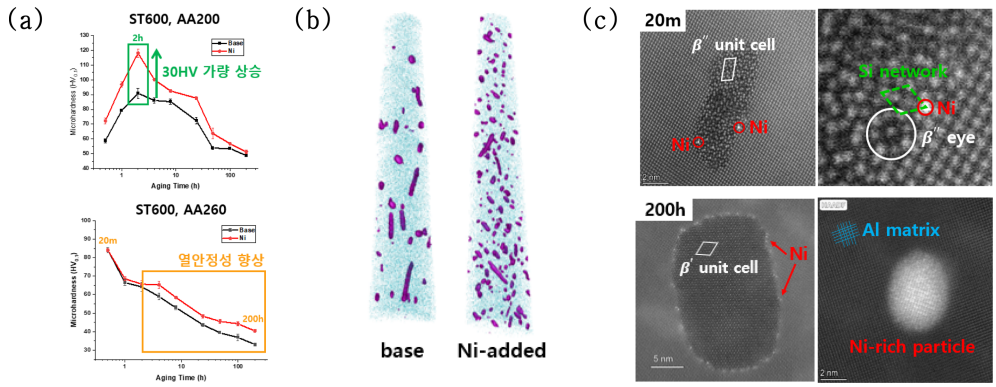


Fig. 1. (a) 600 ℃에서 용체화 처리한 후 200 ℃와 260 ℃에서 각각 200시간까지 인공시효하였을 때의 경도, (b) 200 ℃에서 2시간 인공시효한 Base, Ni-added 합금의 APT 분석 결과, (c) 260 ℃에서 20분, 200시간 인공시효한 Ni-added 합금의 TEM 이미지

인공시효가 진행되면서 Mg-Si 클러스터가 형성되고 Mg 및 Si와 결합한 vacancy는 소모된다. Ni-vacancy에서 비평형 상태인 vacancy가 평형 상태에 도달하는 과정에서 Ni가 다량의 vacancy를 기지 내로 방출한다. 방출된 vacancy는 결함으로 작용해 추가적인 핵생성 자리를 제공하고, 결국 석출물의 개수밀도 증가에 기여한다. 그림 1(a) 하단은 260 ℃에서 인공시효한 합금들의 경도 데이터이다. 먼저 260 ℃에서 20분동안 인공시효한 Ni-added 합금의 TEM 관찰 결과, β″의 계면에 Ni 원자가 국부적으로 편석되어 있음을 확인하였다. Ni는 β″의 Si 네트워크에서 Si 자리를 대체하여 편석되었으며, 이로 인한 경도 증가는 관찰되지 않았다. 그러나 200시간까지 과시효가 진행되면서 계면에 편석된 Ni가 증가하고, β′ 계면에 Ni가 완전히 편석된 형태가 나타난다. Ni는 β′의 조대화를 억제하여 미세한 석출물 형성을 유도하고, 최종적으로 열안정성 향상에 기여한다. 과시효가 지속됨에 따라 β′은 β로 천이되는데, 안정한 상으로 천이됨에 따라 Ni는 계면에서 기지로 방출되고 기지 내에서 Ni-rich particle로서 응집한다. 본 결과는 시효 온도가 석출물에 영향을 미치는 미량원소(Ni)의 양을 결정하는데 중요한 인자임을 나타낸다. 또한 시효 온도에서 고용되지 않는 미량원소들은 용질 상태에서 간접적으로 석출물 형성에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

참고문헌(References) 1) F. Ehlers and S. Dumoulin, Journal of alloys and compounds 591, 329-336 (2014). 2) Jae-Seok Lee, Youg-You Kim, Kwangjun Euh, Wookjin Lee, Hyeon-woo Son, Journal of alloys and compounds 1010, 177199 (2025) 3) Takeshi Saito, Eva A. Mørtsell, Sigurd Wenner, Calin D. Marioara, Sigmund J. Andersen, Jesper Friis, Kenji Matsuda, Randi Holmestad, Advanced Engineering Materials Volume 20, 1800125 (2018) 4)Yaoyao Weng, Lipeng Ding, Zezhong Zhang, Zhihong Jia, Boyang Wen, Yingying Liu, Shinji Muraishi, Yanjun Li, Qing Liu, Acta Materialia 180, 301-316 (2019)

[SS2-3 | 14:26]

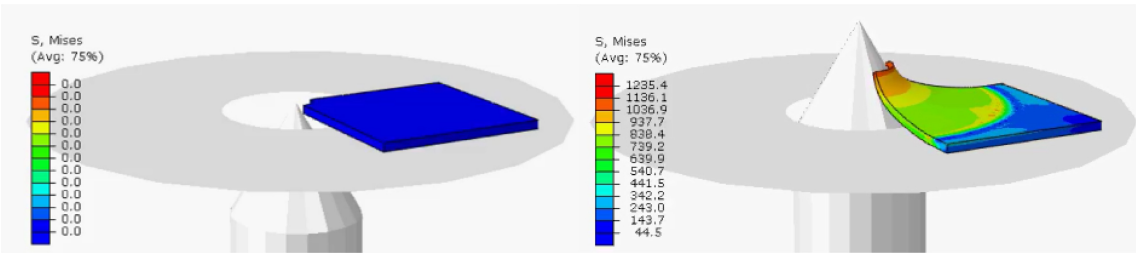
유한요소해석-머신러닝 통합 접근법을 통한 구멍확장비 예측: 정든뵴, 이승호 (서울대학교), 이제웅, 김성일 (포스코 기술연구소), 정경재 (성균관대학교), 한흥남* (서울대학교)

Keywords: 구멍확장비(Hole Expansion Ratio), 일축인장시험, 머신러닝, 유한요소법, 데미지모델

1. Introduction

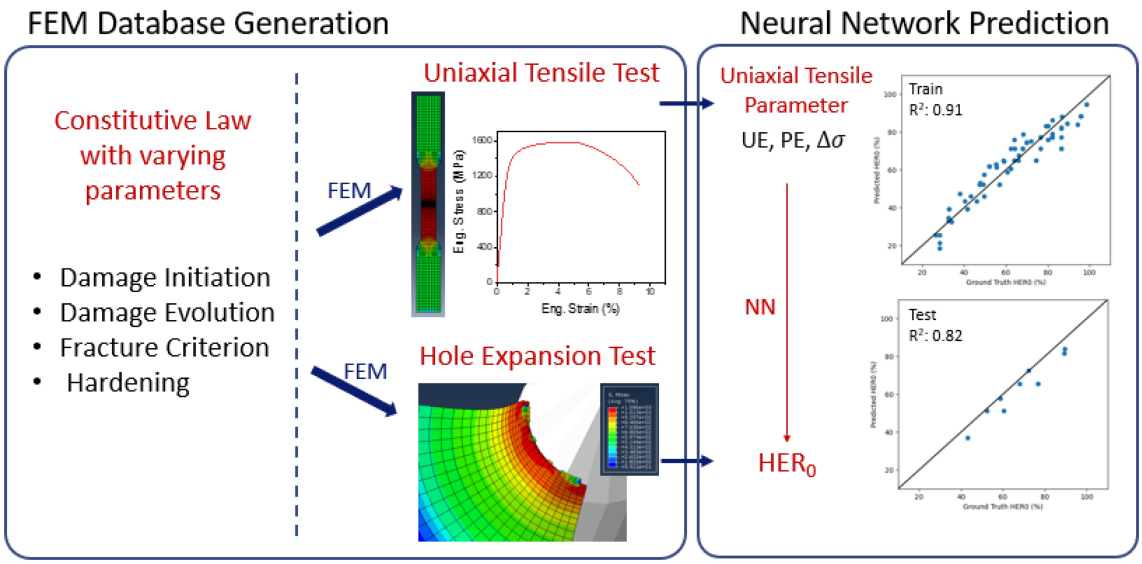
탄소 중립의 중요성이 대두되고 있는 현재, 철강 산업에서도 탄소량을 감소시키기 위해 수소환원제철 기술 기반의 전기로 사용 등 다양한 방법들이 제시되고 있다. 그중 가장 현실적인 방법 중 하나가 초고강도강 (Advanced High Strength Steel, AHSS)이다. 초고강도강은 일반 강보다 높은 강도와 연신율을 가지고 있어 더 적은 양의 철만을 사용할 수 있으므로 생산 시 배출되는 탄소량을 감소시킬 수 있다. 이뿐만 아니라 차체 경량화 소재로 사용되어 연비 감소의 효과를 가진다.

구멍확장비 (Hole Expansion Ratio, HER)란, 판재의 엣지부 성형성을 평가하기 위한 지표이다. 구멍확장비를 측정하기 위해 그림1과 같이 판재에 직경 1cm의 구멍을 가공하고, conical tip을 가진 펀치를 통해 구멍을 확장시킨다. 이때 두께 방향으로 크랙이 전파되었을 때의 확장된 직경과 초기 직경의 차이를 초기 직경으로 나눈 값을 HER이라고 한다. 특히 방전 가공 방법을 통해 초기 구멍을 가공하면 구멍 엣지부에 데미지가 발생하지 않아 재료 고유의 물성을 반영하는 HER을 얻을 수 있는데, 이를 HER_0라고 칭한다. [1]



초고강도강은 높은 강도와 연신율을 가짐에도 기존 강재에 비해 낮은 HER을 보이는 경우가 많다. 엣지부 성형은 자동차 샤시 등의 산업체에 쓰이기 위해 꼭 필요한 가공이므로 초고강도강의 HER을 개선하고 예측하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 일축 인장 실험과 같은 단순한 기계적 특성 시험으로부터 HER을 예측하고자 하는 연구들이 수행되고 있으며, 단순 회귀 분석뿐만 아니라 머신러닝 모델을 활용한 예측 연구도 활발히 이루어지고 있다.[2] 그러나 기존 연구들은 실험적 데이터만을 기반으로 머신러닝 모델을 학습하고 예측을 수행하므로, 데이터 부족으로 인해 모델의 일반화 능력이 제한될 가능성을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 유한요소법(FEM)을 통해 데이터를 생성함으로써 많은 양의 데이터에 대해 머신러닝 모델 학습 및 HER_0 예측을 수행하고자 한다.

2. Results and Discussion



본 연구의 파이프라인 및 결과는 그림 2와 같다. 데미지 모델을 고려한 구성방정식의 파라미터를 변화시키면서 일축 인장 시험 및 구멍확장실험 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 실제 강재의 거동과 유사하도록 파라메트릭 스터디를 진행하여 유효한 파라미터 범위를 설정하였다. HER_0 예측을 위해 다양한 다중 스케일 유한요소법이 제시되고 있으나[3], 문제의 단순화를 위해 거시적 스케일의 데미지 모델을 사용하였다. 거시적 스케일 모델도 충분히 실효성이 있음을 문헌을 통해 확인할 수 있다.[4] 일축 인장 계산 결과로부터 균일 연신율 (uniform elongation, UE), 균일 연신 이후의 연신율 (post elongation, PE) 등의 인장 물성을 구하고, 이러한 인장 물성과 구멍확장비를 한 세트의 데이터로 하여 머신러닝 모델을 학습하였다. 이때 실험적 데이터를 활용하여 HER_0를 대변하는 인장 물성을 제시한 선행 연구[1]의 내용에 기반하여 머신러닝 모델 학습 및 예측에 사용될 인장 물성을 선정하였다. 그림 2는 Johnson Cook damage initiation, linear damage evolution, swift hardening model을 구성방정식으로 하여 82개의 데이터를 생성하고, ridge regression 기법을 사용하여 인장 물성으로부터 HER_0을 예측한 결과이다. 굉장히 단순한 머신러닝 모델을 사용하였음에도 결정계수(r^2)가 0.8 이상으로 매우 높은 것을 확인하였다. 보다 정교하고 검증된 구성방정식을 사용해 더욱 넓은 범위를 포함하는 데이터를 사용하여 본 연구를 발전시키는 과정에 있다.

3. Conclusion

본 연구에서는 유한요소법을 통해 생성한 데이터를 바탕으로 머신러닝 모델을 학습시켜 일축 인장 물성으로부터 HER_0를 예측하였다. 일축 인장 물성 및 HER_0 데이터 생성에 유한요소법을 사용하였다는 데에서 독창성을 가지며, 이를 통해 일반화 역량이 우수한 HER_0 예측 모델이 개발되었다.

참고문헌(References) 1) W. Cho, J. Mater. Res. Technol-JMRT, 26, 837 (2023). 2) J. Lee, J. Mater. Sci., 58, 4780 (2023). 3) J. Jeong, Int. J. Mech. Sci., 284, 109719 (2024). 4) V. Barnwal, Int. J. Mech. Sci., 195, 106269 (2021).

[SS2-4 | 14:39]

Fe_2O_3-RE_2O_3 (RE = Dy, Er, Yb) 이원계 시스템의 상태도에 관한 연구: 이지원, 곽다희 (서울대학교 재료공학부), 정인호* (서울대학교 재료공학부, 서울대학교 신소재공동연구소)

Keywords: 희토류 원소, 상태도, 평형실험, 열분석, 열역학

1. 서론

화석 연료의 고갈에 따라 지속 가능한 발전이 대두되며 전기차, 신재생 에너지 산업의 규모가 급격히 성장하고 있다. 이에 따라 풍력 발전기 터빈, 태양광 패널 등에 활용되는 희토류 금속(rare earth metal)의 수요 또한 지속적으로 증가하는 추세다. 최근 철의 채광 과정에서 함께 채굴된 잔여물(residue)에 희토류 금속이 포함되어 있음이 알려지며 이를 산업 분야에 이용하기 위해 희토류 홑원소를 추출하는 제련 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1] 특히 화학야금공정(pyrometallurgical process)을 적용하는 경우 희토류 산화물(RE_2O_3), 철광석(Fe_2O_3) 등으로 이루어진 계의 상태도에 대한 열역학적 데이터가 필요하나 선행 연구가 충분히 이루어지지 않은 상황이다. 본 연구에서는 희토류 금속 디스프로슘(Dysprosium, Dy), 어븀(Erbium, Er), 이터븀(Ytterbium, Yb)의 산화물 RE_2O_3과 Fe_2O_3의 이원계 상태도를 실험적으로 측정하였다. 본 3개의 이원계 시스템에서 Fe2O3가 많은 영역의 상태도는 기존에 연구된 적이 없다. 본 연구에서는 1400 ºC 이상의 고온에서 각 2원계가 이루는 열역학적 평형 실험과 DTA 실험을 수행하였으며[2] 이를 통해서 열역학 데이터베이스를 구축하여, 궁극적으로는 희토류 금속의 효율적인 회수를 위한 공정 디자인을 목표로 하였다.

2. 실험방법

각 이원계 시스템에서 시료의 조성을 $70Fe_2O_3$-$30RE_2O_3$, $60Fe_2O_3$-$40RE_2O_3$의 2가지 몰비로 정하고 이에 해당하는 무게의 Fe_2O_3 (Alfa Aesar, 99.998 %), Dy_2O_3/Er_2O_3/Yb_2O_3 (Alfa Aesar, 99.99 %) 분말을 헥세인에 섞어서 혼합하였다. 혼합물을 70 ºC의 진공건조기에서 건조시켜 헥세인을 모두 날린 후 약 40~60 mg의 시료를 백금 도가니(Pt crucible; 내경 5mm, 길이 10mm의 Pt 튜브의 한쪽을 용접하여 제조)에 넣어 실험에 DTA 및 고온 평형 실험에 사용하였다. 특히 실험 중 공기와 평형을 이룰 수 있도록 대기 분위기에서 실험을 실시하였다.[2] 평형 실험에 앞서 각 이원계에서 상변화가 일어나는 온도를 분석하고자 $70Fe_2O_3$-$30RE_2O_3$ 시료에 대해 DTA (Differential Thermal Analysis)를 시행했다. DTA 결과를 바탕으로 각 이원계에 대해 $70Fe_2O_3$-$30RE_2O_3$ 시료는 1490 ºC에서 3 시간/1550 ºC에서 1 시간, $60Fe_2O_3$-$40RE_2O_3$ 시료는 1600 ºC에서 1 시간 열역학 평형 실험을 수행하였다. 또한 필요한 경우 추가로 $62.5Fe_2O_3$-$37.5RE_2O_3$ 시료 준비하여 평형 실험을 수행하기도 하였다. 평형 실험에서는 수직관상로 (vertical tube furnace)를 이용하였으며 평형에 도달한 후, 물에 급냉하여 시료를 얻었으며, 수득한 시료 중 일부는 EPMA[3] (Electron Probe Micro Analysis) 시편으로 만들어 미세구조를 분석하였다. 나머지 시료는 분쇄하여 XRD (X-Ray Diffraction) 시편으로 만들어 시료 내에 존재하는 상을 분석하였다. 각각의 분석에는 서울대학교 기초과학공동기기원의 전자현미분석기 (JXA-8530F)와 신소재공동연구소의 X-선 회절 분석기 (D8 Advanced, 2020, Multi-purpose)를 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1에는 본 실험의 결과를 통해서 작성된 Fe_2O_3-Dy_2O_3 이원계 상태도를 도시하였다. 대부분의 $REFeO_3$ 상에 대한 열용량(C_p)과 액상화 온도는 Paridaet et al.[4]과 Neilsen et al.[5]에 의해 보고된 바 있다. 특히 본 연구에서는 상태도 작성을 위해서 Neilsen et al.에 의해 측정된 $REFeO_3$ 상의 대략적 액상화 온도를 그대로 차용하였다.

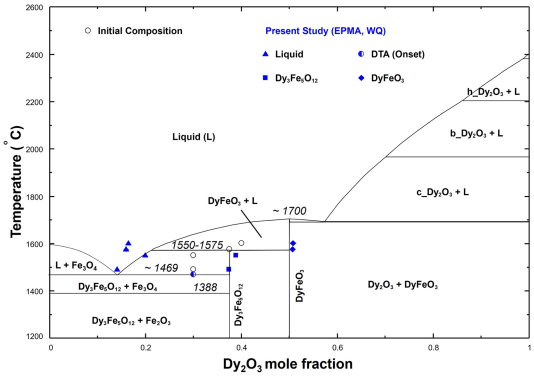
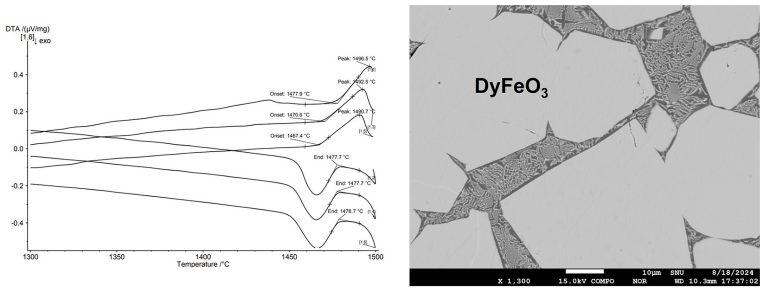


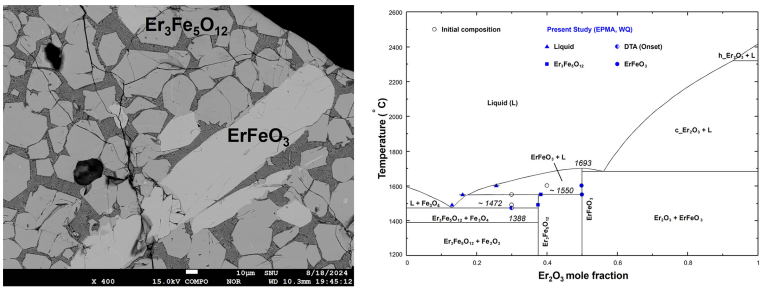
Fig. 1. 본 연구의 실험 결과 및 이를 통해서 작성된 Fe_2O_3-Dy_2O_3 이원계 상태도



(a) (b)

Fig. 2. 70Fe_2O_3-30Dy_2O_3 시료의 (a) DTA 분석 자료, (b) 1550 ºC에서 열처리 후 급냉한 미세조직 (EPMA BSE image)

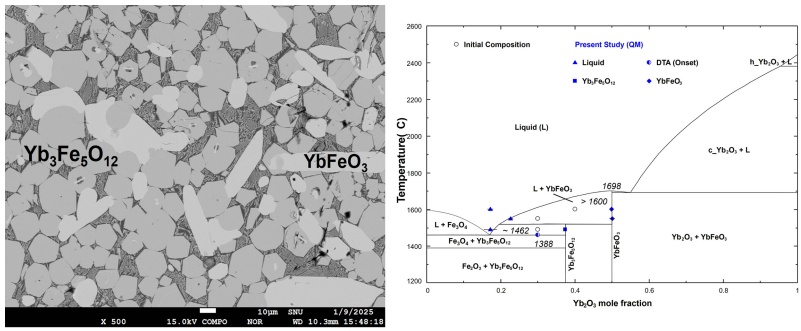
70Fe_2O_3-30Dy_2O_3 시료에 대해 얻은 DTA 곡선을 Fig 2(a) 에 나타냈다. DTA는 1200-1500 ºC 범위에서의 3회 heating/cooling cycle로부터 onset temperature의 평균값을 구한 결과 1469 ºC 부근에서 상변화가 일어남을 알 수 있었다. DTA에서 확인된 상변화 온도가 eutectic(공정) 온도임을 확인하기 위해서 분석 결과 동일한 조성 (70Fe_2O_3-30Dy_2O_3) 샘플을 1490 ºC와 1550 ºC에서 각각 평형 실험 후에 급냉된 시편의 조직을 EPMA로 분석하였다. Fig. 2(b)에 보듯이 시료에서는 eutectic 반응의 lamellar 구조 및 $Dy_3Fe_5O_{12}$ 고상을 명확히 관찰할 수 있었다. 이를 통해서 1469 ºC를 상변화 온도는 'L -> Fe_2O_3+$Dy_3Fe_5O_{12}$' eutectic 반응 온도에 해당하는 것을 판명할 수 있었다. 한편 60$Fe_{2222}O_3$-40Dy_2O_3 시료를 1600 ºC에서 평형실험을 한 결과 $DyFeO_3$와 lamellar 구조의 액상이 관찰되었다. 이는 $Dy_3Fe_5O_{12}$가 1550-1600 ºC에서 peritectic (포정) 반응을 통해서 액상화 됨을 의미한다. 보다 정확하게 peritectic 반응 온도를 알아보고자 $Dy_3Fe_5O_{12}$ 화합물의 조성비인 62.5Fe_2O_3-37.5Dy_2O_3 시료를 추가 제작하여 1575 ºC에서 1 시간 가열하여 평형을 조사했는데, X-선 회절 분석 결과 $DyFeO_3$ 단일 고상이 확인되었다. 이로부터 Fe_2O_3-Dy_2O_3 이원계의 peritectic 반응이 1550-1575 ºC 범위 내에서 일어남을 확인하였다. 본 연구에서 $Dy_3Fe_5O_{12}$와 $DyFeO_3$와 평형하는 액상의 조성을 정확히 알아보고자 하였다. 하지만 액상산화물의 점도가 너무 낮아서 수냉 중 이미 lamellar 구조를 만들면서 고상화가 진행되었고 이러한 lamella 구조의 영역을 EPMA beam size를 크게 하여 측정하였으나 liquidus line의 경향성을 따르지 않고 모두 eutectic 조성에 가깝게 나타났다. 이는 응고 중 짧은 시간 동안에도 추가 고상을 만들면서 모두 공정 조성화 된 것으로 이해할 수 있다. 동일한 실험 방법을 이용해서 Fe_2O_3-Er_2O_3와 Fe_2O_3-Yb_2O_3 이원계에 대해서도 상태도 실험을 실시하였다. 먼저 Fe_2O_3-Er_2O_3 이원계의 경우, DTA로부터 1472 ºC 부근에서 상변화가 일어난다는 결과를 얻어 Fe_2O_3-Dy_2O_3과 동일하게 3가지 온도에 대해 평형 실험을 시행했다.



(a) (b)

Fig. 3. (a) 70Fe_2O_3-30Er_2O_3 시료의 1550 ºC 평형 실험 후 미세조직 EPMA BSE image, (b) 본 연구 결과에 기반한 $Fe_{22}O_3$-Er_2O_3 이원계 상태도.

1490 ℃ 평형 실험으로부터 뚜렷한 lamellar 구조와 $Er_3Fe_5O_{12}$ 고상이 확인되었다. 특히 Fig. 3(a)의 BSE image에서 확인되는 것처럼 1550 ℃ 실험 시료의 XRD 및 미세조직 영상 분석 결과 $Er_3Fe_5O_{12}$와 $ErFeO_3$ 2가지 고상과 함께 lamellar 조직이 동시에 확인되었다. 이는 본 이원계의 peritectic 반응이 약 1550 ℃에서 일어남을 의미한다. 본 실험 결과를 바탕으로 작성된 Fe_2O_3-Er_2O_3 이원계 상태도를 그림 3(b)에 도시하였다. 특이한 점은 본 시스템의 상평형 실험에서는 Fig. 3(b)의 상태도에 도시한 바와 같이 고상과 평형하는 액상의 조성이 비교적 잘 측정되었다. 마지막으로 Fe_2O_3-Yb_2O_3 이원계의 경우 DTA를 통해 1462 ℃ 부근에서 상변화가 일어남을 확인하였다. 앞선 두 개의 이원계 시스템과 동일하게 1490 ℃, 1550 ℃, 1600 ℃에서 상평형 실험을 실시하였다. 1490 ℃ 실험으로부터 lamellar 구조와 $Yb_3Fe_5O_{12}$ 고상이 확인되었으나, 그 이상의 온도에서는 미세조직 영상으로부터 고상과 액상을 명확히 구분하는 데 어려움이 있었다. X-선 회절 분석 결과로는 1550 ℃, 1600 ℃ 두 실험 모두에서 $YbFeO_3$ 상이 확인되었다. 이로부터 해당 이원계의 peritectic 반응이 1490-1550 ℃ 범위 내에서 일어남을 알 수 있었고, 보다 정밀한 온도 추정을 위해 $Yb_3Fe_5O_{12}$ 화합물의 조성비인 $62.5Fe_{22}O_3$-$37.5Yb_2O_3$ 시료를 제작한 후, 두 온도의 평균값인 1520 ℃에서 1 시간 동안 가열하는 추가 실험을 진행했다. XRD 분석 및 미세조직 EPMA 영상 분석 결과 $Yb_3Fe_5O_{12}$와 $YbFeO_3$ 2가지 고상이 동시에 확인되어 해당 이원계의 peritectic 반응이 1520 ℃ 에서 일어남을 알 수 있었다. 이러한 실험결과를 바탕으로 Fig. 4(b)와 같은 Fe_2O_3-Yb_2O_3 이원계 상태도를 작성할 수 있었다.



(a) (b)

Fig. 4. (a) $62.5Fe_2O_3$-$37.5Yb_2O_3$ 시료의 1520 ℃ 평형 실험 미세조직 EPMA BSE image, (b) 본 연구 결과에 기반한 Fe_2O_3-Yb_2O_3 이원계 상태도.

4. 결론

본 연구에서는 Fe_2O_3-Dy_2O_3, Fe_2O_3-Er_2O_3와 Fe_2O_3-Yb_2O_3 3가지 이원계에 대한 air 분위기에서 상태도를 구축하기 위해서 Fe_2O_3가 많은 영역에서 DTA 실험과 열역학 평형실험을 실시하였고 실험후 샘플의 평형상을 XRD와 EPMA를 통해서 분석하였다. 이를 통해서 3가지 이원계 시스템에 대한 상태도를 최초로 보고하게 되었다. 본 연구 결과를 바탕으로 현재 각 이원계 시스템에 대한 열역학 모델링을 수행 중이며, 향후 Fe_2O_3-SiO_2-RE_2O_3 삼원계 시스템으로 확장하여 최종적으로는 희토류 원소를 추출하는 공정에 대한 설계에 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 또한 본 시스템의 상태도 연구 결과는 항공기 터빈 코팅 소재의 고온 부식 등의 연구에서도 활용 가능하다.

참고문헌(References) 1) Costis, S., Mueller, K. K., Coudert, L., Neculita, C. M., Reynier, N., & Blais, J.-F. (2021). Recovery potential of rare earth elements from mining and industrial residues: A review and cases studies. Journal of Geochemical Exploration, 221, 106699. 2) Lars Klemet Jakobsson, G. T., and In-Ho Jung. (2017). Experimental Investigation and Thermodynamic Modeling of the B2O3-FeO-Fe2O3-Nd2O3 System for Recycling of NdFeB Magnet Scrap. Metallurgical and Materials Transactions B, 48, 60-72. 3) Wittry, David B. (1958). "Electron Probe Microanalyzer", Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office 4) Paridaet al. (2008). Heat capacities, order–disorder transitions, and thermodynamic properties of rare-earth orthoferrites and rare-earth iron garnets 5) Neilsen et al. (1972). Crystal Growth and Phase Equilibrium Studies in the System (R.E.)2O3-Fe2O3

[SS2-5 | 14:52]

In-situ 모니터링 기술 기반의 Fine Feature 기능이 부여된 재료 압축 적층제조 기술을 적용한 pure copper의 제조와 기계적 및 열/전기전도 특성 향상: 이나윤, 박소연 (인하대학교), 백소령 (Markforged), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Metal material additive manufacturing, Fine feature, Pure copper, Tensile properties, Thermal conductivity, Electrical conductivity

구리는 우수한 부식저항성, 전기전도도, 열전도도 및 가공성으로 인해 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 특히, 고사양 부품 수요의 증가에 따라 Additive Manufacturing (AM)을 이용한 복잡한 형상의 구리 부품 제조가 활발히 연구되고 있다 [1,2]. 그러나 기존 전통적 가공 공정은 형상 구현의 한계가 있으며, 절삭 가공 시 재료 손실이 크다는 단점이 존재한다. 이를 해결하기 위해 AM 기술이 주목받고 있지만, 구리는 레이저 흡수율이 낮아 레이저 기반 AM (LPBF, DED 등) 적용에 어려움이 있다 [3,4]. 이에 따라 소결 기반 AM 기술이 대안으로 검토되고 있으며, 특히 금속 재료 압출 적층 공정(Metal-Material Extrusion Additive Manufacturing, M-MEX)이 주목받고 있다. M-MEX 공정은 금속 분말과 폴리머를 혼합한 필라멘트 또는 펠렛을 압출하여 적층한 후 탈지 및 소결 과정을 통해 최종 금속 부품을 제조하는 방식이다 [5]. 기존 MEX 기술은 printing void와 같은 조대한 결함을

내부에 형성하며, 이러한 결함은 hot isostatic pressing 이후에도 완전히 제거되기 어렵다. 최근 Markforged 사는 층간 간격을 기존 0.129 mm에서 0.085 mm로 감소시키면서 동시에 in-situ 모니터링 software를 도입하여 내부 결함을 최소화하고 부품 형상의 정밀도를 향상하는 fine feature (FF) 기능을 개발하였다 [6]. 본 연구에서는 기존 MEX 공정과 FF MEX 공정으로 제조된 구리 부품을 비교하여 미세조직 및 물성을 평가하였으며, 이 기능을 적용한 부품의 기계적 특성 및 열/전기전도 향상 효과에 대하여 공정 특징 및 미세조직 변화와 연계하여 해석하고자 하였다. 미세조직 분석의 경우 optical microscopy (OM), field emission scanning electron microscopy, electron backscattered diffraction (EBSD) 등을 사용하였다. 인장 시험은 Instron 8501 장비를 이용하여 ASTM E8M 규격의 판상 시편을 1×10^{-3}/s initial strain rate 조건으로 부여하여 수행하였다. 상온 전기 전도도는 ZEM-3M8 장비를 이용하여 60 kHz 주파수 대역에서 ASTM E1004 방법으로 측정하였고, 상온 열전도도는 LFA 467 HyperFlash 장비를 이용하여 구하였다. 제조된 시편들의 밀도 측정 결과, 기존 공정으로 제조된 M-MEX 구리(이하 normal)의 상대밀도는 96.2% 수준을 보였고, FF 시편은 99.3% 수준의 향상된 밀도를 나타내었으며, FF 적용 이 후 층간 결함이 크게 개선되었다 (그림 1). 결정립 크기를 측정한 결과 normal 시편의 경우 평균 86.01 μm에서 FF 기능 적용 후 평균 56.33 μm의 입도로 미세화되었으며, 이는 층의 층간 간격 감소에 대한 효과로 사료된다 (그림 2). 인장 시험 결과, normal의 경우 평균 74.79 MPa의 항복 강도와 평균 200.16 MPa의 인장 강도를 보였으며 연신율은 55.48% 값을 나타냈다. FF 시편은 평균 138.31 MPa 항복 강도와 평균 268.22 MPa 인장 강도 수준으로 normal에 비해 큰 강도 향상 효과를 나타냈으며, 연신율은 48.64% 으로 강도 향상 효과 대비 건전한 연신율을 유지하였다 (그림 3). 전기 전도도[MS/m]는 Normal 시편의 경우 측정 면에 따라 43.85(WD), 50.52(BD)이며, FF의 경우 45.59(WD), 46.98(BD)로 측정되었다. 열전도도[W/mK]의 경우, Normal 시편은 면별로 317.87(BD), 338.65(WD)으로, 그리고 FF는 349.64(BD), 349.69(WD)로 확인되었다. Normal 시편의 경우 전기전도도와 열전도도 모두 면별 이방성이 확인되었으며, FF 적용 후 이방성의 개선 및 평균 열/전기전도 특성의 향상이 이루어졌다. 상기 결과들을 바탕으로, M-MEX 공정에서 FF 기능 적용에 따른 기계적 특성과 열/전기적 물성 향상 효과에 대하여 공정 특징 및 미세조직과 연계하여 고찰하고자 하였으며, M-MEX 공정 기술의 개발 방안에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

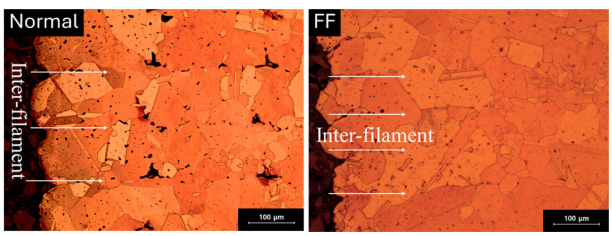


Fig. 1. Initial microstructures (OM images)

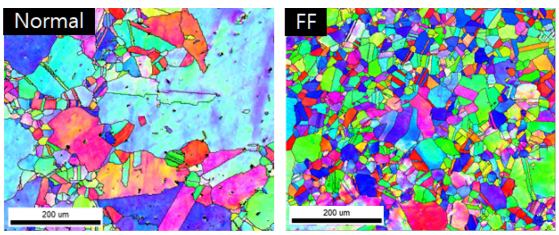


Fig. 2. Initial microstructures (EBSD images)

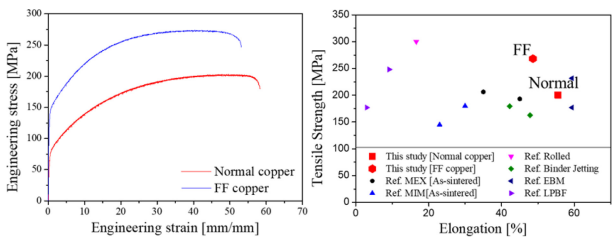


Fig. 3. Tensile test results and comparison our results with other processed pure coppers.

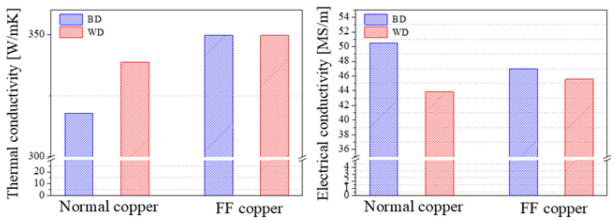


Fig. 4. Thermal conductivities and electrical conductivities of MEX coppers

참고문헌 (reference) [1] Q. Jiang, Coatings 11, 740 (2021). [2] K. S. Prakash, Mater. Today: Proc. 5, 3873–3882 (2018). [3] F. Trevisan, Res. Gate 25, 987 (2017). [4] X. Yan, Mater. Sci. Eng. 789, 139615 (2020). [5] H. Ramazani, Prog. Addit. Manuf. 7, 609–626 (2022). [6] Markforged, Introducing Fine Features for Pure Copper on the Metal X, https://markforged.com/ko/resources/blog/introducing-fine-features-for-pure-copper-on-the-metal-x

[SS2-6 | 15:105]

Co22.2Cr6.2Fe48.8Ni17.8Cu5.0 저열팽창 고엔트로피합금의 열처리 온도에 따른 물성변화 연구: 이우영 (국민대학교), 최문수 (단국대학교), 이정완, 김형섭 (포항공과대학교), 최현주 (국민대학교), 주수현* (단국대학교)

Keywords: high-entropy alloy, cryogenic property, coefficient of thermal expansion, tensile test, magnetic property

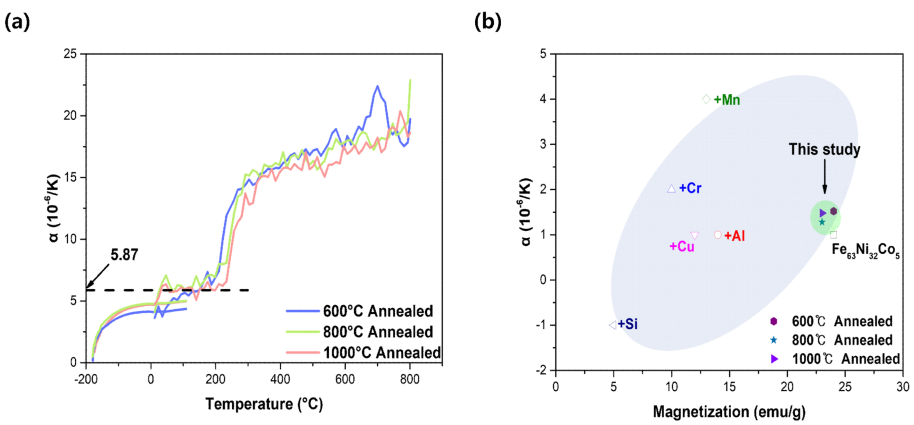
고엔트로피 합금(high-entropy alloys, HEAs)은 다중 주 원소 개념을 특징으로 하며, 전통적인 합금보다 우수한 특성들로 인해 큰 관심을 받고 있다. HEAs의 중요 특징이라면 높은 구성 엔트로피로 인해 단일상 고용체를 형성하며, 초극저온 및 초고온의 극한 환경에서도 뛰어난 기계적 성질을 얻을 수 있다는 장점을 보여준다. 최근에는 저열팽창계수를 보이는 고엔트로피 합금에 대한 관심이 대두되고 있는데, 여러 가지 구성성분에도 불구하고 Invar 합금에 준하는 낮은 열팽창계수를 보인다고 알려졌다. 하지만, 저열팽창계수를 지니는 HEAs에 대한 체계적인 연구는 상당히 부족한 상황이기 때문에, 본 연구에서는 저열팽창계수를 보이는 것으로 알려진 $Co_{22.2}Cr_{6.2}Fe_{48.8}Ni_{17.8}Cu_{5.0}$ HEAs [1]를 열처리 온도를 다르게 함으로써 발생하는 경도 및 초기미세구조의 변화, 변형거동, 열팽창계수와 자성특성 사이의 상관관계에 대해 연구하였다. 경각주조 후 균질화 열처리된 시편을 50%의 압하율로 냉간압연 하였고, 이후 600 ºC, 700 ºC, 800 ºC, 900 ºC 그리고 1000 ºC에서 열처리하여 온도별로 나타나는 경도 변화와 EBSD 분석을 통해 재결정 거동을 살펴보았으며, 77 K에서의 인장특성을 관찰하였다. 또한, 자성특성이 열팽창계수에 주는 영향을 분석함으로써 저열팽창계수를 지니는 고엔트로피합금의 미세조직을 최적화하는 조건을 제시하고자 한다.

	600 ºC Annealed	800 ºC Annealed	1000 ºC Annealed
YS (MPa)	743 ± 33	519 ± 32	414 ± 10
UTS (MPa)	889 ± 16	823 ± 3	735 ± 10
Recrystallized fraction (%)	13	48	99

경도분석을 통해 600 ºC, 800 ºC, 1000 ºC에서 각각 회복 및 재결정 시작, 부분재결정, 완전재결정이 일어남을 예측하였고, 이를 KAM(Kernel Average Misorientation) 맵을 통해 확인 할 수 있었다. 참고한 문헌에서 알려진 바와 같이 해당 HEA는 열처리 온도 범위에서 모두 FCC 단상 XRD 회절패턴 결과를 보여주었다. 77 K 인장실험 결과 항복강도와 최대인장강도는 일반적인 합금에서의 결과와 같이 열처리 온도가 증가함에 따라 감소하였다 (표 1). 그러나 600 ºC 인장 그래프의 형상이 다른 두 시편에 비해 특이한 점을 보이고, 연신율이 800 ºC 열처리 시편 보다 600 ºC에서 높게 측정이 되었다. 600 ºC의 높은 연신율은 다른 두 조건과 비교하였을 때 TRIP(Transformation Induced Plasticity)이 미치는 영향이 높아 발생한 현상이라 판단된다. 600 ºC 시편의 EBSD phase map과 인장 후 시편의 XRD 결과를 통해 많은 양의 BCC(BCT)구조의 마르텐사이트 변태가 진행되었음을 확인하였고, 이를 토대로 TRIP의 영향이 다른 두 시편보다 높아 연신율의 향상에 기여하였다고 판단하였다 (표 2).

	600 ºC Annealed	800 ºC Annealed	1000 ºC Annealed
FCC fraction (%)	54.6	99.6	99.4
BCC fraction (%)	45.4	0.4	0.6

세 조건 모두 연성과 취성파단면이 동시에 관찰이 되는데, 800 ºC의 취성파단면은 다른 두 조건과 다르게 크랙의 주요 원인이 되는 cleavage형상의 파단면이 관찰이 되었다. 800 ºC 시편의 낮은 연신율은 미미한 TRIP 강화 효과 및 cleavage 형상의 파면의 생성에 따라, 다른 두 조건보다 크랙의 전파속도가 빠르기 때문으로 유추된다 [2].



열팽창 계수(CTE) 측정 결과, 600 ºC 열처리 시편이 가장 낮은 열팽창 계수를 극저온에서 100 ºC 까지 보여주었다(그림 1a). 비슷한 합금 조성의 다른 저열팽창 HEAs의 문헌에서 얻는 magnetization 값과 열팽창계수를 이번 실험 결과와 비교해보았다 (그림

1b). Magnetization이 증가할수록 합금원소의 변화에 따라 높은 열팽창계수가 보이는 경향은 있지만, 뚜렷한 경향을 찾기는 어려웠다. Invar 특성을 보이는 합금들의 저열팽창 특성은 자성특성에 의한 자기수축, 재료 고유의 열적 팽창 등 다양한 인자들에 영향을 받으며 아직까지 정확한 메커니즘이 규명되지 않았다. 따라서 새로운 저열팽창·고강도 HEAs를 개발하기 위해서는 보다 더 체계적인 연구와 데이터 확보가 필요한 시점으로 판단된다.

참고문헌(References) 1) Ziyuan Rao et al., "Machine learning–enabled high-entropy alloy discovery," Science 378 (6615), 78 (2022). 2) Wei Wang et al., "Temperature Dependence of Tensile Behaviors of Nitrogen-Alloyed Austenitic Stainless Steels," J. of Materi Eng and Perform 19 (8), 1214 (2010).

[SS2-7 | 15:18]

소재 빅데이터 기반 고속 스크리닝을 통한 알루미늄 신합금 개발: 전서연, 박수원 (국민대학교), 조아연, 김용주 (고려대학교), 김세훈 (한국자동차연구원), 최현주* (국민대학교)

Keywords: Al-Cu 합금, 석출 강화, 열처리, 미세구조, 기계적 성질

1. Introduction

알루미늄 합금은 높은 비강도, 우수한 부식 저항성, 그리고 뛰어난 열 및 전기 전도성으로 인해 자동차, 항공우주, 건축 등 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다[1]. 특히, 석출 경화를 통해 높은 비강도를 구현할 수 있는 Al-Cu, Al-Si-Mg, Al-Zn-Mg 등의 열처리형 합금은 경량 구조 소재로서 중요한 역할을 해왔다. 그러나 상용 합금들은 장기간 열에 노출될 경우 석출물의 불안정성이 발생하여 기계적 특성이 저하되는 한계를 가진다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 강화 효율이 우수하면서도 높은 안정성을 지닌 새로운 석출 강화상의 개발이 필요하다. 기존의 합금 설계 방식은 주로 경험적 시행착오에 의존하므로 많은 비용과 시간이 소요되는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 해외 소재 화합물 빅데이터에 고속 스크리닝 방법론을 적용하여, 알루미늄 기지 내에서 형성될 수 있는 고강도·고안정성 석출물을 탐색하였다. 특히, 열역학 데이터베이스를 통한 예측과 본 연구에서 개발한 알고리즘 비교하여 정확도를 제고하고, 이를 실험적으로 검증하여 기존에 알루미늄 합금에서 보고된 바 없는 새로운 석출물을 도출하였다.

2. Experimental

Open Quantum Materials Database(OQMD) 데이터를 활용하여 총 1,176,681 개의 2원계, 3원계, 4원계 화합물 데이터를 구축하였다. 이 데이터셋을 이용하여 열역학적 평형, 안정성 및 격자 정합성을 평가하였다. 그 결과, Al_5Cu_2La, Al_5Cu_2Sr 석출상이 우수한 열역학적 안정성과 최소한의 격자 불일치를 보여 산업적 공정에 적합성을 지닌 최적의 후보로 선정되었다. 따라서, 본 연구에서는 3원계(Al-Cu-La) 석출물을 실증 실험으로 유도하고자 하였다. Al-Cu 합금에 란타넘(La)과 스트론튬(Sr)을 첨가하여 압출재를 제작하고, 이후 550 ºC에서 2시간동안 용체화 처리를 진행한 후, 수냉하였다. 석출물 유도를 위해 77, 180, 300 ºC에서 0-20시간동안 인공 시효 처리를 시행한 후, 다시 수냉하였다. 시효 처리 온도 조건을 설정하고, 석출물 여부를 확인하기 위해 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimeter, DSC)를 활용하였으며, 미세구조와 상 분석을 위해 주사전자현미경(Scanning Eletron Microscope, SEM), 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM), X선 회절분석(X-Ray Diffraction, XRD)을 활용하였다. 비커스 경도 시험과 전기전도도 측정을 통해 열처리 조건에 따른 기계적 특성을 분석하였다.

3. Results

그림 1(a)는 DSC 분석 결과를 나타낸다. 용체화처리(Solution Heat Treatment, SHT)만 진행한 시편에서는 약 255ºC에서 θ' 석출상이 형성됨을 확인할 수 있다. 반면, 인공 시효처리(Aging Treatment)를 진행한 경우 θ' 석출 피크가 약 361ºC로 이동하는 경향을 보였다. 이는 시효 처리 후 석출상이 더욱 안정화되었으며, 격자 내 구조적 변화가 발생했음을 시사한다. 특히, 시효 시간이 증가함에 따라 열적 거동에 미치는 영향이 달라지는 것으로 분석되며, 이에 대한 구체적인 결정구조 변화는 추가적인 미세구조 분석을 통해 확인할 필요가 있다. 그림 1(b)는 XRD 결과를 보여주며, HighScore 프로그램을 활용하여 각 회절 피크를 정밀하게 라벨링하였다. 그 결과, 용체화 처리 후 인공 시효가 진행됨에 따라 Al, Al_2Cu, $Al_{6.5}Cu_{6.5}La_1$ 등의 상이 검출되었다. 특히, Al_2Cu와 $Al_{6.5}Cu_{6.5}La1$ 상의 존재는 합금 내에서 3원계(Al-Cu-La) 금속간화합물이 형성될 가능성을 의미하며, 3원계 상이 합금의 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 주요 인자로 작용할 가능성을 시사한다.

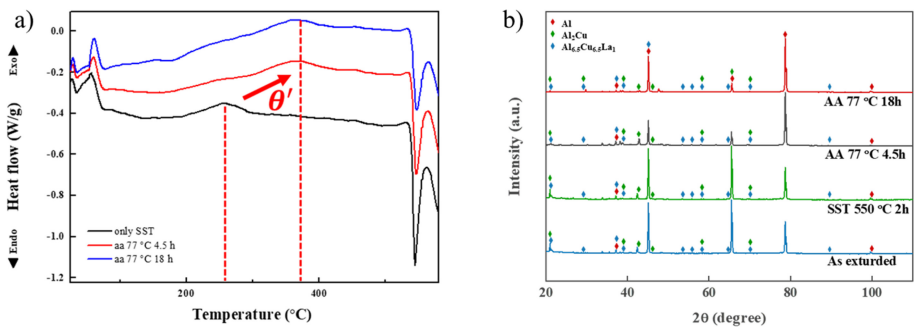


Fig. 1. Al-Cu-La 합금의 용체화처리 및 시효처리 비교 a) DSC, b) XRD

보다 정밀한 미세조직의 분석을 위해 SEM(그림 2 a)과 TEM(그림 2 b)를 활용하였다. 그림 2(a)는 SEM 및 EDS 원소 매핑 분석 결과를 나타내며, Al_2Cu 공정상(eutectic phase) 위에 3원계 상이 형성된 것으로 보인다. 특히, 용체화 처리만 진행한 경우보다 인공 시효 후 3원계 상이 조대화된 경향을 보였다. 이는 시효 과정에서 원소 확산 및 응집이 촉진되었음을 시사하며, 상의 형성과 성장 메커니즘을 보다 정밀하게 분석할 필요가 있다. 그림 2(b)는 TEM 분석을 통한 결정구조 평가 결과를 보여준다. 밝은 영역에서는 3원계 상의 존재가 확인되었으며, 고분해능 FFT(Fast Fourier Transform) 패턴 분석을 수행한 결과, 해당 상이 $Al_{4.45}Cu_{9.56}La$로 확인되었다. 그러나 XRD 분석 결과와의 차이가 존재하여, 보다 정밀한 구조 분석을 위해 고분해능 투과전자현미경 기반 EELS 분석을 추가적으로 수행할 예정이다. 이러한 차이는 상의 형성 조건 및 열처리 변수에 따른 결정구조 변화와 관련이 있을 것으로 예상되며, 향후 연구에서는 결정립 내부 및 계면에서의 원자 배열 특성을 심층적으로 분석할 필요가 있다.

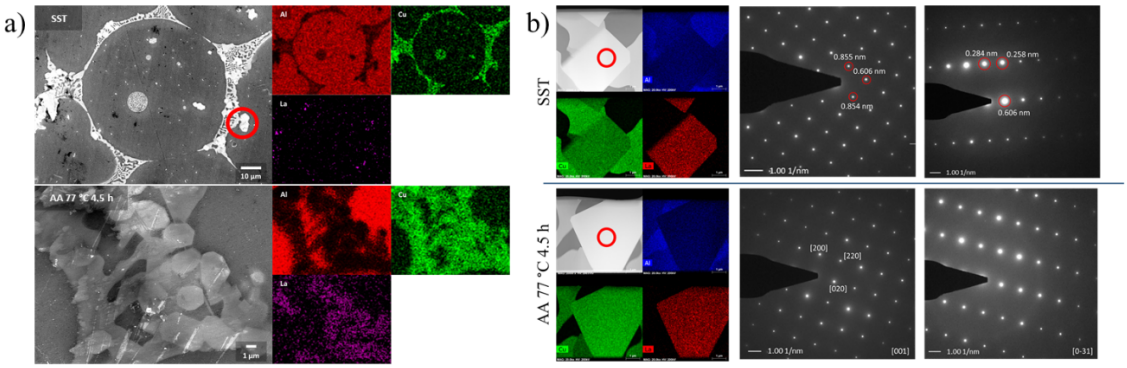


Fig. 2. Al-Cu-La 합금의 용체화처리 및 시효처리 비교 a) SEM, b) TEM

본 연구에서는 빅데이터 기반 인공지능 고속 스크리닝 기법을 활용해 강화효율이 우수하면서 고온에서 안정적인 석출물을 탐색하였으며, 새로운 $Al_{4.45}Cu_{9.56}La$ 상의 형성을 실험적으로 확인하였다. 이는 데이터 기반 인공지능 설계가 기존 합금 DB의 내삽형 최적화를 뛰어 넘어 외삽형 신합금 설계에도 적용될 수 있음을 시사한다.

참고문헌(References) 1) S.S. Li, X. Yue, Q.Y. Li, H.L. Peng, B.X. Dong, T.S. Liu, H.Y. Yang, J. Fan, S.L. Shu, F. Qiu, Q.C. Jiang, JMR&T. 27(2023) 944-983. 2) X. Dong, S. Yang, N. Li, H. Zhong, X.Y. Wang, H. Dong, Mater Charact 217 (2024) 114454. 3) Q. Zheng, J. Wu, H. Jiang, L. Zhang, J. Zhao, J. He,Corros Sci 179 (2021) 109113 4) D. Yao, Z. Bai, F. Qiu, Y. Li, Q. Jiang, J Alloys Compd 540 (2012) 154–158. 5) Z.X. Song, Y.D. Li, W.J. Liu, H.K. Yang, Y.J. Cao, G.L. Bi, , Metals (Basel) 11 (2021).

SS3 : 학생세션
Room 삼다A, 4월 23일

[SS3-1 | 15:40]
EAF 형 수 모델을 활용한 저취 모사 시, 균일 혼합시간에 따른 교반 에너지 도출: 박지현, 김선중* (조선대학교)
Keywords: Electric arc furnace, Bottom blowing, Water model, Stirring energy, Particle image velocimetry

1 Introduction

2050 탄소중립 실현을 위해 철강 산업에서는 전기로 조강 생산량 확대를 통한 이산화탄소 감축을 목표로 하고 있다.[1] 전기로 공정은 스크랩 활용 조업 특성상 전극봉 주변의 국부적 용융으로 인해 용강 내 온도 및 조성의 불균일을 초래한다는 단점이 있다. 저취 기술(Bottom blowing)은 유체의 흐름을 촉진하고 야금학적인 반응을 가속화하여 전기로의 교반력을 향상시킬 수 있다.[2] 따라서 본 연구에서는 저취 기술이 전기로 내 용강 교반에 미치는 영향을 확인하기 위해 PIV 방법을 활용하여 전기로 형 수 모델 내의 유체 흐름을 관찰하였으며, 가스 유량 및 물 높이 조건에 따른 균일 혼합시간을 측정하였다. 또한, 균일 혼합시간 결과를 토대로 교반 에너지와의 관계식을 도출하여 혼합시간의 측정값과 계산값의 유사성을 파악하였다.

2. Experimental method

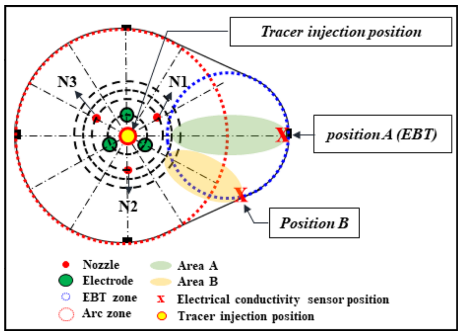


Fig. 1. 균일 혼합시간 측정 및 유동 관찰을 위한 실험 장치 모식도

140톤 EAF의 1/8 규모로 설계된 편심 형태의 수 모델의 수력 직경을 활용해 Froude number 도출하여 실 공정과 수 모델 간의 동적 유사성을 확인하였다. 수 모델 및 외부 수조에 물을 채운 후, Ar 가스를 수 모델 하부에 주입하였다. 유동의 영향이 적은 dead zone에 전기전도도 센서를 설치한 후 수 모델 중심의 상부에서 KCl 포화 수용액을 주입하였다. 혼합 비율이 95%에 도달했을 때를 완전한 혼합으로 가정하여 균일혼합시간을 도출하였다. PIV(Particle image velocimetry) 방법을 통해 카메라 설정을 1초당 15 frame으로 하여 10초 동안 총 150장의 유동 data를 도출하여 유동 변화를 관찰하였다.

3. Results

균일 혼합시간 측정 결과, Fig. 2와 같이 물 높이 조건이 동일할 때 특정 가스 유량 조건에서 국부적 최솟값을 지니고 이후 가스 유량이 증가하면 다시 증가하는 형태로 나타났다. 또한, 물 높이가 증가함에 따라 균일 혼합시간의 국부적 최솟값을 갖는 가스 유량은 감소하였다. 유동 변화 관찰 시, Eccentric Bottom Tapping(EBT) 영역에서 large eddy가 형성되어 특정 위치에서 머무르는 것을 확인하였다. large eddy의 위치는 가스 유량에 따라 변화하였으며, 물 높이가 증가할수록 그 위치가 벽에 가까이 이동하였다.

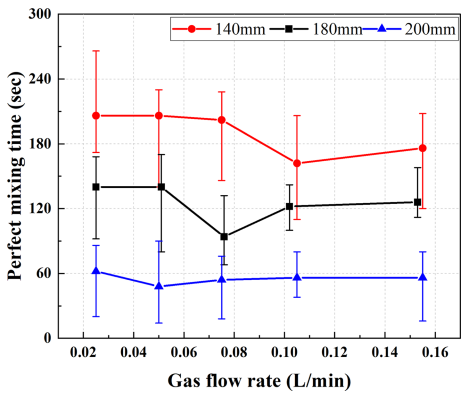


Fig. 2. 가스 유량 및 물 높이에 따른 균일 혼합시간의 변화

4. Discussion

Large eddy의 위치와 균일 혼합시간 결과를 비교했을 때, 균일 혼합시간의 국부적 최솟값을 갖는 가스 유량 조건에서 large eddy가 벽에 가까이 위치함을 통해 유체의 힘이 노즐로부터 더 멀리 전달되어 균일 혼합시간이 감소함을 확인하였다. 따라서 large eddy의 위치가 유체의 교반에 영향을 미치며 large eddy의 위치 변수를 고려할 필요가 있다. large eddy의 위치 변수는 수 모델의 EBT 영역부터 Arc 영역의 범위에서 large eddy가 이동한 수평 길이에 대한 비율로 나타내어 교반 에너지 관계식을 도출하였다.

5. Conclusions

본 연구에서는 전기로 형 수 모델을 활용하여 가스 유량 및 물 높이 조건에 따른 균일 혼합시간을 측정하고, 유동 관찰을 통해 bottom blowing 기술이 유체 교반에 미치는 영향을 파악하였다. EBT 영역에서 형성되는 large eddy의 위치가 균일 혼합시간의 국부적 최솟값을 갖는 가스 유량 조건에서 벽에 가장 가까이 위치함을 통해 large eddy의 위치가 유체 교반에 영향을 미친다는 것을 파악하였으며, large eddy 위치를 고려하여 stirring energy 관계식을 도출했을 때 계산된 혼합시간이 측정값과 유사한 값으로 모사됨을 확인하였다.

참고문헌(References) 1) 김한웅, 류광남, 엄지용, 이한주, 정다운(KAIST), Sha Yu, Haewon McJeon(PNNL), 김근하, 김주진(기후솔루션). “2050 탄소중립을 위한 한국 철강 부문의 탄소중립 경로”. (2022) 2) Wei, G., Zhu, R., Dong, K.A.I., Ma, G., and Cheng, T., "Research and Analysis on the Physical and Chemical Properties of Molten Bath with Bottom-Blowing in EAF Steelmaking Process," Metall. Mater. Trans. B, 47, 3066–3079 (2016).

[SS3-2 | 15:53]

재료 압출 적층 제조 기술을 이용한 신 SUS316L foam 소재의 제조, 압축 기계적 특성 및 물질 유동 특성: 송노건, 박소연 (인하대학교), 윤중열 (한국재료연구원), 김주용 ((주)리프로텍), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Material extrusion additive manufacturing, 316L Stainless steel, Foam, Compressive property, Gas flowability.

316L 스테인리스강은 우수한 생체 적합성, 내식성 및 기계적 특성으로 인해 의료 및 필터링 산업에서 널리 사용되고 있다 [1-3]. 특히 의료용 임플란트 및 필터는 높은 비표면적과 기계적 물성 조정이 필요하여 다공성 구조를 갖는 foam 형태로 제조될 수 있다 [2-4]. Foam은 무작위 다공성 구조를 가지며 경량성과 비표면적 증가의 장점을 가진다. 또한 상대 밀도 조절을 통해 기계적 특성(강도, 연신율, 강성 등)과 충격·진동 흡수 성능을 조정할 수 있어 다양한 분야에 적용 가능하다 [5]. 기존 금속 폼 제조법인 소결법과 발포법은 판재나 봉재 형태로 제공된 후 절단하여 부품을 제작하는 방식이 일반적이다 [3,4]. 하지만 복잡한 형상의 foam 부품 수요 증가로 인해 정전 분무법 및 금속 사출 성형(MIM) 등의 공정이 제시된 바 있으나 이러한 공정들은 공정 가격의 상승, 금형 제작의 필요 등으로 인해 제작 비용을 상승시킨다 [6]. 이를 극복하기 위해 적층 제조(Additive Manufacturing, AM)를 활용한 foam 제조 연구가 최근 진행되고 있다. 다양한 금속 적층 제조 기술들 중 특히, Material Extrusion additive manufacturing (MEX)를 적용할 경우 다양한 방식으로 foam의 기공 구조 및 물성을 제어할 수 있을 것으로 판단된다. 피드스톡의 금속 분말 입자 크기 및 탈지·소결 조건을 조정하여 상대 밀도(소결 밀도)를 제어 할 수 있으며 더 나아가 part의 정밀한 형상 설계가 가능하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 MEX 공정을 이용하여 SUS 316L foam을 제조하였으며, 이때 평균 입도가 다른 금속 분말이 첨가된 피드스톡을 활용하여 foam의 상대 밀도 및 물성을 제어하고자 하였다. 50 μm 및 8 μm 입도의 316L 스테인리스강 분말을 이용하여 금속-폴리머 복합 필라멘트를 제조하고, MEX 공정을 통해 그린 파트를 출력하였다. 이후 탈지 및 1050ºC에서 3시간 소결을 진행하여 판형 부품을 제작하였다. 평균입도 50 μm 분말을 사용한 시편을 “50 Foam”, 8 μm 분말을 사용한 시편을 “8 Foam”으로 명명하였다. 제조된 Foam의 미세구조 분석은 OM, SEM, EBSD를 이용하였으며, 0.001/s의 initial strain rate로 상온 압축 시험을 수행하였다. 또한 open pore 구조가 물질의 flowability에 미치는 영향을 분석하기 위해 가스 투과성을 측정하였다. 연구 결과, 50 Foam은 24.21%의 기공율과 19.87 μm의 평균 기공 크기를 가지며, open pore 네트워크가 형성되어 높은 가스 투과성을 나타냈다. 반면, 8 Foam은 기공율이 10.02%로 낮고 평균 기공 크기가 7.54 μm로 작아 폐쇄형 기공 구조를 이루었다. 소결 분석 결과, 50 Foam은 소결 초기 단계에서 좁은 소결목을 형성하는 특징을 보였으며, 8 Foam은 소결 후기 단계에서 두꺼운 소결목이 형성되며 결정립 성장 차이가 뚜렷하게 나타났다. 기계적 성능 평가 결과, 50 Foam은 yield strength 82.10 MPa와 26.69%의 densification strain을 기록하며 open pore 구조로 인해 높은 변형 흡수율을 보였다. 반면, 8 Foam은 140.12 MPa의 높은 항복 강도와 5.07%의 낮은 densification strain을 기록하며 미세한 결정립 구조와 폐쇄형 기공 구조로 인해 강도 증가 효과를 나타냈다. 특히, MEX 공정을 통해 제조된 SUS316L Foam이 BJAM(Binder Jetting Additive Manufacturing), SLS(Selective Laser Sintering), PM(Powder Metallurgy) 공정을 통해 제조된 SUS316L Foam보다 비강도(Strength-to-Weight Ratio)가 높은 것으로 확인되었다 (Fig. 1(b)). EBSD 분석을 통해 압축 전과 후 미세구조 변화를 확인한 결과, 50 Foam에서는 기공 붕괴 및 입자 간 충돌이 주요 변형 및 강화 메커니즘으로 작용하였으며, 8 Foam에서는 미세한 결정립 구조로 인해 전위 이동이 방해되면서 가공 경화 효과가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2). 상기 결과와 함께, MEX 공정으로 제조된 316L 스테인리스강 foam의 미세조직 및 다공성 구조를 분석하고, 가스 투과성과 압축 변형 거동을 평가하였으며, 이를 바탕으로 금속 foam 제조 기술로써 MEX 공정의 적용 가능성과 그 적용 분야에 대하여 탐색하고자 하였다.

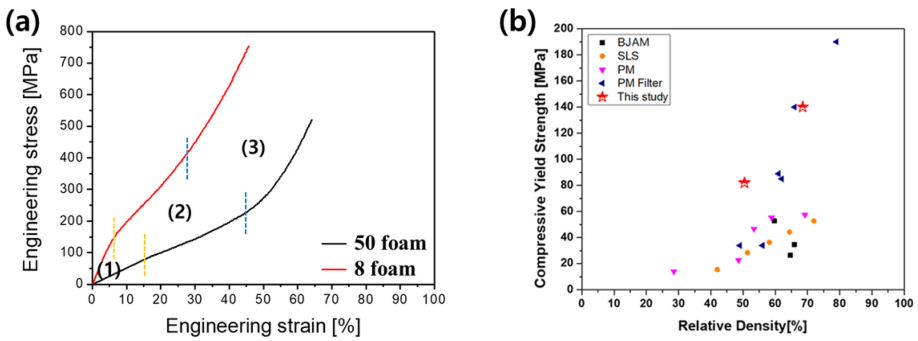


Fig. 1. (a) Compressive stress-strain curves and (b) Comparison of yield strength versus relative density with SUS316L porous materials manufactured by other processes.

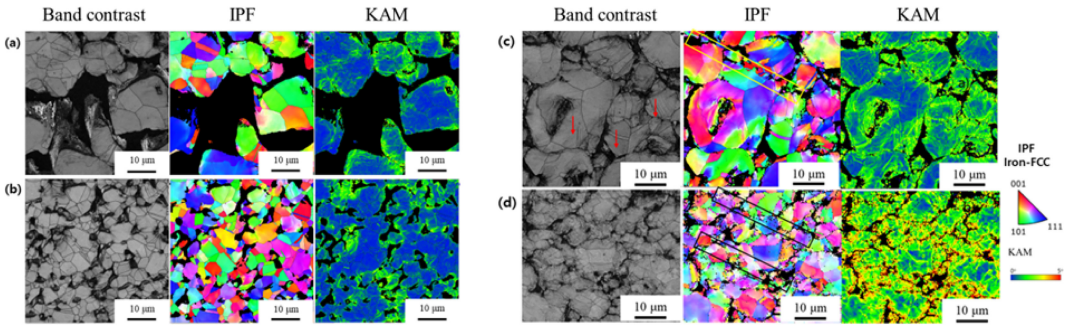


Fig. 2. EBSD analysis results: initial microstructures of (a) 50 foam, (b) 8 foam and compressive deformed microstructures of (c) 50 foam, (d) 8 foam.

참고문헌(References) 1) Choi, J. & Kim, K.-H. Journal of Korean Powder Metallurgy Institute 17, 489-493 (2010). 2) Essa, K., Jamshidi, P., Zou, J., Attallah, M. M. & Hassanin, H. Mater Des 138, 21-29 (2018). 3) Weise, J. et al. Steel Res Int 85, 486-497 (2014). 4) Smith, B. H., Szyniszewski, S., Hajjar, J. F., Schafer, B. W. & Arwade, S. R. J Constr Steel Res 71, 1-10 (2012). 5) Guarino, S., Barletta, M., Pezzola, S. & Vesco, S. Mater Des 40, 268-275 (2012). 6) Kang, T.-H., Kim, K.-S., Yun, J.-Y., Lee, M.-J. & Lee, K.-A. Adv Eng Mater 22, (2020).

[SS3-3 | 16:06]

Mutual solubility를 활용한 Mg 첨가 경량 고엔트로피 합금의 제조 및 합금화 거동 연구: 송은효, 이용건 (아주대학교 에너지시스템학과), 이한성 (아주대학교 첨단신소재공학과), 안병민* (아주대학교 에너지시스템학과, 아주대학교 첨단신소재공학과)

Keywords: high entropy alloy, mutual solubility, mechanical alloying, alloying behavior, lightweight

고엔트로피 합금(high entropy alloys, HEAs)은 5가지 이상의 원소가 서로 혼합되어 고용체 상을 형성하는 재료로, 최근 구조용 소재의 경량화에 대한 요구가 증가하면서 Al, Mg, Ti 등의 경량 원소를 포함한 경량 고엔트로피 합금(lightweight high entropy alloys, LWHEAs)에 대한 연구가 주목받고 있다. 주로 Mg, Al, Ti을 첨가한 LWHEAs가 연구되고 있으며[1], 이 중 Mg은 1.7g/cm^{3}의 밀도로 HEAs의 경량화를 효과적으로 달성할 수 있다. 하지만 Mg은 낮은 융점을 가지며, 다른 금속과 쉽게 금속간화합물(intermetallic compounds, IMC)을 형성하기에 기존의 주조 공정으로는 LWHEAs의 고용체 형성이 원활하지 않은 한계를 보인다[2]. 본 연구는 이러한 문제를 해결하고자, 기계적 합금화(mechanical alloying)를 적용하여 Mg를 포함하는 LWHEAs를 제조하여 HEAs의 초경량화를 달성하고자 한다. 본 연구에서는 열역학적 계산을 기반 초경량화를 달성하기 위해 Mg, Al, Ti를 첨가한 $AlTiCrV_{0.5}Mg_{0.5}$ LWHEAs를 설계하였다. 기계적 합금화로 LWHEAs 분말을 제조하고, 소결 온도에 따른 미세조직 변화를 관찰하기 위해 방전 플라즈마 소결(spark plasma sintering, SPS)로 치밀화하였다. LWHEAs의 상변화와 미세조직 거동은 X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD)과 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 관찰하였으며, X선 형광 분석(X-ray fluorescence, XRF)을 통해 고온 소결에서 저융점 원소의 유실 여부를 확인하였다. Gas pycnometer를 통해 소결 온도에 따른 LWHEAs의 밀도를 측정하고 micro-Vickers hardness 측정하여 상용 합금과 비교하였다. XRD 결과, LWHEAs 분말은 BCC 상과 Ti, Cr, V 등 고융점 원소의 rich 상으로 구성되었다(Fig. 1(a)). 치밀화 후, 소결 온도 증가에 따라 BCC 고용체 상은 새로운 격자 상수의 BCC 상과 laves 상으로 변화하였으며, 고융점 원소의 rich phase가 BCC 상으로 재고용되었다(Fig. 1(b)). 미세조직 분석에서 Al 원소는 모든 조건에서 모든 상에 합금화되었으며, 고융점 원소인 Ti, Cr, V 원소는 소결 온도 상승에 따라 rich 상에서 BCC 상으로 재고용됨을 확인하였다. 반면 Mg 원소는 기계적 합금화 후와 700°C 미만에서 Al과 함께 모든 상에 합금화되었으나, 소결 온도 상승에 따라 700°C부터 편석이 형성되는 것이 관찰되었다(Fig. 1(c, d)). 이는 BCC 상 구성 원소 간의 상호 고용 차이이며, 소결 온도 증가에 따라 고융점 원소(Ti, Cr, V)의 BCC 상 내부로 고용이 증가하면서, 고융점 원소와 혼합 엔탈피가 낮은

Al은 BCC 상에 안정적으로 고용체를 이루고 있으나, 고융점 원소와 혼합 엔탈피가 높은 Mg은 편석되어 상 분리가 발생하는 것으로 판단하였다. 이때 상 분리된 Mg은 액상 소결 효과로 인해 치밀화 중 용출되거나 응고 중 수축하여 기공으로 관찰되었다. XRF 결과, Mg뿐만 아니라 Al도 일부 용출된 것으로 측정되었다. LWHEAs의 밀도는 소결 온도 증가에 따른 치밀화 거동 향상으로 증가하는 경향을 보였으며, Mg, Al 등 낮은 밀도 원소가 용출됨에 따라 밀도의 증가 폭이 커짐을 확인하였다. LWHEAs의 경도는 소결 온도 상승에 따른 미세조직 거동 및 고밀도화로 증가하는 경향을 보였으며, 특정 조건에서 현저히 증가하였다(Fig. 1(e)). 경도 측정 결과를 tabor equation[3]을 적용하여 강도로 환산하였으며, 이를 상용 합금과 비교하였을 때(Fig. 1(f)), 본 연구의 LWHEAs는 Ti 합금과 유사한 밀도로 고강도 특성을 나타낼 수 있음을 확인하였다. 결론적으로 본 연구는 새로운 조성의 LWHEAs를 제시하고, 기계적 합금화를 통한 큰 융점 차 경량 원소(Mg, Al, Ti)를 합금화하여 고엔트로피 합금 초경량화의 가능성을 제시하였다.

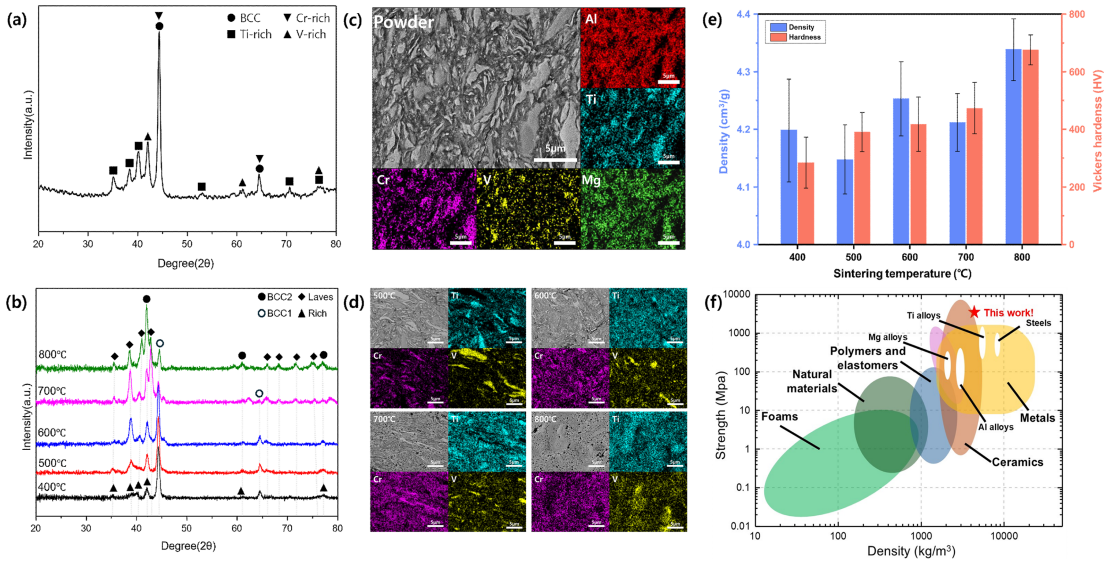


Fig. 1. Results of this study: (a) XRD result of LWHEA powders, (b) XRD results of as-sintered LWHEA, (c) SEM-EDS images of LWHEA powders, (d) SEM-EDS images of as-sintered LWHEA, (e) densities and hardness values of as-sintered LWHEAs, (f) comparison of conventional materials and LWHEAs in this study regarding specific strength

참고문헌(References) 1) S. A. Krishna, N. Noble, N. Radhika et al., J. Manuf. Processes 109, 17 (2024) 2) Z. Y. Ding, W. T. Huo, Y. Zhang et al., Scr. Mater. 187 (2020) 3) A. Basem, M. A. Hassan, O. A. Elkady et al., J. Mater. Res. Technol. 30 (2024)

[SS3-4 | 16:19]

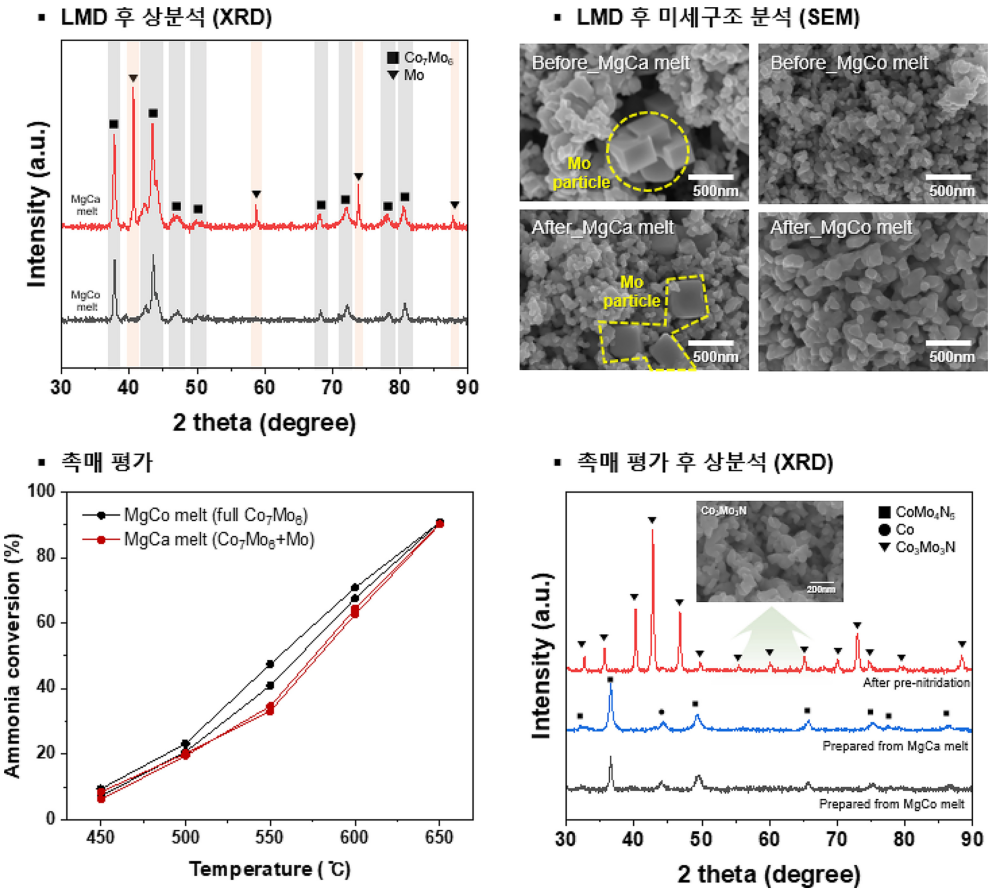
LMD 공정 및 암모니아 반응 조건에 따른 Co-Mo 나노다공체의 활성상과 촉매효율 변화: 최예원 (한국과학기술연구원(KIST), 서울대학교), 서예본, 양성은* (한국과학기술연구원(KIST)), 박은수* (서울대학교), 김진우* (한국과학기술연구원(KIST))

Keywords: Liquid metal dealloying(LMD), 암모니아 분해, 나노다공성 촉매, 활성상

수소에너지는 온실가스 배출 저감을 위한 핵심 대안으로 주목받고 있으며, 특히 장거리 수송 매체로써 암모니아가 각광받고 있다. 암모니아는 생산지에서 저장·수송된 후 열화학적으로 분해되어 수소로 전환될 수 있으며, 이를 위해 높은 활성과 안정성을 갖춘 촉매가 필수적이다[1]. 구성원소에 따른 질소 원자의 흡착에너지와 촉매 활성 간 관계를 기반으로, 최적의 질소 흡착에너지를 갖는 다양한 이원 금속 촉매가 개발되었다. 그중 Co-Mo 합금은 적절한 질소 흡착에너지를 제공하며 우수한 촉매 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다[2]. 이러한 합금 촉매 소재의 성능을 극대화하기 위해 나노다공성 구조를 적용하면 표면적이 증가하고 기체 확산이 용이해져 촉매 활성이 향상될 것으로 기대된다. 그러나 촉매의 성능은 합금 조성뿐만 아니라 제조 방법과 반응조건에 따라 형성되는 활성상에 의해 크게 좌우되며, Co-Mo 소재 내 활성상의 변화가 촉매 성능에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지지체의 영향 없이 촉매 성능 및 활성상을 평가 가능한 나노다공성 촉매를 제조하기 위해, 전구체 합금에서 특정 원소를 금속 용탕으로 선택적으로 용해하여 다공성 구조를 형성하는 Liquid Metal Dealloying(LMD) 공정을 활용하였다[3]. $(CoMo)_{35}Ni_{65}$ 합금을 Mg계 용탕에 800°C에서 15분 반응하여 Co_7Mo_6 다공체를 제조하였으며, 촉매의 구조 및 활성상 변화를 분석하기 위해 XRD, SEM, BET 등의 분석을 수행하였다. 촉매 성능 평가 실험은 450~650°C 조건에서 암모니아 분해 효율 측정을 통해 진행하였고, 50시간 범위에서 장기 안정성 테스트도 함께 수행하였다. 분석 결과 LMD 공정에서 사용하는 용탕 종류에 따라 Co 원소의 일부가 용출되면서 Mo 입자가 형성되는 현상이 나타났으며[4], 이는 활성상의 변화를 초래하여 촉매 성능을 저하시켰다. 이러한 결과는 Mo 단상을 사용하는 것보다 Co를 합금화하여 질소 흡착에너지를 최적화하는 것이 촉매 활성 향상에 더욱 효과적임을 보여주며[5], 용탕 조성 최적화를 통해 단상의 Co_7Mo_6로 이루어진 다공체 촉매를 제조할 수 있었다[6]. 단상의 Co_7Mo_6 촉매를 활용하더라도 암모니아 유량 조건에 따라 촉매 활성이 우수한 것으로 알려진 Co_3Mo_3N 상이 아닌[7] $CoMo_4N_5$, MoN 상 등이 형성될 수 있음을 확인하였다. 이러한 활성상의 변화를 개선하기 위해 LMD로 제조된 Co_7Mo_6 상을 저유량 암모니아 분위기에서 사전 질화처리 하여 Co_3Mo_3N 상을 형성할 수 있었으며, 활성상 구성에 따른 암모니아 분해 촉매로써의

반응 효율을 비교 분석하였다. 요약하면, 본 연구에서는 LMD 공정 중 Co 누출 현상으로 인해 활성상의 조성이 변화하여 Co-Mo 나노다공체의 촉매 성능이 저하되는 문제를 용탕 조성 최적화를 통하여 해결하였고, 지지체가 필요 없는 단상 Co_7Mo_6 촉매를 제조할 수 있었다. 또한 암모니아 반응 조건에 따른 활성상 변화 및 촉매 성능 차이를 체계적으로 분석함으로써 암모니아 분해 촉매 설계에 대한 새로운 전략을 제안하였다.

참고문헌(References) 1) K. E. Lamb et al., Int. J. Hydrogen Energy, 44, 3580-3593 (2019). 2) A. Boisen et al., J. Catal., 230, 309–312 (2005). 3) X. Guo et al., Mater. Today Commun., 26, 102007 (2021). 4) S.-H. Joo et al., Materials and Design, 180, 107908 (2019). 5) L. A. Jolaos et al., Int. J. Hydrogen Energy, 43, 4839-4844 (2018). 6) T. Wada et al., Commun. Mater. (2023). 7) X Duan et al., ChemCatChem, 8, 938–945 (2016).



[SS3-5 | 16:32]

미세조직의 변화에 따른 바나듐계 합금 분리막의 수소 투과 특성: 이상민 (한국과학기술연구원, 서울대학교), 백주현 (한국과학기술연구원, 고려대학교), 한흥남 (서울대학교), 서진유* (한국과학기술연구원)

Keywords: Metallic hydrogen membrane, Vanadium alloys, surface kinetics, grain size

금속 수소 분리막은 높은 에너지 효율과 간단한 공정 구성 덕분에 고순도 수소 추출을 위한 수소 정제 기술로 주목받고 있다. 기존에는 팔라듐이 우수한 수소 투과 특성으로 인해 금속 수소 분리막의 주요 재료로 각광받았으나, 높은 가격으로 인해 상대적으로 저렴한 바나듐계 수소 분리막에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[1] 이러한 금속 수소 분리막의 투과 물성을 평가하기 위해, 수소 투과도 값 도출에 필요한 수소 유량 측정이 용이하도록 약 1밀리미터 이하 두께의 박판 형태의 분리막 시편을 활용하여 투과 실험을 진행하였다. 주조된 합금은 압연 및 재결정 과정을 거치면서 미세조직이 변화하며, 이에 따라 금속 내 전위 밀도와 결정립계 면적이 달라진다. 이러한 변화는 결과적으로 수소 투과 물성 차이를 유발한다.[2] 본 연구에서는 바나듐계 합금을 제조하여 다양한 재결정 열처리 조건에 따른 미세조직의 변화를 관찰하고, 이에 따른 수소 투과 물성을 평가하였다. 수소 용해도와 확산계수를 평가하기 위해 기체의 확산 시 정상 상태에 도달하기까지 소요되는 지연 시간을 측정하는 time-lag 방법을 사용하였으며, 정상 상태 도달 후의 기울기를 이용하여 수소 투과도를 평가하였다.[3] 한편, 수소 분리막이 작동하는 동안 표면에서는 수소 분자의 해리 및 재결합 반응이 동반되는데, 바나듐의 경우 매우 높은 수소 확산계수를 갖기 때문에 시편의 두께가 얇을수록 이러한 표면 반응이 지연 시간 측정의 정확성을 저하시킬 수 있다. 따라서, 우선적으로 바나듐-니켈 합금 분리막을 제조하여 time-lag 실험을 위한 적절한 투과 시편 두께를 결정하는 실험을 수행하였다. 실험 결과, 두께가 800마이크로미터 이상인 분리막의 수소 투과 실험에서 수소 확산도 및 수소 용해도 값이 일정 수준에 수렴하는 경향이 나타났다. 이는 충분히 두꺼운 분리막에서 표면 반응 속도가 분리막 내부 확산 속

도에 비해 현저히 낮아져 지연 시간 측정에 미치는 영향이 최소화된 결과로 판단된다. 이후, 미세조직 변화에 따른 수소 투과 물성 평가를 위한 바나듐-알루미늄 합금을 주조하였으며, 냉간 압연 및 4가지 재결정 열처리 조건을 적용하여 약 800마이크로미터의 두께로 총 4종류의 수소 투과 실험용 분리막을 제조하였다. 각 분리막의 결정립 크기 및 전위 밀도를 비커스 경도 실험 및 EBSD 분석을 통해 직?간접적으로 평가하였으며, time-lag 방법을 이용하여 수소 투과 물성을 평가하였다. 또한, 각 분리막의 수소 투과 안정성을 평가하기 위해 수소 연속 투과 시험 후 파괴 온도를 측정하였다. 실험 결과, 결정립 크기가 증가할수록 수소 투과도 및 수소 확산계수가 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나, 수소 연속 투과 시험에서는 결정립이 커질수록 상대적으로 높은 온도에서 파괴되는 경향이 나타나 수소 투과 안정성이 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 결정립 크기의 증가에 따라 수소로 인한 격자 팽창의 정도가 커지기 때문으로 판단된다.

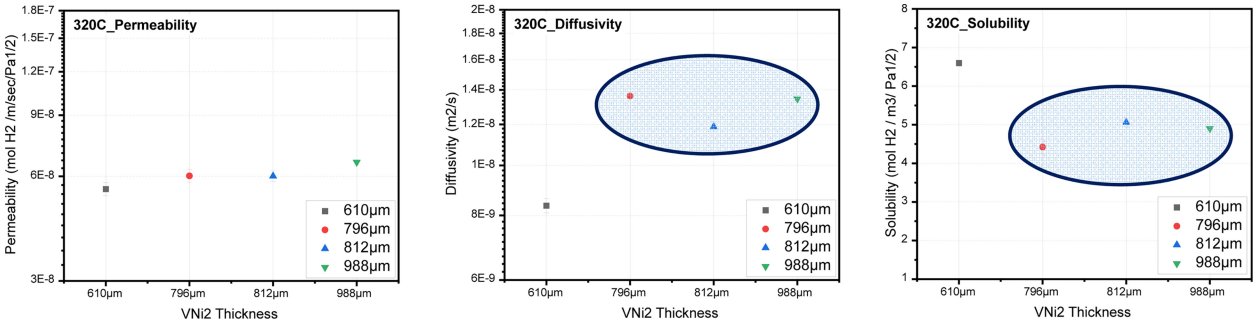


Fig 1. 각 두께별 수소 투과 물성 측정값 [VNi_2]

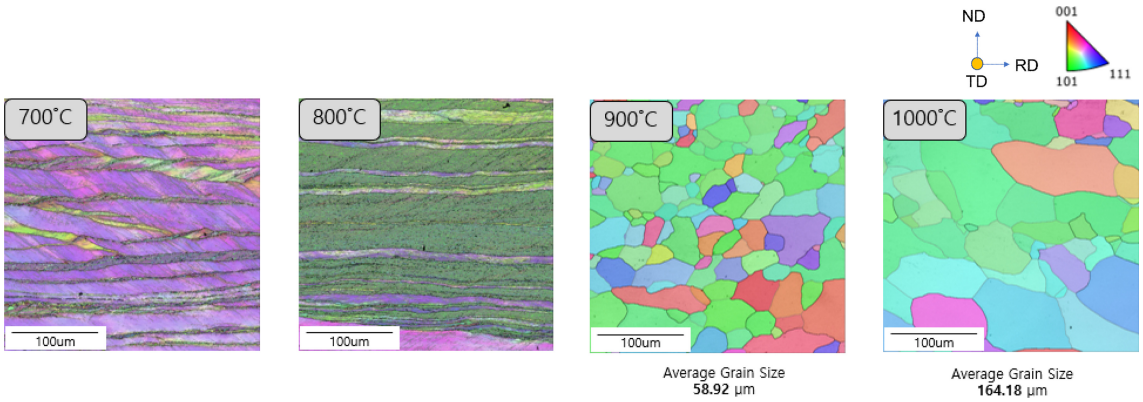


Fig 2. 각 온도별 1시간 열처리된 압연재의 미세조직 [VAl_5]

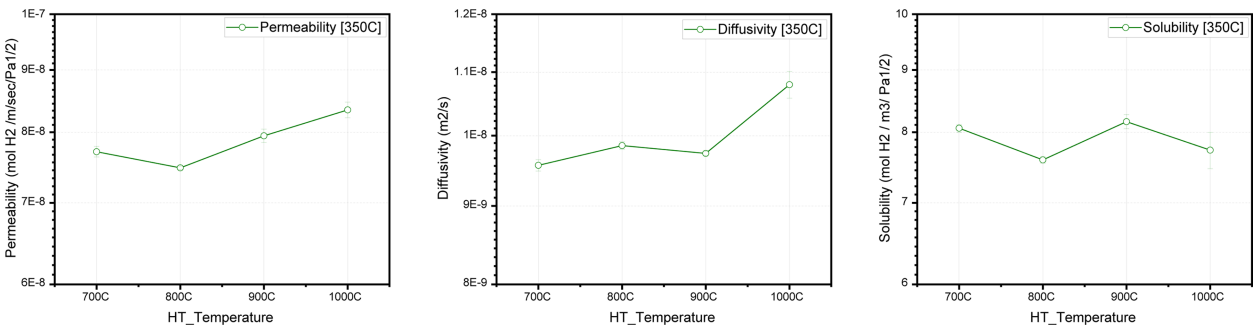


Fig. 3. 열처리 온도별 수소 투과 물성 측정값 [VAl_5]

참고문헌(References) 1) M. D. Dolan, Journal of Membrane Science (2010). 2) G. Song, M. E. Kellam, D. Liang, M. D. Dolan, Journal of Membrane Science (2010). 3) Young-Su Lee, Jae-Hyeok Shim, Jin-Yoo Suh, Journal of Membrane Science (2019).

[SS3-6 | 16:45]

새로운 상온 열전소재로서 SrSb2의 합성 및 열전물성 연구: 오민욱* (한밭대학교), 정연식*, 이강건, 장한휘 (한국과학기술원(KAIST))

Keywords: Thermoelectric, strontium antimonide, low- to mid-temperature

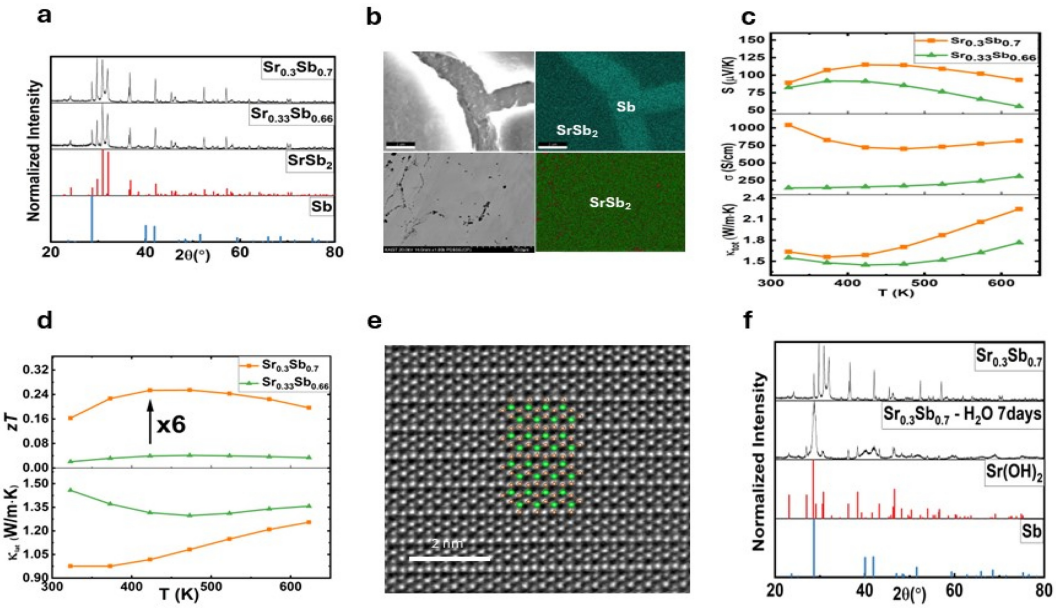


Fig. 1. (a) Powder XRD patterns of Sr0.33Sb0.66 and Sr0.3Sb0.7 measured at 298 K. (b) BSE-SEM images of polished surface of Sr0.33Sb0.66 (upper-left) and Sr0.3Sb0.7 (lower-left) with EDS mapping. Seebeck coefficient(S), electrical conductivity(σ), total thermal conductivity(κtot), lattice thermal conductivity(κlat) and zT of samples are shown in (c) and (d). Atomic-resolution HAADF-STEM image of SrSb2 showing its characteristic layered structure. (e) Structural model of SrSb2 is overlaid on the image for better visibility (Sr:Green, Sb:Brown). (f) Powder XRD patterns of Sr0.3Sb0.7 exposed to H2O showing the degradation of SrSb2 into Sr(OH)2 and metallic Sb.

1. Introduction

Thermoelectric materials have attracted considerable attention due to their ability to conveniently transform heat into electricity and vice versa. Especially, with the rising interest in the internet of Things (IoT), low-temperature thermoelectric materials have emerged as a crucial element for self-powered devices or active thermal management.[1] While bismuth telluride (Bi_2Te_3)-based alloys have remained cutting-edge room-temperature materials in recent decades, scarcity of Te limits wide applications. Recently, strontium antimonide ($SrSb_2$) has been suggested as a new candidate with a promising thermoelectric figure of merit (*zT*) in the low- to mid-temperature range, based on density functional theory calculations.[2] However, experimental evaluation on thermoelectric properties of $SrSb_2$ have been elusive. This work pioneers a novel study to the material of thermoelectric for the first time, highlighting its potential as an efficient thermoelectric material.

2. Methodology

We designed Sr-Sb alloys with two different stoichiometric ratio: $Sr_{0.33}Sb_{0.66}$ (0.33:0.66) and $Sr_{0.3}Sb_{0.7}$ (0.3:0.7), to compare purity of $SrSb_2$. High-quality polycrystalline samples are synthesized using vacuum arc melting, followed by induction hot pressing where the temperature of sintering are 673 K and 773 K respectively, with 50MPa uniaxial pressure.

3. Key Research Findings

First, we study the structural properties of $Sr_{0.33}Sb_{0.66}$ and $Sr_{0.3}Sb_{0.7}$. Fig. 1a shows the powder X-ray diffraction (XRD) pattern of both samples, where majority phase is indexed to monoclinic $SrSb_2$ without noticeable secondary phase. From Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy(SEM-EDS) analysis, however, we found significant amount of Sb-rich phase at the grain boundary (Fig. 1b). Instead, phase purity was improved by adding extra Sb during the synthesis (i.e., $Sr_{0.3}Sb_{0.7}$), leading to the enhanced Seebeck coefficient, electrical conductivity, and lattice thermal conductivity (Fig. 1c, Fig. 1d). Eventually, the maximum *zT* of $Sr_{0.33}Sb_{0.7}$ at 400 K is approximately 6 times higher than that of $Sr_{0.33}Sb_{0.66}$ (Fig. 1d). In addition, the low lattice thermal conductivity result from its unique layered structure prone

to phonon scattering[2]. Crystal structure observed by HAADF-STEM image is well matched with the expected layered structure[2] (Fig. 1e). Despite the fact that the reliability of thermoelectric properties was confirmed by thermal cycling test, as with other Zintl compound, we discovered $SrSb_2$ exhibits poor stability in humid condition. $SrSb_2$ was gradually degraded into $Sr(OH)_2$ and metallic Sb by exposing water (Fig. 1f). Further research is being conducted to improve susceptibility to moisture. These in-depth understandings of $SrSb_2$ will aid in the development of low-to mid-temperature thermoelectric materials as potential alternatives to conventional Bi_2Te_3-based alloys.

참고문헌(References) 1) D. Narducci, J. Phys. Energy 1, 024001 (2019). 2) M. Y. Toriyama, A. N. Carranco, G. J. Snyder, P. Gorai, Mater. Horiz., 10, 4256-4269 (2023).

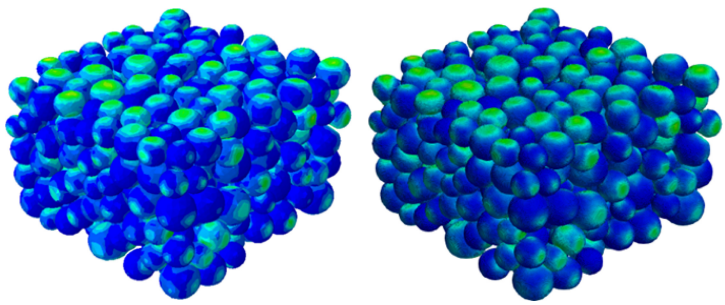
[SS3-7 | 16:58]

유한 요소법과 Phase Field 모델을 결합한 압축 분말 소결체의 고상 소결에 관한 연구: 차필령*, S.Sugathan, M.Dasari, 김기연, 최현주 (국민대학교), 김지훈, G.Menghgari (부산대학교)

Keywords: 고상소결, FEM, PFM, 압축체, GPU, 다중 입자

고체상태 소결은 현대 제조 산업에서 재료의 기계적 성질을 향상시키고 복잡한 부품을 제조하는 데 중추적인 역할을 합니다. 이러한 점을 고려하여, 본 연구에서는 유한 요소법(Finite Element Method, FEM)과 Phase Field Model(PFM)을 결합한 다중 스케일의 접근 방식을 통해 소결을 위한 수치 모델을 개발하였습니다. 이 모델은 분말 압축을 다중 입자 유한 요소 방법(Multi-Particle Finite Element Method, MPFEM)으로 시뮬레이션하고, 압축된 소결체의 소결 과정은 PFM으로 시뮬레이션하였습니다.

Phase Field 모델은 경계 이동을 통한 입자 성장 및 표면, 입계, 체적 확산 메커니즘을 고려하여 고체상태 소결 과정을 시뮬레이션하였습니다. 미세구조의 진화는 보존된 조성 필드를 위한 Cahn-Hilliard 비선형 확산 방정식과 비보존 구조적 순서 매개 변수 필드를 위한 시간 의존적 Allen-Cahn 구조 이완 방정식을 결합하여 모델링되었습니다. 분말 압축의 구현과 실행은 상업적 FEM 소프트웨어인 Abaqus와 Python 스크립트를 사용하였으며, MATLAB 코드는 입자 간의 과도한 접촉을 방지하고 시뮬레이션의 정확성을 보장하기 위해 적절한 체적 요소(Representative Volume Elements, RVE)를 생성하는 데 사용되었습니다. 구조화되지 않은 그리드로 구성된 분말 소결체의 FEM 데이터는 그림1-2에 나타난 바와 같이 소결 시뮬레이션을 위해 구조화된 그리드로 변환되었습니다.



이 모델은 분말의 압축 및 소결 중 밀도화에 미치는 미세한 입자와 조대한 입자의 혼합 비율(fine-to-coarse, F:C)과 압축 압력(compaction pressure, CP)의 효과를 조사하는 데 사용됩니다. 시뮬레이션 결과는 실험에서 관찰된 추세와 차이가 있는데, 이는 시뮬레이션 그리드의 낮은 해상도(높은 Δx) 때문입니다. 시뮬레이션의 정확성을 향상시키기 위해 그리드를 세분화하는 것(Δx를 낮추는 것)은 많은 계산 비용과 시간을 필요로 합니다. 이러한 문제점과 시뮬레이션의 정확성을 높이기 위해 고성능 컴퓨팅 MPI 프레임워크와 GPU 계산을 결합하였습니다. CUDA-MPI Phase Field solver를 사용하여 다중 GPU환경에서 3D 소결 시뮬레이션을 실행합니다. 그림3에 나타낸 바와 같이 2d의 경우 GPU 카드 수를 두 배로 늘릴 때 약 1.98배의 빠른 속도로 시뮬레이션이 진행되고 네 배로 늘릴 시 약 3.9배 빠른 시뮬레이션이 가능합니다. 또한 그림4(Np=GPU갯수) 처럼 2d 도메인 사이즈가 커질수록 시뮬레이션 진행 속도는 더욱 빨라집니다. 이로인해 도메인 사이즈가 매우 커져도 시뮬레이션 속도와 비용에 대한 한계점을 돌파할 수 있었습니다. 추후 3d 환경에서도 이러한 시뮬레이션 속도가 향상될 것을 기대할 수 있습니다.

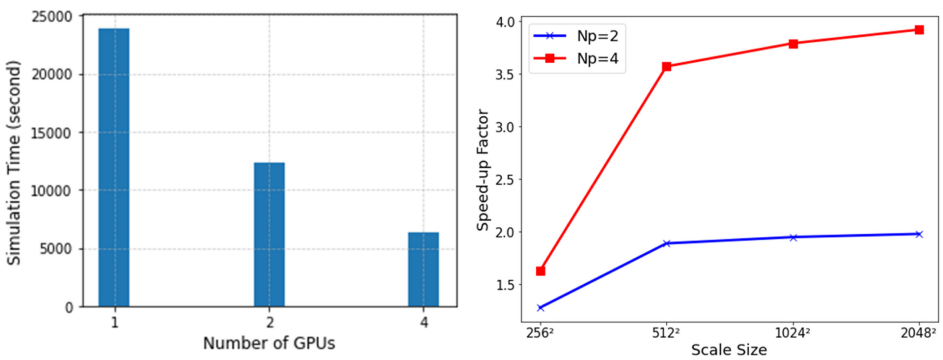
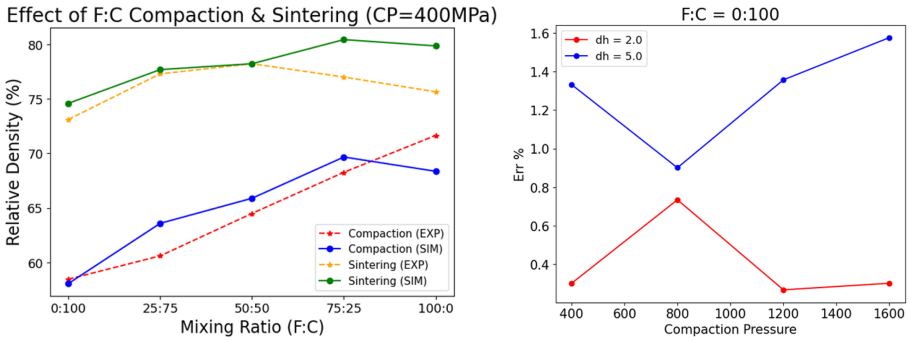


그림 5는 400 MPa에서 입자 비율에 따른 압축체와 소결체의 실험 밀도와 시뮬레이션 밀도 비교를 나타냅니다. bimodal 분말 혼합물은 미세 입자가 굵은 입자에 소결되어 접촉 표면적을 증가시키고 치밀화를 향상시키기 때문에 단일 크기 입자 소결체에 비해 더 높은 소결 밀도가 관찰되었습니다. 그림 6은 F:C=100에서 각 압축 압력에서의 구조화된 그리드와 구조화 되지 않은 그리드 간의 차이(Δx) 영향에 따른 데이터 변환의 정확도를 비교했습니다. Δx가 감소하면 그리드 크기가 커지고 입자의 벌크-인터페이스 그리드 포인트 비율이 높아지므로 구조화되지 않은 그리드와 구조화된 그리드 간의 데이터 변환 과정의 정확성이 증가하였습니다.



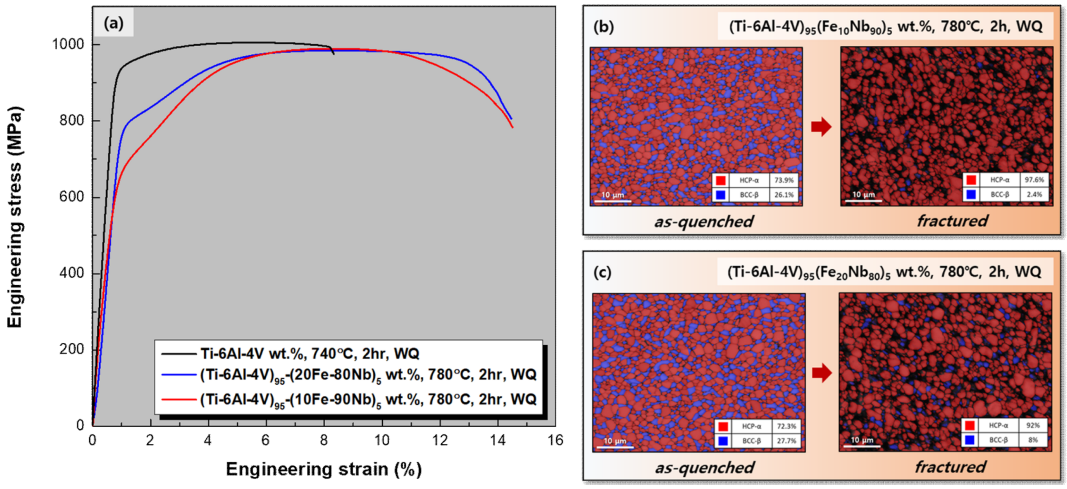
참고문헌(References) 1) H. Ghorbani-Menghari, H. J. Kim, H. Choi, P. R. Cha, and J. H. Kim, Mater. Res. Proc. 41, 2554-2561(2024). 2) H. Ghorbani-Menghari, H. J. Kim, H. Choi, P. R. Cha, and J. H. Kim, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1307, 012023 (2024). 3) Y. U. Wang, Acta Mater. 54, 953 (2006). 4) Kahhal, P., Jung, J., Choi, H., Cha, P. R., & Kim, J. H , Materials Transactions, 63(11), 1576-1582 (2022).

[SS3-8 | 17:11]

β 상 준안정도 제어 기반 TRIP Ti-6Al-4V-X 합금 개발: 서기완 (서울대학교 재료공학부), 김지영 (서울대학교 신소재공동연구소), 김도향 (연세대학교 신소재공학과), 박은수* (서울대학교 재료공학부)

Keywords: Ttianium alloys, Ti-6Al-4V, Stress-induced martensitic transformation, TRIP

Ti-6Al-4V(이하 Ti64) 합금은 경량 고강도 소재로서 타이타늄 합금 시장의 50% 이상을 점유할 정도로 다양한 산업계에서 주요 소재로써 활용되고 있다. 특히 높은 비강도와 우수한 내열성 및 내식성에 기인하여, 항공기 엔진이나 우주 발사체 소재로써 항공 우주 산업 분야에서 높은 잠재력을 지니고 있다. 이와 같은 특성적 우위에도 불구하고 낮은 연신율과 제한적인 가공 경화율에 의해, 범용 산업 재료로서의 활용에 제약이 많은 실정이다. 특히, 성형 공정 중에 과도한 변형이나 취성파괴가 일어날 가능성이 높아 복잡한 구조의 부품을 제조하는데 한계를 보인다. 본 연구에서는 이러한 Ti64 합금의 한계점을 해결하기 위해 상변태 유기 소성 변형(이하 TRIP) 기작을 구현할 수 있는 Ti-6Al-4V 기반의 신 타이타늄 합금을 설계하고자 한다. 타이타늄 합금에서의 TRIP은 준안정 β 상이 변형이 가해짐에 따라 α′ 및 α˝ 마르텐사이트로 응력 유기 상변태를 겪으면서 작동하게 된다.[3] 기존 소재인 Ti-6Al-4V 합금은 β 상 안정도가 낮아 준안정 β 상이 형성되기 매우 어려운데, 이에 따라 본 연구에서는 β 상 안정화 원소의 첨가 기반의 조성 설계를 통해 상 안정도를 제어하고, 준안정 β 상의 형성을 유도하여 응력 유기 상변태에 의한 TRIP 기작을 구현하고자 하였다. β 상 안정화 원소의 첨가는 냉각 후 형성되는 β 상의 상 안정도를 높일 뿐 아니라, 타이타늄 합금에서 β transus와 Ms 온도를 함께 감소시켜 열 유기 마르텐사이트의 형성을 억제함과 동시에 β 상 형성률을 높일 수 있기에[2] 합리적인 합금 설계 방법론이라고 판단하였다. 정량적인 조성 설계를 효율적으로 수행하기 위해 본 연구에서는 phase-stability index diagram(이하 Bo-Md diagram)을 합금 설계 가이드라인으로 채용하였다.[1] Bo-Md diagram은 고체 물리 이론에 기반한 Bo, Md 인자의 수치에 따라 α 및 β 상의 안정성과 β 상의 변형 기구가 변화하는 경향성을 도시한 diagram으로, 타이타늄 합금의 Bo, Md 수치를 기반으로 응력 유기 상변태 여부를 예측할 수 있게끔 한다. 본 연구의 핵심인 Ti64 합금은 α+β 합금으로 냉각 과정에서 α 상 및 β 상으로의 상 분리, 그리고 이에 따른 조성적 분포의 차이가 발생하게 된다. 이를 고려하여, 본 연구에서는 온도 조건에 따른 β 상의 조성을 CALPHAD 열역학 계산을 통해 도출하고, Bo, Md 수치로 각각 치환하여 그 상 안정도를 예측하였다. 상기 Bo-Md diagram을 활용하여 학계에 보고된 각 β 상 안정화 원소의 첨가에 따른 Ti-6Al-4V 합금의 상 안정도 변화를 분석한 결과, 본 연구의 합금 설계 목표인 응력 유기 상변태를 유도하기 위해서는 BCC 계열의 Nb, Mo, W, Ta를 첨가하는 것이 유리하다고 판단되었다. 다만, 해당 원소들의 융점이 기존 소재에 비해 매우 높아 합금 제조 과정에서 용융을 통한 균일성을 확보하기 어려울 것이라는 우려가 있어, 이를 완화하기 위해 FCC 계열의 Fe, Cr, Mn, Co, Mn, Ni를 함께 첨가한 조성 설계를 진행하였고 최종적으로는 Fe-Nb 이원계를 첨가 원소군으로 선정할 수 있었다. 또한, 해당 이원계에 대한 상변태도를 참고하여 기존 Ti64 합금과의 융점 차이를 최소화하고 금속간 화합물을 형성하지 않는 Fe:Nb 조성 비율을 한정하여 최종적으로 $(Ti\text{-}6Al\text{-}4V)_{95}(10Fe\text{-}90Nb)_5$ wt.% 및 $(Ti\text{-}6Al\text{-}4V)_{95}(20Fe\text{-}80Nb)_5$ wt.% 합금 조성을 설계할 수 있었다. 상기 두 합금에 대해 TRIP 기작의 작동 여부를 확인하기 위해 상온 일축 인장 시험을 시행한 결과, 기존 Ti64 합금에 비해 매우 높은 가공 경화 효과가 나타났고 이에 따라 상온 연신율이 기존의 8%에서 14% 이상으로 크게 증가했음을 알 수 있었다. 더불어, 변형 전후 EBSD를 통한 상분율 변화 분석 결과 변형이 일어남에 따라 BCC-β의 상분율은 감소하고 HCP-α의 상분율은 증가하는 것을 관찰할 수 있었는데, α′ 마르텐사이트의 결정구조가 α상과 동일함을 고려하면, 이는 설계 및 제조된 합금에서 준안정 β 상이 형성되어 응력 유기 상변태에 따른 TRIP 기작이 작동하였음을 시사하는 실험 결과이다.



위와 같은 연구를 통해 Ti-6Al-4V 합금에 Fe 및 Nb을 소량 첨가하여 응력 유기 상변태에 의한 TRIP 거동을 보이는 타이타늄 합금을 설계할 수 있었다. 이에 더불어, 기존 β-Ti 합금의 설계에 주로 활용되었던 Bo-Md diagram을 CALPHAD 열역학 계산과 복합적으로 사용하여 α+β 타이타늄 합금의 설계에 대해서도 확장시킨 조성 설계 플랫폼을 구축할 수 있었다. 이러한 연구 성과는 추후 고강도, 고연신 특성을 갖는 타이타늄 합금 설계 연구에도 적극적으로 활용되어 차세대 타이타늄 합금 개발에 크게 기여할것으로 기대된다. 본 발표에서는 상기 Ti-6Al-4V 기반 합금 조성을 설계한 정량적인 방법론에 대해 상술하고, 설계된 합금의 미세구조 및 기계적 특성 분석 결과에 대해 논하고자 한다.

Acknowledgement 이 논문은 2025년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 21-106-A00-006(KRIT-CT-23-019), 반응성 고증착률 적층제조 기술 특화연구실)

참고문헌(References) 1) Morinaga, M., Yukawa, N., Sone, K., & Adachi, H. (1988). Theoretical Design of Titanium Alloys. Sixth World Conference on Titanium, France 1988, 3(2), 1601-1606. 2) Polmear, I., StJohn, D., Nie, J.-F., & Qian, M. (2017). Titanium Alloys. In Light Alloys (pp. 369-460). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-099431-4.00007-5. 3) Zhang, T., Huang, Z., Yang, T., Kong, H., Luan, J., Wang, A., Wang, D., Kuo, W., Wang, Y., & Liu, C.-T. (2021). In situ design of advanced titanium alloy with concentration modulations by additive manufacturing. In Science (Vol. 374, Issue 6566, pp. 478–482). American Association for the Advancement of Science (AAAS). https://doi.org/10.1126/science.abj3770

[SS3-9 | 17:24]

열기계적 나노 성형 기법을 활용한 알루미늄 음극재의구조적 안정성 확보 및 리튬 이온 배터리 효율 향상: 문준혁 (서울대학교), 류채우 (홍익대학교), 박은수* (서울대학교)

Keywords: 열기계적 나노 성형(Thermomechanical nanomolding, TMNM), 리튬 이온 배터리, 알루미늄 음극재, 표면 개질

리튬 이온 배터리 산업은 미래 에너지 산업을 주도하는 핵심 분야로 자리 잡고 있으며, 특히 운송 산업에서 친환경 에너지원으로 주목받고 있다. 그러나 리튬 이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 우수한 성능에도 불굴하고, 지속 가능성, 경제성, 수명, 용량 및 에너지 밀도 등의 문제를 해결해야 하는 과제에 직면해 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 음극 소재의 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 상업적으로 널리 사용되는 흑연은 충방전 과정에서 부피 변화가 적고 구조적 안정성이 우수하지만, 낮은 이론 용량(372 mAh/g)으로 인해 고에너지 밀도를 요구하는 응용분야에서는 한계를 보인다. 이를 해결하기 위해 높은 용량을 제공하면서도 안정성과 경제성을 동시에 충족할 수 있는 대체 음극 소재가 연구되고 있으며, 대표적인 후보로 실리콘(Si), 주석(Sn), 알루미늄(Al), 저마늄(Ge) 등이 검토되고 있다. 그중에서도 알루미늄(Al)은 높은 저장 용량(993 mAh/g)을 제공하면서도 다른 소재 대비 상대적으로 낮은 부피 변화(+97%)를 보이며, 경제성과 원소의 풍부함을 고려했을 때 차세대 음극재로 가장 유망한 후보 중 하나로 평가된다. 이러한 특성으로 인해 전기차 및 대형 에너지 저장 시스템에서의 대량 생산 및 상용화 가능성이 높아지고 있다. 그러나 리튬 이온이 삽입·탈리되는 과정에서 발생하는 부피 변화로 인해 전극의 기계적 붕괴, 균열 형성, 계면 분리, 전극 부피 증가에 따른 전해질과의 부반응 증가 등이 발생하며, 이는 배터리 수명 감소 및 성능 저하를 초래하는 주요 원인으로 작용한다. 따라서 알루미늄 음극재의 부피 변화를 효과적으로 완충하고 구조적 안정성을 유지할 수 있는 새로운 접근 방식이 필요하다. 본 연구에서는 열기계적 나노 성형(Thermomechanical nanomolding, TMNM) 기법을 적용하여 알루미늄의 표면에 마이크로어레이 및 나노어레이 구조를 형성함으로써, 전극의 부피 변화로 인한 물리적 손상을 완화하고 배터리의 성능을 개선하는 방안을 제안한다. TMNM 기술은 나노 제작 기술 중 하나로, 몰드(mold)를 사용하여 재료에 온도와 압력을 가해 imprinting 및 etching 공정을 통해 나노 및 마이크로어레이를 쉽게 제작할 수 있고 다양한 소재에 적용할 수 있는 높은 범용성을 지닌다. TMNM 기법의 매커니즘은 공정 온도에 따라 두 가지로 구분되며, 소재의 녹는점의 0.4배 이상의 온도에서는 확산(diffusion) 메커니즘이 우세하고, 0.4·Tm미만에서는 전위(dislocation) 매커니즘이 지배적이다. 또한 확산 메커니즘에서는 몰드의 직경이 작을수록, 전위 메커니즘에서는 몰드의 직경이 클수록 더 낮은 압력으로 어레이 구조가 형성되는 특징이 있다. 알루미늄의 녹는점은 약 660°C로, 본 연구에서 사용한 실온은 대략 0.3·Tm으로 전위 메커니즘이 지배적인 환경이다. 마이크로어레이의 경우 상온에서 200 MPa 압력을 가한 뒤 mechanical demolding 공정을 통해 제

작하였고, 나노어레이의 경우는 300 MPa의 압력을 가한 뒤 etching을 통해 제작했다. 이러한 TMNM 기법을 적용함으로써, 전극 표면의 형상을 정밀하게 조절하여 부피 변화로 인한 내부 응력 분산을 촉진하고, 전극의 기계적 안정성을 향상시킬 수 있다. 또한 TMNM을 통해 형성된 마이크로 및 나노 구조는 리튬 이온과의 접촉 면적을 증가시켜 반응성을 향상시키며, 전극 내부의 충분한 물리적 공간을 확보함으로써 부피 팽창을 효과적으로 완충할 수 있도록 설계되었다. 이를 검증하기 위해, 전기화학적 사이클(Electrochemical cycling) 실험을 수행하여 TMNM 방식으로 제작된 알루미늄 음극재의 충방전 특성을 분석하였다. 분석 결과 표면 개질을 진행하지 않은 평탄한 알루미늄 음극재(그림 1 Plain) 대비, 표면 개질을 진행해 어레이 구조를 형성한 시편에서 초기 사이클동안 용량이 대략 25% 증가된 것을 확인하였다. 또한 리튬 이온의 삽입·탈리 과정에서 발생하는 부피 팽창으로 인한 내부 응력이 효과적으로 분산됨으로써, 전극의 구조적 안정성이 향상됨을 전기화학적 분석을 통해 입증하였다. 더 나아가, 미세구조 분석을 통해 리튬 이온 확산 및 상변화를 정량적으로 평가한 결과, 표면 개질된 샘플에서 리튬 이온 삽입이 더욱 원활하게 이루어졌으며, 어레이 구조가 부피 변화의 균형을 유지하는데 기여함을 확인하였다. 본 연구는 TMNM 기법을 활용한 표면 개질이 알루미늄 음극재의 구조적 안정성을 향상하고, 리튬 이온 배터리의 성능을 효과적으로 개선할 수 있음을 입증하였다. 이를 통해 TMNM 방식이 차세대 고용량 음극재 개발을 위한 효과적인 표면 개질의 전략이 될 수 있으며, 향후 상용화 가능성이 높은 기술임을 제시한다. 또한 본 연구는 알루미늄 기반 리튬 이온 배터리의 성능 향상을 위한 새로운 설계 전략을 제공하며, 다양한 나노공학적 기법을 결합하여 더 높은 성능을 갖춘 차세대 배터리 소재 개발에 기여할 가능성을 시사한다. 궁극적으로, 고성능 리튬 이온 배터리의 개발을 통해 전기차 및 대형 에너지 저장 시스템에서의 효율적인 에너지 저장 솔루션을 제공할 수 있으며, 지속 가능하고 경제적인 차세대 배터리 기술의 상용화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

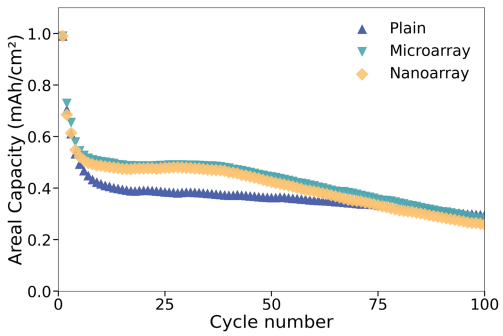


Fig. 1. Plain, 마이크로어레이, 나노어레이 알루미늄 음극재의 사이클 수에 따른 면적 용량 변화

참고문헌(References) 1) N. Nitta, F. Wu, J. T Lee, and G. Yushin,Materials Today.18(5), 252 (2015). 2) P. J. Crowley, K. P. Scanlan, and A. Manthiram, Journal of Power Sources.546, 231973 (2022). 3) Z. Liu, G. Han, S. Sohn, N. Liu, and J. Schroers, Physical Review Letters.122(3), 036101 (2019). 4) Z. Liu, N. Liu, and J. Schroers, Progress in Materials Science.125, 100891 (2022). 5) Z. Liu, Nature Communications.8(1), 14910 (2017). 6) A. Manthiram, Nature Communications.11(1), 1550 (2020). 7) D. Larcher and J. Tarascon, Nature Chemistry.7(1), 19 (2015). 8) J. Tarascon and M. Armand, Nature.414(6861), 359 (2001). 9) M. K. Jangid and A. Mukhopadhyay, Journal of Materials Chemistry A.7(41), 23679 (2019). 10) M. H. Tahmasebi, D. Kramer, R. Mönig, and S. T. Boles, Journal of The Electrochemical Society, 166(3), A5001 (2019). 11) T. Zheng, D. Kramer, M. H. Tahmasebi, R. Mönig, and S. T. Boles, ChemSusChem. 13(5), 974 (2020). 12) D. Li, F. Chu, Z. He, Y. Cheng, and F. Wu, Materials Today. 58, 80 (2022). 13) J. Zhang, T. Zheng, K. Lam, and S. T. Boles, Electrochimica Acta. 456, 142437 (2023). 14) T. Zheng, J. Zhang, W. Jin, and S. T. Boles, ACS Applied Energy Materials. 6(3), 1845 (2023). 15) H. T. Jeong and W. J. Kim, ACS Applied Materials & Interfaces. 16(11), 13662 (2024).

철강 : 철강A-압연, 강종개발, 후처리
Room 삼다B, 4월 23일

[철강A1-1 | 09:00]
이상역 소둔 열처리 온도가 다상 조직강의 인장특성과 충격특성에 미치는 영향: 정창곤, T.T.T. Trang (포항공과대학교 친환경소재대학원 (POSTECH GIFT)), 우영윤, 윤은유, 이영선 (한국재료연구원 (KIMS)), 허윤욱* (포항공과대학교 친환경소재대학원 (POSTECH GIFT))
Keywords: Multiphase TRIP-assisted steels, Phase Transformation, Intercritical Annealing, Ductility, Impact Toughness

다상 조직강은 상간의 변형과 응력의 분배와 변형 중에 발생하는 잔류 오스테나이트의 변형 유기 마르텐사이트 변태(deformation-induced martensitic transformation)로 인해 우수한 강도와 연신율을 나타낸다. 다상조직강이 가지는 이러한 우수한 인장 특성은 높은 에너지 흡수가 필요한 자동차의 Body-In-White에 적용되어 사용되고 있다. 한편, 다상 조직의 저항복비 특성을 활용하여 자동차 구조용 볼트 및 너트류 제작에 적용하려는 연구도 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 볼트 및 너트류 제작에서는 급냉 및 조질(quenching & tempering) 공정을 통해 높은 강도와 필요한 연성을 확보한다. 그러나 조질 처리를 포함한 기존 생산 과정은 복잡한 열처리 공정을 요구해 생산 단가가 높고 에너지 효율이 낮은 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 조질 처리를 생략한 비조질강(non-quenched and tempered steel)에 대한 연구가 진행되고 있다. 비조질강은 주로 다상조직을 가지며 TRIP효과를 이용해서 원하는 특성을 얻고 있으며, 에너지 효율적인 공정을 통해 제품 제작 시 필요한 응력을 줄이고, 제작 후 높은 항복 강도를 가지는 장점이 있다. 그러나 비조질강에 TRIP강을 적용하기 위해서는 높은 인장 특성뿐만 아니라 충분한 충격치가 요구되며, 이에 대한 연구는 아직 미흡한 상태이다. 본 연구에서는 이상역 소둔 열처리 온도를 변화시켜 구성 상의 변화를 유도하고, 이에 따른 인장 특성과 충격 특성의 변화를 분석하였다. FE-EPMA, XRD, EBSD 분석을 통해 각 열처리 단계에서 구성 상의 분율과 오스테나이트 내 성분 원소 함량을 체계적으로 분석하였다. 또한, in-situ EBSD 및 인장 실험을 통해 변형 시 발생하는 구성 상 간의strain partitioning과 crack 형성 및 전파 과정을 조사하였다. 이를 바탕으로 미세조직과 인장 특성, 충격 특성 간의 상관관계를 해석하고자 하였다. 본 연구는 다상 TRIP강의 선재 적용을 위한 최적의 미세조직 설계 방안을 제시하는 데 기여하고자 한다.

[철강A1-2 | 09:15]
구성방정식과 기계학습 기반 하이브리드 모델을 활용한 S355NL 강의 열간 변형거동 예측: 이성호, 유진영, 천세호, 박동준 (부산대학교), 이진모, 이채훈 ((주) 태웅), 이태경* (부산대학교)
Keywords: S355NL, hot deformation, constitutive model, machine learning, processing map

S355NL 강은 우수한 기계적 특성으로 인해 극한 환경에서 사용되는 구조 재료로 주목받고 있다. 본 연구는 S355NL 강의 고온 변형거동을 체계적으로 탐색하고, 최적 열간 가공 조건을 도출하기 위해 Zener-Hollomon(ZH) 구성 방정식과 인공지능을 결합한 정밀 예측 모델을 새롭게 개발하였다. 900 – 1200 ºC의 온도 범위와 10^{-3} – 1 s^{-1}의 변형 속도 범위에서 열간 압축 실험을 수행하여 고온 유동응력 곡선을 확보하였으며, 이를 기반으로 ZH 구성 방정식을 적용해 초기 구성 모델을 구축하였다. 그러나 ZH 모델은 비선형적 특성 및 고온 변형의 동적 회복과 재결정 거동을 완전하게 설명하는데 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 artificial neural network(ANN), support vector regression(SVR), XGBoost(XGB) 알고리즘을 ZH 모델에 결합하여 새로운 하이브리드 예측 모델을 개발하였다. 성능 평가 결과, ZH와 ANN을 결합한 하이브리드 모델이 가장 우수한 예측 정확도를 나타내며, 고온 유동응력 곡선을 정밀하게 예측하는 데 성공하였다. 실제 실험 데이터와 기계학습 기반 예측 결과를 활용해 변형 공정지도를 작성한 결과, 두 공정지도 모두 1100 – 1200 ºC의 온도 범위와 10^{-3} – 10^{-2} s^{-1}의 변형 속도에서 에너지 분산 효율이 최대 0.5에 도달하며 S355NL의 최적 열간 가공 조건을 확인하였다. 반면, 변형속도가 10^{-1} s^{-1} 이상인 경우 온도와 무관하게 소성 불안정 영역이 형성됨을 확인하였다. 본 연구는 ZH-ANN 하이브리드 모델을 통해 S355NL 강의 고온 변형 거동을 정밀하게 예측하고, 기계학습 기반 공정 최적화 방법론을 성공적으로 제시함으로써 산업적 응용 가능성을 확장하는데 큰 기여를 하였다.

[철강A1-3 | 09:30]
후판 저탄소 TMCP 강재에서 Ni, Mn 함량 변화에 따른 저온변태조직 및 충격인성 특성 연구: 최정현, 유성훈 (부산대학교), 김우준, 고성웅 ((주)포스코), 강남현* (부산대학교)
Keywords: 저탄소강, 충격인성, MA

최근 세계적인 물류 이동량의 증가와 자원 수급 문제로 인해 극지를 통하는 항로 개척 및 극지 자원 개발 가능성이 대두되고 있다. 이에 저온 해양 환경에서 구조용 철강의 취성 증가로 인한 급격한 균열 전파 및 파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해 우수한 저온 인성을 보유한 강재들이 개발되고 있다. 본 연구에서는 후판 저탄소 TMCP 강재에서 저온 인성을 향상시키는 것으로 알려진 합금원소 Ni, Mn의 함량이 미세조직에 미치는 영향을 분석하였고, 이를 샤르피 충격시험 결과와 비교 분석하였다. 이를 통해 Ni, Mn 함량의 증가가 저온변태조직 형성을 유리하게 하였으나, 경한 MA의 형성으로 인해 오히려 충격인성을 저하시킬 수 있음을 확인하였고, 저탄소강에서 충격인성 향상을 위한 최적의 Ni, Mn 함량을 도출하였다.

[철강A1-4 | 09:45]

템퍼드 마르텐사이트강의 수소취성 저항성에 미치는 Nb 및 Ti 복합 첨가의 영향: 김상규, 황병철* (서울과학기술대학교)

Keywords: hydrogen embrittlement, tempered martensitic steels, MC carbide, Nb/Ti ratio

템퍼드 마르텐사이트강은 높은 강도와 인성의 조합을 갖추고 있어 고압 수소 저장 및 운송용 소재로 활용되고 있다. 그러나, 수소 환경에서 사용될 경우 수소취성으로 인한 조기파단이 발생할 수 있어 이에 대한 저항성을 향상시키는 연구가 필수적이다. 특히, NbC 및 TiC과 같은 MC 탄화물의 석출 거동이 수소 확산에 미치는 영향은 비가역적 수소 트랩 사이트 도입 관점에서 중요한 연구 주제이며, 그 중에서 탄화물 내 탄소 공공 농도는 수소 확산 및 트랩 거동과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 기존 연구에서는 Nb 및 Ti가 첨가될 경우 MC 탄화물의 석출을 통해 비가역적 수소 트랩 사이트를 도입하여 수소취성 저항성을 향상시킬 수 있다고 보고된 바 있다. 그러나 Nb 및 Ti의 복합 첨가에 따른 탄화물 석출 거동과 수소취성 저항성 간의 상관관계 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Nb 및 Ti의 첨가 비율이 다른 4종의 템퍼드 마르텐사이트계 강재를 제조한 후 형성된 탄화물의 미세구조적 특성과 수소 확산 거동 간의 상관관계를 규명하고자 하였다. 이를 위해 전산모사 프로그램을 활용하여 Nb 및 Ti 복합 첨가에 따른 MC 탄화물의 석출 거동과 탄소 공공 농도를 예측하고, 상평형 계산 및 석출 거동 모델링 결과를 실험적 결과와 비교하였다. 또한, 전기화학적 수소 주입과 동시에 저속 변형률 시험을 수행하여 Nb 및 Ti 복합 첨가가 수소취성 저항성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

[철강A1-5 | 10:00]

Cobalt가 9-12Cr 페라이트/마르텐사이트계 내열강의 미세조직 변화와 Creep 거동에 미치는 영향: 박봉천 (한국재료연구원, 부산대학교), 김성대 (부경대학교), 석우영, 박이호, 장재훈* (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교)

Keywords: Cobalt, Creep, 9-12Cr heat-resistatnt steel, TEM

Ferritic/Martensitic 9-12Cr 내열강은 고온에서의 우수한 내산화성, 높은 열전도도, 낮은 열팽창계수 그리고 뛰어난 Creep strength로 인해 복합화력발전소의 스팀 터빈 소재로 주목받고 있다. 스팀 터빈의 효율성을 향상시키기 위해서는 더 높은 온도와 압력에 사용될 수 있어야 한다. 이를 위해 가혹한 조건에서도 안정적으로 미세구조을 유지하고 변형에 대한 저항성이 우수한 소재가 요구된다. 따라서 화학 조성, 열처리와 같은 제조 공정의 최적화를 통해 안정적인 미세조직을 확보하는 것이 중요하다. Co는 대표적인 오스테나이트 안정화 원소이며, A_1및 A_3영역을 낮추지 않으면서 A_4 영역을 상승시켜 고온에서 δ-페라이트의 형성을 억제시키는 대표적인 고용강화 원소이다. 특히, Co는 $M_{23}C_6$의 성장 거동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 특성으로 인해 Co가 높은 합금은 미세조직의 변형을 지연시켜 안정적인 미세조직을 유지할 수 있다. 그러나 Co는 높은 비용으로 인해 함량을 최적화가 필요하며, 고온에서 충분한 기계적 물성을 유지할 수 있는 소재를 개발하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 630ºC급으로 개발된 10.2Cr-Mo-W-V-Co-C-Nb을 기준으로 Co 함량을 달리한 합금을 제조하여 650ºC에서 Creep 시험을 진행하였다. 그 결과, Co 함량이 낮은 합금이 Creep 강도가 더 우수한 것으로 나타났다. Co 함량이 낮은 합금에서는, 미세한 prior austenite grain을 가지는 것을 주사전자현미경 (SEM)을 통해 확인하였다. 또한, 투과전자현미경 (TEM)분석 결과, 두 합금의 석출물의 분포 및 크기의 차이가 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 석출물과 전위의 관계를 분석하여 650도에서의 Creep 파단 기구를 규명하였다.

[철강A2-1 | 10:25]

이상영역 열처리 및 항온 열처리된 3Mn TRIP강의 미세조직 및 기계적 물성: 임용수, 김진경* (한양대학교)

Keywords: 중망간강, 이상영역 열처리, 항온 열처리, 오스테나이트 안정도, 기계적 성질

3~12 wt.%의 망간이 첨가된 중망간강(Medium Mn steel)은 우수한 기계적 물성을 나타내어 차세대 고강도 자동차용 강판 소재로서 활발한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 Fe-3Mn-0.2C-1Al (wt.%) 중망간강을 냉연한 후 이상영역 열처리를 진행하고, 오스테나이트 안정화를 위해 항온 열처리를 실시하여 열처리 공정이 미세조직에 미치는 영향을 고찰하였다. 이상영역 열처리는 700ºC 및 720ºC에서 5분간 진행하였다. 열처리 이후 조직은 페라이트와 오스테나이트로 구성되었으며, 720ºC의 경우 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. XRD 분석 결과, 700ºC와 720ºC에서 5분간 열처리 후 오스테나이트 분율은 각각 약 19.8% 및 16.4%로, 700ºC에서 더 높은 분율을 나타냈고, 720ºC의 경우 급냉 시 형성된 마르텐사이트 조직으로 인해 분율이 감소하였다. 700ºC와 720ºC 샘플의 항복강도, 인장강도, 연신율은 각각 522.1 MPa 및 444.5 MPa, 629.0 MPa 및 795.2 MPa, 11.7% 및 9.0%로 나타났다. 720ºC 열처리 이후 낮은 오스테나이트 안정도로 인해 낮은 항복강도와 연신율을 확인하였다. 오스테나이트를 안정화하여 기계적 성질을 향상시키기 위해 열처리 이후 즉시 급냉하지 않고 300ºC에서 10분간 항온 열처리를 진행하였다. 700ºC 열처리 이후 항온 열처리를 진행한 결과, 오스테나이트 분율, 항복강도, 인장강도, 연신율은 각각 20.2%, 563.3 MPa, 723.5 MPa, 29.7%로 기계적 성질이 향상됨을 확인하였다. 720ºC 열처리 이후 항온 열처리를 진행한 결과, 급랭 시 마르텐사이트가 형성되지 않았으며, 오스테나이트 분율, 항복강도, 인장강도, 연신율은 각각 22.3%, 525.3 MPa, 835.4 MPa, 19.6%로 기계적 성질의 향상을 확인하였다. 초기 미세조직과 변형 후 미세조직을 분석하고, 미세조직과 기계적 성질의 상관관계를 고찰하였다.

[철강A2-2 | 10:40]

3Mn Q&P강의 퀜칭 온도가 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향: 김규헌, 임용수 (한양대학교), 김지훈 (Tohoku University), 김진경* (한양대학교)

Keywords: 중망간강, Q&P, TRIP

망간 함유량이 3~12wt%인 중망간강(Medium Mn steel)은 3세대 고강도강으로, 우수한 강도와 연성을 갖추고 있어 활발한 연구

가 진행되고 있다. Quenching and partitioning (Q&P) 공정은 열처리 후 형성되는 복합상을 조절하여 재료의 기계적 물성을 향상시키는 데 목적이 있다. 본 연구는 Q&P 공정을 적용한 중망간강에 대해 오스테나이트화 열처리 후 각기 다른 퀜칭 온도에 따른 미세조직과 기계적 물성의 상관관계를 조사하였다. Fe-3Mn-0.2C-1Al(wt%) 강을 균질화한 후 열간 압연과 냉간 압연을 진행하고 Q&P 공정을 수행하였다. 860ºC에서 5분간 오스테나이트화 열처리된 재료를 딜라토미터로 측정한 마르텐사이트 개시 온도(Ms)를 바탕으로 선정한 여러 온도 조건에서 30초간 퀜칭한 후, 460ºC에서 3분 동안 파티셔닝 및 수냉을 수행하였다. Q&P 공정 후 미세조직은 잔류 오스테나이트, 마르텐사이트, 베이나이트와 소량의 페라이트로 구성되었으며, 마르텐사이트 내에는 다량의 카바이드가 관찰되었다. 각 상의 분율은 XRD 분석과 딜라토미터의 부피 변화를 정량화하여 나타낸 결과, Ms 온도(350ºC) 이하 범위에서 퀜칭 온도가 증가할수록 마르텐사이트 상의 분율은 감소하고 베이나이트상과 잔류 오스테나이트상의 분율은 증가하였다. 마르텐사이트에서 오스테나이트로의 탄소 파티셔닝과 베이나이트로의 상변태, 그리고 lath 형태의 잔류 오스테나이트가 오스테나이트 안정도 향상에 영향을 미쳤고, 이에 따라 기계적 물성의 차이가 나타났다. 마르텐사이트 분율이 높을수록 항복강도가 증가하였고, 오스테나이트 안정도가 높을수록 변형에 의한 마르텐사이트 상변태(TRIP)가 감소하여 연신율이 증가하였다. 이러한 내용을 고찰하여 해당 강종의 미세조직 및 기계적 물성 최적화 방안을 도출하였다.

[철강A2-3 | 10:55]

Development of TRIP-maraging steel with exceptional J-integral fracture toughness through the segregation engineering and metastable phase separation: 예정원, 김민석, 박은수* (서울대학교)

Keywords: TRIP-Maraging steels, Grain boundary segregation engineering, Austenite reversion, BCC decomposition, J-based fracture test

마레이징 강(Maraging steel)은 로켓 엔진 케이스, 잠수함 선체 및 극저온 미사일과 같은 중요한 응용 분야에서 중요한 부품으로 사용되는 중요한 소재이다. 그러나 고강도가 요구되는 환경에서 주로 사용되는 마레이징 강은 강도-연신 trade-off를 극복하지 못하며 취성 특성을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 Intragranular complex compound 석출에 의해 초고강도 특성을 가지는 Martensite 기지를 갖는 합금에Segregation engineering을 통하여 complexion 석출제어를 통한 마레이징 CCA의 고인성화를 달성하고자 한다. 이때, intergranular에서의 segregation 되는 원소를 찾기 위해, base system에 포함되는 elements(: Fe, Ni) 및 석출 강화 효과를 위해 첨가되는 elements(: Co, Mo)와 segregation enthalpy가 양의 관계를 갖는 element를 찾고자 하였다. 결과적으로 Mn 원소가 첨가되는 다른 원소에 대해 양의 segregation enthalpy를 갖는 것을 확인하였다. 또한 Mn 원소는 Fe 기반 합금에 첨가되었을 때 FCC 상의 안정성을 크게 증가시킨다고 알려져 있어Mn원소를 segregation engineering의 최적 원소로 선정하였다. 이 합금 설계 전략을 통해 intergranular에 FCC 오스테나이트(Y) 상이 석출된 합금을 설계할 수 있었다. 그러나 연성 FCC Y 상이 석출에 의해 발상하는 강도-연신 trade-off를 극복하기 위해, 열역학적 계산을 통해 석출된 FCC Y 상의 안정성이 낮은 합금을 선정함에 따라 변형 중 마르텐사이트 변태가 발생하는 변형 기구 (TRIP)를 갖는 합금을 설계하였다. 추가적으로 pseudo ternary에서 miscibility gap에 의한 BCC decomposition으로 인해 석출되는 α-Mn상의 석출 가능 열처리 조건을 최적화하여 약 1GPa 정도의 우수한 강도를 갖는 합금을 선정하였다. 또한 상기 전략에 따라 설계된 TRIP 마레이징 강의 J-based 균열 저항 곡선 및 비선형 탄성 파괴 역학 분석 방법을 통해 균열 성장 과정에서 elastic 및 plastic 기여에 대해 고찰하였다.

[철강A2-4 | 11:10]

고온 질화를 통한 304L 스테인리스강의 내수소취성 개선: 권영제 (영남대학교), 김성준 (포항공과대학교 친환경소재대학원), 강지현* (영남대학교)

Keywords: Austenitic Stainless Steel, High Temperature Nitriding Treatment, Austenite Stability, Strengthening, Hydrogen Embrittlement

탄소중립의 필요성이 대두됨에 따라 수소 경제로의 전환이 주목받고 있어, 수소 산업 인프라용 소재가 활발하게 연구 개발되고 있다. 상용 316L 오스테나이트계 스테인리스강은 안정한 FCC 구조로 내수소취성이 뛰어나 수소 인프라용 소재로 적합하다고 평가받는다. 316L보다 Ni 함량이 낮은 304L은 FCC 구조의 안정성이 낮아 변형 시 마르텐사이트로 변태하여 강도가 높은 반면 고압 수소에 노출될 경우 취성이 발생할 가능성이 더 높다. 본 연구에서는 고온 질화를 통해 FCC 구조의 안정성을 높여 304L의 수소취성 민감성을 개선하고, 항복강도를 향상시키고자 하였다. 0.8 mm 두께의 상용 304L 오스테나이트계 스테인리스강판을 고온 질화처리하여 미세조직과 경도, 인장 물성의 변화를 분석하고 Slow strain rate test(SSRT)와 Thermal desorption analysis(TDA)를 통하여 수소의 영향을 평가하였다. 1200ºC에서 3시간 동안 고온 질화처리 시 질소가 균일하게 분포한 시편을 얻을 수 있었다. 고온 처리로 인해 결정립은 조대해졌으나 질소로 인한 고용강화로 인장강도와 항복강도 모두 120 MPa, 경도가 40 HV0.05만큼 증가하였다. 또한, 오스테나이트의 안정성이 증가하여 내수소취성이 향상되는 것을 확인하였다.

[철강A2-5 | 11:25]

15-5PH 강종의 열처리 조건에 따른 영향분석: 윤준원, 박성민, 이정찬, 안찬울 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 이민수 (한국생산기술연구원), 지성화 (Pumster), 손석수 (고려대학교), 박창수* (한국생산기술연구원)

Keywords: 15-5PH, Hot Isostatic Pressing, Cu-rich precipitates, Austenitizing temperature variation

15-5PH(Precipitation Hardening) 합금은 석출경화형 마르텐사이트계 스테인리스 스틸로, 고강도와 우수한 내식성을 갖추고 있어 항공우주, 방위산업 및 의료기기 분야에서 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 15-5PH 스테인리스강의 피로 성능을 향상시키기 위해 재료 내부의 미세한 기공과 결함을 제거할 수 있는 Hot Isostatic Pressing (HIP) 공정을 적용하였으며, 오스테나이징(austenitizing) 유지 시간을 달리하여 연구를 진행하였다. 다양한 열처리 조건에서의 비커스 경도 및 샤르피 충격 시험을 수행하였으며, 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM) 및 투과전자현미경(TEM)을 활용한 미세조직 분석을 통해 석출물의 형성 및 상

변화를 관찰하였다. 그 결과, HIP 열처리 진행 여부에 따라 오스테나이징 시간 조건에 따른 경도와 충격 인성의 변화가 다르게 나타남을 확인하였다. 이러한 결과는 HIP 열처리에 의한 미세조직과 석출상의 변화에 기인한다. 본 연구를 통해 15-5PH 스테인리스강의 열처리 조건이 기계적 성질과 미세조직에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였으며, 이를 통해 최적의 열처리 조건을 도출하고자 한다.

[철강A2-6 | 11:40]

Effects of Paint Baking on tensile properties and hydrogen embrittlement of martensitic medium-Mn steel: Jin-Young Lee (Yonsei Univ.), Won Hui Jo, Jae Bok Seol (Kookmin Univ.), and Young-Kook Lee* (Yonsei Univ.)

Keywords: Medium-Mn steel, Martensitic steel, Paint baking, Epsilon carbide, Hydrogen embrittlement

The warm stamping process using medium-Mn steels has recently attracted significant attention due to its lower austenitizing temperature and the feasibility of air cooling instead of die quenching. In this study, we investigated the effects of paint baking on the tensile properties and hydrogen embrittlement resistance of martensitic medium-Mn steel. Paint baking enhanced the tensile properties by raising the yield strength from 1022 MPa to 1528 MPa and the total elongation from 10.0% to 12.0%, while the ultimate tensile strength decreased slightly from 2178 MPa to 1946 MPa. In addition, paint baking markedly improved hydrogen embrittlement resistance, primarily through forming ε carbides, which introduced strong hydrogen trap sites and thus increased the non-diffusible hydrogen content.

[철강A3-1 | 14:00]

39K급 고강도 BH강의 미세조직과 기계적 특성과의 상관관계: 이정섭*, 한천하, 이승철, 황인석, 나광수 (현대제철연구소)

Keywords: 소부경화강, EBSD, 미세조직분석, 기계적 성질

소부경화강은 고용탄소 함량을 제어하여 잔류탄소의 코트렐 분위기가 전위의 움직임을 제한하여 도장 이후 항복강도가 증가하게 된다. 이러한 특징을 활용하여 극저탄소강 기반 35K급 강판이 자동차 외판 및 구조용 내판으로 널리 사용되는데, 여러 완성차 기업에서 구조 강성확보에 따른 고강도화를 요구하고 있다. 35k급 소부경화강은 저탄소강 기반 고용강화 원소 Mn, P 첨가로 강도를 증가시키지만, 높은 고용원소 함량은 표면결함을 유발하게 되고 임계수준으로 제한된 극저탄소강은 고강도화를 실현하기 어렵다. 39K급 소부경화강은 높은 항복강도에 따른 탄소함량을 증가시키고, 동시에 R값, BH, 시효를 보증하기 위해서 고용탄소 제어를 위한 합금설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 극저탄소강 기반 첨가원소를 제어하여 39K급 소부경화강을 제조하고, 미세조직 분석을 통해 기계적 특성과의 상관관계를 고찰하였다.

[철강A3-2 | 14:15]

Evaluation of the Effect of Titanium Content on Recrystallization and Precipitation Behavior in Ti-Nb Alloyed Cold-Rolled Ultra-High Strength Low Alloy Steels: Sang Hun Shin*, Jong Myeong Kim, Changgeun Lee (Hyundai Steel R&D Center), Asmaa Albeltagy, Alexander Gramlich (RWTH Aachen University), and Kwang Su Na (Hyundai Steel R&D Center)

Keywords: Recrystallization kinetics, Precipitation behavior, Ti-Nb system, Strengthening mechanism

This study examines the influence of titanium concentrations (1000, 1500, and 2000 ppm) in a titanium-niobium alloy system on the recrystallization and precipitation behaviors of ultra-high strength low alloy (UHSLA) steels. The effects of heat treatment parameters, specifically time and temperature, on these metallurgical processes are analyzed. Recrystallization kinetics are evaluated through hardness testing and Electron Backscatter Diffraction (EBSD), with grain orientation characterized using the Orientation Distribution Function (ODF). Transmission Electron Microscopy (TEM) is employed to quantify precipitate size and distribution, providing insight into microstructural evolution. The study further investigates the contribution of key strengthening mechanisms, including dislocation density, precipitation hardening, and grain refinement, under different thermal treatment conditions. The results demonstrate the interdependence of alloy composition and heat treatment in optimizing the mechanical properties of UHSLA steels. These findings provide a basis for refining alloying and processing strategies to enhance steel performance in industrial applications.

[철강A3-3 | 14:30]

균일 및 국부 성형성을 향상시킨 고성형성 냉연 초고장력강 개발: 이선규*, 홍진성, 이상욱, 한영철, 한성경, 권태우 (현대제철연구소)

Keywords: Automotive Steel, Dual Phase with improved formability

국내 및 글로벌 주요 자동차사는 연비 및 충돌 안전 규제에 대응하기 위해 자동차 부품에 초고장력강 적용 비율을 확대하는 추세이다. 난성형 부품에 더 낮은 두께와 높은 강도를 가지는 강판을 적용하기 위해, 강도와 성형성의 균형이 우수한 초고장력강판 개발이 요구되고 있다. 현대제철은 성분 및 미세조직을 제어하여 기존 동급 강판 대비 우수한 성형성을 갖는 DH강종을 개발하였으며, 이 강종은 2상으로 구성된 DP강판(Ferrite+Martensite)에 오스테나이트를 잔류시킨 것이 특징이다. 성형성이 우수해 보다 복잡한 형태의 부품에 적용이 가능하여 차량의 충돌인성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 현대제철이 개발한 590~980MPa급 DH강의 개발 컨셉 및 특성에 대해 설명하고, 해당 강종의 기계적 특성과 자동차 적용 물성에 대해 고찰하였다. 이를 통해 자동차 차체 경량화 및 안전성 향상에 기여할 수 있는 고성능 강판의 개발 방향성을 제시하고자 한다.

[철강A3-4 | 14:45]
냉연 마르텐사이트(MS) 강의 기계적 성질과 수소취성에 미치는 텐션 레벨링의 영향: 공종팔*, 방찬우, 최강현, 류주현, 정연승, 황아인 (포스코 기술연구원)
Keywords: 마르텐사이트강(MS), 텐션 레벨링, 인장물성, 굽힘, 수소취성

최근 글로벌 전기차(EV) 및 하이브리드차(HEV) 시장이 급성장함에 따라, 승객 및 충돌 안전성뿐만 아니라 배터리 보호를 위해 인장강도 1.5GPa급 이상의 Hot Press Forming(HPF) 및 냉연 마르텐사이트(MS)강의 적용이 급격히 증가하고 있다. 특히, 전 세계적으로 탄소중립 등의 이슈로 인해 자동차 보강재에 적용 중인 HPF에서 저탄소·저비용인 냉연 MS강으로의 전환이 활발히 진행되고 있다. 냉연 MS강은 롤포밍(Roll forming) 및 스탬핑(Stamping) 공정을 통해 부품을 성형하며, 최종 부품의 치수 정밀도를 위해 원소재의 우수한 형상이 요구된다. 일반적으로 MS강은 급냉 공정을 통해 제조되며, 급격한 상변태로 인해 형상이 열화되어 이를 교정하기 위해 텐션 레벨링(Tension Leveling)등이 적용된다. 특히, 수냉(Water quenching) 공정을 통해 제조된 MS강은 냉각 속도가 빨라 원소재에서 Twist 및 Wave 등의 변형이 과도하게 발생하여 이를 교정하기 위해 과도한 텐션 레벨링이 적용될 수밖에 없다. 따라서, 과도한 텐션 레벨링 적용 시 표층부 가공 경화로 인해 기계적 성질 및 수소취성에 악영향을 미칠 것으로 예상되며, 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 현재까지의 선행 연구는 주로 텐션 레벨링이 강재의 평탄도와 잔류 응력에 미치는 영향에 초점을 맞추고 있다. 본 연구에서는 인장강도 1.5GPa급 이상의 냉연 MS강의 기계적 성질(인장, 굽힘) 및 수소취성에 미치는 텐션 레벨링 연신율의 영향을 조사하였습니다. 인장강도 1.5GPa급 냉연 MS강에서 텐션 레벨링 연신율 증가 시 표층부 가공 경화로 인해 항복강도(YS)는 증가하나, 연신율 및 굽힘 특성은 점진적으로 감소함을 확인하였다. 또한, 텐션 레벨링 연신율이 높을 경우 표층부에 수소 Trap Site(트랩 사이트) 증가로 인해 확산성 수소량이 증가하고, 이로 인해 수소취성 저항성이 낮아짐을 확인하였다. 이러한 문제를 극복하기 위해 POSCO에서는 냉각 조건을 최적화하여 형상이 우수한 냉연 MS강을 개발하였으며, 텐션 레벨링 적용을 최소화하여 표층 가공 경화를 저감함으로써 우수한 굽힘 특성 및 내수소취성을 확보하였다. 현재 형상이 우수한 POSCO 냉연 MS강은 자동차(EV 등) 보강재의 다양한 부품(Bump, Sill side 등)에 양산 적용되고 있다.

[철강A3-5 | 15:00]
냉간 단조용 비조질강의 바우싱거 효과에 관한 연구: 임재한* (현대제철연구소, 인하대학교), 이규호, 이상원 (현대제철연구소), 박문원, 이종혁, 장병록* (인하대학교 제조혁신전문대학원)
Keywords: 냉간 단조, 비조질강, 바우싱거, 전위, 인발

최근 전 세계적으로 환경 규제가 강화됨에 따라 자동차 시장에서는 CO2 저감 등 친환경적인 목표를 달성하기 위한 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이와 관련하여, 자동차 산업에서는 조질강에서 열처리 생략이 가능한 비조질강으로의 전환이 증가하는 추세이다. 특히 냉간 단조용 비조질강은 자동차의 체결 부품이나 조향 부품에 사용되며, 두 가지 공정에서 열처리를 생략할 수 있는 장점이 있다. 첫 번째는 냉간 단조성을 향상시키기 위한 구상화 열처리, 두 번째는 기계적 특성을 부여하기 위한 조질(Quenching & Tempering) 열처리 공정이다. 따라서 냉간 단조용 비조질강은 열처리를 생략하는 대신, 금형 수명을 확보하고 냉간 단조성 및 기계적 특성을 충분히 확보하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 가공 경화 및 바우싱거 효과(Bauschinger effect)를 활용하여 비조질강의 기계적 특성과 냉간 단조성을 확보하고자 하였다. 이를 규명하기 위해 10~50%까지 냉간 인발된 선재의 인장/압축 특성을 분석하였고, EBSD를 통해 인장/압축 전후의 전위 밀도와 거동을 비교함으로써 바우싱거 효과를 정량적으로 분석하였다. 그 결과 38% 인발된 합금에서 가장 우수한 효율을 나타내었으며, 이를 바탕으로 비조질강의 최적 인발 감면률을 제시하고자한다.

[철강A3-6 | 15:15]
법랑강의 재질 및 밀착성에 미치는 Tramp 원소 영향도 평가: 이병호*, 조민호, 주형돈 (포스코 기술연구원)
Keywords: 법랑강, 스크랩, 잔류원소, 법랑 밀착성, 재활용비 인증

최근 국내/외로 최종 소비재의 환경 영향도에 대한 소비자의 관심이 높아지면서 제품 사용 측면 뿐만 아니라, 제품을 구성하는 소재 측면에도 고객이 관심을 기울이고 있다. 이로인해 대형 가전사나, 자동차사 등 철강의 주요 고객사들이 소재를 생산함에 있어서의 탄소배출량을 저감해달라는 요구와 함께 재활용율비를 늘이고, 이에 대한 제3자 인증을 요구하고 있고, 그 대표적인 예가 ECV recycled contents 인증으로 제품을 생산함에 있어 사용된 재활용품의 비율을 인증하는 것이다. 하지만, 제품의 재활용율 비율은 용해하는 기술적으로도 한계가 있지만, 제품의 기능이나 성능 측면에서도 마냥 높일수 만은 없다. 이는 스크랩으로 대표되는 재활용품 내에 제강 공정에서 제거되기 힘든 Tramp 원소들이 다량 포함되어 있고, 재활용율이 증가할수록 이러한 잔류 원소의 함량이 늘어나기 때문이다. 본 연구에서는 가전 오븐용으로 주로 활용되는 법랑 강판에서 강 성분 내 잔류 원소가 증가하였을 경우 소재의 성능에 미치는 영향도를 분석하고자 하며, 이러한 영향도를 어떻게 최소화할 수 있을지에 대해 연구하고자 한다. 잔류원소의 함량을 모사한 용해-압연을 통해 잔류 원소가 법랑강의 재질이나 유약층과 강판 사이의 내 Fish Scale성, 법랑성에 미치는 영향도를 분석하고 이의 영향도를 무해화할 수 있는 제조 조건의 영향도에 대한 연구 결과를 공유하고자 한다.

[철강A3-7 | 15:30
수소취성 물성이 향상된 고강도 볼트용 소재 개발: 이봉희* (현대자동차 연구개발본부)
Keywords: 금속, 하드웨어, 볼트, 수소취성, 고강도

탄소 중립의 중요성이 강조됨에 따라 전세계적으로 탄소 배출 저감을 위한 친환경 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 이는 자동차 산업에도 큰 영향을 주어 EV와 같은 차량 전동화 기술이 주요 관심사가 되었고, 당사에서도 EV 전비 및 AER 개선을 위한 기술 개발에 힘쓰고 있다. 이 중 전기차의 1회 충전 주행 거리를 나타내는 AER(All Electric Range) 성능은 배터리 용량에 직접

적인 영향을 받는다. AER 개선을 위해 차량용 배터리 무게가 증가하면, 이를 직접적으로 지지하는 샤시 부품의 가혹도도 증가하게 되고 이에 따른 샤시 부품의 내구성 강화 니즈도 함께 증가되고 있다. 자동차용 볼트는 샤시부품의 가혹도 증가에 따라 직접적으로 내구성이 필요 한데 고강도화 됨에 따라 수소취성 위험성도 같이 높아지는 문제가 있다. 이 를 해결하고자 수소지연파괴 물성은 문제 이력 없는 12T급 수준이면서 강도는 14T급 이상인 소재를 개발하였고, 기존소재와 비교 평가를 진행하였다. 그 결과 목표 물성에 부합된 고내구 소재 개발 완료하였으며, 부품 적용 추진을 위하여 부품 개발 진행중이다.

[철강A4-1 | 15:55]

자동차용 PosMAC®1.5 고내식 용융도금 강판: Tae Chul Kim* (포스코 기술연구원), Ilryoung Sohn (포스코 기술연구원)

Keywords: ZnMgAl 고내식 도금강판, 내식성, 내 골링성, 표면외관

1. 서론 최근 들어 유럽철강사를 중심으로 하여 Zn-Mg-Al 도금재의 자동차용 적용이 본격화 되고 있어, POSCO는 고내식 강판인 PosMAC®1.5제품을 양산 판매 중이다. PosMAC®1.5제품의 내식성, 내 골링성, 표면외관 등의 특징을 발표코자 한다. 2. 실험방법 다양한 조성에 대해 광범위하게 실험을 진행하였으며, 광양제철소의 실라인 테스트를 통해 제품을 개발하였다. 물리적 기본 성질, 내식성, Galling 특성, Sealer 접착성, 용접성 등의 자동차 및 가전용 평가를 진행하였다. 3. 결과 요약 자동차 내외판으로 적합한 표면 품질을 확보하였다. 부착량 30% 하향에도 기존의 GI 대비 2~3배의 내식성이 확보되었으며, 조밀한 부식생성물이 형성됨을 확인하였다. 내Galling특성은 매우 우수하여 자동차용으로 GI대비 월등한 프레스 가공성으로 자동차 내외판 생산성 향상이 예상된다. 인산염 처리 특성이 우수하며 또한 양호한 Sealer 접착성 및 GI 대비 유사한 용접특성을 얻을 수 있었다. 이와 같은 결과를 통해, 차세대 자동차용 및 가전용 강판으로 PosMAC®1.5 생산 중이다.

[철강A4-2 | 16:10]

Zn-Al-Mg 고내식 용융도금 흑화강판 미세조직 및 흑화처리 특성: 홍문희* (포항공대 친환경소재대학원), 백두진, 백제훈, 김태철, 권문재 (포스코 자동차소재연구소), 이경황 (포스코 철강솔루션연구소)

Keywords: Zn-Al-Mg, Glavalume, 고내식강판, 용융도금, 흑화층

용융아연 도금강판은 galvanized 강판으로 불리며 세계 연간 생산량 1,400만 톤의 아연 중에서 약 40% 정도를 도금제품 생산에 소모할 정도로 중요한 산업이며, 대부분 자동차, 건재, 가전용으로 사용되고 있고 전세계 용융도금 시장 규모도 150조 이상으로 추정이 된다. 또한 아연에 더하여 Al 용융도금 강판도 우수한 내열성과 내스크래치성을 가지고 있으며 최근에는 자동차용 Hot press stamping 소재로 전세계적으로 400만 톤 이상 생산이 되고 있으며, 전체 Al계 용융도금생산량은 700만 톤 이상으로 추정이 된다. 또한 아연과 Al의 복합성분을 활용한 용융도금 강판도 주로 건재용으로 개발이 되었으며 Al 5%를 함유한 Galfan, Al 55%를 함유한 Galvalume 강판이 상품명으로 판매가 되고 있다. ASTM에 규격 등록된 용융도금 강판은 Zn 및 Al 함량에 따라 각각 GI/GA, Galfan, Galvalume, Al 도금강판이 있으며, KS 규격의 경우에는 PosMAC도 등록이 되어있다. Galfan의 경우에는 KS 규격 등록이 되었다가 2013년 국내 생산실적이 없다는 이유로 규격에서 삭제가 되었고 현재에도 생산하는 업체는 없다. 2000년대에 들어서서는 용융도금 산업계에 2가지의 새로운 흐름이 나타났다. 가. 자동차용 강판 :기존의 전기도금 à용융도금으로 전환, 나. 건재용 강판 : 다양한 Mg 성분을 함유한 고내식 강판 개발. 가) 항의 경우 일본 및 한국의 철강업계를 중심으로 2010년대 중반에 GA 강판 및 GI 강판 양산체계가 갖추어지고 Si, Mn 등 산화성 원소를 함유한 ASH 강판의 도금성도 개발을 완료하였다. 나) 항의 경우 일본에서는 ZAM, Superdyma, ZEXEED, Ecogal 등의 제품이 개발되고 국내에서도 PosMAC 제품을 개발하였으며 이들 제품은 주로 건재용으로 태양광, 풍력 등 가혹한 환경을 요구하는 환경에 사용 중이다. 또한 유럽의 경우에는 Mg 첨가 강판을 자동차용으로 개발하려는 시도가 있었으나 표면품질 확보의 어려움 및 용접성, 도장성 등의 문제로 인하여 현재까지 대량으로 사용하지는 않고 있다. 한편 Mg 첨가 도금강판의 경우는 장기간 보관할 때 결로 등에 기인하는 흑점이 아연도금 강판에 비하여 도금층 표면에 심하게 발생하는 단점이 있는데, 최근의 연구에 의면 흑점 현상을 반대로 이용할 목적으로 고온 고습 분위기에 1~50시간 노출시에 도금표면 전체가 흑화하는 상이 일어나는 것으로 알려졌다. (G. Jiang,Pro. of Galvatech'23, Seoul, Rep. of Korea, October 2023, p.159). (Y. Uchida et al, Tetsu-to-Hagane. 72(1986), p. 1013). 최근에는 국내 연구진에 의하여 Zn-Al-Mg 도금강판을 대상으로 고습화 흑색강판 표면을 분석한 결과 산소결핍 ZnO 산화물 이론이 타당한 것으로 발표가 되었다 (강유진, 이명훈 www.preprints.org, doi;10,20944/preprints 202312. 0634.v1). 본 연구에서는 다양한 용융도금 제품 100*200 크기의 컷샘플을 100~150ºC의 온도에서 습도를 80~95 RH% 범위로 유지한 후에 수증기를 이용하여 1~2시간 훈증을 하였다. 시험은 상업적으로 판매되는 호리바 제품을 활동하여 밀폐된 공간에서 지지대에 시험편을 직각으로 세운 후에 수증기에 접촉하는 방법으로 행하였다. Mg 첨가제품은 0.5% 이상 첨가에 흑색으로 변하였으며, 특수용액 전처리에 의해 흑화현상이 가속화됨을 발견하였다. 즉 기존의 1시간 이상 걸리던 흑화처리 시간이 수분 이내로 단축됨을 알 수 있었다. FIB를 이용하여 도금층 단면을 관찰한 결과 수 ㎛ 깊이로 흑화처리가 되어있었으며 흑화는 Mg, Al을 포함하는 라멜라 층에서 진행이 되었고 Zn 초정의 단상에서는 흑화현상이 관찰되지 않았다. 또한 도금층 미세조직 차이에 의해서 도금층/소지철 계면까지 도금층 전체에서 흑화현상이 진행되는 경우도 있었다. 즉 흑화현상은 도금층 Mg 농도 및 미세조직에 크게 의존함을 알 수 있었다. 또 다른 방법인 가. NaOH 20% 용액처리 나. 불꽃 가열을 사용한 경우에서도 흑화현상이 발현되었으며 흑화정도는 도금층 성분에 따라서 상이한 특성을 보였다.

[철강A4-3 | 16:25]

선박 및 화력발전 탈황설비용 초고내식 스테인리스강의 개발 및 적용: 이계만*, 김지수, 홍승갑 (포스코 기술연구원)

Keywords: 스테인리스, 탈황설비, 초고내식, S31254

대형 선박의 주연료인 벙커C유와 화력발전의 주연료인 석탄은 다량의 황(Sulphur)를 함유하기 때문에, 연소 과정에서 황산화물

(SOx)이 포함된 가스를 배출한다. SOx는 질소산화물(NOx)과 함께 대표적인 대기오염물질로 알려져 있으며, 그 배출규제가 갈수록 강화되기 때문에 선박과 화력발전에는 배출가스의 SOx를 포집할 수 있는 탈황설비를 필수로 설치하는 추세이다. 배출가스 내의 SOx는 물과 반응하여 황산 부식을 유발할 뿐만 아니라, 석탄 해상 운송 과정 및 선박 운용 환경에서 고농도의 염분에 노출되기 때문에 탈황설비용 소재는 최고 수준의 내식성을 요구한다. 본 발표에서는 선박 및 화력발전 탈황설비에 적용되는 초고내식 스테인리스강의 특성에 대해 소개하고, POSCO에서 개발한 초고내식 스테인리스강인 S31254강의 적용사례들을 소개한다.

[철강A4-4 | 16:40]

탄소 활용에 의한 경제형 2상 스테인리스강의 공식저항성 향상: 하헌영*, 이태호, 조효행, 이진종 (한국재료연구원), 이지원 (한국재료연구원, 부산대학교)

Keywords: 2상 스테인리스강, 탄소, 부식, 부동태 피막, 재부동태

오스테나이트계 스테인리스강(austenitic stainless steel, γ-SS)에서 니켈 함량을 저감하고 망간, 질소, 탄소 등의 γ 상안정 원소를 활용하는 것은 소재의 경제성 향상에 효과적이다. 특히, 탄소는 오스테나이트 기지 내에서 고용상태로 존재하는 한 부동태 피막의 보호성을 증가시키고 모재를 보다 귀(noble)하게 하므로 공식 및 일반부식의 관점에서 모두 유리하다. 그러나, 이러한 탄소의 장점에도 불구하고 2상 스테인리스강(duplex stainless steel, DSS)에서의 탄소의 활용에 대한 연구는 상대적으로 미진한 상태이다. 이는 DSS가 탄소 고용한이 낮은 페라이트상을 포함하며, 따라서 첨가된 탄소가 석출할 위험성이 높은 특성에 주로 기인한다. 본 연구에서는, 상용 DSS 및 상용 DSS의 질소 일부를 탄소로 치환한 합금 2 종을 제조하고 이의 공식부식 특성을 조사·비교함으로써, DSS의 내식성에 미치는 탄소 활용의 효과를 연구하였다. 시험 결과, 질소의 일부를 탄소로 치환한 DSS는 기본 조성의 DSS보다 내공식성이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과는, 탄소 활용시 DSS 부동태 피막 내 Cr 농도가 증가하여 피막 보호성이 강화되고, 재부동태가 촉진됨으로써, 공식의 생성은 억제되고 발생한 공식의 소멸은 활성화되기 때문으로 조사되었다.

[철강A4-5 | 16:55]

Lean duplex stainless steel의 HAZ부 인성에 미치는 조성 및 미세조직의 영향: 최가영*, 김지수, 송석원 ((주)POSCO)

Keywords: 스테인리스강, 듀플렉스스테인리스

Ni과 Mo 함량이 감소된 Lean duplex stainless steel은 높은 항복 강도를 가지면서도 부식 저항성을 만족하기 때문에 수문, 물저장 시설, 건축 자재 등의 용도로 사용됩니다. Lean duplex stainless steel은 오스테나이트 상 안정화 원소인 Ni 함량을 줄이면서도 오스테나이트 상과 페라이트 상의 비율을 각각 40:60으로 유지해야 합니다. 따라서 Ni 대신 오스테나이트 상을 안정화할 수 있는 Mn이나 N 원소를 적극적으로 활용하는 것이 필수적입니다. 제강 기술의 발전으로 용강에 N을 첨가하는 것이 용이해졌으며, 그 결과 N 함량이 중량 기준 0.15% 이상인 경우가 많아졌습니다. 그러나 이는 용접부에서 충격 인성이 감소하는 문제를 초래했습니다. 본 연구에서는 용접부의 HAZ(Heat Affected Zone) 인성을 개선하기 위해 델타 페라이트 단상 영역을 최소화하고 응고 중 오스테나이트 상을 확보하는 설계를 수행했습니다. SAW(Submerged Arc Welding) 중 용접부의 인성을 150J 이상으로 개선하였으며, STS304와 동등한 부식 저항성과 450MPa 이상의 인장 강도를 만족시켰습니다.

[철강A4-6 | 17:10]

페라이트계 고실리콘강과 오스테나이트계 고망간강에서의 열응력 형성과 열크랙 생성에 대한 연구: 김연석, 김수현, 정창곤 (포항공과대학교), 조경철 (포스코기술연구원), 이재상, 허윤욱* (포항공과대학교)

Keywords: Thermal crack, Thermal stress, Fracture

철강 제품의 사용 분야가 점차 확장됨에 따라서, 요구되는 물성도 다양해지고 있다. 원하는 물성을 충족하기 위해서는 합금원소 첨가가 필수적이다. 그러나, 합금원소의 다량 첨가는 강종의 기계적 성질에 변화를 주어 제품 생산 과정에서 예기치 못한 열크랙을 발생시키기도 한다. 슬라브 열크랙은 주조 후 냉각 및 적치 단계에서 자주 발생하는데 이러한 크랙은 예측과 발생 감지가 어렵다는 특징이 있다. 슬라브의 열크랙 형성은 막대한 경제적인 손실을 유발하기 때문에, 열크랙 형성 메커니즘에 대한 정확한 이해가 필요하다. 이를 위해서는 강의 대표적인 기지조직인 페라이트와 오스테나이트 기지에서의 열응력 형성 거동에 대해 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 열수축을 제한 후 온도를 감소시켜 열응력이 발생하는 상황을 모사함으로써, 페라이트계 고실리콘강과 오스테나이트계 고망간강에서의 온도변화에 의해 발생되는 열응력을 측정하는 실험을 진행하여 두 강종의 상이한 열응력 형성 거동을 비교하였으며, SEM, EBSD, EPMA 그리고 TEM을 통해 열응력 시험 시편의 미세구조를 분석하여 열크랙 형성 메커니즘을 조사하였다. 조사한 메커니즘과 측정 열응력, 그리고 측정한 결정립 크기, 격자상수, 탄성 계수를 비롯한 강의 미세구조 인자와 물리적 인자를 토대로 두 강종의 상이한 열크랙 거동을 정량적으로 설명하고자 하였다.

[철강A4-7 | 17:25]

Optimizing roll pass design: integrating QKaliber and QForm UK for enhanced roll stress analysis on a multi-thread wire rod mill: Sergey Stebunov*, Vitaliy Belugin, Igor Alimov, Evgeniy Kopylov, Pavel Maltsev (QForm Group FZ LLC), Nikolay Biba (Micas Simulation Ltd.), Hotaek Kwak, and Changsoon Jang (CAE Technology Inc.)

Keywords: Finite Element Analysis, Roll pass design, Rolling, Optimization, Steel & Cast-iron roll

Optimizing roll pass design (RPD) is critical for ensuring operational efficiency and extending tool life in modern rolling mills. This article examines the use of QKaliber software to streamline the RPD process for profiles in longitudinal rolling. With its built-in analytical formulas, the software computes key rolling parameters such as metal deformation, temperature, speed regimes, and energy-

force characteristics. QKaliber delivers rapid roll stress calculations for all passes, using different methodologies for steel and cast-iron rolls, and it identifies critical passes where roll loading exceeds mill limits. The article also presents a case study involving a roll pass design project on a 250 rolling mill producing wire rod in four simultaneous threads over 23 stands. The primary objective is to assess the feasibility of rolling four threads while keeping rolling forces within allowable limits to reduce the risk of roll damage. The paper demonstrates the optimization of roll pass design using both analytical and numerical approaches, with the analytical calculations verified through Finite Element Method simulations in QForm UK. This integration not only enhances project understanding but also underscores the advanced, user-friendly capabilities of QKaliber software in RPD.

가공-표면처리
Room 300, 4월 23일

[표면처리1-1 | 09:00]
Shot Peening 후 질화처리를 통한 Ti-12.1Mo-1Fe 합금의 기계적 및 전기화학적 특성 향상: 이승우, 이동근* (순천대학교)
Keywords: Metastable β-titanium alloy, shot peening, nitriding, wear, corrosion properties

타이타늄 합금은 비강도가 높고 내식성이 우수하여 자동차 구조물 소재로 적합하지만 내 마모성이 떨어져 지속적으로 마모되는 부품에는 적용이 제한된다. 이에 타이타늄 합금 표면에 열적 또는 기계적 표면처리를 수행하여 내마모성을 개선하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 가스 질화는 표면에 질화물 층을 형성하여 경도와 내마모성을 크게 향상시키나 고온에서 장시간 처리하여 에너지 소모량이 많고 내부 미세구조에 영향을 미친다. 본 연구에서는 값 싼 합금원소인 Mo, Fe의 첨가로 가격경쟁력이 우수한 준안정 베타 Ti-12.1Mo-1Fe 합금 을 이용하여 4가지 표면처리 조건 (As-recived, Shot peening, Nitriding, Shot peening + Nitriding)에 따른 미세조직을 관찰하였다. 또한, 표면처리 조건에 따른 기계적 특성을 분석하기 위해 Ball-on-disc 방식의 마모 시험을 수행하였으며, 동전위 및 정전위 분극시험을 통해 전기화학적 특성을 평가하였다.

[표면처리1-2 | 09:15]
Investigation on interfacial adhesion strength of multi-layered Al_2O_3 coatings manufactured by laser cladding: Sumin Song (Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang Univ.), Taebum Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Jeongho Han (Hanyang Univ.), and Kyuntaek Cho* (Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: Laser cladding, Ceramic coating, Adhesion strength, Ni island phenomenon

Ceramic coating has been highlighted in steel industries because of its outstanding properties including hardness, high-temperature stability, and wear resistance. As ceramic coating has been challenging to be manufactured on metal matrix due to mismatch of the coefficient of thermal expansion (CTE), multi-layered system whose composition is gradually changed has been adopted to overcome thermal-physical differences and improve interfacial adhesion strength. In this study, an experimental study was carried out to compare the interfacial adhesion strength of Al_2O_3 coatings formed by adopting two different multi-layered coating system and investigate the mechanism of improvement of coating performance. In order to determine how multi-layered system could affect on coating performances, Al_2O_3 coatings were built as duplex type and gradient type by introducing Ni intermediate layer through laser cladding. Furnace Cycle Test (FCT) was conducted at 1200ºC to demonstrate the ability to withstand high temperature without fracture and cracking, which were observed by Scanning Electron Microscope(SEM). After FCT, XRD was carried out to identify the amount of specific phases that could be attributed to coating delamination. In addition, adhesion strength of two ceramic coating was compared through ASTM C633. It is considered that thermal stresses caused by a large temperature gradient could be released by duplex coating, which result in reduction in coating defects including crack, pore and Ni island phenomenon. As a result, it is clearly indicated that duplex coating system was more suitable for stably building ceramic coating by overcoming thermal-physical differences between metal and ceramic.

[표면처리1-3 | 09:30]
금속 제조현장 산업 안정성 향상 및 사고 예방 (Enhancing Industrial Safety and Accident Prevention in Metal Manufacturing Sites): 최순호*, 권희준, 임영석, 임혜경, 이지희, 이한찬* ((주)이엠에스)
Keywords: Smart-Factory, AI vision system, Risk situation detection, Safety managemen

2022년 1월 50인 이상의 산업현장에서 중대재해처벌법이 시행된 이후 2024년 1월에는 상시 근로자 5명 미만 사업장에 확대 적용되고 있다. 관련법 시행 이후 산업현장의 안전관리 중요성이 더욱 부각되면서 기존의 안전관리 시스템의 고도화가 요구되고 있다. 이런 추세에 발맞춰 AI와 IoT 기술을 접목한 스마트 안전 관리시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 기존 기업이 구축하던 스마트 공장의 주요 관심사가 생산분야에서 안전분야로의 변화하고 시스템이 고도화되면서 다양한 방식으로 재해를 감소할 수 있는 기술이 공장에 도입되고 있다. 공장의 위험을 판단하고 차단하기 위해 실시간 모니터링 및 위험예측을 진행하면 잠재적 위험을 사전에 감지하고 신속하게 대응할 수 있다. 본 연구에서는 AI 기반 영상 분석 기술을 통해 CCTV 영상을 실시간으로 분석하여 다양한 위험 상황을 감지하는 기술을 제시하고자 한다. 다양한 사례를 기반으로 비전시스템의 중대재해 예방 기능을 분석하고 타 산업 분야로의 추가 확산이 가능한지 고려하고자 한다. 연구결과를 통해 산업의 안전관리 체계 개선을 위한 실질적인 방안을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

[표면처리1-4 | 09:45]
금속 표면 결함 검출을 위한 YOLO 알고리즘의 비교 연구: 권희준, 최순호, 이지희, 이한찬* ((주)이엠에스)
Keywords: Metallic Surface Defect Detection, Object Detection, YOLO, Deep Learning, Industrial Quality Control, Computer Vision

최근 산업 분야에서 금속 표면의 결함을 효과적으로 탐지하는 것은 품질 관리와 생산 효율성을 높이는 데 중요한 요소로 작용하고 있다. 금속 표면 결함은 부주의한 생산 공정, 장비 노후화, 유지보수 미흡 등 다양한 요인으로 인해 발생하며, 이를 신속하고 정

확하게 탐지하는 것이 필수적이다. 그러나 기존의 전통적인 이미지 처리 기법은 조명 변화, 반사, 다양한 결함 유형 등 환경적 요인에 의해 성능이 저하되는 한계를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 딥러닝 기반의 객체 탐지(Object Detection) 기술이 금속 표면 결함 탐지 시스템에 적극적으로 활용되고 있다. 특히 You Only Look Once (YOLO) 모델은 실시간 객체 탐지에서 높은 정확도와 빠른 속도를 제공하여 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. YOLO 모델은 다양한 버전이 존재하며, 각 버전은 서로 다른 특성을 가지고 있다. 결함 유형과 검사 환경에 따라 최적의 성능을 발휘하는 모델이 달라질 수 있으며, 이에 따라 다양한 버전의 YOLO 모델이 금속 표면 결함 탐지에 적용되고 있다. 본 연구에서는 YOLO 모델의 버전별 성능을 비교 분석하여 금속 표면 결함 탐지에 가장 적합한 모델을 도출하고자 한다. 이를 위해 GC10-DET 데이터셋을 활용하여 각 YOLO 모델의 탐지 성능을 평가하고, 최적의 모델을 선정함과 동시에 산업 환경에서 적용 가능한 최적화 방안에 대한 연구를 수행하고자 한다.

[표면처리1-5 | 10:00]

가스터빈 고온부품용 열차폐 코팅 개발 및 신뢰성 평가: 장경익*, 박광용, 명상원 (두산에너빌리티), 김상훈, 고윤석 (국방과학연구소)

Keywords: 가스터빈, 열차폐 코팅, YSZ

발전용 또는 항공용 가스터빈의 터빈블레이드와 같은 고온부품은 1,400C이상의 고온고압 환경에 직접적으로 노출되어 Ni계 초내열합금의 수용 온도 범위를 크게 초과하게 된다. 따라서 Ni계 초내열합금의 노출 온도를 낮추기 위해 열전도도가 매우 낮은 지르코니아 기반의 안정화 지르코니아(YSZ, Yttria Stabilized Zirconia)를 코팅하여 열차폐 성능을 확보한다. 또한 급격한 온도변화에 의한 열충격 손상을 방지하기 위해 Aluminide 또는 MCrAlY계 금속합금 소재를 열차폐 코팅과 Ni계 초내열 합금 사이에 코팅을 하게 된다. 이러한 열차폐 코팅은 고온 환경에 장시간 노출됨에 따라 다양한 메커니즘에 의해 손상이 발생하며, 가스터빈의 성능과 수명에 치명적 결과를 초래하기 때문에 가스터빈 고온부품용 열차폐 코팅은 고온 특성 평가의 높은 신뢰성을 기반으로 개발되어야 한다. 본 발표에서는 가스터빈 고온부품용 열차폐 코팅 기술 및 신뢰성 평가 방법에 대한 소개와 고찰을 하고자 한다. 가스터빈, 열차폐 코팅,

[표면처리2-1 | 10:25]

발전용 가스터빈의 열차폐 코팅에서 Bond Coat 조성에 따른 TGO 성장 및 박리 거동 연구: 박상현, 강용진, 김도현, 유연우, 박영진, 박훈관, 이성훈, 남욱희, 변응선 (한국재료연구원), 김세윤* (경남대학교), 권한솔* (한국재료연구원)

Keywords: 발전용 가스터빈, 열차폐코팅, 용사코팅, 본드코트, 미세구조

가스터빈 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)은 발전용 가스터빈에서 터빈 부품을 보호하고, 고온 환경에서 내구성을 향상시켜 가스터빈의 수명을 연장하는 핵심 기술이다. 특히, bond coat는 TGO(Thermally Grown Oxide)의 형성 속도와 박리 거동에 영향을 미쳐 TBC 시스템의 수명을 결정짓는 중요한 요소로 작용한다. 본 연구에서는 상용 분말을 선정하여 다양한 bond coat 조성을 적용한 시편을 제작하고, TGO 성장 속도 및 박리 특성을 비교 분석하였다. 모든 시편은 동일한 Ni 기반 초내열합금(CM939) 기판과 8YSZ(8 mol% Yttria-Stabilized Zirconia) top coat를 적용하였으며, Hf, Si, Ta, Mo 등을 포함하는 다양한 bond coat 조성을 선정하여 제작하였다. 실험은 FCT(Furnace Cycle Test)와 등온산화 실험을 수행하였으며 다양한 bond coat로 구성된 열차폐 코팅 샘플의 열적 내구성 및 고온 노출 거동을 분석하였다. FCT는 1100ºC에서 500사이클, 등온산화실험은 1100ºC에서 1000시간으로 진행하였다. 실험을 통해 각 bond coat의 조성별 TGO 두께 및 박리 거동을 정량적으로 분석하였다. 실험 결과, 특정 bond coat 조성에서 TGO 성장률이 상대적으로 낮았으며, 박리 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 본 연구는 다양한 bond coat 조합의 특성을 체계적으로 분석하여, TBC 시스템의 내구성과 고온 산화 저항성을 향상시키는 차세대 bond coat 설계 시 참고할 수 있도록 수행했다. 특히, 본 연구 결과는 TBC 제작업체에서 bond coat 설계를 최적화하는 초기 데이터로 활용될 수 있으며, 발전용 가스터빈 분야 뿐만 아니라 항공 우주, 산업장비 등 고온 내구성이 필요한 부품의 내열 코팅 개발에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

[표면처리2-2 | 10:40]

전주도금 전해액의 사카린농도에 따른 Fe-Ni 합금 미세조직과 열팽창계수 변화: 김진범, 안다영, 김인경, 박용범, 신세은* (순천대학교)

Keywords: Fe-Ni, 전주도금, 저열팽창특성, 사카린, 미세조직

OLED 디스플레이 제조공정에서 사용되는 FMM (Fine Metal Mask)은 서브 픽셀 영역에만 다이오드 물질이 증착 될 수 있게 hole이 형성된 금속 박판이다. RGB 유기물 증착공정 중에 발생하는 열에 의해 FMM의 변형 및 Hole 위치 틀어짐 등이 발생하지 않도록 열팽창계수가 0에 근접하는 Invar 박판을 사용한다. 현재 FMM에 적용되는 Invar 박판은 Top-Down 방식인 압연공정으로 두께를 줄이는데 한계가 있기 때문에 차세대 고해상도 (UHD급) 디스플레이용 10 μm 이하의 FMM을 제조하기 위해서는 Bottom-Up 방식인 전주도금공정이 적용되어야 한다. 하지만, 전주도금 Invar 극박판의 형상을 유지하면서 상용 Invar 합금 수준의 저열팽창 특성을 확보하기 위해서는 열기계적 열처리 방법을 적용하여 600 ºC이상의 고온에서 장시간 열처리가 필요하다. 전착상태의 전주도금 Invar 미세조직의 균질성을 확보한다면, 열처리 온도와 시간을 단축하여 공정의 효율성을 높일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 전주도금 중 도금 층 표면 응력을 제어하여 Fe, Ni 이온의 확산을 돕는 Fe-Ni 합금 전해액 주요 첨가제인 사카린을 제어하여 Invar 극박판의 미세조직 변화를 조사하였다.

[표면처리2-3 | 10:55]

알루미늄계 도금 종류에 따른 Hot Press Forming 강의 수소취화 특성평가: 천세영, 문병록 (부산대학교 공대 재료공학부 금속공학), 이석규 (포스코 기술연구원), 엄상호 (포스코 글로벌 R&D 센터), 백두진 (포스코 기술연구원), 강남현* (부산대학교 공대 재료공학부 금속공학)

Keywords: 금속, Hot press forming, 도금강판, 수소취화,

Hot press forming 강은 우수한 비강도를 가져 모빌리티의 경량화와 안전성 향상에 크게 기여하고 있다. 그러나 hot press forming 강과 같이 1GPa 이상의 강도를 갖는 고강도 강재는 수소 민감성이 매우 높은 것으로 알려져 있으며, 수소에 노출될 경우 0.5wtppm 이하의 적은 양으로도 수소취화가 발생한다. 수소는 hot press forming 중 또는 공정 이후 사용 환경에 따라 강재 내부로 침투할 수 있고, 이로 인한 수소취화를 억제하기 위해 강재 표면에 도금처리를 하는 방법이 연구되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 자동차 강판에 적용중인 알루미늄 실리콘 도금재와 알루미늄 아연 개발 도금재가 수소환경에 노출되었을 때의 수소취화 특성을 비교하였다. SEM-EDS, EBSD통해 hot press forming 이후 도금량과 도금 종류에 따른 도금층의 변화를 분석하였으며, permeation, TDS를 사용하여 각 도금재 적용 시 수소의 확산 속도, 강재 내 트랩되는 수소양을 측정하였다. 이를 통해 hot press forming 이후 도금층 내 형성되는 금속간 화합물과 그 연속성이 수소 확산 속도 사이에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 바탕으로 도금재 적용 시, hot press forming 과정과 이후 수소 환경에서 각 도금재의 활용성에 대한 평가를 하였다.

[표면처리2-4 | 11:10]

Zn 도금 Si 첨가 강재에서 열처리에 따른 계면 Si-enrichment 기구와 Fe-Zn 합금화 억제 현상: 박형권*, 김성훈, 이진종, 권기환, 김경원, 이창훈 (한국재료연구원 극한재료연구소), 박영도 (동의대학교 신소재공학과), 이태호* (한국재료연구원 극한재료연구소)

Keywords: Zn도금강판, 3세대강판, 액상금속취화

환경오염 및 탄소배출규제가 강화됨에 따라 연비향상을 위한 차량 경량화의 필요성이 커지고 있다. 이에 따라 강도와 연신율을 동시에 갖춘 3세대 강판이 개발되었으며, 이에 대한 관심이 높아지고 있다. 3세대 강판은 열처리를 통해 상온에서 형성된 Retained Austenite의 변형시 변태유기소성(TRIP)을 활용하여 기계적 성능을 향상되는데, 이때 강재에 첨가된 Si은 열처리 과정에서 Cementite 형성을 억제하고 Retained Austenite를 안정시키는 핵심요소로 작용한다. 그러나 Zn 도금 강재의 Si 성분은 galvannealing시 Fe-Zn 합금화를 저해하거나, 점용접시 액상금속취화(LME) 문제를 유발하는 것으로 보고되고 있으나, 그 원인에 대해서 현재까지 명확하게 밝혀진 바 없다. 따라서 본 연구에서는 Zn 도금강재에서 열처리시 코팅층과 모재 계면에서의 Si-enrichment 형성 기구와 그에 따른 Fe-Zn합금화 억제 역할에 대한 연구를 진행하였다. 이를 위해 Si 함량이 다른 두 강재를 제작하고, 전기화학적으로 Zn도금한 후 600 ºC에서 시간대별 열처리를 진행하였다. 이 과정에서 국부적 도금방지를 통해 두 강재에서 열처리시 합금화가 억제되는 현상을 관찰하였으며, 모재로의 Zn 확산거리를 측정하였다. 또한 HR-TEM과 APT를 이용하여 계면에서의 미세조직적 변화를 자세히 관찰하였으며, Thermo-Calc DICTRA 전산모사를 활용하여 계면 현상을 해석하였다. 그 결과, 2 wt% Si이 첨가된 강재는 0 wt% Si이 첨가된 강재에 비해 Zn가 모재로 확산하는 거리가 현저히 짧았으며, Fe-Zn 합금화가 억제되는 거동을 보였다. 또한 코팅층과 모재 계면에서 Si이 축적되어 enrichment된 상태를 확인하였다. 이를 바탕으로 계면에서의 Si-enrichment 기구와 그에 의해 Fe-Zn 합금화가 억제되는 현상에 대해 고찰하였다.

[표면처리2-5 | 11:25]

발전용 가스터빈 고온부품 대상 열차폐코팅의 NiCoCrAlY계 본드코트 조성에 따른 장시간 산화거동 및 수명 연구: 권한솔, 강용진, 유연우, 김도현, 박영진, 박훈관, 이성훈, 남욱희, 변응선* (한국재료연구원)

Keywords: 열차폐코팅, 용사코팅, 본드코트, 등온산화시험, 미세구조

발전용 가스터빈은 대기 중의 공기 및 연료의 연소를 통해 발생하는 고온·고압의 연소가스 운동에너지를 통해 전기를 생성하는 사회 기반 시설이다. 가스터빈의 주요한 부품 중, 고온부품(연소기, 베인, 블레이드 등)은 발생된 고온·고압의 연소가스의 영향을 지속적으로 받는 부분으로서 발전용 가스터빈 성능을 결정 짓는다. 가스터빈 시작 지점의 온도인 turbine inlet temperature(TIT)가 증가할수록 발전용 가스터빈의 발전효율은 증대되므로, 이를 지속적으로 증대시키는 연구와 이를 뒷받침할 수 있는 소재 연구가 병렬적으로 진행되었다. 높은 온도에 의한 고온부품의 손상을 방지하기 위한 방법 중 하나로 열차폐코팅은 금속 본드코트 및 세라믹 탑코트를 Ni계 초내열합금 상에 적용함으로서 고온부품이 실제로 겪는 온도를 낮추고, 산화/부식 저항성을 증대하여 성능을 극대화하고 수명을 증대한다. 본 연구에서는 이러한 열차폐코팅의 구성 요소 중, 본드코트의 조성이 열차폐코팅의 장시간 산화거동 및 수명에 미치는 연구를 수행하였다. Ni계 초내열합금인 CM247 모재 상에 vacuum plasma spray (VPS)을 이용하여 3종의 본드코트를 적층하고, atmospheric plasma spray(APS)을 통해 동일한 8% yttria-stabilized zirconia(8YSZ) 코팅을 적용하였다. 이때 본드코트는 상용으로 실 적용 중인 NiCoCrAlY를 기준 소재로 하여, Hf, Si, Ta, Re 등이 첨가된 차세대 본드코트 소재와의 상호 비교를 수행하였다. 제작된 3종의 코팅 샘플은 대기 분위기 1000ºC에서 최대 15,000시간까지 노출하여 장시간 산화거동을 관찰 및 분석하였다. 본 연구에서는 본드코트 3종에 의한 영향을 확인하고자, 탑코트-본드코트 계면에서 형성되는 thermally grown oxide(TGO)의 변화 양상과 본드코트 표면부의 조성/상 변화에 집중하였다. 발전용 가스터빈의 가동 및 가동중단에 따른 반복적인 가열 및 급속 냉각 환경을 모사하는 실험인 furnace cyclic tester(FCT)를 수행하여 열차폐코팅의 박리와 균열이 발생하는 수명을 정량적으로 확인하였다. 본 연구에서 제시하고 있는 평가 결과는 향후 발전용 가스터빈의 실제 고온부품 대상 열차폐코팅 개발 시, 장시간 노출에 따른 본드코트의 열화 및 내구성을 판단하는데 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

재료강도
Room 300, 4월 23일

[재료강도1-1 | 14:00]
LNG 저장탱크용 9% Ni강의 화학조성에 따른 극저온 충격인성 변화: 박정빈*, 소형섭, 김종철, 박민호, 천승환 (현대제철 기술연구소)
Keywords: 9% Ni강, 극저온, 충격인성

본 연구에서는 9% Ni 강의 C 및 Mo 함량 변화에 따른 극저온 충격인성 변화를 분석하였다. 9% Ni 강은 우수한 극저온 인성과 높은 강도를 갖춰 LNG 저장탱크 및 극저온 환경용 구조재료로 널리 사용된다. 이러한 특성을 확보하기 위해 미세조직 제어와 적절한 합금 설계가 필수적이다. 실험을 위해 각 조성의 9% Ni 강을 열간압연 및 QT(Quenching and Tempering) 열처리를 통해 제조하였으며, 인장시험과 -196ºC 충격시험을 수행하여 재질 특성을 평가하였다. 실험 결과, 저 C 및 저 Mo 함량 조성에서 237J의 우수한 극저온 충격인성이 확인되었다. 충격인성 향상 메커니즘을 분석하기 위해 XRD(X-ray Diffraction), SEM(Scanning Electron Microscopy), EBSD(Electron Backscatter Diffraction) 등을 활용한 미세조직 분석을 실시한 결과, 본 연구에서는 C 함량 감소에 따른 기지 조직인 템퍼드 마르텐사이트의 연화 및 Fresh 마르텐사이트 감소가 주요 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 추가적으로, 고 C 함량 조성에서 Mo 함량을 증가시켰을 때 충격인성이 향상됨을 확인하였다. 이는 Mo 증가로 인한 탄화물 형성 증가가 기지 내 C 석출을 유도하여 조직 연화를 촉진하고 $M_{23}C_6$ 탄화물 형성을 통해 시멘타이트 형성 억제 및 소멸을 유도하여 나타난 결과로 판단된다. 본 연구 결과는 9% Ni 강의 극저온 충격인성 향상을 위한 미세조직 설계 및 합금 조성 최적화에 중요한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

[재료강도1-2 | 14:15]
Influence of Irradiation Defects and RIS on the IASCC Behavior of 316 Stainless Steel in PWR Primary Water: Yun Soo Lim*, Sung Woo Kim, Min Jae Choi, Seong Sik Hwang, and Dong Jin Kim (Korea Atomic Energy Research Institute)
Keywords: Stainless Steel, Protons, Irradiation Defects, RIS, IASCC

Irradiation-assisted stress corrosion cracking (IASCC) of austenitic 316 stainless steel (SS), used in the internal components of a pressurized water reactor (PWR), is considered critical for safe long-term operation. The IASCC mechanism is not fully understood due to its intrinsic complexity; however, it appears to be closely related to microstructural alterations caused by neutron irradiation. Proton irradiation is a well-known useful experimental technique to study neutron irradiation-induced phenomena in reactor core materials. The objective of the present work was to investigate the microstructural features, oxidation phenomena and cracking behavior of proton-irradiated 316 SS to obtain clear insight into the role of irradiation defects and radiation-induced segregation (RIS) on the IASCC susceptibility in a pressurized water reactor (PWR) primary water. Test specimens were irradiated with protons accelerated by an energy of 2 MeV with an average dose rate of ~7.1×10^{-6} dpa/s at a temperature of 360 ºC. Radiation damage depending on the depth was calculated using the SRIM program at a displacement energy of 40 eV. Oxidation tests were conducted under the simulated PWR primary water at 325 ºC with a hydrogen concentration of 30 cm^3/kg H_2O. The types of irradiation damage examined were, Frank loops, dislocations, voids and nano-twins. Frank loops, dislocations and nano-twins were found mainly in the area exposed to a low radiation dose; however, voids were dominant in areas exposed to a high radiation dose. Ni, Si, B and P were enriched, whereas Cr, Mn and Mo were depleted on the grain boundaries associated with RIS. From slow strain rate tests, it was demonstrated that the IASCC susceptibility increased depending on the radiation dose. From the oxidation tests, it was found that Cr and Fe became depleted while Ni was enriched at the grain boundary beneath the oxidation front both in the non-irradiated and proton-irradiated specimens. However, proton-irradiation induced more Cr/Fe depletion and Ni enrichment owing to the irradiation defects and RIS. The promotion of the diffusion of alloying elements by irradiation defects, the severe depletion of Cr along the grain boundaries by RIS, and the easy rupture of the protective surface oxidation layers by pile-up dislocations at a grain boundary, including degradation of the mechanical properties caused by irradiation hardening appear significantly to increase the IASCC susceptibility of austenitic 316 SS.

[재료강도1-3 | 14:30]
적층 제조된 316L 스테인리스강의 크리프 거동에 대한 결정학적 텍스처의 영향: 임광혁, 배종수 (한국과학기술원(카이스트)), Shubham Chandra (Nanyang Technological University), Xipeng Tan (National University of Singapore), 이규민, 심기동* (한국과학기술원(카이스트))
Keywords: 316L 스테인리스 강, 크리프, 집합조직, 적층 제조, 전자빔-분말층 융합 공정

적층 제조(Additive manufacturing, AM)는 미세 구조를 정밀하게 제어할 수 있어 추가적인 후처리 및 가공과정 없이 원하는 물성을 가지는 부품을 제작할 수 있으며, 이를 통해 생산 시간과 비용을 절감하고, 환경 오염을 최소화할 수 있다. 그러나 적층 제조를 통해 미세 구조를 제어한 합금을 실제 산업계에 적용하기 위해서는 제어한 미세 구조가 고온 크리프 물성과 같은 합금의 기계적 특성에 미치는 영향을 이해하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 전자빔-분말층 융합(electron beam-powder bed fusion, EB-PBF) 공정을 이용하여 집합 조직을 제어한 316L 스테인리스 강의 크리프 거동을 보고한다. 650 ºC, 150 MPa~250 MPa 조건에서 고온 크리프 시험을 수행하였다. 주사전자현미경 (scanning electron microscope, SEM), 전자 후방 산란 회절 분석 (electron backscatter diffraction analysis, EBSD), 투과전자현미경 (Transmission Electron Microscope, TEM) 등 미세 구조 분석을 통해 크리프 거동

을 지배하는 주요 메커니즘을 규명하였다. 본 연구는 원자로 격벽 등 고온 환경에서 사용 가능한 크리프 변형 저항성이 높은 AM 316L 스테인리스 강 개발에 기여할 것으로 기대된다.

[재료강도1-4 | 14:45]

조사취화에 따른 Fe-9Cr계 합금의 나노스케일 표면 경도 변화 분석: 정회연 (UNIST), 전은채 (울산대학교), 김주영* (UNIST)

Keywords: 조사취화, Fe-9Cr계 합금, 나노인덴테이션, 경도, 핵융합

지구 열대화 시대에 대응하여 세계적으로 탄소저감을 위한 적극적인 대응책이 필요해지면서 지속가능하고 친환경적인 핵융합 에너지에 대한 주목이 높아지고 있다. 핵융합 에너지는 100억℃ 이상의 환경에서 중수소와 삼중수소가 융합하면서 발생하며, 핵융합로 대면재는 고온에서 중성자가 고속으로 충돌하는 환경에 노출되기 때문에 시간에 따른 대면재의 특성 변화에 대한 정량적 평가가 필요하다. 온도의 경우 대면재 전체에 영향을 미치나, 중성자 조사는 수 마이크로 이내의 영역에서 깊이에 따라 영향 미치는 정도가 달라진다. 따라서 나노스케일 영역에서 깊이에 따라 연속적으로 물성을 평가할 수 있는 새로운 평가법이 필요하다. 또한, 고온 환경은 대면재를 연화시키고 중성자 조사는 취화시키는 서로 상반되는 특성 변화를 야기하므로, 온도와 조사 환경이 동시에 가해질 경우 각각의 영향이 상쇄될 수 있으며 깊이에 따라 그 효과도 다를 것으로 생각된다. 따라서 단일 조건에서 대면재의 기계적 특성 평가뿐만 아니라 복합 조건에서 대면재의 기계적 특성을 깊이에 따라 평가하여 각 환경 조건에 의해 특성 변화가 상쇄되는 정도를 정량화하는 연구가 요구된다. 본 연구에서는 핵융합로 대면재로 사용하기 위해 한국에서 개발한 Fe-9Cr계 합금인 ARAA(Advanced Reduced-Activation Alloy) 강을 대상으로 온도 환경을 조성함과 동시에 이온 조사를 진행하였다. 핵융합로 대면재의 취화와 연화를 평가하는 지표 중 국부적인 기계적 특성을 평가할 수 있는 경도를 활용하였으며, 나노스케일 영역에서 깊이에 따른 연속적인 경도 평가가 가능한 나노인덴테이션을 활용하여 조사 환경에 따른 대면재의 기계적 특성을 정량적으로 평가하였다. 또한, 두 조건이 동시에 조성되는 복합 조건에서 각 조건에 의해 특성 변화가 상쇄되는 정도를 경도 차이를 통해 정량적으로 평가하고 이를 단일 조건에 의해 변한 경도 차이와 비교분석하였다.

[재료강도1-5 | 15:00]

결함 동역학 모델을 활용한 파단의 메커니즘에 관한 연구: 성준호, 심규장, 류일* (서울대학교)

Keywords: 결함 동역학 모델, 멀티스케일 모델, 파괴 메커니즘, 미세구조 진화

재료의 파괴를 예측하는 것은 첨단 산업 공정 설계에 매우 중요함에도 불구하고, 여전히 도전과제로 남아있다. 이를 해결하기 위해서는, 파괴를 유발하는 미소조직내의 다양한 결함 간의 상호작용으로 인한 근본 메커니즘을 규명하는 것이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 최근 개발된 전위 동역학과 유한 요소법을 결합한 결함 동역학 모델을 활용하였다. 본 모델은 다양한 결함 간의 상호작용 뿐만 아니라, 복잡한 경계 조건 및 다중 물리적 현상을 함께 고려할 수 있다. 본 발표에서는 결함 동역학 모델을 활용하여 미소조직내의 파괴 메커니즘을 구현하는 모델을 소개한다. 기존의 연속체 기반 현상론적 모델과 달리, 본 모델은 파단 모델의 기반이 되는 재료 내 기공의 성장, 생성, 합체를 미세구조의 동적 진화 관점에서 상세히 분석할 수 있는 환경을 제공한다. 이 과정을 통해, 다양한 하중 조건 및 극한 환경에서 전위들의 집단적 운동이 재료의 거시적 파단 거동과 어떻게 연관되는지를 조사할 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안된 다양한 상황에서의 재료 파단 모델의 결과를 기존의 현상학적 파단 모델의 결과와 비교함으로써, 본 모델의 타당성을 입증하고 거시적 파단 거동의 미세 메커니즘을 규명한다.

[재료강도1-6 | 15:15]

초음파 공진피로강도 평가방법의 해석이론과 응용사례: 조인식* ((주)엠브로지아)

Keywords: 초음파 피로, 구조재료, 피로강도평가

초음파피로시험은 기존피로시험법과는 달리 20kHz 고주파수의 탄성공진 시험방법으로 최근 다양한 부품소재 피로강도평가 연구분야에서 가속피로시험 평가기술로 활용되고 있다. 최근 연구동향을 보면 다양한 소재에 전통적인 시험결과와 비교 평가뿐만 아니라 고주기에서의 게재물 평가, 고온 및 저온 분위기 시험, 피로 크랙 전파수명에도 관련 연구결과들이 발표되고 있는 상황이다. 하지만 일반적인 피로시험은 하중제어방식으로 응력을 설정하여 피로수명을 평가하지만 초음파피로시험은 변위제어방식으로 시편 끝단의 최대 변위 값 즉, 변위 진폭 값을 가지고 피로응력을 이론적 계산으로 정립하게 되어있다. 이와 같이 기본적인 피로응력 교정기술과 안정적인 피로강도 시험평가 기술이 확보된다면, 그 동안 장시간의 피로시험과 강도해석에 대한 어려움을 새로운 공정 새로운 재료의 응용주기 및 수명평가를 단시간에 평가수행을 할 수 있는 중요한 가속시험평가 법으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 안정된 응력교정과 유지를 위한 방법으로Strain gage와 Fiber Optic 센서를 가지고 동시에 응력교정을 할 수 있고, 실시간 Constant strain 유지할 수 있는 시스템을 구축한 연구결과와 현재 부품소재 재료강도 분야에서 응용되고 있는 다양한 적용 성공사례를 발표하고자 한다.

[재료강도1-7 | 15:30]

A Novel Distortional Hardening Model for Predicting the Strength of Steel Pipes Under Elevated Temperatures and Complex Deformations: Seungwoo Kim, Seonghwan Choi (Department of Materials Science and Engineering and RIAM, Seoul National University South Korea), Soo-Chang Kang (Steel Solution Research Lab, POSCO, South Korea), and Myoung-Gyu Lee* (Department of Materials Science and Engineering and RIAM, Seoul National University South Korea)

Keywords: Anisotropic hardening, Mechanical strength, Dislocation pileup, Linepipe

API line pipes are critical structural components that require accurate mechanical strength predictions to account for the complex

deformations experienced during manufacturing. Recently, the need for reliable strength assessments is continued under operational conditions, particularly at elevated temperatures. This study addresses the challenges of accurately modeling these properties, reducing reliance on trial production, and optimizing pipeline design and manufacturing processes. We propose a novel constitutive model for API X52 steel that effectively predicts Elevated Temperature Tensile Test (ETTT) results across a range of temperatures. The model incorporates key mechanical behaviors, including the yield point phenomenon and dynamic strain aging, while optimizing complex flow curves at various temperatures. Additionally, an anisotropic hardening model within a distortional hardening framework is developed to capture the thermal dependency of the Bauschinger effect. A feasibility study demonstrates the model's ability to accurately predict mechanical behavior under elevated temperature conditions, successfully calibrating both ETTT results and the Bauschinger effect with pre-strain history. This work provides a comprehensive framework for evaluating the performance of API line pipes, offering significant potential to enhance pipeline design and manufacturing efficiency.

[재료강도1-8 | 15:45]

표면막에 의해 생성된 잔류응력이 Fe-Si계 합금의 철손에 미치는 영향: 전지헌, 이소현 (UNIST), 유성현, 안용근, 강춘구 (현대제철연구소), 김주영* (UNIST)

Keywords: Fe-Si계 합금, 철손, 열처리, 잔류응력, 화학 에칭

Fe-Si계 합금은 자속밀도가 높고, 모든 방향으로 자화가 용이하여 모터와 같은 회전 기기에 주로 사용된다. 모터가 구동될 때, 자기에너지가 운동에너지로 변환되면서 에너지 손실인 철손이 발생하여 모터의 성능을 열화시킨다. 따라서 모터의 성능 향상을 위해 철손 감소는 필수적이다. 이를 위해서 공정의 최종 단계에서 열처리를 진행하여, 공정 중 발생한 응력을 제거하고 자화가 용이한 미세조직을 형성시킨다. 그러나 이 과정에서 강판 표면에 2차상으로 구성된 막이 생성되고, 이는 판재와 막 사이에 잔류응력을 형성시켜 철손에 영향을 준다. 이러한 철손을 감소시키기 위하여 잔류응력과 철손의 상관관계에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 하지만 주로 가공에 의해 발생한 잔류응력이 철손에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어지고, 막에 의해 생성된 잔류응력과 철손의 상관관계 관련 연구는 아직 부족한 상태이다. 따라서 본 연구를 통해, Fe-Si계 합금의 제조 공정 중 최종 열처리 단계에서 발생하는 표면막으로 인한 잔류응력을 조사하고, 그에 따른 철손 변화를 분석하고자 한다. 본 연구에서는 화학 에칭을 통해 막의 유무에 따른 잔류응력의 분포와 철손 변화를 분석하였다. 60 × 60 mm 정사각형의 Single Sheet Test 방식을 통해 철손을 분석하였으며, SEM 및 EDS를 통해 표면막의 존재와 화학 성분을 조사하였다. Laser microscope를 통해 막으로 인한 잔류응력이 샘플의 형상에 주는 영향에 대하여 분석하였으며, 철손의 변화를 정량적으로 분석하고 그에 따른 메커니즘을 규명하고자 한다. [본 연구는 2024년도 ㈜현대제철의 지원을 받아 수행된 연구임]

[재료강도2-1 | 16:00] 조청강연

기가스틸 용접금속의 상변태 및 미소 기계적 물성 거동에 대한 Ti 및 Nb 첨가의 영향: 배규열* (포스코 기술연구원), 문준오* (국립창원대학교 신소재공학부), 신찬선 (명지대학교 신소재공학과), 홍승갑 (포스코 기술연구원)

Keywords: 기가스틸, 용접금속, 상변태, 마이크로 인장, 미세합금

복합조직강(Complex Phase, CP 강)은 페라이트와 베이나이트를 주된 기지 조직으로 하며, 소량의 마르텐사이트 및 잔류 오스테나이트를 포함하는 복합적인 미세조직을 갖는다. 이러한 미세조직적 특성으로 인해 CP 강은 초고강도(인장강도 ≥1000 MPa)를 가지면서도 우수한 연성을 유지할 수 있으며, 이에 따라 자동차 부품 제조에 활발히 적용되고 있다. 본 연구에서는 1.0GPa 급 CP 강의 용접금속에서 Nb 및 Ti 첨가가 미세조직 및 인장 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 용접금속의 미세조직은 SEM, EBSD 및 TEM 분석을 통해 평가하였으며, 기계적 특성은 마이크로 인장시험을 통해 검토하였다. 그 결과, 용접금속의 미세조직은 침상 페라이트, 베이나이트, 그리고 소량의 잔류 오스테나이트로 구성되었다. Nb 첨가는 용접금속의 미세조직을 미세하게 하여 강도를 증가시키면서도 연성을 저하시키지 않는 긍정적인 효과를 보였다. 반면, Ti 첨가는 상대적으로 유효 결정립 크기를 증가시키고 잔류 오스테나이트의 분율을 감소시켜 용접금속의 인장 특성을 저하시켰다. Nb 및 Ti 첨가에 따른 용접금속 미세조직 변화의 메커니즘을 규명하기 위해 dilatometer 실험을 수행하였으며, 이를 통해 연속냉각변태(CCT, Continuous Cooling Transformation) 곡선을 도출하였다. 본 연구결과는 1.0GPa 급 CP 강 등에 활용이 가능한 고성능 및 저원가 용접금속 개발을 위한 최적의 합금 설계에 있어 중요한 기초자료를 제공할 수 있을 것이라 기대된다.

[재료강도2-2 | 16:25]

합금 원소 및 열처리 경화 깊이가 비틀림 내구에 미치는 영향: 김민규* (현대자동차 연구개발본부)

Keywords: 비틀림 피로, 고주파 열처리, 드라이브 샤프트, 경화 깊이

최근 자동차 업계는 세계적인 패러다임 변화를 맞이하고 있다. 탄소 배출량 저감을 위한 차량의 전동화 차량으로 전환은 구동 시스템에도 변화를 준다. 베터리 탑재에 의한 중량 증가, 회생 제동 등은 구동 시스템인 드라이브 샤프트의 고강도, 고내구 특성을 요구하게 된다. 드라이브 샤프트는 고주파 열처리에 의한 표면 경화로 부품의 강도와 비틀림 강도를 확보한다. 차세대 모빌리티 시장에 설계, 원가와 중량 증대를 최소화하고 내구성 확보를 위해서는 합금 성분과 고주파 열처리 조건에 따른 내구성 연구가 필요하다. 본 연구에서는 원가를 고려한 합금 성분과 열처리 경화 깊이 조건에 따른 비틀림 피로 내구 특성에 대하여 연구하였다. 경제성을 고려한 탄소강, 망간강, 보론강에 대한 강종별 평가를 진행하였으며, 고주파 경화 깊이가 비틀림 피로 수명에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

[재료강도2-3 | 16:40]
고망간강 용접부 상온/극저온 기계적 물성 평가: 이태호, 정재원 (충남대학교), 강전연 (한국재료연구원), 이수열* (충남대학교)
Keywords: 고망간강, 용접, 극저온, 기계적 특성

최근 지구온난화 가속화에 의해 평균기온 상승폭이 증가되는 환경문제가 두드러지고 있으며, 이상기후의 원인이 되는 온실가스 배출량을 0으로 만드는"탄소중립"정책을 전 세계에서 시행하고 있다. 액체수소는 탄소 화석연료의 대체제로써 고에너지 밀도, 높은 발전효율, 경량성의 장점을 가지며, 차세대 신재생 에너지로 떠오르고 있다. 하지만 액체수소는 초극저온(20K) 이하의 온도 환경에서 보관 및 운송을 해야하는 단점이 있다. 금속 소재는 초극저온 환경에서 연성에서 취성파단면으로 변하며 강도는 증가하고 연신율은 감소하는 초극저온 취성을 가지고 있다. 또한 용접에 따른 미세조직의 차이, 성분차이, 잔류응력은 금속의 기계적 물성을 감소시킬 수 있어서 용접부에 대한 연구는 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 고망간강의 모재부/열영향부/용접부의 상온 및 초극저온(~20 K 이하)에서의 기계적거동 및 변형메커니즘 규명에 주안점을 두고 연구를 진행하였다. 특히, 상온 및 초극저온에서 20~40 mJ/m^{2}의 적층결함에너지와 함께 변형 중에 쌍정이 발생하는 TWIP 변형메커니즘을 가지고 있는 고망간강 소재에 대해서 1) 모재부/열영향부/용접부를 구분하여 초기 미세조직/석출물/경도를 분석, 2) 상온 및 초극저온에서의 기계적 물성 거동을 평가, 3) 변형/파괴메커니즘 규명을 위한 변형 전후 전위/쌍정구조에 대한 미세조직 및 파단면 분석을 통해서 용접 소재의 위치별 기계적 물성을 평가하였다.

[재료강도2-4 | 16:55]
고강도 소재의 표면 오스테나이트화를 통한 우수한 성형성 획득 방안: 김래언, 구강희, 이정아, 최연택, 박효진, 김재훈, 최주미, 김형섭* (포스텍)
Keywords: 성형성, 인장, 헤테로 구조

고강도 재료는 구조 산업에서 필수적이지만, 낮은 성형성으로 인해 산업적 활용이 제한된다. 본 연구에서는 강도와 성형성을 동시에 향상시키는 새로운 방법론을 제안한다. 레이저 처리를 통한 표면 이종구조(surface heterostructuring) 형성은 압연된 마르텐사이트계 스테인리스강에서 국부적인 오스테나이트화를 유도한다. 그 결과, 굽힘 성형성이 크게 개선되어 높은 인장 강도를 유지하면서도 약 180^o 접힘이 가능해진다. 따라서 본 연구에서 제시한 표면 이종구조화는 성형 공정에 맞춘 미세조직 조정을 통해 강도와 성형성의 우수한 조합을 달성할 수 있음을 시사한다.

[재료강도2-5 | 17:10]
Fe-Si계 합금의 미세구조와 자기 특성에 대한 최종소둔 기체분위기의 영향: 이소현, 전지헌 (UNIST), 유성현, 안용근, 강춘구 (현대제철연구소), 김주영* (UNIST)
Keywords: Fe-Si계 합금, 자기특성, 미세구조, 철

높은 규소 함유량과 모든 방향에서 자화가 용이한 미세구조로 이루어진 Fe-Si계 합금은 자기적 특성이 우수한 재료로 전기차의 모터와 같은 회전기기에 사용된다. 하지만 모터가 구동될 때 Fe-Si계 합금 재료에 의해 에너지 손실인 철손이 발생하여 모터의 에너지 효율을 감소시킨다. 이러한 철손을 최소화시켜 고성능 Fe-Si계 합금을 개발하기 위해서 미세구조에 따른 철손 평가 및 상관관계에 관한 연구가 진행되고 있다. 기존 연구에 따르면 Fe-Si계 합금은 외부 자기장에 의해 내부 자구의 이동 및 회전으로 자화가 발생한다. 주파수와 자기장과 같은 구동 환경과 결정립 크기, 방위, 결함과 같은 미세구조가 자구의 이동 및 회전을 방해하여 철손이 발생한다. 이로 인해 Fe-Si계 합금의 미세구조와 구동 환경에 따라 철손이 증가하여 모터의 에너지 효율을 감소시킨다. 본 연구에서는 최종소둔 단계에서 질소와 수소 분율에 따른 Fe-Si계 합금의 미세구조를 관찰하고, 철손을 평가하여 미세구조와 철손과의 상관관계를 분석하였다. 또한 철손을 결정하는 주요 메커니즘을 분석하여 철손의 주요 미세구조 인자를 조사하고자 한다. [본 연구는 2024년도 ㈜현대제철의 지원을 받아 수행된 연구임]

[재료강도2-6 | 17:25]
친환경차 구동 부품 최적화를 위한 철강 소재 물성 연구: 최중길*, 조봉래 (현대자동차)
Keywords: 철강, 모터샤프트, 비틀림 물성, 친환경차, 전기차

모터 샤프트는 전기차 동력을 휠측으로 전달하는 중요 부품 중 하나이다. 하지만 소재에 대한 적합한 시험법이 부재함에따라 그 물성 데이터 또한 확보하기 어렵다. 이러한 물성 데이터 부재로 인해 정확한 내구 해석이나 설계가 어렵고 개발 단계에서의 부품 성능을 정량화할 수 없는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 소재 비틀림 시험법에 대해 연구를 진행하였다. 또한 정립된 평가법을 통해 모터샤프트용 소재 2종에 대한 비틀림 물성 데이터를 확보하였다. 확보된 물성 데이터를 바탕으로 정/동적 물성간 상관성을 도출하였으며, 향후 이 결과를 바탕으로 최적 합금 설계 및 내구 해석 정합성 향상에 활용할 계획이다

[재료강도2-7 | 17:40]
나노다공성 금의 리가먼트 크기 효과와 변형률 속도에 따른 기계적 물성 변화 분석: 김영훈 (UNIST), 전한솔 (계명대학교), 김주영* (UNIST)
Keywords: 나노다공성 금(nanoporous gold), 나노인덴테이션(nanoindentation), 나노역학(nanomechanics), 크기 효과(size effect), 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity)

나노다공성 금(nanoporous gold)은 나노 크기의 리가먼트(ligament)와 기공(pore)으로 구성된 복연속성(bicontinuous) 개방형(open-cell) 구조를 가진 재료로, 일반적인 금에 비해 낮은 상대 밀도와 높은 비표면적 특성으로 인해 촉매, 센서, 액추에이터 등 다양한 분야에서 주목받고 있다. 나노다공성 금에서는 나노역학에서 관찰되는 크기 효과(size effect)와 유사하게, 리가먼트의 크기가 작아질수록 강도가 증가하는 리가먼트 크기 효과(ligament size effect)가 나타난다. 이는 리가먼트 크기가 작아질수록 전위 거동이 억제되어 강도가 증가하기 때문인 것으로 알려져 있다. 일반적으로 나노다공성 금의 기계적 물성은 나노인덴테이션(nanoindentation) 시험법

을 활용한 일축 인장 또는 일축 압축 시험으로 측정되어 왔다. 그러나 기존의 인장 또는 압축 시험만으로는 크기 효과의 근본적인 원인인 전위 거동을 정량적으로 평가하는 데 한계가 있다. 한편, 변형률 속도가 증가할수록 유동 응력(flow stress)이 커지는 변형률 속도 효과(strain rate effect)를 활용하여 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity)를 측정하면, 재료의 활성화 부피(activation volume)를 계산할 수 있으며 이를 통해 전위 거동을 정량적으로 평가하는 것이 가능하다. 이에 착안하여, 본 연구에서는 변형률 속도를 조절하면서 나노다공성 금의 기계적 물성을 측정하고자 하였다. 금-은 모합금을 디얼로잉(dealloying) 공정을 통해 나노다공성 금으로 제조한 후, 열처리를 수행하여 리가먼트 크기를 제어하였으며, 이후 집속 이온빔(Focused Ion Beam, FIB)을 활용하여 압축 시험편을 제작하였다. 플랫 펀치 팁(flat-punch tip)이 장착된 나노인덴터(nanoindenter)를 이용한 변형률 속도 조절 압축 실험을 통해 나노다공성 금의 기계적 물성을 측정하였다. 이를 통해 나노다공성 금의 리가먼트 크기 효과를 확인하고, 리가먼트 크기에 따른 변형률 속도 민감도 및 활성화 부피를 분석함으로써 리가먼트 크기 효과와 전위 거동 간의 관계를 규명하였다.

[재료강도2-8 | | 17:55]

다층 복합재료에서 나타나는 서로 다른 두 가지 주름 형상 및 방지법: 김재훈, 최연택, 김래언, 구강희, 권지혜 (포항공과대학교), 서민홍 (포스코 기술연구원), 김형섭* (포항공과대학교)

Keywords: Metal-polymer-metal laminates, Deep drawing test, Surface wrinkling, Wrinkling limit line, Finite element method

금속-폴리머-금속 (Metal-Polymer-Metal, MPM) 판재는 높은 비강도와 우수한 굽힘강성을 바탕으로 항공, 자동차, 선박 산업에서 주목받고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고, 성형 과정에서 발생하는 주름(wrinkling)현상 때문에 산업에서 광범위하게 활용되지 못하고 있다. 본 연구는 deep drawing 공정에서 MPM 적층소재의 주름을 이론적 분석, 실험, 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 통해 규명한다. 서로 다른 두 형상의 주름이 발생했으며, energy method를 통해 계산한 주름 발생 경계로 나뉘어졌다. 주름 발생 경계 보다 낮은 블랭크 하중 (Blank Holding Force, BHF)를 가했을 때는 모든 층에 전체적으로 동일한 주름이 발생했지만, wrinkling line 이상의 충분히 높은 BHF를 가했을 때는 표면 주름이 발생하였다. 이는 MPM 판재는 주름 방지를 위한 BHF의 영향을 적게 받으며, 단일소재 판재에 비해 wrinkling에 취약하다는 것을 시사한다. 이러한 표면 주름 현상은 금속 표면에 비해 매우 낮은 강성을 갖는 코어의 영향으로 주름 형성에 필요한 에너지가 감소하여 발생한 것으로 분석된다. 코어의 강성이 주름 형성에 미치는 영향을 평가하기 위해 modal analysis와 post-buckling analysis를 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 분석 결과, 코어의 강성이 증가할수록 판재의 모드 형상이 안정화되며, 전반적인 판재 전체의 기계적 특성 변화 없이 주름 발생을 효과적으로 방지할 수 있음이 예상되었다.

전산재료과학
Room 301, 4월 23일

[전산1-1 | 10:00] 초청강연

Designing PtNi ORR Catalysts with Facet-Dependent Doping Techniques: Kihyun Shin* (Hanbat National University)

Keywords: DFT, Nanoparticle, Doping, Fuel Cell, ORR

As fossil fuel reserves deplete and the demand for sustainable energy solutions grows, fuel cells have emerged as a viable alternative. Among electrocatalysts, Pt-based materials demonstrate superior oxygen reduction reaction (ORR) activity; however, their high cost and limited availability present significant challenges. To address these limitations, we employed density functional theory (DFT) calculations to investigate the effects of In doping on PtNi(111) and Mo doping on PtNi(211). In doping on PtNi(111) optimized OH* adsorption while mitigating Ni dissolution, thereby enhancing both catalytic activity and stability. Similarly, Mo doping on PtNi(211) fine-tuned OH* adsorption, further improving ORR performance. Our facet-dependent analysis revealed that doping primarily influences the stability and electronic properties of PtNi catalysts. These findings underscore the effectiveness of combining facet engineering with selective doping as a strategy for developing highly active and durable Pt-based ORR catalysts, paving the way for next-generation fuel cell applications.

[전산1-2 | 10:25]

Computational Insights into the Design of Stable and Efficient Perovskite-Based OER Electrocatalysts: Jaekyum Kim, Jung Kyu Kim*, HyukSu Han* (Sungkyunkwan University), and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

Keywords: Density Functional Theory, Oxygen Evolution Reaction, Proton Exchange Membrane Water Electrolysis, Perovskite Oxide

Proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE) is an essential technology for the sustainable and eco-friendly production of hydrogen. However, its widespread implementation is hindered by the challenge of developing electrocatalysts that can accelerate the sluggish oxygen evolution reaction (OER) while maintaining stability in the highly corrosive PEM environment. Currently, iridium (Ir)-based electrocatalysts are predominantly used as anodes in PEMWE due to their superior catalytic activity and remarkable durability under acidic conditions. Despite their effectiveness, the reliance on scarce and expensive noble metals, such as Ir and Ru, limits the scalability of this technology. In contrast, non-precious metal-based catalysts suffer from severe degradation in such harsh environments, limiting their practical application. Therefore, the fundamental challenge in advancing OER electrocatalysts for acidic media lies in devising an effective strategy that simultaneously enhances catalytic activity and ensures long-term structural stability. In this study, a highly active oxygen evolution reaction (OER) electrocatalyst is presented by alloying catalytically inert perovskite $SrZrO_3$ (SZO) with catalytically active $SrIrO_3$ (SIO) and introducing Re doping. A surface model was constructed to account for the formation of an IrO_2-rich topmost layer, which arises due to Sr leaching during electrochemical operation. Our calculations reveal that Re doping enhances transition metal–oxygen bonding within this layer, improving structural stability under reaction conditions. Additionally, Re doping induces an upshift in the oxygen 2p state, leading to a reduction in the charge transfer energy difference (ΔCT), a key descriptor for OER activity. To accurately capture electrochemical behavior, adsorption calculations were conducted using the constant potential method approach, demonstrating favorable adsorbate interactions and a lower overpotential. These findings provide valuable theoretical insights into the development of highly stable and efficient electrocatalysts for acidic OER applications.

[전산1-3 | 10:40]

Computational Study on Noble Metal-Catalyzed Topotactic Conversion of Mesoporous Molybdenum Carbide: Hayoung Jeong and Jeong Woo Han* (Seoul National University)

Keywords: DFT, Moly carbide, mechanism

The synthesis of highly ordered mesoporous Mo_2C through the Kirkendall effect and nanomaterial-based catalysis plays a crucial role in the nanostructuring of Mo_2C. The catalytic properties of noble metals such as Pt, Ru, and Au have been widely recognized, particularly in their ability to facilitate topotactic conversion. Molybdenum carbide occurs in two distinct forms: α-MoC and β-MoC, with mesoporous Mo_2C predominantly adopting the α-MoC phase due to noble metal catalysis. To further investigate the mechanisms of topotactic conversion and noble metal-induced catalysis on Mo_2C, density functional theory (DFT) calculations were performed. These calculations explored defect formation pathways, illustrating that α-MoC originates from Mo_2CxOy, whereas β-MoC is derived from MoO_2. By identifying optimal vacancy sites and assessing the potential for migration in less favorable configurations, the study focuses on analyzing the structural evolution during MoC synthesis and carbon substitution. A comprehensive analysis of the entire process allowed for the identification of defect formation locations and a deeper understanding of the pore formation mechanism, contributing to an explanation of the Kirkendall effect. Additionally, electrochemical performance was compared through calculations on hydrogen evolution reaction (HER), water dissociation, and hydrogen spillover. In particular, α-MoC demonstrated superior HER and water dissociation properties, with catalytic performance further improved by the presence of Pt. A comparative study was also conducted on

two platinum precursors—phosphomolybdic acid (PMA) as a molybdenum precursor and H_2PtCl_6 or platinum acetylacetonate ($Pt(acac)_2$) as platinum precursors—to assess their interactions. The results indicated that $Pt(acac)_2$, in combination with PMA, led to a more dispersed Pt distribution, preventing agglomeration. Furthermore, interaction energy calculations were carried out to compare these findings with other noble metal systems, providing a broader perspective on catalytic behavior. The results of this study emphasize the benefits of α-MoC's topotactic conversion and highlight its unique characteristics compared to other MoC structures, offering valuable insights into the design and optimization of noble metal-doped carbide catalysts.

[전산1-4 | 10:55]

Strain-Tuned Schottky Barrier Modulation and Energy-Resolved Charge Redistribution in TMDC/Metal Interfaces: Ahn Hyochan and Joo-Hyoung Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology)

Keywords: Transition metal dichalcogenides, Schottky barrier, Contact resistance, Strain engineering, Density Functional theory

Two-dimensional transition metal dichalcogenides (TMDCs) are promising materials for next-generation electronic devices. However, Fermi level pinning hampers precise control over the Schottky barrier height (SBH), posing a significant challenge. Strain engineering has emerged as an effective approach to tune the SBH at TMDC/metal interfaces, yet a comprehensive theoretical understanding of strain-induced effects on band alignment and interface interactions remains limited. In this study, we present a first-principles investigation of strain-mediated SBH modulation by applying external uniaxial strain to MoS2 (WSe2)/metal interfaces. Our simulations reveal that SBH tunability varies across different interfaces under identical strain conditions. Notably, tensile strain effectively reduces the n-type Schottky barrier for most interfaces, whereas compressive strain is required for most p-type Schottky barrier. We identify intrinsic modulation of TMDC band edges as the primary contributor to SBH tunability. Additionally, we distinguish the impact of strain on interface interactions between Group 10 and Group 11 metals, using energy-resolved analysis to decompose strain-induced effects. Our findings offer critical insights into strain engineering strategies for optimizing TMDC/metal interfaces in electronic applications.

[전산1-5 | 11:10]

Revealing Interfacial Superionic Conduction Mechanisms of New Halide Nanocomposite Solid Electrolytes for All-Solid-State Batteries: Jae-Seung Kim and Dong-Hwa Seo* (KAIST)

Keywords: Solid electrolytes, solid-state batteries, halides, DFT calculations, interfacial conduction

The growing demand for high-energy-density batteries in large applications, such as electric vehicles and energy storage systems, has led to an active pursuit of research on solid electrolytes for all-solid-state batteries (ASSBs), motivated by the desire to move away from flammable liquid electrolytes for enhanced safety. Recently, halide-based solid electrolytes have gained significant interest due to their high ionic conductivities, oxidation stabilities and ductility. Here, we report halide nanocomposite solid electrolytes (HNSEs) ZrO2(-ACl)-A2ZrCl6 (A = Li or Na) that exhibit both drastically improved ionic conductivities, from 0.4 to 1.3 mS cm-1 and from 0.011 to 0.11 mS cm-1 for Li+ and Na+, respectively, and compatibility with sulfides. Our density functional theory (DFT) calculations investigate the unique nanostructure of these HNSEs, which provides exceptionally high-surface-area percolating interfaces. Combined with synchrotron X-ray and 6Li nuclear magnetic resonance analyses, we reveal that interfacial oxygen-substituted compounds promote interfacial superionic conduction. Furthermore, ab-initio molecular dynamics with topological analysis and probability density show inherent mechanisms and principles of interfacial conduction. Moreover, compared to Li2ZrCl6, fluorinated HNSE ZrO2-2Li2ZrCl5F enables remarkable enhancements in high-voltage stability and interfacial compatibility with Li6PS5Cl and LiMO2 cathodes without degrading Li+ conductivity. Intrinsic stability window and mutual reaction energy are studied through DFT calculations, shedding light on the fundamental aspects of the fluorination effect of high voltage stability and reduced interfacial reactivity. Based on the understanding of the underlying mechanisms, the HNSEs strategy provides new design principles of superionic solid electrolytes for practical ASSBs.

[전산2-1 | 14:00] 초청강연

Deep learning-based calibration of material parameters for crystal plasticity simulations: Kyeongjae Jeong* (Sungkyunkwan University)

Keywords: Deep learning, Crystal plasticity, Polycrystals, Optimization, Parameter determination

One of the major challenges in the widespread application of crystal plasticity models is the demanding process of identifying their constitutive parameters. Traditional approaches often rely on manual calibration, which is labor-intensive and time-consuming, or optimization algorithms that may struggle with convergence issues and local minima. In this study, we present an efficient and fully automated framework for parameter identification in crystal plasticity models, leveraging deep learning in combination with an optimization scheme. This method enables rapid and accurate determination of material parameters from macroscopic experimental data, making it particularly effective for complex models with numerous parameters. Furthermore, the proposed approach provides insights into the relative importance and sensitivity of different constitutive parameters, enhancing the interpretability of the model. To demonstrate the effectiveness and robustness of this methodology, we apply it to a phenomenological crystal plasticity model for BCC

steel. The ability to systematically convert experimental material responses into optimized digital parameters is crucial to technological advancements in digitizing material property prediction, quality control of intermediate products, and the assessment of mechanical behavior in manufacturing processes.

[전산2-2 | 14:25]

Development of Machine-Learning Interatomic Potential Models and Pressure-based Correction for Accurate Simulation of Binary Molten Chloride Salts: Hyunseok Lee and Takuji Oda* (Seoul National University)

Keywords: Molten Salt, Molecular Dynamic Simulation, Machine Learning, Pressure-based Correction, Thermophysical Property

Molten salts are attracting attention in various industrial fields such as energy storage systems, pyrolysis, and molten salt reactors thanks to their properties such as low melting point, high boiling point, high heat capacity, and chemical stability. Although experimental measurements of the thermodynamic and thermophysical properties of molten salts have been explored for decades, an accurate property database of molten salts has yet to be established due to the difficulty of high-temperature measurements for corrosive materials. In computer simulations, classical molecular dynamics (CMD) and first-principles molecular dynamics (FPMD) have been utilized as an alternative method to explore the properties for various materials including molten salts. Previous FPMD studies for molten salts have often implemented a van der Waals correction to better simulate molten salts; however, there is still a significant gap between FPMD accuracy and experimental accuracy, probably due to the systematic error in density functional theory calculations. In this study, we trained machine-learning interatomic potentials (MLIPs) for two types of binary chloride salts, LiCl-KCl and NaCl-KCl, based on FPMD results to take advantage of both the calculation speed of CMD and the accuracy of FPMD. Vienna ab-initio simulation package (VASP) and Large-scale atomic/molecular massively parallel simulator (LAMMPS) were used for FPMD and CMD, respectively. In order to improve the accuracy of the MLIPs to an experimental level, beyond the FPMD level, we adopted a correction technique to reduce the residual pressure estimated by MLIP at the experimental density, which resulted in reduction of the density error of the MD calculations using MLIP. The correction potential was applied only to the cation-anion pair and was constructed using the unary salts of each binary salt system. In comparison with available experimental results, the densities calculated with the correction potential show good agreement not only for the unary salts but also for the various compositions of the binary mixture, including the eutectic. For further validation, other thermodynamic and thermophysical properties such as viscosity, heat capacity, thermal conductivity, and ionic self-diffusivity were calculated and compared with available experimental data. The results show that the accuracy of the calculated properties is generally improved by the correction.

[전산2-3 | 14:40]

Fast Generation of Radiation Damage Structure in Bcc Tungsten Using a Diffusion Model: JongHyeon Park and Takuji Oda* (Seoul National University)

Keywords: Molecular dynamics, Radiation damage structure, Graph neural network, Diffusion model

In materials used in nuclear reactors, neutron irradiation induces sequential atomic displacements, called collision cascades, leading to the generation of point defects and the formation of complex damage structures such as dislocation loops, voids, and helium bubbles. Consequently, the materials experience various changes in mechanical and chemical properties, including radiation hardening, radiation embrittlement, and radiation-induced segregation. Since these adverse radiation effects arise from structural transformations, it is important to predict the changes in the microstructures. Molecular dynamics (MD) can provide insight into the radiation damage processes and structures. However, MD simulations require large computational resources because the entire collision cascade process is tracked. In a previous study, we developed a code designed to rapidly generate primary radiation damage structures in bcc tungsten, named Primary Radiation Damage structure generator (PRDgen). PRDgen was built using Gaussian process regression and convolutional neural networks and was trained on defect structures computed by MD simulations. PRDgen can predict radiation-induced damage structures 100 times faster than MD simulations. However, PRDgen has limited accuracy in predicting defect clusters formed under high-energy irradiation conditions. In this study, we present a new model that outperforms the PRDgen in terms of speed and accuracy for defect structure generation. The limitations of the previous model came from the intrinsic constraints of convolutional neural networks, which lack generative capabilities. Recently, various AI generative models have been developed. We adopt Stable Diffusion, an open-source code with outstanding performance in image generation, to construct a defect structure generation model. First, radiation-induced damage structures, composed of vacancies and self-interstitial atoms, were transformed into graph structures. These graph structures were then utilized as training data for both a graph neural network (GNN) based classifier and a Stable Diffusion based diffusion model. The GNN based classifier was designed to distinguish defect structures generated by MD simulations from quasi-random structures prepared to challenge the model. The classifier achieved 97% accuracy in classifying these structures. This classifier was then integrated into the diffusion model, allowing the development of a fast and accurate radiation damage generation model using classifier guidance. This new model can predict defect structures 10 times faster than PRDgen, equivalent to a 1000-fold speedup over MD simulations. It also successfully reproduces complex defect damage characteristics such as defect clustering at high energies.

[전산2-4 | 14:55]

Predicting density of states of a-IGZO using a rotation equivariant graph neural network model.: Minseok Moon (Seoul National University), Youngho Kang* (Incheon National University), and Seungwu Han* (Seoul National University)

Keywords: Machine learning, Density of states (DOS), a-IGZO, defect

The amorphous oxide semiconductor $InGaZnO_4$ (a-IGZO) is widely utilized in display technology due to its high mobility, scalability, and low-cost processability. However, the origin of subgap states in a-IGZO remains unclear, leading to reliability concerns such as hysteresis and persistent turn-on voltage shifts, which hinder industrial applications. A precise understanding of the density of states (DOS), particularly trap levels associated with oxygen vacancies and hydrogen-related defects, is essential for addressing these challenges. Density functional theory (DFT) is a standard method for calculating DOS, but its high computational cost makes large-scale simulations impractical, particularly in amorphous systems with dilute hydrogen defect concentrations. Machine learning (ML) approaches have emerged as efficient alternatives, offering significantly reduced computational costs. However, existing ML-based DOS predictions models primarily focus on bulk properties and lack sufficient accuracy in describing localized defect states, which are critical for understanding electronic transport and material functionalities. To overcome this limitation, we develop an ML model capable of accurately predicting DOS while capturing localized defect states. Our approach employs an equivariant graph neural network (GNN) that preserves rotational symmetry and integrates site- and angular-momentum-projected DOS (LM-projected DOS). This enables the model to learn fine-grained electronic structure at a low level, achieving superior accuracy and generalizability compared to conventional ML-based DOS predictions. DOS training data is obtained through DFT calculations on amorphous structures generated by machine learning interatomic potential (MLP). MLP model used for structure generation is the pretrained MLP model SevenNet-0, fine-tuned on an a-IGZO dataset. The dataset includes both pristine and defect-containing configurations such as OH, MH, and oxygen peroxide defects, allowing the model to effectively capture defect-level effects on electronic structure. By leveraging advanced neural network architectures and data-driven feature extraction techniques, our ML framework significantly improves the predictive accuracy of DOS. Our findings highlight the potential of ML-driven approaches to accelerate electronic structure analysis, particularly in identifying localized defect states.

[전산2-5 | 15:10]

Atomistic Simulations of Cu-Sn alloys using a Deep Neural Network Potential: Jae Hur and Won-Seok Ko* (Inha Univ.)

Keywords: Cu-Sn alloys, Deep learning potential, Molecular dynamics simulations, First-principles calculations

Sn-Ag-Cu (SAC) alloys are considered to be among the most promising lead-free solder candidates, and most electronic packaging industry aims to the possible use of nanosized SAC solder joints in the future. However, critical challenges remain, particularly regarding the formation of intermetallic compounds (IMCs) at the SAC/Cu interface, which significantly influence the mechanical and electrical properties. Understanding these intricate phenomena caused by the interdiffusion between the solder alloy and Cu requires atomic simulations, where the accuracy is critically determined by the presence of reliable interatomic potentials. Previously developed empirical potentials, however, are somewhat defective in describing the properties of IMCs and even the properties of pure Sn which undergoes allotropic phase transformations due to the complex bonding characteristics. To address these issues, we developed a machine-learning-based deep potential (DP) for the Cu-Sn binary system. Training datasets for both unary (Cu, Sn) and binary (Cu-Sn) systems were generated on-the-fly using an active-learning framework. The resulting DP model gives predictions consistent with first-principles calculations for both the unary and binary systems in terms of fundamental physical properties, including formation energy, equilibrium volume, equation of state, interstitial energy, vacancy and surface formation energy, and elastic moduli. The model was further validated through comprehensive comparisons with experimental measurements of thermodynamic properties, where the calculated enthalpy of mixing and diffusivity across various compositions showed reasonable agreement with experimental data. Compared with previous empirical potentials, the developed DP model yielded better predictions not only for properties of unary phases (e.g., α-Sn, β-Sn and bct-Sn), but also for the properties of stable IMCs (e.g., $Cu_{20}Sn_6$, Cu_3Sn, and Cu_6Sn_5). The developed DP for the Cu-Sn systems provides an important opportunity to advance the understanding of atomic-scale phenomena in soldering applications.

[전산2-6 | 15:25]

Integration of short-range interaction into pre-trained graph neural network potential for molecular dynamics simulations for dry etching.: Sangmin Oh, Changho Hong, Hyungmin An, and Seungwu Han* (Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University)

Keywords: Plasma etching, Molecular dynamics, Machine learning, Pre-trained potential

Plasma etching is essential in semiconductor fabrication, particularly for enhancing bit density in devices. Energetic ions from the plasma strike the substrate to drive anisotropic etching and selective reactions, enabling the design of high aspect ratio structures. However, the complexity of surface-plasma interactions demands atomistic simulations, often performed via molecular dynamics (MD). While classical potentials are traditionally employed in MD, their limited availability and the difficulty of parameterization reduce their usefulness. Machine learning potentials (MLPs), trained on density functional theory (DFT) data, present a viable alternative, but generating large DFT-based datasets remains a significant hurdle. Recently, graph-based neural network (GNN) models trained on broad

materials databases have emerged. These pre-trained models can simultaneously handle multiple elements and accurately reproduce surface and reaction energies, suggesting their applicability to etching simulations. Yet, they do not inherently guarantee sufficient repulsion during high-energy collisions, which mssing in our tests on dimers and surface-gas structure that is critical to capturing realistic etching phenomena. We propose integrating the Ziegler-Biersack-Littmark (ZBL) short-range potential into the existing SevenNet-0 GNN model from the SevenNet package. By adding a ZBL layer and gradually diminishing the GNN contribution at short distances, we restore the necessary repulsive interactions. We use a reduced distance coordinate to ensure a smooth cutoff transition independent of specific elements, thereby avoiding the need to retrain the pre-trained model. Energy conservation is maintained through PyTorch's autograd feature. We validate this new ZBL-enhanced SevenNet-0 (SevenNet-0-ZBL) by comparing dimer interactions and CF–Si_3N_4 or CF–SiO_2 systems against DFT calculations. Applied to ion implantation of amorphous Si_3N_4 with C, F, and Ar at 100 eV and 500 eV, SevenNet-0-ZBL correct the penetration depth distributions from the original potential. In addition, MD simulations of plasma etching Si_3N_4 and SiO_2 with CHxFy ions show that energies of intermediate structures and reactions are consistent with DFT data. We further demonstrate that etching yield, surface morphology, and byproduct profiles align with those produced by an in-house MLP. By embedding fundamental physical interactions into a pre-trained model, our approach removes the necessity for extensive data generation, thus promoting broader MD adoption. This advancement enables more detailed explorations of plasma etching, the study of emerging materials, and the optimization of industrial processes.

[전산3-1 | 15:50] 초청강연

Modeling carrier trapping at semiconductor/dielectric interfaces based on first-principles calculations of nonradiative capture: Yongjin Shin* (Dankook University)

Keywords: Defects, interface, oxides, quantum tunneling, carrier capture

We demonstrate a quantitative framework to evaluate a nonradiative capture process with multiphonon emission in a semiconductor/dielectric heterostructure, mediated by a tunneling process. In addition to evanescent tunneling decay, the presence of an internal electric field modifies the relative energy depth of the carrier trap depending on the distance, modulating the overall capture behavior. We quantitatively derive the capture rate based on the parameters of the device structure (gate voltage, threshold voltage, dielectric material thickness, and temperature). We benchmark the formalism for the case of a Si/SiO_2 heterostructure, using an isolated Si dangling bond in α-quartz as a prototype defect in silica. We find that the calculated capture coefficients show a nonmonotonic trend as a function of distance of the defect from the interface, due to countervailing trends in capture barrier and wave-function decay. The predicted capture rates are in reasonable agreement with experimentally measured capture time constants, showing promise for the application of this compact model.

[전산3-2 | 16:15] Canceled

[전산3-3 | 16:30]

A study of defect and solute segregation mitigation in IN738LC Ni-base superalloy made by laser-powder bed fusion: SHAILENDRA KUMAR VERMA and Kyoungdoc Kim* (POSTECH)

Keywords: Ni-base superalloy, additive manufacturing, phase field modeling, segregation

Ni-base superalloys are an important class of engineering materials for high temperature use in aeroplane gas turbines and land-based power plants for electricity generation. The metal additive manufacturing has several advantages compared to conventional casting technology like reduced cost, material wastage, energy consumption, and time. However, the manufacturing parameters need to be optimized to produce builds with minimal defects like porosity and micro-cracks and obtain near equilibrium volume fraction of precipitates to achieve good mechanical properties. Therefore, finite element modeling (FEM) was performed to explore the effect of laser power and scan speed on the thermal gradient and cooling rate in the melt pool during laser powder bed fusion process (L-PBF). These parameters were then utilized in phase field modeling (PFM) to analyze the dendrite morphology and solute segregation. Experiments were conducted to manufacture the builds by L-PBF using the same process parameters as used in FEM. The defects and solute segregation were quantified and compared with the predictions from FEM and PFM. Cellular solidification is observed with only primary dendrites. Moreover, it is observed that high thermal gradient causes micro-cracks and low cooling rate causes high solute segregation at cell boundaries. The MC carbide precipitate volume fraction is higher than the equilibrium value predicted by CALPHAD method. Therefore, high laser power and scan speed is recommended to minimize the defects, solute segregation, and achieve near equilibrium volume fraction of MC precipitates, which is expected to result in near equilibrium volume fraction of γ′ precipitates during subsequent heat treatments.

[전산3-4 | 16:45]

A Deterministic Method to Construct a Common Supercell Between Two Similar Crystalline Surfaces: Weon-Gyu Lee* (Computational Science Research Center, Korean Institute of Science and Technology (KIST)) and Jung-Hoon Lee* (Computational

Science Research Center, Korean Institute of Science and Technology (KIST), KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University)

Keywords: Heterostructure, Common Supercell, Complex Plane, Eigenvector-Eigenvalue relation, Moirè pattern

Here, we propose a deterministic algorithm, that is capable of constructing a common supercell between two similar crystalline surfaces without scanning all possible cases. Using the complex plane, we define the two-dimensional (2D) lattice as the 2D complex vector. Then, the relationship between two surfaces becomes the eigenvector-eigenvalue relation where an operator corresponds to a transformation matrix. We show that this transformation matrix can be directly determined from the lattice parameters and rotation angle of the two given crystalline surfaces with $O(\log N_{max})$ time complexity, where N_{max} is the maximum index of repetition matrix elements. This process is much faster than the conventional brute force approach ($O(N_{max}^4)$). By implementing our method in Python code, we successfully generate experimental 2D heterostructures and their moirè patterns and additionally find new moirè patterns that have not yet been reported. According to our density functional theory (DFT) calculations, some of the new moirè patterns are expected to be as stable as experimentally-observed moirè patterns. Taken together, we believe that our method can be widely applied as a useful tool for designing new heterostructures with interesting properties.

[전산3-5 | 17:00]

위상장모델을 활용한 기가캐스팅 소재의 응고 조직 분석: 장형욱, 조휘재, 김동욱, 차필령* (국민대학교)

Keywords: 금속, 알루미늄, 응고, 시뮬레이션, 위상장모델델

증가하는 친환경 소재에 대한 수요와 강화된 탄소 배출 규제는 다양한 산업 분야에서 재활용 소재의 사용을 필요로 하고 있다. 재활용 알루미늄 합금에는 철(Fe)이 포함되어 있어 예상치 못한 미세구조 변화가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 철(Fe)과 망간(Mn) 함량의 변화에 따른 주조 특성을 분석하였습니다.CALPHAD 기반의 자유 에너지를 포함하는 위상장 모델을 활용하여, AA 386 주조 소재와 Fe 및 Mn 불순물을 포함한 유사 합금의 응고 과정 중 미세구조 형성과 석출 현상을 시뮬레이션하였다. 이 모델을 통해 Fe와 Mn이 미세구조에 미치는 영향을 분석하고, 조성 및 공정 조건을 조정하여 베타 상의 형성을 억제하는 방법을 연구하였다.

[전산3-6 | 17:15]

Pourbaix Diagram 모델링을 활용한 고내식 강재 개발: 조현석, 김경덕* (포항공과대학교)

Keywords: Pourbaix Diagram, Rare Earth elements, Corrosion resistant steel, Polarization test

부식으로 인한 경제적 손실은 전 세계 국내총생산(GDP)의 약 2~4%에 달하며, 금속 구조재료의 내식성 향상이 필수적이다. 특히 철강재료는 산업 전반에서 광범위하게 사용되므로 내식성 향상을 위한 연구가 중요하다. 본 연구에서는 희토류 금속(Ce, La, Y)이 철강재료의 내식성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 기반으로 내식성이 우수한 합금 설계를 모색하였다. 희토류 원소 첨가에 따른 철강재료의 안정 상과 이온 용해도를 예측하기 위해 CALPHAD(CALCulation of PHAse Diagrams) 모델링을 수행하였으며, 다양한 pH 및 전위 조건에서의 안정 상 분율을 도출하였다. 이를 실험적으로 검증하기 위해 Ce을 첨가한 철강재료를 이용하여 분극 실험과 전기화학 임피던스 분석(EIS)을 진행하였다. 본 연구는 Ce 외에도 철강재료의 내식성을 향상시킬 수 있는 희토류 원소를 탐색하는 데 기여하며, 이를 통해 차세대 고내식 강재 개발의 기반을 마련할 것으로 기대된다.

[전산3-7 | 17:30]

Q&P 강의 미세조직 형성에 대한 주요 매개변수 분석: 조휘재, 장형욱, 김동욱, 차필령* (국민대학교)

Keywords: Q&P공정, 미세조직

Quenching & Partitioning(Q&P) 공정은 고강도와 연성을 동시에 구현하는 첨단 강재 개발의 핵심 기술이며, QT(담금질 온도), PT(분배 온도), 분배 시간 등이 주요 매개변수로 작용한다. 본 연구에서는 Q&P 공정에서 탄소, 치환형 원소의 분배 거동, 마르텐사이트/오스테나이트 계면 이동 특성을 반영하여 매개변수들이 잔류 오스테나이트 내 탄소 함량, 마르텐사이트 및 잔류 오스테나이트 상분율 등 미세조직에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 통해 최적의 공정 조건과 주요 매개변수를 도출하였으며, 이를 통해 고성능 Q&P 강 설계를 위한 방향성을 제시할 것으로 기대된다.

금속 적층제조에 의한 계층구조 제어기술 개발 심포지엄
Room 303, 4월 23일

[계층구조1-1 | 10:00]
국내외 적층제조기술의 동향과 기술 이슈: 강민철*, 천혜랑 (3D프린팅연구조합), 성지현, 홍명표 (한국생산기술연구원), 윤오성, 안희성 ((주)비즈)
Keywords: Additive Manufacturing, WAAM, Powder-DED, Wire-DED, HIP

금속적층장비는 금속분말 또는 금속 와이어를 사용하여 레이저, 전자 빔(Electron Beam), 플라즈마 등의 에너지로 사용하여 직접 용융시켜 3차원으로 형상을 제작한다. 이중 PBF(Powder Bed Fusion) 방식은 복잡한 형상의 구현이 가능하여 우주항공, 방산부품, 자동차부품 등에 다양하게 사용된다. DED(Directed Energy Deposition) 방식은 단순한 형태의 부품을 제작하거나 손상 또는 마모된 부품의 보수 등에 활용되며 금속의 다층 구조 활용이 가능한 장점이 있다. 최근 PBF 방식에서는 최대 64개의 레이저를 사용하여 속도 증대와 대형 부품 제조를 이용하는 방법이 상용화되기 시작했다. 분말을 이용하는 DED 방식은 이종 소재를 이용한 다층구조화와 함께 탄화물 등을 보강재로 사용하는 MMC(Metal Matrix Composite) 적층 연구가 활발하며 wire-DED 방식은 플라즈마 등 아크방식의 연구가 조선·우주·항공·방산분야의 적용 연구가 진행되고 있다. 국내의 경우 PBF 장비가 최근 기업체를 중심으로 200여대 보급되었으나 수요기업의 제품 발굴 등이 지연되고 있으며 이에 따른 신뢰성 확보를 위한 HIP(Hot Isostatic Process) 기술 등이 활발하며 적층제조 강국으로의 노력이 진행되고 있다. 후기 이 논문은 2024년도 국방품질기술원의 민.군기술협력사업 '민.군 규격표준화사업'의 지원을 받아 연구되었음(No. 23-DU-UNI-01)

[계층구조1-2 | 10:20]
DED LP-DED 방식에 적용되는 Nb 합금 C103 분말의 재활용 가능성 평가를 위한 연구: 신석진*, 장지현, 이선주, 고은하, 강태영 (주식회사인스텍), 임병직 (한국항공우주연구원)
Keywords: Additive Manufacturing(적층제조), LP-DED(레이저 파우더–직접에너지증착), Niobium alloy(니오븀 합금), Powder Recycle(분말 재활용), Launch Vehicle(발사체), Nozzle Extension(노즐 확장부)

종래, 우주산업이 올드 스페이스 (Old Space)에서 뉴 스페이스(New Space)의 시대로 변화하면서 국가기관 뿐만 아니라 민간 기업들 역시 우주산업의 발전 및 시장 선점을 위해 기술의 연구/개발과 신기술의 적극적인 도입을 추진하고 있다. 제조 기술 중 하나인 3D 프린팅 기술은 높은 설계 자유도, 부품의 일체화, 경량화, 제작 속도 등의 장점을 바탕으로 최근 연소기를 포함한 발사체 다양한 부품의 시제품 및 제품 제작에 사용되고 있다. 특히, 다양한 3D 프린팅 방식 중 LP-DED 방식은 단일 소재뿐만 아니라 이종 소재의 적용이 가능하고, 제작 제품의 사이즈의 범위가 넓다는 장점이 있어 기능성 제품 및 대형 제품 제작에 활용되고 있다. LP-DED 방식을 적용하여 발사체 부품 제작에 가장 널리 사용되고 있는 소재는 철(Fe), 니켈(Ni), 타이타늄(Ti)이며, 최근 니오븀(Nb) 소재의 분말 상용화를 통해 3D 프린팅 적용을 위한 다양한 연구 및 시제품 제작이 활발하게 이뤄지고 있다. 니오븀(Nb) 합금은 1500ºC 이상의 고온에서 안정적으로 성능을 발휘하는 높은 내열성 및 우수한 기계적 강도/내식성/가공성 특성을 바탕으로 발사체 노즐 확장부등 고온 환경 부품에 적용되고 있다. C103은 적층제조용로 개발된 니오븀 합금으로 하프뮴(Hf), 타이타늄(Ti), 지르코늄(Zr) 등의 원소 등을 포함하고 있으며, 높은 레이저 흡수율을 기반으로 레이저와 파우더 기반 적층제조 방식인 PBF(Powder Bed Fusion)/LP-DED(Laser Powder – Direct Energy Deposition) 방식에 널리 적용되고 있다. 하지만 발사체 노즐 확장부와 같이 대형 제품 제작에 다량의 분말을 사용이 요구됨으로써, 높은 소재 가격으로 경제성이 떨어지는 C103 소재로 제작된 제품의 가격 경쟁력을 향상을 위해 분말 재사용이 반드시 필요한 실정이다. 본 연구에서는, 철(Fe), 니켈(Ni), 타이타늄(Ti) 소재를 활용하여 LP-DED 방식으로 제작한 다양한 발사체 부품을 사례를 통해 소개하고, LP-DED 방식에 사용된 C103 분말을 재활용하여 제작한 시험편의 기계적 특성 테스트 및 분석을 통해 C103 분말의 재활용 가능성에 대해 평가하고자 한다. 재활용 분말의 분석을 위해 Powder Flow-ability Test, O/C Analysis, ICP Analysis를 수행 했으며, LP-DED 방식으로 시험편을 제작하여 인장강도, 밀도 시험을 수행했다.

[계층구조1-3 | 10:40]
헤테로제닉 적층제조기술 개발: 김형섭* (포항공과대학교)
Keywords: 헤테로제닉 적층제조기술 개발

적층제조(AM, Additive Manufacturing) 기술은 기존의 제조 방식과 차별화된 자유로운 형상 설계 및 소재 최적화가 가능하여 다양한 산업 분야에서 활발히 연구되고 있다. 특히, 단일 재료 기반의 적층제조를 넘어 서로 다른 물성을 갖는 이종 소재 또는 이종 미세조직을 조합하여 기능성을 극대화하는 헤테로제닉 적층제조(Heterogenic Additive Manufacturing, HAM) 기술이 주목받고 있다. 본 강연에서는 헤테로제닉 적층제조 기술의 핵심 개념과 최신 연구 동향을 소개하고, 다중 소재 적층(Multi-material AM), 국부적 조직 제어(Site-specific Microstructure Control), 기계적 및 기능적 특성 향상을 위한 이종접합(Heterogeneous Joining) 기술에 대해 논의한다. 특히, 고엔트로피 합금(High-Entropy Alloys, HEAs), 중엔트로피 합금(Medium-Entropy Alloys, MEAs)과 같은 차세대 소재를 활용한 헤테로제닉 소재 및 적층제조 연구 사례를 공유하고, 향후 기술적 도전과제를 조망할 것이다. 이를 통해, 헤테로제닉 적층제조 기술이 항공우주, 생체재료, 에너지 산업 등 다양한 응용 분야에서 가지는 가능성을 탐색하고, 금속 3D 프린팅 기술의 새로운 방향성을 제시하고자 한다.

[계층구조1-4 | 11:00]

강화재 복합 적층제조된 내열합금의 고온 특성: 정원종 (한국과학기술원), 이태규 (국립한밭대학교), 류호진* (한국과학기술원)

Keywords: Additive Manufacturing, SMART, Inconel, Mechanical Properties

금속 복합재료(MMC)의 적층 제조(AM)는 재료의 근본적인 불균일성과 피드스톡 분말 준비의 어려움으로 인해 여러 한계를 나타내고 있다. 이러한 어려움은 균열, 불규칙한 증착, 기공 형성으로 이어진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 적층제조용 복합 분말 제조를 위한 SMART(Surface Modification And Reinforcement Transplantation) 공정이 개발되었다. SMART 공정은 크기 선택적 고에너지 충돌 현상을 사용하여 고체 상태에서 금속 분말 표면에 강화재를 기계적으로 코팅하는 혁신적인 방법이다. 이 공정은 적층제조용 크기인 기지 분말 입자와 미세한 첨가 분말 입자의 충돌 및 변형을 유도하여 표면 개질, 합금 원소 이식, 복합층 형성을 가능하게 한다. SMART 공정을 통해 제조된 MMC 분말은 레이저 분말 직접 에너지 증착(DED)과 같은 적층제조 공정에 적용될 수 있다. 또한 SMART 공정은 분말의 유동성 향상, 표면 나노 코팅, 합금 원소 이식, 복합층 형성 등의 응용이 가능하다. 본 연구에서 SMART 공정을 통해 Inconel 718-HfC 복합재료를 제조한 결과 우수한 고온 특성을 나타내었고 HfC 첨가량이 증가함에 따라 결정립 크기가 감소하고, 열처리 후에도 미세한 결정립 크기를 유지하며, 인장 강도와 연신율이 향상되었다. 특히, 1.5 vol.% HfC가 첨가된 Inconel 718은 상온 및 650ºC에서 AMS 5663 요구 사항을 충족하며, 우수한 강도와 연신율 조합을 보인다. 따라서 적층제조된 Inconel 718 금속복합재료가 고온 구조용 응용 분야에 유망한 신소재로 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

[계층구조1-5 | 11:20]

적층제조에 의한 원자력 부품의 계층구조 구현: 김현길*, 홍종대, 오홍렬 (한국원자력연구원)

Keywords: Additive manufacturing, Nuclear, Reactor, Cladding, Micro-structure

최근 국제적으로 에너지 안보 정책에 따라 안전한 분산형 전원 공급을 위한 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR) 개발이 진행되고 있다. SMR은 미국, 프랑스, 영국, 러시아, 중국 및 우리나라에서 기술 선도를 위한 기술 개발을 추진하고 있으며, 현재 약 70종의 다양한 노형이 제시되고 있다. 특히 SMR의 경제성 확보를 위해서는 초기 투자비용 감소와 기기 모듈화 및 공장 생산을 통한 건설비용 및 기간의 단축을 추구하고 있다. 또한 다양한 노형(경수형, 초고온가스형, 고속중성자형, 용융염형 등)의 SMR에 대하여 경제성과 안전성 확보를 위한 노력의 일환으로 적층제조와 같은 첨단 제조 기술을 적용한 소재 및 부품개발이 진행되고 있다. 이는 원자로가 고온고압, 고방사선 및 매질과의 고반응성 환경에서 소재 및 부품이 설계마진을 확보해야만 안전성과 수명이 예측되기 때문이다. 본 연구에서는 적층제조 기술을 적용하여 고온 적용, 방사선 차폐 등의 성능이 요구되는 원자력용 부품의 제조를 위한 기술 개발 내용을 다루었다. 특히 스테인리스 모재에 W, Mo, B4C와 같은 난가공성 고융점의 이종소재를 계층구조 구현을 통해 원자력 환경에서 성능과 내구성 향상을 추구하고자 하였다.

[계층구조1-6 | 11:40]

Joint properties of LP-DED additive manufactured ferritic stainless steel 430 on martensitic stainless steel 410 base metal: Hyun-Ki Kang*, Sam Sub Byun, Jong Yeob Lee (Turbo Power Tech Co., Ltd.), and Eun-Joon Chun (Bukyong National University)

Keywords: Ferritic stainless steel 430, Laser powder-directed energy deposition, tenile strength at elevated temperatures, Post-heat treatment

The aim of this work is to study the phase transformations, microstructures, and mechanical properties of ferritic stainless steel (FSS) 430 deposits on martensitic stainless steel (MSS) 410 base metal using laser powder-directed energy deposition (LP-DED) additive manufacturing. The LP-DED AM FSS 430 on MSS 410 underwent post-heat treatment at 815 ºC and 980 ºC for 1 hour, respectively. The analyses of phase transformations and microstructural evolutions of LP-DED AM FSS 430 on MSS 410 were carried out using X-ray diffraction, SEM-EDS, and EBSD. Vickers hardness and tensile strength properties at elevated temperatures were discussed to analyze the effects of the different heat treatments. It revealed that the mechanical properties of as-built including hardness of about 175 HV1.0, tensile strength of about 570 MPa, and elongation of about 20% were same as commercial FSS 430 material. Generally, tensile properties decreased as tensile temperatures increased because increased thermal energy weakens interatomic bonds, allowing for easier deformation and ultimately leading to lower tensile strength.

[계층구조2-1 | 14:00]

적층제조용 분말 특성평가 및 분말특성이 적층제조 공정에 미치는 영향: 홍순직* (국립공주대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 김현중, 조성재, 김인서 (국립공주대학교)

Keywords: 적층제조공정, DED, 분말 특성 평가

금속 제품의 다품종 소량 생산, 복잡한 형상 구현 및 기계적 특성 향상 방안으로 금속 적층 제조 공정이 각광 받고 있다. 금속 적층제조는 금속 분말을 사용하여 적층하는 PBF(powder bed fusion)와 DED(direct energy deposition) 공정이 주를 이루고 있으며, 분말 특성은 적층제조 공정의 안정성과 최종 부품 품질에 결정적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 DED 공정용 STS 316L 분말의 재활용 및 표면 수분함량에 따른 분말 특성(유동성, 형상, 입도 등) 평가를 진행하였고, 분말 특성이 적층재에 미치는 영향을 분석하였다. 재활용 분말 사용 시 레이저 조사에 의한 산화된 재활용 분말이 적층재의 산화물 형성 및 기계적 특성 저하에 영향을 미쳤다. Mn/Si rich oxide 분율 증가 및 산화된 재활용 분말의 불완전 용융으로 인한 조대 산화물 형성이 압축 시험에서는 큰 영향을 미치지 않았으나, 인장시험의 경우 Origin 분말 보다 약 55% 감소된 연신율을 나타냈다. 분말 표면 수분함량 변화에 따른 연

구의 경우, 분말의 수분함량이 증가함에 따라 유동성이 감소하여 RH(relative humidity) 70% 조건에서는 노즐 막힘 현상으로 적층 제조 공정이 불가능하였다. 또한, RH 35% 이상의 조건의 as-built 316L에서 아래 그림과 같이 Cr2O3, MnSiO3 조대 산화물 형성 및 기계적 특성 저하로 나타나 분말 수분함량에 따라 feed rate, 적층재 미세조직 및 물성에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 분말 재활용 및 표면 수분함량이 적층재 결함, 기계적 특성 저하에 영향을 미칠 수 있으며, 적층제조 공정을 이용한 고품질 부품 제조를 위해서는 고품질 분말의 균일한 특성이 필요함을 제시한다.

[계층구조2-2 | 14:20]

Additive manufacturing of hetero-structures and its improvement in hydrogen resistance: Jae Wung Bae* (Pukyong National University)

Keywords: Additive Manufacturing, Powder Bed Fusion, Hetero-structure, Mechanical properties, Hydrogen embrittlement

As part of the global efforts toward carbon neutrality and energy transition, the hydrogen industry has been rapidly expanding both domestically and internationally. To facilitate the safe storage and transport of hydrogen fuel, the demand for high-strength structural metallic materials with enhanced hydrogen resistance has been increasing. However, there is generally an inverse relationship between the strength of metallic materials and their resistance to hydrogen embrittlement. Additive manufacturing enables the processing of heterogenous materials with customised architectures. In this study, we introduce a controlled heterogeneous structure fabricated via additive manufacturing and discuss its effects on mechanical properties. Furthermore, based on the microstructural characteristics of additively manufactured materials, we explore potential strategies to leverage microstructural defects for improving hydrogen embrittlement resistance.

[계층구조2-3 | 14:40]

레이저 기반 적층제조를 통한 계층구조 제어기술: 문종언* (국립공주대학교), 김래언, 김형섭 (포항공과대학교)

Keywords: 적층제조공정, 계층구조, 표면 개질, 변형쌍정, 집합조직

표면 개질을 통해 제조된 계층구조 합금은 뛰어난 기계적 특성으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 합금을 계층구조로 제조하는 다양한 방법 중 금속 분말을 활용한 레이저 클래딩은 표면 적층을 통해 금속 판재를 계층구조화 할 수 있는 간단한 방법이다. 본 연구에서는 레이저 기반 적층제조공정을 활용하여 316L 스테인리스강 판재 표면에 동일한 재료를 적층함으로써 계층구조를 구현하였다. 레이저 클래딩으로 제조된 계층구조 316L은 적층제조재와 압연재에 비해 향상된 강도와 연성의 조합을 보였다. 계층구조 재료의 표면층에서 국부적으로 활성화된 쌍정은 가공 경화를 유발하였으며, 표면층과 판재 중심부의 계면에서의 계면 강화로 강도와 연성이 동시 향상되었다. 또한, 이러한 계층구조 재료의 특징을 활용하여 동적으로 강화되는 레이저 클래딩 재료를 설계하는 새로운 전략을 제안하였다. 레이저 클래딩을 위한 특정 공정변수를 선택하여 쌍정에 유리한 집합조직을 유도하였다. 해당 레이저 클래딩 합금은 표면층과 중심부에서 다른 집합조직을 보여주었으며, 각각 하중 방향을 따라 <111>과 <100>의방위를 나타냈다. 표면층에서의 쌍정 친화적인 집합조직으로 인해 발생하는 국부적인 변형 쌍정에 의해 유도되는 계층구조로 인해 계면 강화가 심화되었으며, 결과적으로 본 레이저 클래딩 합금은 다른 재료들과 비교하여 뛰어난 가공경화로 인해 우수한 강도-연성의 조합을 달성하였다. 해당 계층구조 제어기술은 접근법은 간단하면서도 실용적인 방법이며, 우수한 강도-연성을 가지는 계층구조 합금을 제조하기 위한 레이저 클래딩의 새로운 전략을 제시한다.

[계층구조2-4 | 15:00]

LPBF 기반 SS 304L 계층구조 및 영하 269도 기계적 물성: 김영균*, 전승민 (한국재료연구원), 손광태, Brian K. Paul (Oregon State University), 나영상 (한국재료연구원)

Keywords: STS304L, Laser powder bed fusion, Mechanical properties, cryogenic, Liquid helium

본 연구에서는 laser powder bed fusion (LPBF) 공정을 통해 산소 농도(0.2%)를 제어하여 제작된 304L 스테인리스강(SS)의 상온 및 초저온(~영하 269도) 기계적 특성을 조사하였다. LPBF 방식으로 제조된 SS304L은 기존의 소성가공된 SS304L에 비해 항복강도가 상온에서 약 336 MPa, 영하 269도 에서 최대 398 MPa까지 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 기존 연구된 LPBF SS304L에 비해서도 상온에서 추가적으로 약 64 MPa의 항복강도 증가를 보였다. 이러한 강도 향상은 주로 제어된 산소 농도에 의해 촉진된 산화물 분산 강화 효과와 함께 결정립계 강화 및 전위 강화에 기인하며, 연성이 크게 감소하지 않았다. 추가적으로, strain induced martensitic transformation (SIMT)는 상온에서 발생하지 않았으며, 초저온에서는 소성가공된 SS304L보다 감소하는 경향을 보였다. 이는 높은 전위 밀도와 질소에 의해 안정화된 오스테나이트 때문으로 해석된다. 또한, 영하 269도에서 관찰된 불연속 소성 유동 (discontinuous plastic flow, DPF)'은 소성 변형에 의한 단열 가열 효과로, 낮은 열전도성과 일치하는 결과를 보였다. 상기 결과들을 기반으로 LBPF SS304L의 독특한 계층구조 및 미세구조와 영하 269도 초저온 기계적 특성 간의 상관관계에 대하여 고찰하였다.

[계층구조2-5 | 15:20]

와이어 아크 적층제조 기술을 이용한 Ti-6Al-4V 합금의 적층공정 연구: 홍명표*, 정재우, 김다혜, 김우성, 성지현 (한국생산기술연구원)

Keywords: Additive Manufacturing, Wire, Ti-6Al-4V, Directed Energy Deposition, Wire Arc Additive Manufacturing

재료를 한층씩 쌓아 올려 3차원 형태의 입체물을 제조하는 적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 기술은 설계 자유도가 높고 맞춤형 다품종 소량 생산에 유리하며, 종래의 전통적인 제작 방식과 비교하여 적용되는 분야에 따라 제조 비용, 시간, 제품성능 등

의 개선이 가능하여 최근 항공, 발전, 국방, 뿌리산업 등 다양한 산업 분야에서 그 중요성이 지속적으로 강조되고 있다. 본 연구에서는 다양한 금속 적층 제조 기술 중 금속분말 소재를 사용하고 있는 에너지 제어 용착(DED) 적층 제조 기술 대비 생산성 향상과 소재 사용율 100% 달성 가능하며, 작업환경 개선이 가능한 와이어 아크 적층 제조 기술을 이용하여, 최근 항공, 국방, 의료 분야 등 고부가가치 산업에 널리 적용되고 있는 Ti-6Al-4V 합금의 적층 공정 최적화에 대해 연구하였다. 이를 위해 적층 가공 공정 조건 변화에 따른 적층 가공 특성을 분석한 후 이를 공정 최적화에 활용하고자 하였다. 후기 이 논문은 2024년도 국방품질기술원의 민.군기술협력사업 '민.군 규격표준화사업'의 지원을 받아 연구되었음(No. 23-DU-UNI-01)

[계층구조2-6 | 15:40]

멀티 로봇 와이어 아크 적층 제조(WAAM) 기반 알루미늄 합금 부품 제작 및 성능 분석: 정영석*, 큐비카 보이타, 오지원, 조신후 (매이드)

Keywords: 와이어 아크 적층 제조(WAAM), 알루미늄 합금(Aluminum alloy), 멀티 로봇(Multi-robot)

본 연구에서는 멀티 로봇 와이어 아크 적층 제조(Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) 기술을 활용하여 알루미늄 합금 부품을 제작하고, 그 성능을 분석하였다. WAAM은 높은 적층 속도와 효율성을 제공하는 적층 제조 방식으로, 특히 대형 금속 부품 제작에 적합하다. 또한, 멀티 로봇 시스템을 적용하면 적층 속도를 더욱 향상시킬 수 있으며, 보다 정밀한 열 관리가 가능하여 잔류 응력을 줄이고 균일한 미세조직을 형성하는 데 기여할 수 있다. 본 연구에서는 멀티 로봇 WAAM 공정을 통해 알루미늄 합금 부품을 제작하였고, 멀티 로봇 간 적층 경계부의 연결성 문제를 주요 이슈로 다루었다. 그리고 제작된 부품을 기계 가공하여 미세조직 및 기계적 특성을 분석하였다.

[계층구조2-7 | 16:00]

적층제조된 계층구조를 통한 가스터빈 효율 향상: 조현철*, 박상은, 최용혁, 류선우, 이재웅 (두산에너빌리티)

Keywords: 가스터빈, 금속적층제조, 미세구조

발전용 가스터빈 OEM은 효율을 향상시키고 제조원가를 절감하기 위한 수단 중 하나로, 금속 적층제조기술, 특히 레이저 파우더 베드 퓨전 공정을 적극적으로 활용하고 있다. 현재 두산에너빌리티는 이 기술을 개발단계에서의 시제품 제작 뿐만 아니라 가스터빈 양산부품 제조에도 적용하고 있다. 금속 적층제조기술을 활용하기 위해서는 소재, 공정, 설계에 대한 심층적인 지식이 요구되는데, 공정개발단계에서 계층구조를 제어하여 요구되는 물성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 두산에너빌리티는 혁신적인 설계가 반영된 연소기 부품 제조에 이 기술을 최초로 적용했다. 이를 통해서, 연소 성능을 향상시킴과 동시에 원가를 절감하고 납기를 단축하는 효과를 거두었다. 두산에너빌리티에서 금속적층제조기술의 또 다른 성공적인 응용 사례는 가스터빈 베인 내부 부품 제조입니다. 금속적층제조기술은 이 부품 설계를 제조할 수 있는 유일한 기술이었고, 이를 통해서 냉각효율을 향상시킬 수 있었다. 추가로 두산에너빌리티는 금속적층제조기술을 활용해서 미세구조를 제어하는 기술을 개발 중인데, 이를 통해서 금속적층제조기술을 발전용 가스터빈 부품 제조에 적극 활용할 예정이다. [Acknowledgement] 이 논문은 2025년 산업통상자원부 재원으로 민군겸용기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (19-CM-AE-14)

역학측정
Room 304, 4월 23일

[역학1-1 | 10:00]
유한요소해석을 활용한 고밀도 센서 배열 기반 전자소자 구조의 설계 및 최적화: 김수민 (UNIST), 황경석 (Harvard University), 배재영, 강승균* (서울대학교), 김주영* (UNIST)
Keywords: 미세침습형 전자소자, 생분해성, 형상기억고분자, 유한요소해석

뇌-기계 인터페이스(BMI)는 뇌에서 발생하는 신경 신호를 해석하여 뇌전증이나 뇌졸중과 같은 신경계 질환을 진단하거나 질병의 진행을 실시간 모니터링하며 신경 재활을 지원하는 기술로 이에 대한 연구가 지속적으로 활발히 진행되고 있다. 특히, 보다 정밀한 신호 측정을 통해 질병을 진단하고 예측하기 위해서는 침습적 방식이 필수적인데, 대면적에서 발생하는 신호를 측정하기 위한 기존 소자는 크고 단단한 구조적 특성으로 인해 광범위한 조직 절제가 필요하다는 한계가 있다. 이에 따라, 수술적 외상이 증가하고 환자의 회복 부담 및 합병증 발생 위험이 높아지며, 추후 소자 제거를 위한 추가적인 수술이 요구되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해서는 최소 침습적 수술이 필수적이며, 체내에서 넓은 영역의 신호를 측정한 후 자연적으로 분해되는 소자의 개발이 필요하다. 이에 따라 기존 연구에서는 생분해성 형상기억고분자를 활용하여, 체온에 의해 자가 확장되어 대면적 신호 측정이 가능한 전자소자를 개발함으로써 이러한 문제를 해결하고자 하였다. 그러나, 기존 연구에서 제안된 전자소자는 방사형 구조를 가지므로, 중심에서 멀어질수록 신호를 측정하지 못하는 빈 영역이 증가하는 한계가 존재한다. 신경계 질환을 정밀한 진단 및 모니터링을 위해서는 고밀도 센서 배열이 필수적이므로 기존 구조보다 향상된 구조적 설계가 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 기존 구조에서 내부에 서브 서포트를 추가함으로써 센서의 밀도를 높여 보다 정밀한 센싱이 가능한 구조를 설계하고자 한다. 또한, 소자를 작은 직경의 튜브에 패키징할 때 발생하는 변경과 인가되는 스트레인을 최소화할 수 있도록 3차원 유한요소해석을 활용하여 다양한 기하학적 인자를 조절하며 각 요소가 미치는 영향을 분석한 후 이를 기반으로 스트레인을 최소화하면서도 고밀도 센서 배열을 갖는 최적의 구조를 설계하고자 한다.

[역학1-2 | 10:15]
Macroscale Mechanical Behavior of Single Crystal Graphene: ANIRBAN KUNDU (IBS), Seyed Kamal Jalali (University of Trento), Minhyeok Kim (IBS, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Meihui Wang, Da Luo, Sun Hwa Lee (IBS), Nicola M. Pugno (University of Trento, Queen Mary University of London), Won Kyung Seong* (IBS), and Rodney S. Ruoff* (IBS, Republic of Korea, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)) *Keywords:* Single Crystal Graphene, High Tensile Strength, Near-ideal Stiffness, Chiral Dependency, Damage Evolution

'High end' values of Young's modulus (E) and particularly, of tensile strength (s), have been reported for monolayer graphene: but for strength (particularly), only for samples in the few micrometer length scale.[1] The strength of macroscale (centimeter-scale) graphene is relatively unexplored. We are studying the macroscale mechanics of single crystalline adlayer-free monolayer graphene by polymer thin film-assisted tensile testing to 'extract' the values of E and s for graphene that is adhered to the thin polymer film.[2] In this work, we present the mechanical properties of centimeter-scale single-crystal monolayer graphene (SCG) using 'dog bone' samples aligned with edges along specific crystallographic directions. For SCG samples with zigzag (zz) edges, we measured a Young's modulus (E) of 1.11 ± 0.04 TPa, tensile strength (σ) of 27.40 ± 4.36 GPa, and failure strain (εf) of 6.01 ± 0.92%. Samples with armchair (ac) edges exhibitedE = 1.01 ± 0.10 TPa,σ = 20.21 ± 3.22 GPa, andεf = 3.69 ± 0.38%, while chiral samples displayed intermediate values:E= 0.75 ± 0.12 TPa,σ= 23.56 ± 3.42 GPa, andεf = 4.53 ± 0.40%. The SCG was synthesized using chemical vapor deposition (CVD) on single-crystal Cu(111) foils and tested with a custom-built 'float-on-water' (FOW) tensile system, enabling in situ observation of crack initiation and propagation. Quantized fracture mechanics (QFM) analysis indicated edge defects ranging from several to tens of nanometers, influenced by chirality and notch angle. Weibull statistical analysis further projected that the strength of A4-sized SCG sheets would range between 13.67 and 18.43 GPa, depending on chirality, as failure is primarily initiated at edge defects. These findings highlight the remarkable mechanical performance of macroscale SCG, establishing it as a promising material for a wide range of applications, including aerospace, flexible electronics, and straintronics. This work is supported by the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1). References [1] Changgu Lee, Xiaoding Wei, Jeffrey W. Kysar, and James Hone. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. Science, 2008, 321(5887), 385-388. [2] Bin Wang, Da Luo, Zhancheng Li, Youngwoo Kwon, Meihui Wang, Min Goo, Sunghwan Jin, Ming Huang, Yongtao Shen, Haofei Shi, Feng Ding, and Rodney S. Ruoff. Camphor enabled transfer and mechanical testing of centimeter scale ultrathin films. Advanced Materials, 2018, 30(28), 1800888 .

[역학1-3 | 10:30]
반도체 첨단 패키징용 구리 범프의 소성변형에 의한 미세조직 변화 분석: 심영주, 곽지윤, 김동현, 김주영* (UNIST)
Keywords: 반도체 첨단 패키징, 구리-구리 접합, 소성변형, 결정립 미세화, 나노인덴테이션

반도체 첨단 패키징 기술은 개별 반도체 칩들을 하나의 시스템으로 통합하여 반도체 성능을 극대화하는 방법으로, 무어의 법칙 한계를 극복하고 인공지능이나 자율주행차 같은 첨단 기술을 구현하는 기술이다. 반도체 칩 간의 안정적인 데이터 전송을 위해서는

전기적 연결 경로를 형성하는 인터커넥션(interconnection) 기술이 필수적이다. 특히, 구리-구리 접합은 수직으로 적층된 칩 간의 전기신호 전송경로를 단축하여 전기적 효율을 향상시키는 핵심기술로 주목받고 있다. 하지만 구리의 표면 산화와 300ºC 이상의 높은 접합온도는 반도체 구성 재료 사이 열팽창계수(CTE) 차이에 의한 불균일한 열응력을 유발하여 웨이퍼 휨(warpage)을 발생시킨다. 웨이퍼 휨이 발생하면 구리-구리 접합 과정에서 온도 및 압력의 균일성이 저하되고, 일부 영역에 국부적인 응력이 집중되어 기계적 및 전기적 신뢰성을 감소시킨다. 따라서 반도체의 성능과 신뢰성을 유지하기 위해 저온에서 구리-구리 접합하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 웨이퍼 기판 위에 타이타늄 접착층 및 구리 씨앗층을 증착하고 노광공정을 통해 포토레지스트에 범프 패턴을 형성하였다. 이후 전기 도금하여 구리 범프를 전착하였다. 구리 범프에 압력과 전단 변형(shear strain)을 가하여 미세조직을 변화시켰으며, 변형률에 따른 구리 범프의 결정 방위 변화를 관찰하고 입자어긋남각(misorientation angle)을 이용하여 미세조직을 변화시키는 주된 메커니즘을 분석하고자 하였다. 이후 나노인덴테이션을 이용하여 미세조직 변화에 따른 경도 변화를 측정하였다

[역학1-4 | 10:45] Canceled

[역학1-5 | 11:00]

생분해성 하이브리드 다층 봉지 재료의 적층 공정 최적화 및 특성 평가: 유현지 (UNIST), 황경석 (Harvard University), 강승균 (서울대학교), 김주영* (UNIST)

Keywords: 생분해성, 봉지재료, 수분 침투 특성, 기계적 특성

최근 체내 조직과 직접적으로 상호작용하면서 수술 후 모니터링 및 무선 약물 전달과 같이 다양한 분야에 응용될 수 있는 생분해성 소자 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 소자들은 체액과 반응하여 녹는 특성으로 인해 2차 수술 및 그로 인한 감염 위험성을 배제할 수 있지만, 필요한 작동시간을 확보하기 위해서는 체액의 침투를 최외각에서 막아줄 수 있는 봉지 재료가 필수적이다. 소자의 목적에 따라 요구되는 수명이 다르고, 필요 이상의 장시간 동안 용해되지 않을 경우, 추가적인 면역 반응 및 부작용을 유발할 수 있으므로 목적에 부합하는 수명을 보장할 수 있는 봉지 재료가 요구된다. 본 연구에서는 무기층과 유기층이 교차로 위치하는 하이브리드 구조의 다층 봉지 재료를 통해 물의 침습 경로를 효과적으로 극대화하면서 층수에 따른 수명 조절이 가능한 시스템을 구축하고자 한다. 기계적/열적 물성에 큰 차이가 있는 무기 재료와 유기 재료를 안정적으로 적층하기 위하여, 열적 물성과 나노-마이크로 인장 시험법을 통해 측정한 기계적 물성에 기반한 전사 공정을 도입하였다. 최종적으로 혈류와 같은 생체 내 미세 동적 신호를 측정할 수 있는 소자에 적용함으로써 소자의 작동 신뢰성 보장과 동시에 층수에 따른 수명 모델링을 개발하고자 한다.

[역학1-6 | 11:15]

DCB 시험법을 이용한 하이브리드 본딩의 유전체 접합력 평가: 김동현, 곽지윤, 심영주 (UNIST), 김인주, 이시예, 김성동 (서울과학기술대학교), 김주영* (UNIST)

Keywords: DCB 시험, 접합력 평가, 하이브리드 본딩, 유전체

기존 반도체 기술에서는 성능 향상을 위해 전공정(Front-end process)에서 선폭 미세화를 통해 트랜지스터의 집적도를 높여왔으나, 반도체 크기 축소에 따라 누설전류 등의 문제가 발생하고 기술 개발에 대한 비용이 크게 증가했다. 이에 따라 최근에는 후공정(Back-end process)인 패키징 공정에서 다수의 칩을 효율적으로 연결하여 성능을 향상시키기 위한 다양한 기술들이 개발되고 있다. 칩의 효율적인 연결을 위해서는 수직 적층 방식으로 부피를 줄이고, 전기적 에너지 손실 및 발열을 감소시키기 위해 연결부의 길이를 최소화해야 한다. 이를 실현하기 위해 연결 재료로 많이 사용되는 구리를 직접 접합하는 하이브리드 접합 기술이 최신 기술로 주목받고 있으며, 구리 접합과 유전체 접합이 모두 이루어져 전기적 연결과 연결부 보호 역할을 함께 수행할 수 있다. 유전체 접합이 구리 접합보다 먼저 이루어지므로, 구리의 산화 방지 및 내구성 강화의 역할을 수행하는 유전체 접합의 정밀도가 접합의 신뢰성을 높이는데 중요한 역할을 한다. 따라서, 유전체 접합의 품질이 전체적인 접합 신뢰성에 결정적인 영향을 미친다. 특히, 신뢰성 높은 접합을 구현하기 위해서는 접합력 평가가 필수적이며, 이를 정량적으로 분석할 수 있는 적절한 시험 방법이 필요하다. 본 연구에서는 일축 인장을 이용해 균열 진전을 분석하고 접합 에너지를 계산할 수 있는 DCB 시험법을 통해 유전체 접합력을 평가하고자 한다. 시편은 Si 기판 위에 100nm 두께의 SiO_2를 증착한 후, pre-crack을 생성하여 접합하고, 로딩 탭을 부착하여 DCB 시편을 제작한다. 이후 일축 인장 실험을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 접합 에너지를 계산하여 접합력을 평가한다. DCB 시험에서 장비의 변형을 제외하기 위해 machine compliance 보정을 수행하였으며, 보정 전후의 데이터 차이를 비교함으로써 machine compliance 보정을 통해 계면 접합력 분석의 정확도를 높이고자 하였다.

제2회 산,학,연 여성 재료공학 리더 포럼 심포지엄
Room 304, 4월 23일

[여성1-1 | 14:10] 초청강연

A female, foreign professor in Korea, and her dedication in plasma engineering for sustainable energies: Li Oi Lun Helena* (Pusan National University)

Keywords: Low temperature plasma, catalysts, hydrogen energy, seawater batteries, biofuels

Being a foreign professor alone in Korea is considered as minority; Meanwhile, being a female, Foreign AND Engineering Professor can be very unique. In the first part of this invited talk, I will introduce my path and personal experience as a female and foreign professor in engineering school in Canada, Japan and Korea. Amid various culture difference and academic background, I am currently enjoying the challenges and potential to grow more as a female professor in south Korea. In the second part of this invited talk, I will briefly introduce my current academic research interested in developing a novel technology, “plasma engineering”, and its contribution on the synthesis and surface modification of catalytic and electrode materials, emphasizing their application in fuel cells, hydrogen production, and biomass upgrades. Plasma, consisting of electrons, ions, molecules, radicals, photons, and other excited species, has complex atomic and molecular processes and versatile physical and chemical reactions with solid materials. Unlike conventional syntheses, plasma engineering allows direct synthesize of carbon nanomaterials (from benzene, pyridine, phenylamine), metal nanoparticles (from electrode sputtering or metal salt) or silicon materials (from waste oil or TEOS) at ambient temperature and pressure. In addition, when applied in-situ ultrasonic homogenizer during plasma engineering, ultra-fine and dispersed metal nanoparticles or even single-atom doped metal in carbon/ silicon/ silicon carbide substrate can be easily synthesized. The design, synthesis, and modeling of novel plasma engineering as well as the current progress on plasma-engineered catalytic performance in various applications including proton electrolyte membrane fuel cell, metal-air seawater batteries, alkaline and seawater electrolysis and biofuel production. Finally, the future research directions, challenges, and opportunities of plasma-based synthesis process as a novel fast-throughput synthesis route will be discussed.

[여성1-2 | 14:40] 초청강연

제일원리 계산을 이용한 합금 개발: 최은애*, 한승전 (한국재료연구원)

Keywords: 제일원리계산, 밀도범함수이론, 합금설계, 석출형 합금, 석출상 제어

밀도범함수이론(DFT, Density Functional Theory)은 물질의 전자 구조를 계산하는 제일 원리 방법으로, 물질의 특성, 에너지 상태 및 상호작용을 정확하게 예측할 수 있습니다. DFT 계산을 통해 합금 내 첨가원소들의 고용/편석에너지와 석출물의 응집/계면에너지를 분석하였고, 이를 기반으로 합금 원소들의 거동과 제 3의 첨가원소에 의한 석출상 형상 및 분포 변화를 예측하였습니다. 그리고 이를 통해 우수한 기계적, 전기적 특성을 가진 새로운 합금을 설계하였습니다. 본 발표에서는 석출형 합금인 구리와 알루미늄 합금에서 DFT 기반 첨가원소 물질 스크리닝을 통해 고강도 합금을 설계한 내용을 소개하고, 편석제어를 통해 가공능을 향상시킨 결과를 다룹니다. 또한, 차세대 리튬-황 이차전지의 음극재용 리튬합금 소재 설계 및 이차전지 성능과 내구성 평가를 DFT 계산 기반으로 진행한 내용을 소개합니다.

[여성1-3 | 15:10] 초청강연

Affordable, wireless, patch-type wearable transcutaneous oxygen sensor: Jin-Woo Park* (Yonsei University)

Keywords: transcutaneous oxygen pressure, wearable sensor, wireless sensor, photoluminescence quenching, clinical trials

We have developed an affordable wireless patch-type wearable transcutaneous oxygen pressure (ws-$TcPO_2$) sensor based on the photoluminescence quenching of oxygen concentration ($[O_2]$)-sensitive dyes. The detection of $[O_2]$ in the anatomy of the human body is critical to diagnose and ideally prevent diseases. O_2 is essential to the survival of cells and tissues, and its deficiency, or hypoxia, causes various diseases. Consequently, according to the Global Top 10 Cause of Death published by the World Health Organization in 2018, 5 out of 10 diseases are associated with O_2 deficiency in the body. Including the number of ailments of the increasing elderly population, peripheral vascular disease (PVD, caused by the inability to transfer O_2 throughout the whole body, especially the arms and legs) affects diseases such as diabetic ulcers, Raynaud’s disease, Burger’s disease, varicose veins, and cerebral cardiovascular diseases. However, current O_2 sensors available to masses either only involved indirect $[O_2]$ detection or direct measurement mechanisms utilizing intrusive protocols. Pulse oximetry, spectroscopy method, laser Doppler and electrochemical method employ the optical response of the O_2-carrying hemoglobin cells in the blood circulation to infer $[O_2]$ supplied to the organs or tissues and not the actual $[O_2]$ utilized in the specific parts of the human body. On the other hand, the arterial blood gas analysis and Clark electrode need the painful probed insertions and collection of blood samples. Hence, we present our ws-$TcPO_2$ as the ideal replacement for the bulky and expensive O_2 sensors currently available to the masses. The active area of the ws-$TcPO_2$ does not exceed the dimension of 5×5 mm^2, which is excellent for detecting the transcutaneous O_2 pressure ($TcPO_2$) from the narrow areas on the skin of adult patients, and the small and sensitive body of neonatal infants. Inside the sensor's active area, a couple of green light-emitting diodes (LEDs) provide the excitation

illumination of the photoluminescent sensing film in direct contact with the skin of the test subject. The [O_2]-dependent red photoluminesce of the sensing film is detected by a Si photodiode (Si-PD) with a red optical filter. Sandwich between the sensing film and the optoelectronic devices (i.e., the LEDs and Si-PD tandem), the transparent heater provides the thermal energy to enhance the changes in the structure of the stratum corneum of the human skin and thus, allowing the dissolved O_2 to diffuse from the skin toward the ws-$TcPO_2$ effectively. The excellent optical transparency of the transparent heater does not hinder the exceptional transmission of the sensing film photoluminescent emissions. The voltage drop across the Si-PD is then processed through the built-in firmware in the patch-type sensor and transmitted to the observer wirelessly as $TcPO_2$ values, avoiding discomfort and disturbance to the resting state of the test subject or patients. The ws-$TcPO_2$ can detect the saturation of [O_2] in less than a minute, comparable to that of a commercially available electrochemical sensor when tested on a controlled gas flow chamber. The ws-$TcPO_2$ was then successfully used in the laboratory-scale clinical trials of four healthy adult volunteers over a period of three months. Despite not activating the transparent heater, the ws-$TcPO_2$ can detect almost instantaneously and with excellent consistency the $TcPO_2$ at an average of around 80 mmHg from the healthy test subjects measured multiple instances at different days of intervals. The appropriate and healthy level of $TcPO_2$ from the human skin was only detected using a reference sensor (a commercially available medical sensor) at the widely used skin heating of probes at around 44 ºC and after 10 minutes of probe attachment. The ws-$TcPO_2$ can also accurately detect the minimal variation of the $TcPO_2$ on the human skin at about 5 mmHg, better than the average of about 6 mmHg of the tested reference sensor.

탄소중립 고도화를 위한 첨단 소재▪가공 기술 심포지엄
Room 한라A, 4월 23일

[탄소중립1-1 | 14:10] 초청강연
트램프 원소의 귀환 - 탄소 중립형 순환형 저탄소 생태계 모델: 이준호* (고려대학교)
Keywords: 순환형경제, 트램프원소, 철스크랩, Hot Shortness

트램프 원소(Tramp Elements)는 철스크랩을 재활용할 때 제강 공정에서 제거하기 어렵기 때문에 철강에 잔류하여, 철강 제품의 품질에 악영향을 미치는 미량 원소들을 총칭하는 용어로, 대표적인 트램프 원소로는 구리(Cu), 니켈(Ni), 주석(Sn), 비소(As), 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo), 납(Pb) 등이 있다. 구리 당량이 높은 경우 열연 공정에서 Hot Shortness를 발생시키고, 열연 제품의 비늘흠 결함을 일으킨다. 현재까지는 주로 Ni을 첨가하는 방식으로 결함발생을 억제하였다. 최근, 지구 온난화로 인한 순환형 저탄소 공정에 대한 요구가 증대하면서 유럽을 중심으로 스크랩의 사용량 증가가 요구되고 있다. 예를 들어, Benz의 경우 '39년까지 연간 철강 구매량의 85% 이상을 탄소 중립 제품으로 구매할 것을 선언했으며, BMW의 경우 '30년까지 저탄소 철강 전환을 통해 온실가스 배출을 40% 감축할 것을 선언했다. 이에 독일의 티센크룹에서는 고로-전로 공정에서 스크랩의 사용 비중 향상을 통해 CO_2 배출량을 일반 제선공정 2.11 t-CO_2e/ton 기준에서 0.75 t-CO_2e/ton으로 저감한 제품(Bluemint Recycled)을 선보였다. 현재 여러 나라에서 수소환원제철 기술을 개발중이나, 대량의 수소 공급 문제와 일반 광석을 사용한 적절한 수소환원제철 기술의 개발이 이루어지지 않아, 당분간은 철스크랩 사용 증대를 통해 온실가스 배출 저감을 모색하는 것이 가장 효과적일 것이다. 본 발표에서는 최근 국내 전기로 업체에서 수집된 스크랩 기반 생산제품(철근) 중 포함된 트램프 원소의 농도 분석 결과와 이들 제품의 고온 산화 반응을 통해 얻어진 스케일과 강재 계면에서의 액상 Cu의 분포 결과를 보고하며, Confocal Scanning Laser Microscope를 이용한 Hot Shortness의 실시간 관찰 결과를 통해 트램프 원소에 대한 적절한 대응 방향에 대해 제안하고자 한다.

[탄소중립1-2 | 14:35] 초청강연
탄소중립을 위한 SMR 개발 가속화 및 SMR 혁신제작기술: 김동수* (두산에너빌리티)
Keywords: 탄소중립, SMR, 혁신제작 기술, 제작기간 단축

최근, 탄소중립 목표 달성 및 청정에너지원 증대 요구에 따라 SMR이 유력한 대안으로 떠오르고 있으며, 전 세계적으로 '35년까지 최대 97.4조원 규모의 시장이 전망되고 있다. 이로인해, 미국, 영국 등 SMR 설계를 선도하고 있는 주요 국가들은 SMR 제작기술의 중요성을 사전에 인지하고 제작분야에서도 경쟁 우위를 확보하기 위하여 정부차원에서 혁신 제작기술(PM-HIP, EBW, DLC)개발 및 설비투자를 적극적으로 지원하고 있다. 이는 SMR이 복잡한 설계와 더 커진 기자재 크기에도 불구하고 대형 원전 대비 시공기간 단축을 위해 기자재 제작기간 단축이 글로벌 SMR 경쟁에서 중요한 경쟁요소가 될 것으로 전망되기 때문이다. PM-HIP(Powder Metallurgy-Hot Isostaic Pressing) 기술은 복잡 형상의 부품을 최종제품과 매우 근접한 형상(Near Net Shape)으로 한번에 제조 가능한 기술로 혁신제작기술 중 적용효과가 가장 크다. PM-HIP 기술개발/상용화는 미국이 가장 빠르게 추진하고 있으며, 2016년 부터 EPRI 주관으로 SMR 부품대상 기술개발을 추진하여 1/2 Sclae까지 제작/검증 완료하였고, 현, 자국내 기업 컨소시엄을 통해 양산용 대형 HIP 설비도입 검토를 진행하고 있다. 따라서, 국내에서도 '22년 부터 초대형 PM-HIP, EBW, DLC 기술개발 및 양산용 설비도입을 위한 국책과제를 기획하였고, 기술개발 국책과제를 '24년 부터 우선 추진하는 것으로 결정되었다.

[탄소중립1-3 | 15:00] 초청강연
핵융합 발전용 철강소재 개발 현황: 이창훈*, 박형권, 김치원 (한국재료연구원), 문준오, 홍현욱 (창원대학교), 신찬선 (명지대학교)
Keywords: 핵융합, 저방사강

핵융합 발전은 1억도 이상의 고온에서 중수소와 삼중수소가 만나 핵융합 반응을 일으키고 방출되는 에너지를 발전에 이용하는 기술로, 여기에 사용되는 소재는 우수한 물성, 저방사화 특성, 중성자 내조사성, 용접성 등의 극한의 특성이 요구된다. 이러한 요구특성을 고려할 때, 저방사화 철강은 핵융합 발전을 위한 구조용 소재로 활용될 가능성이 매우 높다. 저방사강은 9Cr-1Mo계 화력발전용 내열강에서 Mo와 Nb와 같은 고방사화 합금원소를 W, Ta 등의 저방사화 합금원소로 치환하여 9Cr-(1~2)W에 미량의 Ta이 포함된 합금성분을 가진다. 이러한 저방사강은 노말라이징과 템퍼링 열처리를 거쳐 최종적으로 템퍼드 마르텐사이트 조직을 가지고, 결정립 및 래스 경계에 상대적으로 조대한 Cr계 M23C6 탄화물과 입내에 미세한 Ta계 MX 석출물이 분포되어 있다. 본 발표에서는 또다른 저방사화 원소이면서 미세한 석출물을 생성하는 Ti를 Ta과 함께 첨가한 저방사강의 연구결과를 집중적으로 소개하고자 한다. Ta와 Ti의 첨가는 미세한 MX 석출을 조장하여 상대적으로 조대한 M23C6 탄화물의 크기를 줄임으로써 저방사강의 충격특성과 동시에 중성자 내조사성을 대폭 향상시키는 것으로 확인되었다.

[탄소중립1-4 | 15:25] 초청강연
친환경 발전용 가스터빈 블레이드 단결정 초내열합금의 TMF 변형기구와 제어: 홍현욱* (국립창원대학교)
Keywords: Superalloys, Thermo-mechanical fatigue, Microtwin, Crack, Microstructure design

발전용 가스터빈은 최근 친환경 및 탄소중립 정책에 발맞춰 효율 향상과 온실가스 배출 저감을 목표로 개발이 진행되고 있다. 특히, 수소 및 저탄소 연료의 활용을 위한 기술 혁신이 주요 과제로 부각되고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해 고온 수소 분위기 등 가혹한 환경에서 우수한 성능과 내구성을 제공할 수 있는 첨단 소재의 중요성이 부각되고 있다. 항공용 제트엔진 및 산업용 가

스터빈의 고온 주요부품인 블레이드와 베인의 소재로 니켈기 초내열합금이 사용되며, 터빈의 고효율화를 위한 작동온도의 지속적 증가로 인해 단결정 합금으로의 전환과 동시에 차세대 단결정 합금 개발로 이어져 가고 있다. 이러한 주요 고온부품들은 엔진의 반복적인 기동 (start up)과 정지 (shut down)로 인해 온도변화에 따른 구속 열응력 주기와 작동중의 기계적 하중 주기를 특정 위상(phase)에 따라 함께 겪게 된다. 따라서, 블레이드 소재로서 최근 적용되는 단결정 합금의 열화기구를 보다 정확하게 평가하고 설계에 반영하기 위해서는 기존의 등온 저주기 피로 (isothermal low cycle fatigue, LCF) 보다는 열·기계적 피로 (thermo-mechanical fatigue, TMF) 시험이 최근 각광을 받고 있다. 따라서, 본 연구에서는 단결정 니켈기 초내열합금 CMSX-4에 대하여 TMF 시험 동안 변형 및 파괴거동을 LCF와 대비하여 차이가 나타나는지 비교, 평가해보고 미세구조적 관점에서 그 결과를 분석하고자 한다. 온도와 변형량의 변화가 90º 위상차이를 보이는 역위상 (Out-of-Phase, OP) TMF 수명은 LCF 수명에 비해 절반 이하로 나타났다. 균열은 산화층이 형성된 표면에서 시작되어 LCF와 OP TMF 조건 모두에서 <100> γ 채널을 따라 전파되었다. 하지만, OP TMF의 경우, 균열이 일정 크기에 도달했을 때 균열 선단 근처의 {111} 면에 평행한 마이크로 쌍정(microtwin) 판이 여러 그룹으로 형성되었다. 이러한 국부적인 쌍정은 균열 전파를 위한 우선 경로를 제공하여 OP TMF 수명을 크게 단축시켰다. 추가적으로, 표면 균열 형태와 그 밀도를 비교한 결과, 최저 온도에서의 최대 인장 변형률이 OP TMF 사이클 중 균열의 초기화 및 전파를 가속화하는 것으로 확인되었다. OP TMF의 특이한 변형기구를 기반으로 피로 수명을 개선하는 단결정 초내열합금 설계 방향을 제안하고자 한다.

[탄소중립2-1 | 16:10] 초청강연

국제 탄소규제 대응을 위한 제조업 발전 방향: 최태훈*, 조훈, 이종섭, 송람, 신호정, 안상준 (한국생산기술연구원)

Keywords: 탄소발자국, 제조공정, CBAM(Carbon Border Adjustment Mechanism), DPP(Digital Product Passport), LCA

지구 온난화와 기후 변화가 전체 인류 존속의 큰 위기로 대두되고 있다. 이 위기가 현실이 되지 않도록, EU를 중심으로 한 CBAM, DPP, EU 배터리 규정 등 국제적인 탄소규제들이 곧 시행될 예정이며, 이는 제조산업의 지속가능성을 위협하고 있다. 최근까지 제조산업에 있어서 주요 이슈는 품질, 가격, 납기 등이었으나, 이제는 제품의 제조, 사용, 폐기에 이르는 전과정에서의 탄소발자국도 간과할 수 없게 되었다. 글로벌 대기업을 중심으로, 탄소발자국 측정, 보고서 작성, 검증 등에 관한 대응체계가 구축중이며, 공급망에 있는 중소·중견 제조기업들도 이에 동참해야 할 것으로 예상된다. 국제 탄소규제에 대응하기 위해서는, 국제적으로 통용 가능하면서, 현실적으로 중소·중견 제조기업들이 적용가능한 실용적 탄소발자국 발생량 측정 및 산정 방법이 필요하다. 또한 궁극적으로 제조산업에서의 탄소발자국을 저감하기 위한 기술과 인프라가 지속적으로 개발되어야 한다. 본 발표에서는, 이와 같은 산업환경 극복을 위한 한국생산기술연구원의 R&D 전략과 현황을 소개하고자 한다.

[탄소중립2-2 | 16:35] 초청강연

탄소중립 기반 용접기술 발전방향: 박영도* (동의대학교)

Keywords: 탄소중립, 용접공정, 용접재료

탄소중립(Net-Zero)은 전 산업 분야에서 필수적인 목표로 자리 잡고 있으며, 용접 분야에서도 에너지 소비 절감과 친환경 기술 도입이 요구되고 있다. 본 발표에서는 용접공정 및 용접 재료의 관점에서 탄소중립을 실현하기 위한 발전 방향을 논의한다. 첫째, 저에너지 소비형 용접기술의 개발이 필요하다. 레이저 용접, 저열입량 MIG/MAG 용접, 초음파 용접 등의 공정은 전력 소비를 줄이고 열영향부를 최소화하여 에너지 효율성을 높일 수 있다. 둘째, 친환경 용접 재료의 개발이 중요하다. 기존의 CO_2 배출량이 높은 용접재료(플럭스, 가스, 와이어)를 대체할 수 있는 저탄소 소재 및 친환경 플럭스 개발이 요구된다. 셋째, 디지털 트윈 및 인공지능(AI) 기술을 활용한 공정 최적화를 통해 불필요한 에너지 소비를 줄이고, 용접 결함을 최소화하여 재작업(rework)으로 인한 추가적인 탄소 배출을 방지할 수 있다. 본 발표에서는 이러한 기술적 발전 방향을 중심으로 탄소중립 목표 달성을 위한 용접공정 및 재료의 혁신적인 접근 방안을 제시하고, 산업 적용 가능성을 논의하고자 한다.

[탄소중립2-3 | 17:00] 초청강연

PCR 기반 재활용 잉곳이 첨가된 자동차용 알루미늄 판재의 공정 및 부품화 기술개발: 유창열*, 정준영, 권혁민, 정연일 (현대자동차 AVP본부)

Keywords: 알루미늄, 차체, 판재, 재활용, 재생 잉곳, 스트립캐스팅

자동차산업에서 내연기관차에서 전기차로 진행됨에 따라 알루미늄을 많이 적용하고 있다. 전동화 부품 뿐만 아니라, 차체, 샤시부품에 대폭 적용되고 있다. 그 이유는 배터리, 모터 등 전동화 관련 부품이 증대 됨에 따라 차량 무게를 경량화해야 하며, 전비를 증대하기 위해서는 경량화가 필연적이기 때문이다. 경량화 후보 소재로는 복합재, 알루미늄, 마그네슘 등이 있으며, 그 중에 알루미늄이 원가 및 성형성에 있어서 가장 적합한 소재이다. 알루미늄은 판재, 빌렛, 잉곳 형태로 만들어지고, 판재는 후드, 도어, 트렁크로 적용되고 빌렛은 압출하여 배터리케이스, 범퍼에, 잉곳은 주조하여 휠, 모터하우징, 기가캐스팅 차체부품에 적용되고 있다. 여기서 압출재와 주조재는 국내에서 소재, 성형, 표면처리 까지 모두 이루어지는 인프라를 갖추었지만, 판재의 경우, 중국, 일본, 유럽, 북미에서 수입해오는 현실이다. 물론 국내에서 제조하는 경우도 있지만, 연속열처리를 위해 중국으로 이동하였다가, 국내로 다시 들어온다. 이에 수입되고 있는 판재를 국산화하고 국내 판재 생산 인프라를 구축하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 이러한 알루미늄 판재 인프라를 구축하는 시도 외에 유럽 법규를 대비하기 위한 재활용 알루미늄 과제들이 작년부터 진행되고 있다. 현재는 알루미늄 판재 화학성분 및 기계적 물성을 고려하여 공정 스크랩 위주의 재활용 기술을 개발하고 있으나, 유럽 법규 등을 고려할 때 재생원료 양이 부족할 것으로 예상되며, PCR (Post Consumer Recycled) 재생원료가 적용되어야 할 것으로 판단된다. 따라서, 기존의 공정 스크랩 연구개발에서 PCR 기반 재활용 연구로 전환이 필요하다. PCR 기반의 재생 잉곳 제조하기 위해서는 재생원료 조합 기술, 재생원료 선별 기술, 전처리 기술, 불순물 제거 기술, 화학성분 조정 기술, 용탕 품질 평가 기술 등이 필요하며, 현재 정부 과제 등을

통해 개발 중에 있다. 또한 열연 공정을 삭제하여 탄소 저감하는 스트립캐스팅 판재 제조 기술이 개발되고 있으며, 화학성분과 공정 최적화를 통해 기존 DC(Direct Chill) 캐스팅 대비 동등한 물성을 확보하는 것을 목표로 개발하고 있다. 추가로, PCR 기반 재생 잉곳과 스트립캐스팅으로 제조된 판재를 차량에 적용하는 것을 검토하고 있다.

[탄소중립2-4 | 17:25] 조청강연

탄소중립 실현을 위한 첨단 소재 평가: SSMT(Small-Scale Mechanical Testing) **기반 원자력, 핵융합 및 용접부 물성 연구**: 신찬선* (명지대학교), 진형하 (한국원자력연구원), 이창훈 (한국재료연구원), 문준오 (창원대학교), 배규열 (포스코)

Keywords: 탄소중립, 원자력, 핵융합, 이온조사, SSMT, 용접부, 소형인장시험, 미세 기계적 평가, 표준화

탄소중립 시대를 맞아 원자력 및 핵융합 발전은 지속가능한 에너지원으로 주목받고 있으며, 이를 위한 구조 재료의 신뢰성 평가가 필수적이다. 특히, 고온·고방사선 환경에서의 내구성을 확보하기 위해 원자력 및 핵융합 발전용 첨단 소재에 대한 미세 기계적 물성 평가가 중요하다. Small-Scale Mechanical Testing (SSMT) 기법은 소량의 시편만으로도 재료의 변형 및 손상 거동을 정량적으로 분석할 수 있어, 방사선 조사된 소재나 미세 영역 특성을 평가하는 데 효과적이다. 본 연구에서는 SSMT 기법을 활용하여 원자력 및 핵융합 발전 소재의 이온조사 후 미세 기계적 물성 평가를 수행하고, 용접부에서 채취한 소형 시험편의 인장시험을 통해 용접부의 강도 및 연성 거동을 분석하였다. 그러나 SSMT의 산업적 적용을 위해 해결해야 할 몇 가지 도전과제가 존재한다. 첫째, 소형 시편에서 얻은 기계적 물성이 거시적 스케일에서의 재료 거동을 대표할 수 있는지에 대한 신뢰성 확보가 필요하다. 둘째, 다양한 산업 분야(원자력, 항공우주, 자동차, 해양, 생체의료 등)에서 활용될 수 있도록 표준화된 시험 방법 및 데이터 해석 기술이 요구된다. 셋째, SSMT 결과를 기존 거시적 시험 데이터와 연계할 수 있는 상관성 연구가 필수적이다. 본 발표에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 접근 방안을 함께 제시할 예정이다. 구체적으로, 실험 데이터 기반의 머신러닝 및 물리 기반 모델링을 활용하여 소형 시험 결과와 거시적 물성 간의 상관관계를 정량화하는 방법을 소개하며, SSMT의 표준화 가능성 및 향후 연구 방향을 논의한다.

New-Horizon : 소재 실험지능화 및 디지털화 심포지엄
Room 한라B, 4월 23일

[지능화1-1 | 11:00] 초청강연

MARK: **나노소재 개발용 AI 재료공학자**: 한상수* (한국과학기술연구원)

Keywords: Artificial intelligence, robotics, autonomous laboratory, nanoparticles

The development of autonomous laboratories based on AI and robotics is revolutionizing nanomaterials research by accelerating the discovery and optimization of functional nanoparticles (NPs). In this talk, I will introduce our effort for development of autonomous laboratories for nanoparticles, called MARK (Materials Acceleration Research K-lab in KIST). In particular, this presentation will focus on the bespoke synthesis of silver (Ag) nanoparticles, highlighting strategies for optimizing synthesis conditions to meet specific application needs. Additionally, I will discuss the balancing optimization between activity and stability in nanoparticle catalysts, exploring how AI-based autonomous experiments contribute to efficient catalyst design. By integrating autonomous systems into nanomaterials research, we can enhance reproducibility, reduce material waste, and unlock new possibilities for catalytic applications

[지능화1-2 | 11:30] 초청강연

지능형 로봇을 활용한 올레핀 생성용 촉매 조성 설계 및 최적화: 신정호* (한국화학연구원)

Keywords: 지능형 로봇, 자율화, 인공지능, 촉매, 올레핀

최근 자율 실험실의 발전은 기계 학습을 위하여 필요한 고품질의 소재 연구데이터를 축적하기 위한 목적으로 활용되어 오고 있다. AI가 결합된 지능형 로봇 팔을 이용하여 소재 연구데이터 생성을 자동화하고 메타휴리스틱 방법을 적용하여 연구자들은 소재의 성분 및 다양한 공정 조건을 최적화하여 요구되는 목표를 더 효율적으로 달성할 수 있다. 지능형 로봇 팔은 프로그래밍이 가능한 데이터 생성의 자동화 구현을 위하여 이용될 수 있으며, 그 과정에서 실험의 속도와 효율성에 대한 향상 뿐 아니라 24시간 가동이 가능함에 따라 소재 연구개발을 가속화할 수 있는 이점이 있다. 이와 관련하여 온실가스를 올레핀으로 전환하기 위한 촉매 소재의 설계 및 공정 최적화를 위하여 지능형 로봇 기반의 자율화 실험실 구축 과정을 소개하고자 한다. 동 지능형 로봇 기반의 자율화 실험실의 구축은 로봇팔을 이용하여 범용적이고 모듈화된 방식으로, 분말/액체 형태의 시료 취급/처리를 기반으로 함침법 기반의 촉매 합성 실험을 수행하는 것을 목표로 한다. 특히 다양한 실험적인 요인에 의하여 그 특성이 변화할 수 있는 촉매 시스템의 합성과 관련하여 높은 재현성 및 효율성이 보장되는 실험 과정을 수행하고자 한다.

[지능화2-1 | 14:00] 초청강연

Data-Driven Discovery of Framework Materials for Our Planet: Challenges, Opportunities, and Future Directions: Wonyoung Choe* (UNIIST)

Keywords: Material Discovery, Metal-Organic Frameworks, Carbon Neutrality

Achieving carbon neutrality by 2050 is a formidable global challenge, requiring innovative approaches to accelerate materials discovery. The exploration of chemical space has emerged as a critical strategy in this pursuit (Nat. Synth. 2024, 3, 1518). Framework Materials (FMs), including Metal-Organic Frameworks (MOFs) and Metal-Organic Polyhedra (MOPs), are highly tunable solids constructed from diverse organic linkers and metal nodes, making them promising candidates for carbon-neutral applications. However, optimizing their synthesis remains complex and labor-intensive due to the vast number of variables involved and the absence of a definitive construction blueprint. To address these challenges, we have adopted a data-driven approach that integrates structural databases and digitized chemical intuition to streamline FM discovery. This presentation will highlight key examples of MOFs, underscoring the critical role of chemical intuition and the necessity of data-driven strategies when navigating numerous synthetic variables. Despite the vast combinatorial possibilities inherent in MOFs, their optimization remains a significant challenge, requiring innovative solutions from both computational and synthetic chemists. I will also discuss case studies involving Zeolitic Imidazolate Frameworks (ZIFs), Zirconium-based MOFs, and MOPs, demonstrating how theoretical and experimental databases serve as powerful tools for identifying synthetic targets and advancing FM discovery. In the context of carbon neutrality, these digital repositories of chemical insights significantly accelerate the design and optimization of novel FMs, offering essential support for overcoming the challenges of sustainable materials.

[지능화2-2 | 14:30] 초청강연

인공지능 및 실험 자동화를 통한 배터리 소재 개발 가속화: 서동화* (한국과학기술원)

Keywords: 자율 실험실, 인공지능, 실험 자동화, 배터리

새로운 소재를 개발하기 위해서는 많은 연구 개발 시간과 자원이 필요하다. 특히 차세대 이차전지 등 기술 고도화가 이뤄지고 있는 분야에서 새로운 소재에 요구되는 다양한 특성과 높은 성능 지수들로 시행 착오 기반이나 연구 개발자의 경험이나 통찰력 기반으로 새로운 소재를 개발하는 것에 한계가 있다. 소재 개발 가속화를 위해 빅데이터 기반의 인공지능 기술을 적용하고자 많은 연구

들이 진행되고 있다. 하지만 그 시작점인 소재들에 대한 빅데이터를 구축하는 것에 큰 어려움이 있다. 이는 소재 실험들의 재현성 확보가 어렵고 연구자의 지속적인 개입이 필요하고 실패 데이터에 대한 확보가 어려움으로 인함이다. 이를 극복하기 위해 로봇 기반의 자율 실행 실험실에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 인공지능을 통해 실험을 계획하고 이를 로봇이 실험과 분석을 수행하고 인공지능으로 해석하여 다음 실험을 계획하는 closed-loop 실험을 통해 양질의 데이터를 구축하고 소재 탐색 혹은 성능 최적화를 수행할 수 있다. 본 세미나에서는 차세대 이차전지 분야에서 적용되고 있는 자율 실행 실험실에 대해 소개하고 이에 필요한 인공지능 기술에 대해 설명한다.

[지능화3-1 | 15:15] 초청강연

협동로봇 기반 Self-Driving Lab 구축 전략: 허영진* (뉴로메카)

Keywords: 협동로봇, 자동화, 실험실 자동화, 로봇 자동화

협동로봇 기반 Self-Driving Lab 구축 전략에 대한 본 발표에서는 연구실 자동화의 개념과 구현 전략을 다룹니다. Self-Driving Lab(SDL)은 로봇이 실험을 수행하고 인공지능(AI)이 실험 설계를 자동으로 결정하는 완전 자동화된 연구 환경을 의미하며, 최근 복잡한 소재 개발 과제를 가속화할 방법으로 주목받고 있습니다. 협동로봇은 인간과 안전하게 협업할 수 있도록 설계된 로봇으로서, 이러한 SDL 구현의 핵심 요소입니다. 반복적이고 시간 소모적인 실험 절차를 협동로봇이 수행하게 함으로써 연구자는 창의적 분석과 이론 도출에 집중할 수 있습니다. 자동화를 통한 효율 개선과 비용 절감 효과도 큰데, 한 보고에 따르면 지능형 자동화를 도입한 조직은 평균 30% 이상의 비용을 절감하였으며, 특히 실험실에서는 수작업 감소와 정확도 향상을 통해 상당한 비용 절감으로 이어집니다. 다만 이러한 자동화 시스템 구축에 있어서 시스템 통합 (System Integration) 비용이 많이 발생하여 실제 연구실 단위에서의 도입은 여전히 어려우며 이러한 이유로 인해 보편화 되고 있지 않습니다. 본 발표에서는 뉴로메카(Neuromeka)의 실제 협동로봇 기반 자동화 시스템 도입 사례를 소개하여 자동화 운영 최적화 및 성과를 살펴보고, 이를 바탕으로 어떻게 협동로봇 기반의 자동화 시스템을 현실적으로 도입 할 수 있을지에 대한 방향을 제시하고자 합니다. 이를 통해 Self-Driving Lab 구축의 개념적 접근과 구체적 사례를 함께 논의하고, 연구개발 분야에서 자동화 전략이 가지는 혁신적 의의를 조망하고자 합니다.

[지능화3-2 | 15:45] 초청강연

Metals and Materials Lab Automation to boost R&D: Sam Yoon* (CM Corporation Ltd.)

Keywords: Metals, Materials, Lab Automation

Laboratory automation has been identified as a key strategy for increasing the rate at which new discoveries are made in chemistry and materials science.1–6 Automation serves two central purposes: 1) to increase the experimental throughput via continuous and/or parallel execution of otherwise repetitive, manual tasks, and 2) to foster more standardized and reproducible results. While the history of automation in chemistry traces back to the mid-20th century,1 recent years have seen a “renaissance” of automation in both academic and industrial laboratories. Advances in robotics and engineering have enabled the automation of increasingly challenging laboratory operations such as dosing of powders, gels and slurries, Inert reaction, work-up and on-line analysis. Integrating such automated modules into larger workflows has demonstrated the potential to tackle increasingly complex scientific challenges in an automated fashion.

[지능화4-1 | 16:30] 초청강연

제조업에 바라보는 인공지능과 타이어 컴파운드 적용 사례:류명신* (한국타이어앤테크놀로지)

Keywords: 인공지능, 컴파운드, 점탄성, 강화학습, Virtual Compound Design

최근 몇 년간 4차 산업혁명의 급속한 발전과 함께, 인공지능과 빅데이터는 단순한 기술적 선택이 아니라 현대 사회와 경제에서 필수적인 요소가 되고 있습니다. 예를 들어, 소매업에서는 고객의 구매 이력과 온라인 행동 데이터를 분석하여 개인화된 쇼핑 경험을 제공하는 데 인공지능과 빅데이터가 활용되고 있습니다. 또한, 의료 분야에서는 환자의 건강 기록과 생명 징후 데이터를 분석하여 질병을 조기에 진단하고 치료 방법을 최적화하는 데 이 기술들이 중요한 역할을 하고 있습니다. 제조업에서도 인공지능 기반의 예측 유지보수 시스템이 장비 고장을 예방하고 생산성을 향상시키는 데 기여하고 있습니다. 이처럼, 인공지능과 빅데이터는 다양한 산업 분야에서 혁신을 촉진하고, 업무 효율성을 극대화하며, 새로운 가치 창출의 기회를 제공하고 있습니다. 따라서, 이러한 기술들은 선택적 도구가 아니라 현대 사회를 이끌어가는 핵심적인 기술로 자리 잡았습니다. 이러한 기술적 변화에 발맞추어, 전 세계의 많은 제조업체들이 인공지능(AI)과 빅데이터를 적극적으로 도입하여 제조 공정의 혁신과 효율성 향상을 도모하고 있습니다. 그러나 이러한 기술 도입에도 불구하고, 많은 회사들이 기대했던 가시적인 성과를 얻는 데에는 어려움을 겪고 있음이 현실입니다. 기술 도입 초기에는 데이터의 질과 양, 기술 인프라의 부족, 직원들의 기술 수용도 및 적응력 문제 등 다양한 장애물에 부딪히곤 합니다. 예컨대, 어떤 중소 규모의 제조업체는 데이터를 수집하고 분석하는 고급 분석 도구를 갖추었음에도 불구하고, 실제로 유용한 통찰을 도출하기 위한 충분한 데이터의 양이나 질을 확보하지 못해 실질적인 생산성 향상이나 비용 절감 효과를 보지 못하는 경우가 있습니다. 결국, 이러한 도전과제들은 제조업체들이 인공지능과 빅데이터를 통한 혁신을 실현하는 과정에서 직면하는 주요한 장애물로 작용하며, 이를 극복하기 위한 지속적인 노력과 전략적 접근이 요구되고 있습니다. 본 강연에서는 타이어 compound 의 배합 레시피와 물성을 연결하는 빅데이터를 인공지능에 활용한 예시를 통해 산업계에서 빅데이터와 인공지능 적용이 왜 어려운지, 어떻게 극복해 나가야 하는지에 대해서 설명하고자 합니다. 특히 올바르게 데이터를 쌓아야 하는 방법, 잘못된 데이터가 인공지능 예측에 미치는 악영향, 그리고 이러한 예측 시스템이 어떻게 활용되고 있는지에 대한 소개를 하겠습니다.

[지능화4-2 | 17:00] 초청강연

Methodology for accelerating materials research combining AI and robot technology: Youn-Suk Choi*, Taesin Ha, and Hyundo Choi (SAIT)

Keywords: AI, Robot, Autonomous system

Materials development is a laborious process that requires a long time and high cost. Since most of the resources are known to be concentrated on R&D phase, a lot of efforts have been exerted to rationalize the conventional trial-and-error approach. When it comes to in-silico materials discovery, high-throughput virtual screening and inverse design based on artificial-intelligence (AI) are typical examples and exhibiting their usefulness in many applications. However, experiments for the synthesis and characterization of candidate materials still serve as a major rate-limiting step, as the level of automation is low and most of them have to be conducted by human researchers. To overcome this issue, autonomous systems have been also developed in which various robots execute experiments from reaction to analysis under the guide of AI models to find optimal recipes. In this presentation, two autonomous experimental platforms will be introduced. The first is a robot chemist in which AI and robots collaborate to explore optimal experimental recipes and perform multi-stage organic synthesis. And the other is a system to search optimal formulation of materials by evaluating their characteristics. Acceleration of materials development in industry is an important issue that not only secures product competitiveness but also shortens the time to market. Although it has been proving its value, there are still many technological obstacles to overcome in order to be an enabling tool in actual fields. In this respect, remaining tasks along with global trends will also be discussed.

고엔트로피합금 I
Room 400, 4월 23일

[고엔1-1 | 09:00]
고엔트로피합금의 고속 변형 조건에서의 동적 거동 분석: 이소영, 김현수, 김윤호, 박은수* (서울대학교)
Keywords: 고엔트로피합금, 고속충돌시험, 동적 변형 거동

고엔트로피합금(High-Entropy Alloys, HEAs)은 우수한 기계적 특성과 높은 열적 안정성으로 인해 극한 환경에서의 구조재료로 주목받고 있다. 특히, 고속 변형(high strain rate) 조건에서의 동적 거동에 대한 이해는 방탄, 항공우주 및 자동차 충돌 방지 설계와 같은 응용 분야에서 필수적이다. 본 연구에서는 plate impact test를 이용하여 충격 하중 조건에서 HEA의 변형 및 손상 거동을 분석하였다. 이를 통해 고속 충격 시 발생하는 충격파 전파, 압력 및 온도의 변화가 미세조직 및 변형 메커니즘에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 충격 후 미세구조 분석을 통해 변형 쌍정, 전위 구조, 결정립 미세화 및 단열 전단대 형성 여부를 조사하였다. 실험 결과를 기반으로 기존 FCC 기반 합금과의 비교를 수행하였으며, 전산 시뮬레이션을 활용하여 변형 및 손상 거동을 정량적으로 분석하였다. 따라서 본 연구는 고엔트로피합금의 고속 변형 조건에서의 변형 거동을 체계적으로 규명하여, 향후 극한 환경에서의 응용 가능성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

[고엔1-2 | 09:15]
Sintering Behavior of CoCrFeNi High-Entropy Alloy Using High Energy Milled Oxide: Gertrude Mugwe Mongella, Minjong Kim, Taehyeob Im, Nelson Bayi, and Caroline Sunyong Lee* (Hanyang Univ.)
Keywords: Sintering, CoCrFeNi, high entropy alloy, milling, hydrogen reduction

High-entropy alloys (HEAs) have garnered considerable attention in recent years due to their remarkable combination of high strength and good elongation properties. In this study, the CoCrFeNi HEA was fabricated using a powder metallurgical process involving high-energy ball milling, spray drying, hydrogen reduction, and sintering at various temperatures of 900 ºC, 1000 ºC, 1100 ºC, and 1200 ºC in a 75% H_2 - 25% N_2 atmosphere. The fabricated samples were characterized through a range of analytical techniques, including X-ray diffraction, scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, nanoindentation, and the density was measured using Archimedes principle. These investigations provided detailed insights into the microstructural evolution, densification behavior, and mechanical properties of the CoCrFeNi HEA as a function of the sintering temperature. The study highlights the significant impact of sintering conditions on the alloy's phase stability, porosity, and hardness. In our study, 1200 ºC was found to be the optimal condition, resulting in improved densification, reduced porosity, and a hardness value of 4.81 GPa. This hardness was significantly higher compared to the gas atomized powder sintered under the same conditions, which had a hardness of 2.90 GPa. The enhanced hardness at this temperature is attributed to grain refinement, improved homogeneity, and phase stabilization due to high-temperature processing. This research contributes valuable data on the relationship between sintering temperature and the mechanical properties of CoCrFeNi HEAs, offering insights into the optimization of their processing for advanced material applications.

[고엔1-3 | 09:30]
붕소 첨가가 철계 중엔트로피 합금의 인장 물성에 미치는 영향: 구본우, 손수정*, 이재홍, 왕재민, 이병주, 김형섭* (포항공과대학교)
Keywords: 고엔트로피 합금, 가공경화, 석출물, 마르텐사이트 변태

준안정성 중엔트로피 합금(MEA)는 우수한 기계적 특성으로 인해 많은 관심을 이끌고 있다. 그러나 낮은 항복 강도는 산업적 적용을 위한 장애물로 작용하고 있다. 또한, 준안정성 MEA의 기계적 특성을 더욱 향상시키기 위한 방안으로 침입형 원소의 첨가에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 기계적 물성을 개선하기 위해 붕소를 첨가한 MEA를 설계하였다. 다양한 침입형 원자 중 붕소를 선택하여 Fe60Co15Ni15Cr10(Fe60) 합금에 첨가함으로써 높은 항복강도와 인장 강도를 구현하였다. 붕소가 첨가된 합금은 대부분이 FCC 구조로 구성되며, 붕소 첨가로 인하여 Cr2B 석출상이 형성된다. 붕소가 첨가된 MEA는 상온에서 약 770 MPa의 인장 강도를 나타내며, 이는 Fe60보다 50% 증가한 물성이다. 이러한 기계적 특성 향상은 석출 강화 및 변형 유기 상변태로부터 기인한다. 또한, Cr2B 석출상 형성으로 인해 기지의 조성이 변화하며, 이로 인해 TRIP kinetics가 조절되고 상온에서도 TRIP 거동을 나타낸다. 본 연구에서 제시한 합금은 항복 강도를 향상시킬 뿐만 아니라 TRIP 거동을 활성화하여, 붕소 첨가를 통한 준안정성 MEA의 기계적 특성을 개선하는 효과적인 방법을 제시한다.

[고엔1-4 | 09:45]
고용강화 효과를 활용한 고엔트로피 합금 설계: 정주리, 김종태, 전재열 (한국생산기술연구원), 이진규 (국립공주대학교), 강이승, 한준희* (한국생산기술연구원)
Keywords: 고엔트로피합금, 합금 설계, 기계적특성, 미세구조

고엔트로피 합금(HEA)은 다수의 주요 원소로 구성되며, 높은 혼합 엔트로피로 인해 단일상을 형성하는 경향이 있다. 이러한 특성으로 인해 우수한 구조적 안정성과 기계적 성능을 갖추고 있으며, 차세대 구조용 소재로 주목받고 있다. 특히, BCC 구조를 가지는

내열 HEA는 고융점 금속을 기반으로 뛰어난 고온 강도와 열적 안정성을 제공하며, 대표적인 예로 TiNbZrHfTa 합금이 있다. 이 합금은 탁월한 고온 특성을 나타내어 항공우주 및 고온 구조재 분야에서 중요한 소재로 연구되고 있다. 현재 항공 산업에서는 Ti 계 합금이 고온 구조재로 널리 사용되고 있으나, 대부분의 합금이 α+β 구조를 가지기 때문에 단상의 Ti 합금보다 가공성이 낮으며, 고온에서 장시간 사용 시 미세조직 변화로 인해 강도 저하 및 크리프 저항성이 감소하는 단점이 있다. 본 연구에서는 상용 Ti 계 합금에 고엔트로피 합금 설계 개념을 적용하여 새로운 내열 합금을 개발하고자 하였다. 특히, 원자 크기 불일치(Atomic Size Misfit, δ) 를 적극 활용하여 고용 강화 효과를 극대화함으로써 기존 Ti 합금의 강도를 유지하면서도 기계적 성능을 향상시키는 것을 목표로 한다. 설계된 합금은 주사전자현미경(SEM) 및 X선 회절 분석(XRD) 을 통해 미세구조 및 상 분석을 수행하며, 기계적 특성 평가를 통해 강도 및 연성을 검토할 예정이다. 본 연구를 통해 고온 환경에서도 우수한 기계적 성능을 유지할 수 있는 새로운 Ti 기반 내열 합금을 개발하는데 기여하고자 한다.

[고엔1-5 | 10:00]

Influence of Al content on the microstructure and mechanical behavior of $(CrFeNiCu)_{100-x}$ Al_x high entropy alloys: Dilshodbek Yusupov*, Abbas Muhammad Aoun, Gyeol Chan Kang, Hae Jin Park, Kiran Shinde, Sung Hwang Hong, and Ki Buem Kim* (Sejong University, Department of Nanotechnology and Advanced Materials Engineering)

Keywords: High-entropy alloy, Mechanical properties, Microstructure, Thermo-physical parameters

High entropy alloys (HEAs), as advanced materials, have gained significant attention over the past decade owing to their exceptional properties. A s-cast $(CrFeNiCu)_{100-x}$ Al_x HEAs (x = 0 - 15 at.%) was designed by adding Al as a minor element to the quaternary CrFeNiCu HEA caused microstructural change and enhancement of mechanical characteristics. Systematic microstructural analyses found that the addition of Al content is more than 7 at.% induced significant micro-to-nano-scale microstructural evolution. A minor addition of Al content lower than 5 at.% was effective in modulating the microstructure of the HEAs composed of CrFeNi-rich FCC1 and Cu-FCC2 phases. In contrast , the HEAs containing Al content higher than 7 at.% exhibited crucial microstructural evolution from dual-phase FCC1/FCC2 structure to multi-phase FCC1/FCC2/BCC structure. Furthermore, the primary BCC dendrite revealed a phase separation into the nanoscale A2/B2 phase, and $L1_2$ nanoprecipitates formed in the FCC phase. The Al content with large negative mixing enthalpy with constituent elements induced the micro-to-nano-scale chemical evolution and heterogeneity, which resulted in micro-to-nano-scale microstructural evolution. The volume fraction of the BCC phase strongly depended on Al content and significantly improved the yield strength from 291 MPa to 1366 MPa and Vickers hardness from 134 HV to 475 HV. Although the increase in volume fraction of BCC phase in the HEAs decreased plasticity from a higher than 45% to 16.02%, this result could be considered reasonable plasticity for engineering materials.

[고엔2-1 | 10:25]

FeCrMnNiCo 합금의 열처리 온도에 따른 미세조직과 부식 특성에 관한 연구: 이주희, 김수빈, 이상화 (조선대학교), 정재길 (전북대학교), 장희진* (조선대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, SPS, 열처리, 미세조직, 부식

FeCrMnNiCo 고엔트로피 합금(High Entropy Alloys, HEAs)은 BCC 또는 FCC와 같은 단일 상 구조 및 높은 엔트로피로 인해 우수한 강도, 경도, 열적 안정성, 내식성을 갖추어 극한 환경 적용에 대한 높은 적용 가능성을 보여준다. 그러나 기계적 특성 및 부식 특성은 열처리 조건과 미세조직의 크기 변화에 따라 달라질 수 있다. 이에 따라 열처리 온도가 미세조직, 기계적 특성 및 부식 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 용체화 처리(solution treatment, ST) 후 700~1000ºC에서 24시간동안 열처리를 수행한 후 공냉한 4가지 시편을 준비하였으며, 이를 as-sintered 및 ST 시편과 비교하였다. 미세조직 분석을 위해 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 결정립 크기와 석출물 형상을 관찰하였으며 X-선 화절분석(XRD)을 통해 상 분석을 진행하였다. 또한 경도 시험을 통해 기계적 특성을 평가하고 pH 8.5 완충 용액에 1wt.% NaCl을 첨가한 환경에서 동전위 분극시험을 수행하여 부식 거동을 조사하였다. 실험 결과, 열처리 온도가 증가함에 따라 경도는 감소하는 경향을 보였으나, 부식 전위가 상승하고 부식 속도가 감소하여 내식성을 향상됨을 확인하였다. 본 연구는 HEA의 열처리 온도 변화에 따른 미세조직의 크기와 경도, 부식 특성 간의 상관관계를 조사하였다. 본 연구는 2023년도 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단 (RS-2023-00217415)의 지원을 받아 수행한 성과임

[고엔2-2 | 10:40]

Hyperadaptor; Ni-기반 고엔트로피 합금의 광온도 범위에서의 온도 둔감한 인장 특성: 박효진, 손수정, 안성열, 하효정, 김래언, 이재홍 (포항공과대학교), 주효문 (현대자동차), 김정기 (경상국립대학교), 김형섭* (포항공과대학교)

Keywords: Hyperadaptor, 고엔트로피합금, 온도 둔감성, 전위기반 변형거동

본 연구에서는 다양한 환경 조건에서도 일관된 성능을 유지하도록 설계된 'Hyperadaptor' 합금 개념을 소개한다. 77 K에서 873 K까지의 온도 범위에서 강도와 연성을 안정적으로 유지하는 Ni-기반 고엔트로피 합금을 제시한다. 이는 나노 크기의 $L1_2$ 석출물, 조대한 결정립, 높은 적층 결함 에너지로 인해 온도 변화에 대한 감도가 최소화된다. 또한, 전위 슬립에 의한 변형 기구가 온도에 독립적으로 작용하여 기계적 안정성을 더욱 강화한다. 본 연구 결과는 Ni-기반 고엔트로피 합금이 항공우주, 자동차, 에너지 산업과 같은 극한 환경이 요구되는 분야에서 높은 잠재력을 지님을 보여주며, 합금 개발의 새로운 방향을 제시한다.

[고엔2-3 | 10:55]

The Phase Evolution and Mechanical Behavior of FeCoNiCux High-Entropy Alloys Under Cold Rolling and Heat Treatment: MUHAMMAD AOUN ABBAS*, Dilshodbek Yusupov, Gyeol Chan Kang, Dong sung Hong, Ga Eun jo, Yu Jin Lee, Sung Hwan Hong, Hae Jin Park, and Ki Buem Kim* (Sejong University, Department of Nanotechnology and Advanced Materials Engineering)

Keywords: Cu-Alloy, Phase transformation, Precipitation hardening, Rolling, Heat treatment

This study explores the influence of phase constitution on the microstructural and mechanical properties of $FeCoNiCu_x$ (x = 0-2, in molar ratios) high-entropy alloys (HEAs). The alloys were synthesized through ARC melting, followed by homogenization at 1050ºC for 24 hours to ensure chemical uniformity. After homogenization, the samples were rapidly quenched in ice water and subjected to cold rolling with an 80% thickness reduction. To further analyze the effects of thermal processing, the rolled samples were heat-treated at 600ºC for one hour. The phase evolution and mechanical behavior were examined using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), field emission scanning electron microscopy (FESEM), and mechanical testing. The experimental results indicate a phase transition from a single face-centered cubic (FCC) phase to a dual FCC phase as Cu content increases. FESEM analysis revealed the formation of FCC2 precipitates during the aging process, which contributed significantly to strength enhancement. Cold rolling induced significant strain hardening, increased dislocation density, and refined the grain structure, while post-deformation heat treatment facilitated the redistribution of solute atoms and the recovery of microstructural defects. The introduction of secondary FCC phases acted as barriers to dislocation movement, improving the overall mechanical performance. Additionally, the combined effect of severe plastic deformation and subsequent heat treatment led to improved hardness and strength while maintaining a reasonable level of ductility. This study provides valuable insights into microstructural evolution and strengthening mechanisms in $CoFeNiCu_x$ HEAs. The findings highlight the potential of these alloys for structural applications requiring a balance of high strength and ductility. By tailoring phase composition and thermomechanical processing, HEAs with enhanced mechanical properties can be designed for advanced engineering applications.

[고엔2-4 | 11:10]

Fe–Co–Ni–Cr–Mo계 중엔트로피 합금의 열처리 공정에 따른 석출거동, 미세조직 변화 및 기계적 물성과 저열팽창 특성 연구: 김태혁, 이재혁 (단국대학교), 배재웅 (부경대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 문종언 (공주대학교), 주수현* (단국대학교)

Keywords: medium-entropy alloy, precipitate, coefficient of thermal expansion, cryogenic mechanical property

중엔트로피 합금(Medium-entropy Alloys, MEAs)은 고엔트로피 합금과 전통적인 합금 사이의 개념으로, 비교적 적은 수의 주원소를 포함하면서도 다원소 효과로 인해 기존 합금과 다른 특성으로 주목받고 있다. 특히, Invar 합금과 유사한 낮은 열팽창계수를 가지는 중엔트로피 합금계에 대한 관심이 증가하고 있으나, 석출물이 열팽창계수 및 기계적 물성에 미치는 영향과 열처리 조건에 따른 석출거동 및 물성 변화에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. Fe–Co–Ni–Cr–Mo계 중엔트로피 합금에서는 다양한 석출물이 형성될 수 있으며, 이러한 석출물은 높은 경도를 제공하여 합금을 강화하지만, 높은 열팽창계수를 가져 저열팽창 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fe–Co–Ni–Cr–Mo계 합금에서 Cr 및 Mo 함량을 조절하여, 석출물 형성에 영향을 미치는 열처리 온도 및 시간의 효과를 알아보았다. Mo 함량의 변화를 두고 두 가지 조성의 중엔트로피 합금을 주조한 후 냉간 압연을 수행하였으며, 이후 550ºC, 750ºC, 950ºC에서 5분, 10분, 30분, 1시간, 2시간 동안 열처리하였다. 각 시편의 미세조직 및 상 분석을 위해 주사전자현미경 및 X-선 회절분석을 수행하였으며, 열처리 온도 및 시간에 따른 경도, 극저온 인장강도, 열팽창계수, 자성 특성을 평가하였다. 이러한 연구 결과를 토대로 중엔트로피 합금 조성 설계와 석출물 제어를 통해 새로운 고강도·저열팽창 합금개발의 방향성을 제시하고자 한다.

[고엔2-5 | 11:25]

석출 제어가 Co-Cr-Fe-Ni-Mo-C 철계 중엔트로피 합금의 인장 물성 향상에 미치는 종합적 효과: 이재홍, 권현석*, 구강희, 이지영 (포항공과대학교), 정상국 (도호쿠대학교), Emad Maawad (헬름홀츠 연구소), 하창완 (포항가속기연구소), 왕재민, 이병주 (포항공과대학교), 이상봉* (금오공과대학교), 김형섭* (포항공과대학교)

Keywords: 중엔트로피합금, 석출, 강화기구, 변형기구

Co-Cr-Fe-Ni-Mo-C 철계 중엔트로피 합금(FeMEA)은 변형 유기 소성(TRIP) 효과와 석출 강화를 고엔트로피 합금(HEA)에 도입하여 우수한 기계적 특성을 구현하도록 설계되었다. 면심입방(FCC)에서 체심입방(BCC)으로의 변형 유기 마르텐사이트 변태(DIMT)는 뛰어난 가공 경화 능력을 제공하며, Co-Cr-Fe-Ni-Mo-C FeMEA에서의 석출은 FCC 기지의 조성을 변화시켜 DIMT의 동역학을 조절하는 역할을 한다. 또한, 이러한 석출에 의한 기지 조성 변화는 격자 왜곡 정도에도 영향을 미치지만, 현재까지 Co-Cr-Fe-Ni-Mo-C FeMEA에서 이에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 Co-Cr-Fe-Ni-Mo-C FeMEA의 강화 및 변형 메커니즘을 종합적으로 고려하여 석출 제어를 통해 $Co_{18}Cr_{13}Fe_{57.5}Ni_{7.5}Mo_3C_1$(at%) FeMEA의 강도와 연성을 동시에 향상시키고자 하였다. 유사한 입도(grain size)를 가지지만 석출 특성이 다른 두 개의 시편을 어닐링 조건을 조정하여 제작하였으며, 석출이 억제된 시편이 강도와 연성이 향상됨을 확인하였다. 석출상 분율이 감소했음에도 불구하고 석출상 미세화가 석출 강화 손실을 최소화하며, 고용 강화 효과가 증대되어 더 높은 항복강도를 구현할 수 있었다. 변형 메커니즘의 향상은 실시간 싱크로트론 X선 회절 분석과 변형 미세구조 분석을 통해 분석되었다. 그 결과, 석출이 억제된 시편에서 격자 왜곡의 심화로 인한 kinematic hardening이 효과적인 가공 경화 메커니즘으로 작용하고, DIMT 지연이 연성 향상 메커니즘으로 작용하였음이 밝혀졌다. 본 연구는 Co-Cr-Fe-Ni-Mo-C FeMEA의 기계적 특성을 향상시키는 전략을 제시함으로써 구조용 소재로서 활용 가능성을 향상시키고, 나아가 다른 합금의 기계적 성질을 개선하기 위한 통찰을 제공한다.

[고엔2-6 | 11:40]

고엔트로피 합금 조성을 위한 밀링 기반 Co_3O_4-Cr_2O_3-Fe_2O_3-NiO 금속 산화물 분말의 공정 변수 최적화에 대한 연구: 김민종, 임태협, 몬젤라 거트루드 무웨, 넬선, 이선영* (한양대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, CoCrFeNi, 비드 밀링, 고용체 형성, 수소 환원

고엔트로피 합금은 다수의 원소를 유사한 비율로 혼합하여 형성된 합금으로, 주원소를 기반으로 소량의 다른 원소를 첨가한 기존 합금에 비해 높은 강도와 연성을 동시에 나타낼 수 있으며, 우수한 내마모성 및 내부식성을 제공할 수 있다. 이러한 고엔트로피 합금 분말을 제조하기 위해, 고속 회전과 고에너지 충돌을 통해 입자를 효과적으로 미세화할 수 있는 밀링을 이용하여 금속 산화물 분말을 분쇄 및 균질하게 혼합한 후, 분무 건조로 구형 응집체를 형성하고, 수소 환원 공정을 거쳐 고엔트로피 합금 분말을 제조하고자 한다. 본 공정에서는 밀링 속도가 낮으면 구성 원소들이 고르게 분포되지 않아 최종 합금의 물성이 저하될 수 있다. 이러한 문제를 보완하고자 고속 밀링이 가능한 비드 밀링 시스템이 도입되었다. 비드 밀링은 입자 크기를 효과적으로 감소시켜 반응 표면적을 증가시키고, 고용체 형성을 촉진함으로써 금속 산화물 분말의 환원 반응성을 향상시킬 수 있다. 따라서, 비드 밀링 공정에서 적절한 밀링 조건을 설정하는 것은 분말의 미세구조 조절과 반응성 향상에 중요한 역할을 한다. 밀링 시간이 지나치게 길어지거나 입자가 과도하게 미세화될 경우, 표면에너지가 증가하면서 응집이 발생할 가능성이 있으므로 최적 조건을 도출하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 Co_3O_4-Cr_2O_3-Fe_2O_3-NiO 조성의 금속 산화물 분말에 대해 비드 밀링 공정을 적용하여 분말 사이즈를 미세화 및 균질화하고, 각 공정 조건이 분말의 물리적 특성과 환원 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 밀링 속도와 밀링 시간의 변화를 통해 입자 크기 감소, 고용체 형성 여부, 그리고 환원 반응성 간의 상관관계를 조사하였다. 비드 밀링을 통해 입자 크기가 감소하면 반응 표면적이 증가하여 환원 촉진 효과가 향상될 수 있으며, 높은 충돌 에너지를 통해 고용체 형성을 촉진하여 열역학적으로 환원 온도를 낮출 가능성이 있다. 따라서 밀링 공정 조건의 최적화를 위해, 다양한 밀링 조건에서 제조된 분말을 대상으로 열중량 분석(TGA)을 수행하여 환원 거동을 평가하고, 결정성 분석(XRD)을 통해 고용체 형성 여부를 조사하였다. 결과적으로, 밀링 속도와 시간이 증가함에 따라 입자 크기 감소가 관찰되었고, 특정 조건에서는 고용체 형성이 두드러지게 나타났으며, 이에 따라 열중량 분석 결과 금속 산화물 분말의 환원 온도가 낮아지는 것이 확인되었다. 이러한 비교 분석을 바탕으로, Co_3O_4-Cr_2O_3-Fe_2O_3-NiO 금속 산화물 분말의 미세화 및 반응성 향상을 위한 최적의 비드 밀링 공정 조건을 도출했다.

희소금속 소재화기술 (타이타늄정제련 및 소재화기술) 심포지엄
Room 400, 4월 23일

[희소1-1 | 14:00] 초청강연

타이타늄의 제련과 리사이클링: 손호상* (경북대학교)

Keywords: Titanium (Ti) ,Kroll Process, Ti Recycling

타이타늄(titanium, Ti)은 지각 중 원소 존재도가 0.57 %(9위)로, Al(8.23 %, 3위), Fe(5.63 %, 4위), Mg(2.33 %, 7위) 다음으로 풍부한 구조용 금속이다. 그러나 Ti은 금속으로의 환원이 어렵고 연간 전 세계 생산량이 약 23만 톤에 불과하여 희소금속으로 분류되고 있다. Ti 광석에는 몇 가지가 있지만, Ti 제련에서는 루타일(rutile, TiO2 95~100 %)과 일메나이트(ilmenite, FeTiO3, TiO2 52.7 %)를 원료로 사용한다. 금속 Ti을 제조하는 Kroll법은 TiCl4를 Mg으로 환원하므로, Ti으로의 환원 및 생성된 Ti 스펀지와 MgCl2의 분리에 많은 비용과 시간이 필요한 회분식(batch) 조업이다. Kroll법으로 10톤의 Ti 스펀지를 제조할 때, 환원과 증류 정제 및 냉각에 각각 4일 정도가 소요된다. 그리고 환원용기로 철강재를 사용하므로 Fe 등의 불순물 함유량이 높은 스크랩이 발생되는 등 코스트 경쟁력이 낮아 일반 민수용으로 널리 보급되지 못하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 용융염 전해 등 Ti의 신제련법에 관해 많은 연구들이 수행되고 있으나 아직 Kroll법을 대체할 기술은 없는 실정이다. 리사이클링의 대상이 되는 Ti 관련 제품에는 금속 Ti과 Ti 합금이 있다. Ti은 Al과 마찬가지로 에너지 다소비형 금속으로 리사이클링이 중요한 과제이지만, Ti의 특성상 라이프 사이클이 매우 길고, 시장규모가 작아 스크랩 시장도 아직 성숙되지 못하였다. Ti 스크랩에는 제련 공정에서 발생하는 off-grade sponge(규격외 스펀지)와 잉곳이나 소재 제조공정에서 발생하는 mill scrap, 제품을 만드는 공정에서 발생하는 fabrication scrap 등의 자가발생 스크랩과 제품의 수명이 다하여 발생하는 노폐 스크랩(old scrap)이 있다. 스크랩 용도별로는 고품질의 잉곳용(high grade scrap, vacuum quality)과 Fe 등의 불순물이 많은 합금철용(low grade scrap, ferro quality) 스크랩이 있다. 또 스크랩 형태에 따라 코블(cobbles)과 절삭 스크랩(swarf scrap), 고체 스크랩(solids or bulk weldable scrap) 등으로 구분한다.

[희소1-2 | 14:15] 초청강연

타이타늄 제련 및 리사이클링 기술개발: 강정신* (서울대학교)

Keywords: titanium dioxide, titanium metal, chlorination, reduction and deoxidation, recycling

타이타늄은 우수한 물리화학적 특성으로 다양한 산업분야에서 사용되고 있으며 자원 또한 매우 풍부하다. 그러나 타이타늄 광석으로부터 금속 제조 시 많은 에너지가 소모되며 환경부하가 매우 큰 편이다. 따라서 타이타늄 보급화를 위해서는 제련 시 각 단계별 혁신적이며 친환경적인 제련 및 리사이클링 공정 개발이 요구된다. 타이타늄 제련은 크게 광석의 고품위화, 고순도 이산화타이타늄 제조, 고순도·저산소 타이타늄 금속 제조 및 효과적 리사이클링으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 타이타늄 제련 각 단계별 상용공정을 리뷰하고 최근 연구되고 있는 친환경적이며 고효율의 신규 제련 및 리사이클링 공정 원리 소개 및 이를 기존공정과 비교 분석한다. 이를 통해, 향후 보다 친환경적이며 혁신적인 타이타늄 제련 및 리사이클링 공정 개발 방향을 고찰한다.

[희소1-3 | 14:30] 초청강연

Thermochemical Reduction of TiO_2 Using $CaMg_2$ for Low-Oxygen Titanium Powder Production: Jonghyeon Lee*, Hayk Nersisyan (Chungnam National University, Rapidly Solidified Materials Research Center), Kyuseok Lim (Chungnam National University), and Kwangmo Ku (Korean Strategic Materials Technology)

Keywords: Titanium, Combustion reaction, Thermochemical process, CaMg2 reductant, MD simulation

This study presents a novel thermochemical approach for directly converting titanium dioxide (TiO_2) into high-purity titanium powder using $CaMg_2$ as a solid reductant. By exploiting the exothermic reaction that initiates near the $CaMg_2$ melting point (~ 710 °C), TiO_2 is first reduced to lower titanium oxides (TiO_x), followed by a short heat treatment to fully produce metallic Ti. Experimental characterization (XRD, SEM, TEM, and elemental analysis) confirms that the resulting Ti powder achieves an oxygen content below 0.2 wt% with controlled particle sizes in the micron range. Complementary molecular dynamics (MD) simulations reveal that $CaMg_2$ serves not only as a strong reductant but also as a liquid medium for enhanced Ti nucleation and coalescence, while magnesium in $CaMg_2$ moderates excessive sintering. This integrated experimental and theoretical study demonstrates that $CaMg_2$-based reduction offers a scalable, chloride-free, and cost-effective route to manufacturing high-purity titanium powder,

[희소1-4 | 14:45] 초청강연

7%급 초탄성 변형률을 갖는 Ti-Zr계 3D 프린팅용 구형분말 제조기술 개발: 박지환*, 강민, 장지훈, 정원기 ((주)엠티아이지), 남태현, 임진환 (경상국립대학교), 박상오, 정시영 ((주)디오)

Keywords: Ti-Zr계 초탄성합금, 수소화-탈수소화, 3D프린팅, 구형분말제조, RF 플라즈마 구형화

초탄성 변형거동을 가지는 Ti-Ni 형상기억합금은 치열교정 와이어 및 스테트 등의 의료용 재료로 사용되고 있으나, 알러지를 유발하는 Ni가 포함되어 있어 Ni-free 초탄성 합금의 개발이 많이 이루어지고 있다. 최근 개발된 Ni-free 합금 중 Ti-Nb, Ti-Ta 및 Ti-Mo계 합금에서 초탄성 거동이 보고되었으나, 낮은 변형률과 슬립임계응력을 가지고 있어 Ti-Ni계 합금을 대체가 불가능하다. 이러한 점을 극복하기 위하여 7%급의 초탄성변형률을 가지며 생체적합성이 뛰어난 합금 소재로 Ti-Zr계 합금 소재가 높은 초탄성변형률 및

높은 기계적 특성을 보유하는 것을 확인하였. Ti-Zr계 합금 구형 분말을 제조하기 위해서는 아크용해로를 활용한 모합금 제조, 분말 제조를 위한 수소화-분쇄-탈수소화 공정과 각형분말의 구형화를 30kw급 RF 플라즈마 구형화 장비를 활용하여 3D프린팅 공정에 활용할 수 있는 Ti-Zr계 초탄성합금 구형 분말을 제조하였다. 제조된 구형 분말을 SLM 방식의 3D프린팅 장비를 활용하여 다양한 출력 조건으로 Ti-Zr계 초탄성합금 소재를 출력하여 초탄성 합금 구형분말의 최적 적층 조건을 확인하였다, 제조된 초탄성합금 소재의 초탄성회복율과 생물학적 안정성 시험 평가를 통하여 의료용 소재로 사용 가능성을 평가하였다. 초탄성회복특성의 경우 2.8%의 초탄성회복변형량이 측정되었고, 92.7%의 초탄성회복율을 나타내었으며, GLP 기준으로 수행한 세포독성시험에서 정성적인 평가방법과 정량적인 평가방법을 모두 만족하여 세포독성을 유발하지 않은 것으로 확인하였으며, 전신급성독성시험 또한 시험 동물에게서 유의한 증상이 관찰되지 않아 적합한 것으로 판단하였다.

[희소1-5 | 15:00] 초청강연

일메나이트 제련 공정에서 TiO_2 슬래그의 열물성 및 슬래그 구조와의 상관 관계 연구: 김영재* (인하대학교)

Keywords: 일메나이트, 제련, 슬래그, 분자 동역학, 구조

Kroll 프로세스를 통해 타이타늄 금속을 생산하기 위해서는 고품위 TiO_2 원료가 필요하다. 저품위 일메나이트(Ilmenite) 광석을 활용하여 고품위의 TiO_2를 제조하기 위해, 먼저 건식 제련 공정을 적용하여 슬래그 내 TiO_2 함량을 80% 이상으로 농축하게 된다. 이러한 일메나이트 제련 과정에서 일메나이트 광석 내 FeO는 무연탄과의 탄소 열환원 반응을 통해 선철로 회수되며, 이 과정에서 슬래그 중 TiO_2의 농축과 함께 융점이 급격히 상승하고 열물성이 변화한다. 따라서 공정 중 FeO 및 TiO_2 조성 변화에 따른 높은 TiO2 조성 슬래그의 열물성 변화를 이해하는 것은 조업 최적화에 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 FeO-TiO_2 2원계에서 조성과 온도 변화에 따른 점성 변화를 평가하고, 플럭스 첨가 효과를 분석하였다. 또한, 분자 동역학 시뮬레이션을 활용하여 용융 슬래그의 구조를 고찰하고, 실험적으로 측정이 어려운 고온에서의 물성을 예측하였다.

[희소1-6 | 15:15] 초청강연

국내 타이타늄 산업의 원료소재 자립화 기술확보를 위한 야금학적 연구 접근 방안: 정은진* (포항산업과학연구원)

Keywords: Titanium recycling, TiO_2 nanoparticles, Photocatalyst

TiCl4(Titanium tetrachloride) 소재는 금속 티타늄 또는 안료, 촉매로써의 TiO2를 제조 공정의 원료로써 널리 사용되어 왔다. TiCl4는 티타늄 광석을 코크스 및 염소와 반응하여 제조되는데, 일반적으로 루타일 광석을 활용하여 제조하고 있으나 풍부한 매장량과 가격의 경쟁력으로 인해 일메나이트 광석을 활용하고자 하는 검토가 진행되어 왔다. 일메나이트광석을 활용한 선택염화공정에서의 FeO의 효율적인 제거는 TiCl4의 반응순도를 향상시킬 뿐 아니라 천연루타일로부터 제조된 TiCl4에 비해 가격경쟁력이 높아 연속적인 염화공정을 진행하는데 장점이 있다. 일메나이트광석과 루타일광석은 TiO2 함량의 차이로 인해 공정조건 및 반응 구동력에도 차이가 있어 열역학적 접근 및 고효율의 반응조건을 설계할 필요가 있으며, 해당 화학반응의 상이함에 관한 고찰로 경제성의 분석 또한 필수적이다. 이러한 반응설계를 통해 원료 다변화에 대한 일환으로, 일메나이트 및 루타일 광석의 활용에 따른 경제성 분석을 심도있게 고찰하고 순현재가치 분석, 내부수익률 분석, 민감도 분석, 손익분기점 분석 등을 적용하여 향후 검토 가능한 Ti 종합소재 사업 시나리오의 하나로 활용하고자 한다.

[희소2-1 | 15:40] 초청강연

고순도 티타늄 금속 제조를 위한 전자빔 용융 최적화 연구: 박경태* (한국생산기술연구원), 김현철, 권남훈, 이용관, 고의준 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 신재홍, 김동현 (한국생산기술연구원)

Keywords: 전자빔용해, 고순도 티타늄, 불순물 휘발 제거, 활동도계수, 용융 풀, 빔 포커싱

전자산업, 자동차, 항공 분야에 적용되고 있는 타이타늄 소재는 광물에서 출발하여 제련/정련 기술을 통해 제조되거나 산업에서 활용되고 발생한 폐 스크랩의 재활용 공정을 통해 재사용할 수 있도록 재활용하는 공정이 활용된다. 특히, 티타늄의 전체 제조 과정에서 1차 중간재 (잉곳, 빌릿) 제조에 활용되고 있는 기술은 전자빔용해, 진공 아크 재용해, 플라즈마 아크 용해, 진공 고주파 가열법 등을 거치고, 이를 산업에 적용하기 위해 판재, 롤 형태의 2차 중간재가 제조된다. 특히. 소재의 물성에 큰 영향을 미치는 부분으로는 1차 중간재 제조 과정인 정련 공정을 통해 확보된 티타늄 잉곳의 결정학적 특성, 내부의 불순물의 함량에 의해 결정되며, 이러한 물성 제어를 위해서는 정련 단계에서 불순물의 함량이 효과적으로 제어돼야 한다. 정련 공정 중 전자빔 용해 공정은 초고에너지 열원인 전자 열원을 수 암페어 급의 고밀도 전자를 형성하고 십만 볼트급의 전기장을 통해 가속하여 티타늄 표면에 집속하는 방식으로 초고에너지 밀도 구현이 가능하다. 최대 에너지가 높을수록 티타늄 용탕 형성 및 불순물 제어할 수 있는 범주가 넓어지기 때문에 고순도로 정제 측면에서 유리하며, 이러한 이유로 전자빔 용융 공정의 경우가 4N5 급 이상의 초고순도 실현을 위해 널리 사용됐다. 본 연구에서는 현재까지 전자빔으로 잉곳을 제조하는데 전자빔을 제어하기 위한 집속 코일, 전자기장에 의한 전자의 에너지 구현에 따라 티타늄의 용해되는 거동을 확인하였으며, 이를 통해 발생한 열이 소재 내부의 불순물 휘발 거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 열역학적으로 제거되기 위한 조건을 찾기 위한 연구를 진행하였다. 또한, 실제 전자빔 용해 공정을 통해 저품위 타이타늄으로부터 초고순도 타이타늄이 제조될 때 불순물 농도의 변화와 열역학적 휘발 특성 간의 상관관계 규명을 통해 다양한 불순물이 티타늄 소재에 함유되어 있을 때 본 공정으로 제거할 수 있는지 판단할 수 있는 기준을 확립하였다.

[희소2-2 | 15:55] 초청강연

타이타늄 스크랩으로부터 부품 제조를 위한 타이타늄 분말 제조 연구: 윤진호*, 이지은, 이찬기 (고등기술연구원), 박지환, 강민 (엠티아이지(주))

Keywords: 수소화-탈수소화, 분말야금, 리싸이클링, 금속 분말

타이타늄은 철의 2배, 알루미늄의 6배 강도를 지닌 고강도를 지니고 있을 뿐만 아니라 우수한 내식성으로 반도체, 전자기기, 국방, 항공 우주분야에서 사용되고 있다. 또한 생체 안정성을 띄고 있어 임플란트, 수술용품 및 인공뼈등 의료분야에서도 활발하게 사용되고 있다. 이러한 타이타늄 부품은 CNC 가공 혹은 분말야금법을 활용하여 주로 제조되고 있다. CNC 가공은 우수한 정확도로 세밀한 제어가 가능하여 복잡한 형상의 가공이 가능하나, 표면 절삭을 진행함에 따라 다량의 절삭유와 더불어 스크랩이 발생하고 초기비용 및 높은 유지관리가 필요하다는 문제점이 있다. 반면 분말야금법의 경우, 융점이 높은 금속의 부품제조에 용이하고 대량생산으로 비용절감이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 타이타늄 스크랩을 활용하여 부품 제조용 타이타늄 분말 제조 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 CNC 가공 후 발생한 타이타늄 스크랩을 사용하였으며, 스크랩 내에는 윤활유를 비롯한 일부 금속 불순물이 포함하고 있었다. 따라서 해당 불순물을 제거하기 위한 전처리를 수행하였으며, 전처리 후 유/무기 불순물 제거 거동을 확인하였다. 이후 정제된 타이타늄을 이용하여 수소화-탈수소화 공정을 통해 타이타늄 분말을 제조하였다. 이때 온도 및 시간, 분위기에 따른 수소화-탈수소화 거동을 확인하였다. 제조된 타이타늄 분말 및 수소화-탈수소화 거동 확인을 위해 XRF, PSA, XRD, ONH 분석을 실시하였으며, 최종적으로 30 μm 이하의 입도를 지니는 타이타늄 분말이 제조된 것을 확인하였다.

[희소2-3 | 16:10] 초청강연

국내 타이타늄 광석으로부터 고순도 이산화타이타늄 제조 공정 개발: 이태혁*, 이진영 (한국지질자원연구원), 강정신 (서울대학교)

Keywords: titanium dioxide, reduction, magnesium, hydrogen, titanium hydride

타이타늄(Ti)은 Ti 금속 또는 이산화타이타늄(TiO2)으로 제조되어 항공우주, 자동차, 화장품, 건축자재 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 우리나라는 Ti 금속 제련공정은 없으나 TiO2의 경우 해외 Ti 정광 수입 후 황산법을 이용하여 아나타제형 TiO2를 제조하고 있다. Ti은 지구 지각 중 매우 풍부한 원소이며, 국내에도 Ti 광산이 존재한다. 최근 태백지역 면산층에 부존된 Ti 자원에 대한 탐사 및 선광에 관한 연구가 이루어지고 있어, 향후 Ti 자원 개발 고려 시, 면산층 Ti 광석 맞춤형 제련기술 개발을 통한 고부가가치화가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 면산층 Ti 광석으로부터 고부가가치 루타일형 TiO2 제조를 위한 면산층 Ti 광석 맞춤형 제련공정의 요소기술 개발 결과를 논의하고자 한다.

[희소2-4 | 16:25] 초청강연

Off-grade 타이타늄 스폰지의 친환경 탈산 공정 개발: 박성훈 (동국제강), 임경환 (현대제철), 정형준 (부산대학교), 송영주, 강정신* (서울대학교)

Keywords: off-grade titanium sponge, deoxidation, magnesium, hydrogen, titanium hydride

Ti 금속의 상용 제조에 사용되는 Kroll법은 생산성이 낮고 에너지 소모가 크며 염소가스 사용에 따른 환경부하가 크다. 특히 Ti sponge 생산량의 약 10 – 20 %는 산소 및 철에 의해 오염된 off-grade Ti sponge로 발생하고 있으며 제강 공정의 탈산제로 저가에 활용되고 있다. 그러나 off-grade Ti sponge 내 산소농도를 1800 mass ppm 이하로 감소시킨다면 고부가가치 Ti 합금 원료로의 재활용이 가능하다. 본 연구에서는 H2 가스 분위기 내에서 Mg 금속을 이용한 친환경 off-grade Ti sponge 탈산 공정을 개발하였다. Off-grade Ti sponge를 수소화한 분말상의 TiH2을 원료로 사용하였으며, 933 K의 저농도 H2 가스 분위기에서 MgCl2 – KCl 용융염 중 Mg을 이용하여 탈산을 실시하였다. 최적조건 하에 Ti 내 산소농도는 13750 mass ppm에서 약 1500 mass ppm까지 감소하였다. 또한 친환경 탈산법의 저비용화를 위해 그물형 도가니를 사용한 염 손실 저감형 탈산 공정을 개발하였으며, 96 % 이상의 Mg 함유 용융염 회수 및 TiH2 제조가 가능함을 확인하였다.

[희소2-5 | 16:40] 초청강연

An Introduction to the Recovery of high purity TiO2 from Spent SCR Catalysts: In-Hyeok Choi*, Hongil So, and Byeong-Woo Kim (S3R Co., Ltd.)

Keywords: titanium dioxide, soda roasting, spent SCR catalysts, hydrolysis

Selective Catalytic Reduction (SCR) catalysts, widely used in flue gas treatment for NOx removal, primarily consist of titanium dioxide (TiO_2) as a support material. As these catalysts reach the end of their operational lifespan, the efficient recovery of TiO_2 becomes crucial for both economic and environmental sustainability. This study introduces key methodologies for recovering and preparing TiO_2 from spent SCR catalysts, focusing on mechanical, chemical, and thermal treatment processes. Selected pretreatment, leaching and purification techniques are explored to improve the purity and functionality of the recovered TiO_2, particularly for potential reuse in industrial applications, such as the pigment industry. Additionally, the insights gained from this research can serve as a reference for chemical processes related to domestic ilmenite titanium ore, offering a potential pathway for enhancing titanium extraction and processing technologies. This work aims to provide foundational insights into the sustainable recovery of TiO_2, paving the way for further advancements in catalyst recycling technologies and broader titanium resource utilization.

[희소2-6 | 16:55] 초청강연

마그네슘 열환원법을 이용한 친환경 타이타늄 수소화물 직접 제조 공정 개발: 송영주* (서울대학교), 박성훈 (서울대학교, 동국제강), 강정신 (서울대학교)

Keywords: titanium dioxide, reduction, magnesium, hydrogen, titanium hydride

최근, 타이타늄 (Ti) 금속의 상용 제조법인 크롤 (Kroll) 법의 한계를 극복하기 위해, 수소 가스 (H2) 분위기에서 마그네슘 (Mg) 금속을 이용한 이산화타이타늄 (TiO2) 환원 및 탈산을 통한 저산소 Ti 금속 제조법이 연구되고 있다. 본 연구에서는 TiO2를 직접 환원하여 저산소 Ti 수소화물 (TiH2) 분말을 제조할 수 있는 단일 단계 환원법을 개발하였다. TiO2의 환원 반응은 973 K의 아르곤

(Ar) 및 10 % H2 혼합가스 분위기에서 MgCl2 – KCl 용융염 중 Mg을 이용하여 수행되었다. 나노 크기의 TiO2 분말을 원료로 사용한 실험결과, 용융염 양이 증가할수록 용융염 내 수소 화학포텐셜이 낮아져 생성된 산물의 수소 고용도가 감소하고 산소농도는 증가하였다. 최적 조건에서 산소농도가 0.35 mass%인 TiH2 분말이 제조되었다. 또한, 입도 45 – 300 μm 범위의 TiO2 분말을 이용한 실험결과, 원료 입자가 작을수록 낮은 산소농도의 Ti 금속이 제조되었으며, 특히 나노 크기의 1차 입자가 응집된 미세구조를 가진 TiO2 원료 사용 시 산소농도 0.209 mass%인 TiH2 분말이 제조되었다. 본 연구결과로부터 높은 수소 화학 포텐셜을 이용한 TiO_2의 단일 단계 마그네슘 열환원을 통해 ASTM Gr.2 (≤ 0.25 mass% O) 수준의 저산소 Ti 제조가 가능함을 알 수 있다.

[희소2-7 | 17:10] 조청강연

건식 코팅 기술을 활용한 타이타늄 합금의 in-situ alloying 기술 및 ODS Ti-6Al-4V 합금 적층제조 기술: 이빈*, 김욱주, 김세훈, 강태후, 이종익, 정상희, 한지민 (경희대학교)

Keywords: titanium alloy, powder bed fusion, oxide dispersion strengthening

타이타늄 합금은 수송기기, 방산, 의료 등 다양한 분야에 활용이 가능하며, 적층제조(3D 프린팅) 기술에 적용하기에 이점이 많은 합금이다. 다양한 타이타늄 합금이 우수한 물성을 보유하고 있으나, 타이타늄의 높은 반응성으로 인해 합금화 난이도와 비용이 높아 규모의 경제를 형성한 Ti-6Al-4V 합금이 주로 상용화되어 있으며, 적층제조 공정과 관련된 연구도 Ti-6Al-4V 합금이 주로 진행되고 있다. 본 발표에서는 건식 코팅 기술을 활용해 타이타늄 합금 분말의 유동성을 향상시키고, 산화물 분산강화를 유도하는 다양한 연구에 대해 소개한다. 먼저, 수소화-탈수소화처리된 비구형 Ti-6Al-4V 합금 분말에 소수성(hydrophobic)처리된 SiO2 나노입자를 부착하여 laser-powder bed fusion(L-PBF) 적층제조 공정에 적용할 수 있는 유동성을 확보한 후 L-PBF 공정을 적용하여 99.8%의 상대밀도와 36.0% 향상된 Vickers 경도를 확보하였다. 또한, Ti-3wt.% Fe 합금을 비구형 분말 상태로 elementally 혼합하여 L-PBF 적층제조 공정 중 in-situ alloying하여 고용강화된 타이타늄 합금 부품을 제조하는데 성공하였다. 나아가 건식 분말코팅장치를 활용해 Y2O3 나노입자를 Ti-6Al-4V 분말(구형 및 비구형) 표면에 코팅하여 산화물 분산강화(ODS) Ti-6Al-4V 합금 분말을 제조하였고, 이를 적층제조하여 99% 이상의 적층밀도를 확보하였고, 기계적 물성 향상 거동을 확인하였다. 본 연구에서 in-situ alloying 기술로 다양한 조성의 타이타늄 합금의 적층제조 가능성을 확인하였고, ODS 분산강화를 통해 기계적 물성이 향상된 타이타늄 합금의 제조에 성공하였다.

[희소2-8 | 17:25] 조청강연

MgCl2 용융염건식제련을 활용한 저품위 Ti 스크랩의 재활용 탈산 공정 및 전기화학적 거동 분석: 권남훈, 김현철 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 허성규, 이미혜, 신재홍, 박경태* (한국생산기술연구원)

Keywords: 타이타늄, 전해탈산, 희소금속, 재활용, 건식제련

타이타늄(Ti)은 우수한 물리화학적 안정성 덕분에 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있으며, 이에 따른 수요가 전 세계적으로 빠르게 증가하고 있다. 비록 타이타늄의 자원 매장량은 풍부하지만, 일부 지역에 국한되어 분포해 있고 다른 유·무기 원소들과의 높은 친화 반응성으로 인해 제련 과정이 복잡하고 재활용이 어려운 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 타이타늄 가공 과정에서 대량으로 발생하는 오프그래이드 타이타늄 스크랩(Off-grade Ti scrap)을 활용한 연구가 진행되고 있으나, 실제 상품에 적용 가능한 등급으로까지의 정제 및 활용이 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 저 등급 타이타늄 스크랩의 탈산 공정을 유도 과전압을 활용한 용융염 전해법을 통해 탐구하였다. 염화마그네슘 용융염 전해질 기반의 탈산공정을 진행함으로써 비교적 더 경제적이고 효율이 높은 타이타늄 금속 탈산 프로세스를 구축하였으며, 유도된 과전압을 핵심 변수로 설정해 타이타늄 스크랩의 탈산 효율과 메커니즘에 대해 분석하였다. 특히, 열역학적 한계를 초과하는 산소 분리 효율을 달성하기 위해 의도적으로 과전압 현상을 도입하였다. 또한, 공정수행 과정에서 진행한 다양한 전기화학 분석들을 통해 전극 셀 구성에 따른 전기화학 반응 형성 및 불순물 제거 거동을 관찰하였으며, 그 후 산소, 표면, 성분, 결정상 분석 등, 여러 특성 분석을 통해 최종적으로 재활용된 저 산소 Ti 스크랩의 특성을 평가하였다. 결과적으로, 초기 타이타늄 스크랩은 5500 ppm의 산소 농도와 98.2%의 순도를 보였으나, 첫 번째 전해 공정 이후 산소 농도는 1850 ppm으로 감소하고 순도는 98.97%로 향상되는 결과를 확인하였다. 이러한 결과를 통해 유도 과전압의 활용이 저등급 타이타늄 스크랩의 탈산 효율을 크게 향상시킬 수 있음을 확인 하였으며, 자원 효율적이고 지속 가능한 금속 재활용 공정의 가능성 또한 확인하였다.

가공-용접 및 접합
Room 401A, 4월 23일

[용접1-1 | 09:00]
Ag-Al-Mn계 나노 복합구조를 활용한 고방열, 고신뢰성 페이스트용 나노 다공성 Ag 개발: 김민서 (인하대학교), 김상욱 (로터스머티리얼즈), 성재욱*, 현승균* (인하대학교)
Keywords: 합금설계, 다공성, 나노실버, 소결접합
반도체 칩의 고성능화와 고집적화로 인해 전력 밀도가 증가하면서 발열 문제가 심화되고 있으며, 효과적인 열 방출이 이루어지지 않으면 장기적인 신뢰성 저하로 이어질 수 있다. 특히, 고출력 파워 모듈은 높은 작동 온도에서도 안정적인 성능을 유지하기 위해 신뢰성 확보와 효율적인 방열 설계가 필수적이다. 이에 따라 열을 효과적으로 방출할 수 있는 높은 열전도도와 고온에서의 열적·기계적 스트레스를 견딜 수 있는 신뢰성을 가진 Ag 기반 접합소재가 주목받고 있다. 본 연구에서는 급속 냉각 공정(RSP, Rapid Solidification Process)을 활용하여 Ag-Al-Mn계 나노 복합구조 합금을 제조한 후, 제2상의 화학적 제거를 통해 나노 다공성 은(Ag)을 개발하였다. FE-SEM과 XRD를 활용하여 나노 다공성 Ag의 미세조직과 구성상을 분석하였고, BET와 DSC(DTA) 분석을 통해 입자의 비표면적과 소결 온도 변화의 상관관계를 평가하였다.

[용접1-2 | 09:15]
고온 전력 모듈 패키징을 위한 일방향 다공성 금속 삽입 열 인터페이스 재료: 신재호 (인하대학교제조혁신전문대학원), 김근수 (호서대학교), 현승균* (인하대학교제조혁신전문대학원)
Keywords: UPM(Unidirectional porous metal), TIM(thermal interface material), power module, soldering, thermal shock test
전자기기에 들어오는 전력을 변환, 분해 및 관리하는 역할을 하는 반도체인 전력반도체(Power semiconductor)가 구동될 때 많은 열이 발생한다. 발생된 열은 전력 반도체 소자의 성능을 감소시키고, 파워 모듈 패키지에 다양한 신뢰성 문제를 야기시킨다. 향후 200ºC 이상의 온도에서도 구동 가능한 와이드 밴드 갭(Wide Band Gap) 파워 디바이스의 상용화가 예상되기 때문에 전력반도체는 높은 고온 신뢰성과 방열 특성이 요구된다. 또한 파워 모듈은 다양한 이종재료로 적층되어 있는데, 고온 운용시 패키지 구성 소재간의 열팽창계수(CTE) 차이로 인해 접합부의 접착력 감소나 크랙 생성 등의 기계적 특성 변화와 파워 디바이스의 열화로 인한 특성 및 효율의 감소 현상이 생길 수 있다. 이를 방지하기 위해 베이스 플레이트와 히트싱크 사이에 기계적 적합성이 우수한 thermal grease가 사용되어 왔다. 그러나 thermal grease를 사용하면 이종 재료간 접촉면에서 상당한 열저항 증가로 인해 방열 특성이 감소한다. thermal grease의 낮은 열전도 문제를 해결하고, 기계적 신뢰성을 유지하기 위해선 열전도율이 높고 영률이 낮은 재료가 TIM(Thermal interface material)으로 사용해야 한다. 본 연구에선 Thermal grease 대체를 위해 UPM(unidirectional porous metal)을 TIM으로 두었다. UPM은 일방향 다공성 금속체를 뜻하며, 기존 다공성 금속과는 달리 한 방향으로 정렬된 원통 모양의 기공을 가지고 있는 것이 특징이다. 차별화된 구조로 인해 UPM은 높은 열전도율과 낮은 영률을 갖는다. 따라서 UPM을 TIM으로 사용했을 때 높은 방열 특성과 구조적 안정성을 기대해 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해 히트싱크로 사용되는 물질인 Al과 베이스 플레이트로 사용되는 Cu 사이 UPM을 삽입시킨 후 솔더(SAC305)로 접합시켰고, 열응력 완화 효과 확인 실험을 진행하였다. 열 충격 테스트 후 변화되는 특성을 통해 UPM의 신뢰성 유지 효과에 대해 고찰하였다.

[용접1-3 | 09:30]
양면 방열 파워모듈 패키징을 위한 소자 후면/스페이서 간 계면 다이렉트 본딩: 김신일, 김동진* (한국생산기술연구원(KITECH))
Keywords: 양면 냉각 기술, Cu/ENIG 직접 접합, 미세구조
페이스트 기반 양면 방열 파워모듈 패키징 공정에서 파워디바이스 표면-스페이서간 접합 공정은 소자의 게이트와 소스패드 사이의 전기적 단락을 유발할 수 있으며, 이는 양산성의 주요 허들로 잘 알려져 있다. 이 연구는 양면냉각 구조에서 활용되는 파워디바이스와 스페이서 간의 접합 이슈를 해결하기 위하여 무전해니켈금도금 (Electroless nickel immersion gold, ENIG)표면과 Cu 스페이서 표면을 대기분위기 중에서 접합소재 없이 접합을 성공하였다. 그 결과, 10 MPa를 초과하는 접합 강도가 달성되었으며, 일시적으로 표면 산화를 억제할 수 있는 공정의 유효성이 검증되었다. 접합부 계면에 대한 미세 구조와 생성된 상(phase)은 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM) 과 전자 후방 산란 회절(Electron backscatter diffraction, EBSD)으로 결정학적 거동이 각각 체계적으로 고찰되었다. 이 연구는 금속의 미세 구조와 기계적 거동 사이의 관계를 고려하여 대기 중 Cu/ENIG 계면의 접합 형성 메커니즘을 규명하였으며, 이를 통해 양면방열형 파워모듈의 제조공정의 양산 용이성에 대해 체계적으로 논의된다.

[용접1-4 | 09:45]
초고장력 강판과 알루미늄 주조부품의 접합을 위한 국부연화 SPR 접합법 연구: 고세진* (현대자동차 AVP본부)
Keywords: Hot stamping 강판, Aluminum Casting, 국부연화, Plasma, SPR 접합
전세계 환경 및 배출가스 규제에 따라, 중국을 중심으로 전기차 시장이 빠르게 성장중이며, 북미/유럽 및 국내에서도 꾸준한 판매 증가세에 있다. 전기차 주행거리 확보를 위해 배터리 효율 및 전비 개선은 필수 요소인데, 전비 향상을 위해서는 초저항력 설계, 경량화, 마찰저감, PE 효율증대가 그 방안이 될 수 있다. 이에 자동차 차체에서는 경량화를 위해, 강판 대신 알루미늄과 복합재를 다수의 부품에 적용하고 있으며, 당사에서도 2000년대 초반부터 최고급차에 무빙 부품을 알루미늄화하는 경량화 활동을 진행해왔다.

2015년 아이오닉, 니로의 친환경차 개발로 알루미늄 무빙 부품의 개발이 활발해졌으며, 2018년 제네시스 전기차에 차체 구조부품에도 경량소재를 적용하기 시작하였다. 차체 일부 부품에 경량소재의 적용하게 되면 기존의 차체 구조 부품이 대부분 강판으로 되어 있기 때문에 두 소재를 연결하기 위한 접합 솔루션의 변경이 반드시 필요하다. 강판과 알루미늄, 복합재는 열적 물성(융점, 열팽창계수, 비저항 등)이 다르기 때문에 전통적인 방식의 점용접은 적용할 수 없고, 따라서 소재나 접합체를 소성 변형하여 결합하는 기계적 접합 방식을 적용하였다. 이종소재의 기계적 접합은 적용하는 조건이 점용접보다 까다로워 다양한 접합법이 검토되었으며, 현재 당사 알루미늄 확대 바디에는 6가지 정도의 기계적 접합법이 적용되고 있다. 기계적 접합을 할 때 가장 접합이 어려운 소재는 Hot stamping 강판과 알루미늄 주조재인데, 이는 기계적 접합이 대부분 소재에 중간재를 끼어 넣고, 소재의 소성변형을 시켜 두 소재를 결합하는 방식이기 때문이다. Hot stamping 소재는 중간재를 강도가 너무 높아, 중간재를 끼어 넣기가 어렵고, 알루미늄 주조재는 기타 소재 대비, 신율이 작아 중간재를 끼어 넣을 때 소재에 Neck, Crack, 파단 등의 문제가 자주 발생하곤 한다. 특히, 차체 알루미늄 주조재는 기가캐스팅 등 제품이 대형화되고, 경량화를 위해 박육화 되고 있다. 원가절감을 이유로 열처리형 소재가 비열처리형 소재로 대체되고, 고압주조를 저압 주조 등으로 변경되고 있다. 이는 모두 소재의 접합에 불리한 쪽으로 이동하고 있어 기계적 접합에 어려움이 예상된다. 이에, 본 발표는 이러한 부품 접합을 위해, 국부적으로 접합 플랜지부에 열을 가하여 소재를 연화 시킴으로 SPR 접합하는 것을 검증하고 Hot stamping 소재의 피어싱과 알루미늄 주조재의 크랙 감소를 확인하였다. 국부연화를 통해, 저가 리벳의 사용, 리벳 다이의 종류 축소가 가능함으로 접합 원가 절감도 기대되며, 접합강도도 검증하였다. 공정 중 열원의 사용으로 당장 라인에 적용은 하지 못했으나, 여러 장점으로 향후 미래 기술로 적용 가능성이 있는 연구라 판단된다

[융접1-5 | 10:00]

Reactive Flux Assisted Dissimilar Arc Brazing of Galvannealed Steel to Al Alloys for Automotive Applications: John Sushil, Savyasachi Nellikode, Jae-hyeok Lee (Dong-Eui University), Dae-Geun Nam (Korea Institute of Industrial Technology), Ki-Soon Kim, Sang-Soo Jung, Do-Woon Cho (Hyundai Motor Group), and Yeong-Do Park* (Dong-Eui University)

Keywords: Arc-Brazing, Dissimilar material joining, Wettability, IMC, Flux

Recently, the automotive industry has integrated aluminum alloys with GI/GA steel for lightweight, robust components to improve fuel efficiency and reduce emissions. Fusion joining of aluminum to steel is challenging due to brittle intermetallic compounds and mismatched thermal properties, which weaken the joint and cause residual stress. GI steel, with nearly pure Zn readily melts at ~450ºC thus MIG-CMT has been adopted as an optimal solution to achieve reduced heat input to control IMC with reduced thickness and better properties. However, galvannealed (GA) steel's Fe-Zn alloy coating, melts above ~920ºC, reduces zinc availability and subsequently limits wetting. Thus, high heat input during welding is required for GA steels, which in turn promotes uncontrolled growth of Fe-Al intermetallic compounds. The present work focuses on achieving considerable wetting and a sound joint with controlled IMC characteristics by optimizing the MIG-CMT process parameters and applying reactive flux on the GA steel surface. The application of a corrosive aluminum flux (DF731 – KAlF4 + KF) on galvannealed (GA) steel, prevented oxidation of molten aluminum and silicon and removed surface impurities, thereby facilitated uniform spreading of weld metal. The application of DF731 on the GA steel and AA4043 filler wire during MIG-CMT promoted the formation of ternary Fe-Al-Si IMC with reduced thickness of 3μm to 6μm and enhanced mechanical properties.

[융접1-6 | 10:15]

Reversing Conventional Wisdom: Discovery of Welded Joints with Superior Cryogenic Strength-Ductility over Base Metals: 이유나, 남지민 (부산대학교), 이종원, 박노근 (영남대학교), 박정민* (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교)

Keywords: High-entropy alloys, Welding, Deformation mechanisms, Deformation-induced martensite transformation

The reduced load-bearing capacity of welded joints compared to base metals (BM) in cryogenic environments presents an intrinsic obstacle to designing reliable structural components. For the first time, we present a counterintuitive approach to exploit the typically undesired heterogeneity in welding science to achieve welds with superior strength-ductility surpassing BMs. Compositional heterogeneity encourages the matrix to become more metastable face-centered cubic, preferentially promoting deformation-induced martensitic transformation in the weld metal (WM) rather than BM. Additionally, spatial heterogeneity in metastability between WM and BM triggers a gradual progression of martensite transformation from WM to BM. Consequently, an outstanding strength-ductility synergy is achieved with strength and ductility compared to BM, surpassing most reported alloys. Our welds can overcome the long-standing challenges of structural lifespan reduction caused by weld degradation in cryogenic environments.

[융접2-1 | 10:40]

일방향 다공성 구리를 이용한 Cu-Sn계 천이액상확산접합부 특성: 김홍석 (인하대학교제조혁신전문대학원), 김근수 (호서대학교), 현승균* (인하대학교제조혁신전문대학원)

Keywords: UPM, 천이액상확산접합, 일방향 다공성 구리, 금속간화합물, Cu-Sn

최근 파워 모듈의 고전력화 및 소형화 기조에 따라 구동 온도가 높아져 접합부의 고온 신뢰성 확보를 위한 접합기술 개발이 요구되고 있다. 이에 따라 접합부를 융점이 높은 금속간화합물로 형성하여 열적으로 안정적인 구조를 유지할 수 있는 천이액상확산(Transient Liquid Phase, TLP) 접합에 대해 지속적으로 연구되고 있다. 하지만, 일방향 다공성 금속(Uni-directional Porous Metal, UPM)을 활용한 TLP 접합 연구는 부족하다. UPM은 일방향으로 기공이 형성되어 있는 구조를 가지므로, 수직 방향의 탄성율이 종

래의 다공성 금속체에 비해 낮으며, 기공과 평행한 방향으로 우수한 열전도율을 지닌다. 이에 따라 열적, 기계적 특성 개선을 기대할 수 있고, TLP 접합에서의 UPM 활용은 구조적으로 확산과 파단에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 UPM을 활용한 TLP 접합에서의 접합 시간에 따른 미세조직과 파단의 변화에 대해 고찰하였다. 일방향 다공성 구리를 활용하지 않은 기존의 TLP 접합부와 일방향 다공성 구리를 interlayer로 넣은 접합부를 비교하였다. 접합은 300°C에서 60분, 120분, 180분, 240분 동안 진공 상태에서 thermo-compression 방식으로 진행되었다. 접합 이후 기계적 특성 분석을 위해 전단 시험이 수행되었으며, 접합시간 60분, 120분에서 일방향 다공성 구리를 이용한 접합부의 우수한 전단강도를 확인할 수 있었다. 일방향 다공성 구리를 따라 발생하는 파단 경로 방해 또는 crack 전파 억제 효과로 인한 것으로 추정된다. 금속간화합물 두께에 따른 파단 분석과 접합부 단면에서 확인되는 voids 형성 거동을 통해 접합시간에 따른 전단강도 경향성에 대해 분석하였다.

[용접2-2 | 10:55]

항공용 타이타늄 합금의 마찰교반용접 물성 연구: 황재윤 (현대자동차), 이승준*, 권교민, 김동규, 최효남, 김종훈 (한국공학대학교)

Keywords: 마찰교반용접, 항공용 타이타늄 합금, 기계적 물성

본 연구는 항공용 타이타늄 합금의 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW) 공정을 적용하여 용접부의 물성과 미세구조 특성을 분석하고, 항공기 부품으로서의 활용 가능성을 평가하는 데 목적이 있다. 항공기 부품에는 경량화, 높은 강도, 내식성 등 엄격한 요구조건이 적용되나, 기존 용융용접 공정은 높은 열입력으로 인한 열영향부(Hardening Affected Zone, HAZ) 손상과 미세구조 변화로 기계적 특성이 저하되는 문제가 존재한다. 이에 본 연구에서는 열용융 없이 고체 상태에서 진행되는 FSW 공정을 통해 이러한 문제점을 극복하고자 하였다. 실험은 상용 항공용 타이타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 대상으로 진행되었으며, 두께, 회전 속도, 이송 속도, 용접 이음 종류 등의 공정 파라미터를 변화시켜 최적 조건을 도출하였다. 용접 후, 용접부의 외관과 결함 여부는 광학 및 주사전자현미경(SEM)을 활용하여 미세구조를 분석하였고, 경도 측정, 인장 시험을 통해 기계적 물성을 정량적으로 평가하였다. 연구 결과, 맞대기 용접으로 인장강도 기준 용접 효율 100% 이상, 그리고 연신율 기준 용접 효율 60% 이상을 달성할 수 있는 process window map을 확보하였다. 그리고 공정조건이 물성에 미치는 영향을 파악하였고 용접 이음 종류, 후열처리 등이 물성에 미치는 영향 또한 파악할 수 있었다. 향후에는 피로시험 등을 추가적으로 분석하고 다른 합금과의 용접 및 체결과의 물성 비교를 통하여 실제 항공 부품 적용에 대한 종합적인 평가를 진행할 필요할 것으로 판단된다.

[용접2-3 | 11:10]

Enhancing Joint Strength of Dissimilar Friction Stir Welded Al-Ni Joints Using High-Entropy Interlayer and PWHT: 최병욱, 이유나, 유성훈 (부산대학교), 천현필, 안중관 (한국생산기술원), 강남현* (부산대학교)

Keywords: Dissimilar welding, Friction stir welding, High-entropy alloy, Interlayer, Intermetallic compound

Al-Ni 이종 소재는 높은 비강도와 우수한 열 발산 특성을 갖는 Al 합금과 높은 강도 및 내식성을 지닌 Ni 합금의 장점을 결합할 수 있어 다양한 산업 분야에서 활용 가능성이 크다. 그러나 두 합금을 직접 접합할 경우, 계면에서 취성 금속간화합물이 형성되어 접합부의 기계적 특성이 저하되는 문제가 발생한다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 금속간화합물 형성을 최소화할 수 있는 저입열 고상 용접 기술인 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)이 주목받고 있다. FSW는 기존의 용융 용접 방식으로는 접합이 어려운 이종 소재 간의 접합 가능성을 확보할 수 있는 유망한 기술로 평가된다. 그러나 FSW를 적용하더라도 Al과 Ni의 물리적·화학적 차이로 인해 계면에서 여전히 금속간화합물이 형성될 가능성이 존재한다. 이를 해결하기 위한 방안으로, 이종 소재 사이에 인터레이어를 적용하여 금속간화합물 생성을 억제하고 기계적 특성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 특히, 고엔트로피 합금(High-Entropy Alloy, HEA)은 우수한 열적·기계적 안정성을 가지며, 다양한 조성 설계를 통해 계면 반응을 효과적으로 제어할 수 있는 특성을 지닌다. 본 연구에서는 Inconel 625 하판 위에 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 분말을 직접에너지적층(Directed Energy Deposition, DED) 공정을 통해 인터레이어로 형성한 후, Al 6061 상판을 사용하여 FSW를 수행하였다. 또한, FSW 공정 중 발생하는 열로 인해 열화된 Al 6061의 기계적 특성을 개선하기 위해 후열처리를 실시하였다. 본 연구를 통해 인터레이어 및 후열처리 적용 유무가 계면의 금속간화합물 형성 및 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

[용접2-4 | 11:25]

수소 환경에서 ERW 강관 용접부의 피로 저항성에 영향을 미치는 미세조직 인자 고찰: 백종민, 이찬희 (국립창원대학교), 곽진섭 (현대스틸파이프 생산기술연구소), 전동현 (현대스틸파이프 대경생산팀), 홍현욱* (국립창원대학교)

Keywords: API X70, ERW, Pressure Reversal, Hydrogen, 3 point bending fatigue test

본 연구에서는 극저온 석유 및 천연가스 수송용 전기저항용접(Electric Resistance Welded, ERW) 강관의 용접부에 대한 Sour 환경에서 수소 침투에 따른 Pressure Reversal의 감수성을 평가하고자 하였다. 용접부에 Post seam annealing을 적용하기 전에는 Bainitic ferrite와 Martensite-Austenite(M-A) 상이 bondline과 평행한 방향으로 분포하였으며, post seam annealing 이후에는 bondline과 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)에서 Polygonal한 Ferrite-pearlite와 M-A 상이 관찰되었다. 파이프라인을 통해 석유나 천연가스를 수송하기 위해 지속적인 pumping pulse를 줄 때, Pressure Reversal 현상으로 인해 파이프 내부에 피로 균열이 발생할 수 있으며, 이러한 Pressure Reversal 현상은 stress cycles로 인해 실제 파괴 압력보다 낮은 압력에서 파괴가 발생하는 것이다. 이를 평가하기 위해 약간의 소성 변형이 가해지는 응력으로 20 cycles 동안 3 point bending test로 반복하중을 가한 결과, 균열이 발생하지 않아 용접부에 Pressure Reversal 현상이 발생하지 않은 것을 확인하였다. 따라서 실제 Sour 환경을 모사하기 위해 수소를 Charging한 뒤 이 3 point bending test를 하여 Pressure Reversal 민감성을 평가해보았다. 20 cycle 이전의 cycle에서 균열이 발생해 수소가 Pressure Reversal 현상에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 따라서, 수소가 균열에 어떻게 영향을 주었는지

확인해보기위해 미세조직적으로 관찰해보았다. Bondline에 있는 Elongated한 Phase들이 주는 영향을 확인해보기 위해 Base metal과 비교를 해보았다.

[용접2-5 | 11:40]
인코넬 718 합금 단조품 미세조직 및 용접 고온균열 민감도에 미치는 열처리조건의 영향: 정설빈, 강용준*, 박기태, 송상우 (한국재료연구원), 조일국 (동의대학교)
Keywords: 인코넬 718, 용접, 고온균열, 열처리
인코넬 718 합금은 Ni-Fe-Cr을 기반으로 한 석출경화형 초내열합금으로, γ″(Ni_3Nb)상이 주강화상으로 작용하여 우수한 시효 균열 저항성을 가져, 항공기 터빈 블레이드와 같은 고온 환경에서의 내구성이 요구되는 부품 제작에 널리 활용되고 있다. 그러나 응고 과정 중 형성되는 Laves상 및 Nb 편석 등은 기계적 특성 변화 및 용접 고온균열 민감도 증가의 원인으로 작용한다. 인코넬 718 합금에는 용체화 처리 후 2단 시효가 적용되는데, 본 연구에서는 용체화 처리 조건이 인코넬 718 합금의 미세조직, 기계적 특성, 용접 고온균열 민감도에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 시효 처리를 진행한 모든 열처리 조건에서 기계적 특성은 재료 규격 요건을 만족하였으나, Varestraint 시험을 통한 균열 민감도 평가 결과, 인코넬 718 합금의 고온균열 민감도는 매우 높은 것으로 나타났다. 특히, 모재의 결정립 크기가 클수록 응고균열 민감도가 증가하였으며, Nb-rich 석출물의 분율 증가에 따른 Nb 편석이 액화균열을 유발하는 주요 원인으로 확인되었다. 이는 초기 미세조직 제어가 용접 고온균열 민감도 및 기계적 특성에 중요한 영향을 미친다는 점을 시사한다.

[용접3-1 | 14:00]
일방향 다공성 구리를 활용한 전력반도체용 AMB 기판 접합 특성 확인: 조성민 (인하대학교제조혁신전문대학원), 김근수 (호서대학교), 현승균* (인하대학교제조혁신전문대학원)
Keywords: UPM, Cu, Al2O3, Brazing, Active metal
환경 문제가 대두되며 친환경 자동차에 대한 관심이 증가하고 있고 그중 전기 자동차는 차세대 자동차로서 가장 주목받고 있다. 전기 자동차는 배터리에 충전된 전기에너지를 인버터를 통해 변환시켜 모터를 구동시킴으로서 자동차에 동력을 전달하는데 이러한 모터 구동에 있어서 전력반도체(Power semiconductor)는 핵심적인 역할을 한다. 전력반도체는 배터리에서 공급되는 전력을 변환하여 모터를 구동시키는데 동작 시에 많은 열이 발생하게 된다. 이러한 열은 반도체에 각 부위에 균열을 발생시키고 그러한 균열로 인해 반도체의 내구성이 떨어지게 된다. 본 연구는 전력반도체에서 열을 전달하고 전기적으로 절연해 주는 역할을 하는 AMB(Active Metal Brazing) 기판에 일방향 다공성 금속UPM(Uni-directional Porous Metal)을 적용하여 성능을 개선하려는 시도를 하였다. AMB 기판은 일반적으로 구리(Cu)와 알루미나(Al2O3)가 접합된 형태로 이루어져 있어 두 재료의 열팽창계수 차이로 인해 열이 가해질 때 접합부에 응력이 발생한다. 일반 구리에 비해 탄성계수가 더 낮아 유연한 특성을 갖는 일방향 다공성 구리를 적용해 효과를 보기 위해 각각의 재료의 접합을 시도하였다. 다공성 구리는 세 가지의 기공률(37%. 42%. 47%)로 준비된 시편을 사용하여 접합강도 측정 및 미세조직 분석을 진행하였다. 추가적으로 열충격 시험을 진행해 반복된 열응력 하에서 다공성 구리의 실질적인 성능을 확인하였다.

[용접3-2 | 14:15]
Investigation of hydrogen embrittlement depending on deformation behaviour in FCC welds: 최동현, 남지민 (부산대학교), 유재석 (한화오션), 강남현* (부산대학교)
Keywords: 수소취성, 오스테나이트계 합금, 용접부, 변형유기마르텐사이트
탄소 배출 증가로 인한 환경 문제가 심각해짐에 따라, 전 세계적으로 탄소 배출량을 0으로 줄이기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 흐름 속에서 수소에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 수소의 생산, 저장, 운송, 활용에 필요한 강재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 수소 저장 효율을 극대화하기 위한 방안으로 액체 수소 형태의 저장 및 운송 기술이 제안되고 있다. 그러나 수소의 액화 온도는 20 K로 극한 환경에서도 안정적으로 유지될 수 있어야 하며, 동시에 수소취성에 대한 저항성이 우수한 강재가 필요하다. 이에 따라, FCC계 합금이 액화 수소 저장용 강재의 유력한 후보로 검토되며 실증 및 검증이 진행되고 있다. 하지만, 모재에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있는 반면, 용접부에서의 수소취성 연구는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Flux Cored Arc 용접(FCAW)으로 제작된 용착 금속을 대상으로 전기화학적 수소 장입 후 다양한 온도에서 저속 인장 시험(slow strain rate test)을 실시하여 수소취성 거동 변화를 평가하고, 변형거동에 따라 수소취성 거동 및 매커니즘을 분석하였다.

[용접3-3 | 14:30]
듀얼 빔 레이저를 이용한 알루미늄-구리 박판 용접부의 미세조직 및 기계적 특성 평가: 유채은, 윤성민 (부산대학교), 김용 (고등기술연구원), 이제인* (부산대학교)
Keywords: dissimilar welding, dual-beam laser, intermetallic compound, fatigue
전기자동창 배터리는 수천 개의 배터리 셀들로 구성되며, Al 양극 탭과 Cu로 만들어진 음극 탭과 버스바의 전기적 연결을 통해 구동된다. Al과 Cu는 열전도도가 높기 때문에 고에너지 밀도의 열원이 필요해 주로 레이저 용접 공정을 이용한다. 하지만 Al과 Cu를 용융 접합하게 되면, 두 소재 간의 물리적 특성에 의해 결함 및 취성의 금속간화합물이 용융부에 형성되어 용접부의 특성이 저하된다. 최근, 듀얼 빔 레이저를 이용하면, 원형의 센터 빔 주위에 링 빔의 추가로 용융풀 확대되어 레이저 흡수율 증가, 스패터 및

기공 감소 효과를 얻는다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 듀얼 빔 레이저를 적용하여 센터 빔의 출력은 1100 W로 고정해 Al, Cu 박판 간의 용접을 수행하고, 이 겹치기 용접부의 미세조직, 기계적, 피로 특성을 평가하였다. 링 빔의 출력이 증가하면 비드 폭이 증가하며, 액상 구리의 Al 용융부로의 솟구침이 억제되어 인장전단강도가 증가한다. 하지만 링 빔의 출력이 1650 W 이상으로 과도하게 조사되면 Al, Cu의 섞임이 과도하게 증가해 인장전단강도가 낮아진다. 링 빔이 1300 W로 적정하게 출력되면 Al 영향부에서 연성 파단이 발생한다. 이를 바탕으로 용접부의 내구성을 확인하기 위해 피로시험을 진행하였다. 본 연구를 통해 미세조직과 기계적 특성 및 피로 특성 간의 상관관계를 확인하고자 하였다.

[용접3-4 | 14:45]

IDC(Integrated DC-DC Converter) 제품의 Housing-Cover 間 마찰교반용접기술 연구 : 용접 RPM & Feed Speed가 미치는 용접 품질 상관 관계: 정재훈* (HL Mando)

Keywords: Al Diecasting, 용접, 알루미늄, 금속, 마찰교반용접, 전력변환기

The expansion of electric vehicles (EVs) and eco-friendly trends has highlighted the importance of efficiency and reliability in Integrated DC-DC Converters (IDC), which play a critical role in voltage conversion and control. These factors are essential for improving driving range and energy efficiency. In particular, heat generation in high-voltage conversion systems is a major cause of efficiency loss and failure, necessitating the development of effective cooling systems. This study aims to fabricate a water-cooled IDC by employing Friction Stir Welding (FSW) technology to secure the optimal welding zone between the housing and cover, thereby enhancing thermal management performance while reducing manufacturing costs. The study analyzed the effects of welding parameters, such as rotation speed (RPM) and feed speed, on weld quality during the FSW process. Various experiments were conducted to determine optimal welding conditions. Evaluation criteria were established based on ISO25239-5, and comprehensive analyses, including destructive and non-destructive tests (C/T), leak tests, and others, were performed to develop a highly reliable welding technique. This technology contributes to improving the cooling performance and addressing thermal management issues of IDC while enabling efficient manufacturing processes. This research enhances the thermal management performance and reliability of IDC, providing a practical manufacturing solution for producing key components for environmentally friendly EVs

[용접3-5 | 15:00]

초고강도강/알루미늄합금의 Laser SPR 접합 및 피로특성: 이목영* (㈜포스코)

Keywords: 초고강도강, 알루미늄합금, 레이저, SPR, 피로

전기자동차에서는 배터리 보호를 위하여 측면충돌에 대한 높은 저항성이 요구되어 핫프레스포밍강, MART강 등 1.5 G급 이상의 초고강도강이 사용된다. 또한, 측면충돌저항성을 더욱 높이기 위하여 프리미엄급 차량에서는 알루미늄 프로파일이 사용된다. 이와같은 경우 초고강도강과 알루미늄합금의 이종접합이 요구되는데, 적용 가능한 접합방법이 제한적이다. 기계적 체결은 철강과 알루미늄의 이종접합에 많은 장점을 보유하여 널리 사용되고 있으나, 1.5 G 급 이상의 강재에는 적용이 곤란하다. 초고강도강은 경도가 높은 마르텐사이트 조직을 다량 생성시켜 강도를 높이므로, 가열온도와 냉각속도를 제어하는 열처리를 통하여 소재의 강도 저하가 가능하다. 특히, 레이저를 사용하는 경우 접합부만을 선택적으로 연화시켜 부품의 강성은 유지하면서 접합하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 SPR 접합시 레이저를 조사시켜 접합부를 국부적으로 연화시키고자 하였다. 레이저는 최대출력 10 kW의 화이버레이저를 사용하고, 소재표면에서 레이저 조사영역의 직경이 6 mm 이상이 되도록 빔형상을 변형시켰다. SPR 접합부의 경도, 미세조직 등의 특성을 알아보고, 특히 접합부의 피로특성을 평가하였다.

[용접3-6 | 15:15]

샤시 용접부 내구 신뢰성 확보를 위한 머신러닝 활용 아크 용접 품질 예측 기술 개발: 공호영*, 김대원* (현대자동차㈜), 박종규, 김상훈 ((주)화신), 유지영, 김동윤, 이솔미 (한국생산기술연구원)

Keywords: 용접/접합, 내구성능, 비파괴검사, 머신러닝

최근 전기차 및 차량의 주행성능과 안전성 향상을 위해 고강도강 재료들이 많이 사용되고, 샤시 부품에 가해지는 하중이 증가하고 필요한 내구성능이 커지게 되었다. 대부분의 샤시 부품들이 판재를 성형 및 용접하여 제작하고 있기 때문에 모재부 대비 취약부인 용접부의 품질이 중요하다. 용접 품질 평가 방법에는 외관 확인과 단면 품질 검사(파괴 검사)를 진행한다. 샤시 프레스 부품의 내구 평가 전 품질 검증 시 검사 대상인 부품과 동일 로트 부품의 외관 및 단면 품질 검사(파괴 검사)를 통해 품질 검증을 진행하였으나, 내구 평가 중에 파손 사례가 발생하였다. 이에 따라 내구 투입 부품에 대한 정확한 용접 품질 검증이 가능한 비파괴 품질 검증 방안이 필요하게 되어 비파괴 품질 예측 기술을 개발하였다. 본 개발에서는 머신러닝 알고리즘을 활용하여 용접 조건과 외관 용접 비드 형상의 품질 예측 정확도를 분석하였다. 용접 정보와 스캐닝 데이터를 가지고 단면 품질 인자 예측과 실 시편 품질 인자와의 정합성을 확인하였다. 용접부 스캔 데이터를 활용하여 용접 내부 품질의 합/불을 판단하고, 내부 품질 파라미터를 예측할 수 있는 모델을 구성하고 결과를 검증하였다. 본 개발을 통해 용접 품질 합/불 예측이 가능하며, 내구 투입 부품의 불량 부위 확인에 대한 비파괴 검사가 가능해졌다.

[용접3-7 | 15:30] Canceled

[용접4-1 | 15:55]

일방향 다공성 구리를 활용한 솔더 접합부의 기공 분석: 이진관 (인하대학교), 김근수 (호서대학교), 현승균* (인하대학교)

Keywords: Copper, Bonding, Void, X-ray, Unidirectional Porous Metal

최근 전력 반도체 및 전자 패키징 분야에서는 접합부의 신뢰성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 연속주조 공정을 통해 제조된 일방향 다공성 금속(Unidirectional Porous Metal, UPM) 구조의 구리를 활용하여 니켈 코팅된 알루미늄과 접합하고, 이때 형성되는 보이드 특성을 분석하였다. 실험은 리플로우 장비를 활용하여 대기, 진공, 질소 분위기에서 수행되었으며, 솔더 페이스트를 이용하여 일방향 다공성 구리 및 벌크 구리를 각각 니켈 코팅된 알루미늄과 접합하였다. 접합부의 단면 미세조직과 전단시험 후 파단면의 파괴 양상을 분석하기 위해 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)을 활용하였고, X-ray CT를 이용하여 접합부의 보이드율을 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 일방향 다공성 구리를 활용한 접합부에서 벌크 구리 대비 보이드율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 다공성 구조가 플럭스 기화 시 발생하는 기체의 방출 통로로 작용하여 기포의 잔류를 억제하고, 보이드 형성을 저감하는 역할을 했기 때문으로 판단된다. 본 연구를 통해 기공 구조를 활용하면 솔더 접합부의 보이드를 개선할 수 있음을 확인하였으며, 일방향 다공성 금속이 접합 기술에 효과적으로 활용될 가능성을 제시하였다.

[용접4-2 | 16:10]

Al/Cu 레이저 용접부의 기계적 특성 향상을 위한 금속간화합물 미세조직 제어: 윤성민, 유채은 (부산대학교), 김용 (고등기술연구원), 이제인* (부산대학교)

Keywords: laser wobble welding, lap joint, dissimilar welding, intermetallic compound, fatigue

전기자동차는 리튬 이온 배터리 팩을 동력원으로 사용하는 친환경 자동차로, 배터리 팩의 에너지 밀도와 용량을 높이는 것이 전기차의 주행거리와 직결된다고 할 수 있다. 배터리 팩의 용량을 높이기 위해서는 수백~수천개의 배터리 셀을 연결해야 하는데, 이때 알루미늄 탭과 구리 탭 및 구리 버스바 간 이종 접합이 필수적이다. 알루미늄과 구리를 용접하게 되면 취성인 금속간화합물들이 형성되기 때문에, 이를 제어할 수 있는 용접 공정이 필요하다. 문헌 조사 결과, 와블 용접 공정을 적용했을 때, 금속간화합물 형성을 억제하고 기계적 특성을 향상시킨다는 결과가 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 두께 0.4 mm의 알루미늄과 구리 박판을 겹치기 용접할 때, 와블링 진폭을 달리 하여 (a=0.1, 0.4, 0.5 mm) 용접부 특성에 어떤 영향을 미치는 지 분석하였고 이를 선형 용접 결과와 비교하여 최적화된 미세조직을 제시하였다. 저진폭 용접과 달리 고진폭 용접 시, 구리의 용융량이 감소하여 용접부 내에 구리 함량이 높은 금속간화합물(γ, η)의 양이 줄어들고 알루미늄과 구리 모재 계면에만 형성된다. 이로 인해 인장시험 시 알루미늄 열영향부에서 파단을 유도하여 인장 전단 강도를 높일 수 있었고, 피로수명 역시 선형, 저진폭 용접에 비해 수십배 향상시킬 수 있었다.

[용접4-3 | 16:25]

최적 용접 조건 선정을 위하여 실험계획법을 활용한 용접형 볼스터드 개발: 이봉희* (현대자동차 AVP본부)

Keywords: 금속, 용접, 실험계획법, 반응표면분석법

자동차 스테빌라이저 바는 차량이 선회할 때나 거친 노면을 주행할 때 차체 롤링의 제어를 돕는 부품이며, 스테빌라이져바 링크는 스테빌라이져 바와 스트럿을 연결하여서 지지해주는 부품이며, 그 조인트는 볼스터드로 연결이 되어있다. 현재 볼스터드의 경우 볼부+스터드부 통가공 및 전체 도금을 하여 사용하는데 이는 가공비 과다 및 품질 문제 가능성 잔존 등의 문제점이 있다. 이를 개선하고자 강구(미도금) + 스터드(도금) 전기 저항 용접 기술을 개발하였고, 최적 공정 관리 조건을 확보 하기 위하여 실험계획법을 활용하였다. 실험계획법 중 반응표면분석법을 통하여 용접 인자간 회귀방정식을 도출하였으며, 실제 평가를 통해 정합성을 확인하였다. 원가 검토를 통하여 연간 원가 절감액도 확인할 수 있었다.

[용접4-4 | 16:40]

상용차용 후열처리 초경량휠 용접부 수소민감도 저감기술 개발: 한도경*, 배규열 (포스코 기술연구원)

Keywords: Flash-butt welding, Post-heat treatment, Hydrogen embrittlement, Ultra-lightweight wheel

지구온난화로 인한 급격한 기후변화와 자연재해에 대응하기 위해, 전 세계적으로 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 특히 소재 및 부품 제조 산업에서는 경량화를 통해 부품의 무게를 줄이고 에너지 효율을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 자동차 산업에서는 차량의 경량화와 사용자의 안전을 동시에 확보하기 위해 초고강도 강재의 개발 및 적용에 많은 연구가 집중되고 있다. 그러나 강재의 고강도화는 냉간가공 시 부품 성형에 어려움을 초래하며, 특히 접합부에서는 취성조직이 발생하여 모재에 비해 열위한 냉간 가공성을 나타낸다. 또한, 초고강도 강재의 용접공정 중에는 수소취성에 민감한 마르텐사이트 조직이 접합부 내에 형성될 수 있어, 일반적으로 높은 수소취성 민감도를 보이는 것으로 알려져 있다. 후열처리를 통해 기가급 강도를 지닌 자동차용 초고강도 강재는 높은 탄소 함량과 몰리브덴(Mo), 붕소(B)의 첨가로 인해 매우 높은 경화능을 가지며, 이러한 특성으로 인해 용접공정 이후 수반되는 급격한 냉각은 용접부 내 마르텐사이트 조직을 형성하게 된다. 접합부에 이러한 저온변태조직이 형성되면, 이는 냉간가공 시 가공균열 발생의 원인이 되며, 수소취화에 따른 파단 발생의 위험성을 더욱 증가시킬 수 있다. 그럼에도 불구하고, 자동차 고객사의 상용휠 경량화 요구는 확고하며, 기존의 냉간 성형재의 고강도화 트렌드에서 벗어나 후열처리강의 특성을 활용한 초고강도 제품 시장을 새롭게 형성하고자 상용차용 경량휠 개발을 진행 중이다. 본 연구에서는 후열처리강을 이용한 초경량휠 부품 제작을 위해 Flash-butt 접합 후 열처리 조건을 변화시킨 다양한 용접부품에 대해 미세조직 분석과 수소 민감도 평가를 수행하였다. 특히 Flash butt 접합 시 인가된 단락전류(Short circuit current) 값을 100%로 설정하여 0%, 5%, 10%, 15%, 20% 비율(이하 후열비율)의 후열전류(Post-heat current)를 용접공정 완료 직후에 흘려 줌으로써 접합부의 냉각속도를 제어하고자 하였다. 용접부 후열비율 적용 효과에 따라 Flash-butt 시험편 내 발생한 수소유기균열의 발생빈도와 최대 균열길이를 비교 분석하였으며,

1.5 GPa급 후열처리강 접합부의 수소취화 매커니즘과 균열저항성 향상을 위한 기초데이터를 확보하였다. 이를 기반으로 후열처리 강재의 Flash-butt 접합부 건전성을 확보하기 위한 최적의 조건을 도출하고, 용접솔루션의 선제적인 대응으로 후열처리강 제품의 초경량화 적용에 적극 기여하고자 한다.

[용접4-5 | 16:55]

전자세 용접용 플러스 코어드 와이어의 평가 방법에 따른 저온균열 발생 거동: 유재석 (한화오션, 부산대학교), 윤광희, 박종민 (한화오션), 강남현* (부산대학교)

Keywords: Cold crack, y-groove weld cracking test, Fillet weld cracking test, Window-type restrained weld cracking test, Flux cored wire

저온균열은 탄소강 구조물 제작 시 가장 주의해야 될 용접 균열로 조선/해양 구조물 제작 시에는 맞대기 이음부 다층 용접부의 횡균열과 초고강도강 필렛 이음부의 종균열 및 횡균열 형태로 주로 발생되고 있다. 저온균열 저항성 평가 방법 중 대표적인 방법은 ISO 17642-2와 JIS Z 3158의 y-groove weld cracking test이며 이 시험법을 활용한 많은 연구가 수행되었지만, 다층 용접부 횡균열을 평가하기에는 적합하지 않다는 보고들이 다수 존재한다. 저입열 조건에서 균열 민감도가 더 높은 일반적인 y-groove weld cracking test의 평가 경향과는 달리 다층 용접부 횡균열은 고입열 조건에서 더 민감도가 높다는 보고도 있다. 이에 본 연구에서는 저온균열 평가방법에 따른 전자세 용접용 플럭스 코어드 와이어(FCW)의 저온균열 저항성을 평가하였다. 최소 인장강도 70, 80, 90 ksi급 FCW를 y-groove weld cracking test, fillet weld cracking test, window-type restraint weld cracking test를 적용하여 입열량에 따른 저온균열 거동을 확인하였다. 단층 용접을 적용한 y-groove weld cracking test와 fillet weld cracking test에서는 입열량이 낮고 용접금속의 경도 및 Ceq(탄소 당량)/Pcm(균열 감수성 조성)이 높을수록 저온균열 민감성이 높았다. 하지만 다층 용접을 적용한 window-type restraint weld cracking test에서는 단층 용접부 저온균열 발생 거동과 달리 경도, Ceq/Pcm에 저온균열 민감성이 비례하지 않았다. 최소 인장강도 80 ksi급 FCW는 저온균열(횡균열)이 발생하지 않았고, 최소 인장강도 70, 90 kis급 FCW는 저입열(10 kJ/cm) 조건보다 고입열(35 kJ/cm) 조건에서 저온균열 발생이 더 많았다. 3가지 저온균열 평가 결과를 종합하여 가장 저온균열 저항성이 우수한 FCW를 선정하였고, 평가 방법에 따른 저온균열 발생 거동이 차이나는 이유를 고찰하였다. 또한 AWS D1.1의 prequalified 예열온도 기준을 완화시키기에 적합한 FCW에 대해 판단하였다.

[용접4-6 | 17:10]

초대입열 용접용 HLSA 강의 Nb 미세 합금화가 상변태 및 저온 변태조직 특성 제어에 미치는 영향: 유성훈, 강남현* (부산대학교재료공학부ECO재료연구실)

Keywords: Micro-alloyed steel, Tandem EGW, Weldability, Local brittle zone, MA constituents

대형 구조물(조선, 해양 플랜트 등)에 사용되는 후판에서는 용접품의 성능 향상을 위해 TMC Thermomechanical Controlling) 공정을 통해 제조된 고강도 저합금강 (HSLA, High-Strength Low-Alloy Steel)의 사용이 필수적이다. HSLA 강은 낮은 탄소 함량으로 인해 낮은 탄소 당량(Ceq)을 가지며, 기존 강재에 비해 우수한 용접성을 갖는다. 또한, 티타늄(Ti), 니오븀(Nb), 바나듐(V)과 같은 미세 합금 원소를 첨가하면 석출 경화(precipitation hardening) 효과를 유도하거나 상변태를 제어하여 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있다. 그러나, 대형 구조물에 적용되는 고입열 용접(heat input > 250 kJ/cm)은 국부 취성 영역(LBZ, Local Brittle Zone)을 형성하여 충격 인성을 저하시키며, 이 현상은 미세 합금 원소에 의해 더욱 촉진되는 것으로 밝혀졌다. LBZ의 형성은 모재 및 용접 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)에서 여러 가지 유용한 강화 메커니즘의 영향을 저감 시키기 때문에, 미세조직을 정밀하게 제어하는 것이 중요한 과제가 된다. 본 연구에서는 Nb 함량이 다른 4가지 후판 강재를 제작하여 모재 내 합금원소가 미세조직에 미치는 영향을 분석했다. 대형 구조용 강재의 초대입열 용접 방법인 tandem EGW (electrogas welding) 용접 시 열영향부 (특히 coarse grained heat affected zone)의 열이력을 계산하여 Gleeble을 통해 모사된 CGHAZ 시편을 제작했다. 결과적으로 모재와 모사된 열영향부에서의 미세조직 및 기계적 특성이 합금원소와 갖는 상관관계를 규명하였으며 local brittle zone으로 알려져 있는 중간상의 거동을 제어하여 우수한 인장특성 및 높은 충격 인성을 갖는 조성설계 방안을 제시했다.

[용접4-7 | 17:25]

비조질강 마찰용접부 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 Nb, Si의 영향: 김봉준, 문준오* (국립창원대학교), 강전연 (한국재료연구원), 이정원, 김용현 (디와이파워(주))

Keywords: 비조질강, 마찰용접, 접합부, 미세조직, 기계적 성질

비조질강은 조질열처리(Quenching and Tempering) 공정 없이 조질강 수준의 우수한 기계적 성질을 가지는 강재로써 우수한 특성 및 열처리 공정 생략에 따른 비용 절감 효과에 따라 유압실린더, 크랭크 샤프트, 커넥팅 로드와 같은 각종 기계부품 및 자동차용 부품 등의 제작에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 유압실린더용 비조질강의 합금조성 변화에 따른 마찰용접부 미세조직 및 기계적 성질 변화에 대해 연구하였다. 이를 위해 Si과 Nb 함량이 다른 비조질강 2종을 제작하였으며, 이를 S45C 고탄소강과 마찰용접하였다. OM, SEM, EBSD, TEM 분석을 통해 마찰용접부 위치별 미세조직을 분석하였고, 인장시험, 충격시험 및 비커스 경도 시험을 통해 기계적 성질을 평가하였다. 마지막으로 Nb, Si 첨가에 따른 마찰용접부 결정립 크기, 상분율, 석출물 분포 변화와 기계적 성질 간의 상관관계에 대해 고찰하였다.

소프트소재
Room 401B, 4월 23일

[소프트1-1 | 09:00]
Ionic Diode-Based Drug Delivery System: Hyunjae Yoo, Soon-Bo Kang (Seoul National University), Jeongsoo Kim (Korea University), Wonkyung Cho (Seoul National University), Hyojeong Ha, Seyoung Oh (Korea University), Seol-Ha Jeong, Sihwan Lee (Seoul National University), Hyemin Lee (Korea University), Chang Seo Park, Dong-yup Lee, Taek Dong Chung* (Seoul National University), Kyung-Mi Lee* (Korea University), and Jeong-Yun Sun* (Seoul National University)
Keywords: hydrogel-based device, active drug delivery system, ionic diode, flow-free, immune toxicity

Drug delivery systems hold promise for delivering cytotoxic drugs by controlling the timing and location of the drug release. However, conventional delivery mechanisms often fall short of achieving spatiotemporally controlled yet sustained release, which is crucial for ensuring drug efficacy and minimizing impact on surrounding tissues. Here, we report an ionic diode-based drug delivery system that is controlled by an electric potential and capable of releasing drugs at scales ranging from nanogram to microgram. The migrated drug is slowly but continuously diffused to the lesion through the hydrogel at the desired rate. The ionic diode provides flow-free drug delivery while minimizing unintended drug leakage over prolonged periods. Implanted in a freely moving tumor-bearing mouse model, our system filled with doxorubicin demonstrated superior anti-tumor efficacy and minimal off-target immune toxicity compared to the intratumoral injection of free doxorubicin. With its mechanically compliant and biocompatible components, our system offers a safe and readily translatable approach to patients with surgically unresectable tumors.

[소프트1-2 | 09:10]
Effect of Chalcogen Atom Substitution on the Mixed Transport Properties of Donor-Accepter Polymers: Kim Tae Hoon (Seoul National University), Shinbee Oh (KAIST), Ji Hwan Kim (Seoul National University), Dahyun Jeong, Bumjoon Kim (KAIST), and Keehoon Kang* (Seoul National University)
Keywords: OECT, OMIECs, D-A polymer, Mixed transport

Organic electrochemical transistors (OECTs) operate through mixed conduction, combining both electronic and ionic transport within organic mixed ionic-electronic conductors (OMIECs), where the structural and transport properties are interrelated. Chalcogenophene substitution is a powerful design strategy for modulating intra- and intermolecular interactions in conjugated polymers, widely employed in organic electronic devices such as organic photovoltaics and organic field-effect transistors. In this study, we systematically investigate the effect of heteroatom substitution in a donor–acceptor polymer incorporating a diketopyrrolopyrrole (DPP) acceptor for OECT applications. The substitution of thiophene with selenophene leads to significant performance enhancements, primarily due to the increased quinoidal character of selenophene, which facilitates enhanced π-electron delocalization. This structural modification results in a pronounced improvement in μC*, particularly enhancing charge carrier mobility (μ). Furthermore, the optimized materials exhibit a low off-current and a high on/off ratio, demonstrating their potential for unipolar inverter applications.

[소프트1-3 | 09:20]
Thermal Annealing-Induced Phase Conversion in N-type Triple-Cation Lead-Based Perovskite Field Effect Transistors: Yongjin Kim, Taehyun Kong, Jaeyoon Cho, Hyeonmin Choi, Heebeom Ahn, Jaeyong Woo, Dohyun Kim, Jeongjae Lee, Takhee Lee, and Keehoon Kang* (Seoul National University)
Keywords: Perovskite, Field Effect Transistor, Thermal Annealing

The field of perovskite optoelectronics and electronics has rapidly advanced, driven by excellent material properties and a diverse range of fabrication methods available. Among them, triple-cation perovskites such as $CsFAMAPbI_3$ offer enhanced stability and superior performance, making them ideal candidates for advanced applications. However, the multicomponent nature of these perovskites introduces complexity, particularly in how their structural, optical, and electrical properties are influenced by thermal annealing—a critical step for achieving high-quality thin films. Here, we propose a comprehensive mechanistic picture of the thin film formation process of $CsFAMAPbI_3$ during the thermal annealing step through systematic and comparative analyses, identifying two key thermally induced phase transitions: the crystallization of the perovskite phase facilitated by solvent evaporation and the formation of the PbI_2 phase due to thermal decomposition. Our results reveal that the crystallization process during annealing proceeds from the surface to the bulk of the films, with a significant impact on the film's morphology and optical characteristics. Controlled annealing enhances field-effect transistor device performance by promoting defect passivation and complete perovskite crystallization, while prolonged annealing leads to excessive PbI_2 formation, accelerating ion migration and ultimately degrading device performance. These insights offer valuable guidance for optimizing the design and performance of perovskite-based electronic and optoelectronic devices.

[소프트1-4 | 09:30]

Self-assembly prediction of architecture-controlled bottlebrush copolymers in solution using graph convolutional networks: Wooseop Hwang (Korea Univ), Sangwoo Kwon, Won Bo Lee* (Seoul National Univ), and YongJoo Kim* (Korea Univ)

Keywords: Molecular Dynamics, Machine Learning, Dissipative Particle Dynamics, Graph Convolutional Networks, Bottlebrush Copolymers

The investigation of bottlebrush copolymer self-assembly in solution involves a comprehensive approach integrating simulation and experimental research, due to their unique physical characteristics. However, the intricate architecture of bottlebrush copolymers and the diverse solvent conditions introduce a wide range of parameter spaces. In this study, we investigated the solution self-assembly behavior of bottlebrush copolymers by combining dissipative particle dynamics (DPD) simulation results and machine learning (ML) including graph convolutional networks (GCNs). The architecture of bottlebrush copolymers is encoded by graphs including connectivity, side chain length, bead types, and interaction parameters of DPD simulation. Using GCN, we accurately predicted the single chain properties of bottlebrush copolymers with over 95% accuracy. Furthermore, phase behavior was precisely predicted using these single chain properties. Shapley additive explanations (SHAP) values of single chain properties to the various self-assembly morphologies were calculated to investigate the correlation between single chain properties and morphologies. In addition, we analyzed single chain properties and phase behavior as a function of DPD interaction parameters, extracting relevant physical properties for vesicle morphology formation. This work paves the way for tailored design in solution of self-assembled nanostructures of bottlebrush copolymers, offering a GCN framework for precise prediction of self-assembly morphologies under various chain architectures and solvent conditions.

[소프트1-5 | 09:40]

Solvation Structure Modulation in Aqueous Electrolytes : Stabilizing Pyrazine Radicals and Facilitating Electrochemical Nitrate Reduction: MinYoung Seo and YongJoo Kim* (Korea Univ.)

Keywords: Aqueous electrolytes, Molecular dynamics simulation, Water-in-salt electrolyte (WISE)

This study demonstrate how the solvation structure of highly concentrated aqueous electrolytes can be effectively modulated to enhance their electrochemical performance in two distinct applications, as revealed by molecular dynamics (MD) simulations. First, the stabilization of protonated radical intermediates of pyrazine derivatives in WISEs with 7–8 m LiTFSI was confirmed. Strong interactions between pyrazine derivatives and Li^+–coordinated water ($Li(H_2O)_n^+$) in WISEs prevent molecular aggregation and protect radical intermediates from disproportionation and oxygen-induced degradation, while no similar solvation structure modification occurred with $LiNO_3$. Second, the electrochemical nitrate reduction reaction (NO_3^-RR) is significantly activated even in acidic lithium nitrate solutions at LiNO3 concentrations exceeding 6 m on a Pt electrode (the highly effective catalyst for HER) by the formation of a ‘‘hydronium-in-salt’’ electrolyte (HISE), a new type of aqueous high concentration salt electrolyte. The observed enhancement of NO_3^-RR while the suppression of HER-activity in the $LiNO_3$ based HISE was verified by MD simulations. The formation of a HISE in acidic $LiNO_3$ solutions contrasts with that of a “water-in-salt” electrolyte in LiTFSI with the same concentration. The mechanism of NO_3^-RR activation in a HISE suggests facilitated proton-coupled electron transfers (PCETs) from H_3O^+ to NO_3^- and subsequent reactive intermediates owing to the proximity between the two ions induced by the unique solvation structure blended with all ions together (Li^++NO_3^-+H_3O^+). In contrast, all the ions are separately hydrated at low concentrations of $LiNO_3$ electrolytes. On the other hand, PCET from H_2O to NO_3^- in a high concentration $LiNO_3$ electrolyte (e,g., 9 m) is not kinetically preferred, probably owing to the slow dissociation kinetics of H_2O, and therefore, H_2O reduction is not suppressed by the NO_3^-RR.

[소프트2-1 | 10:00] 초청강연

Directed Soft Materials Assembly for Post-AI Era: Sang Ouk Kim* (KAIST)

Keywords: Self-Assembly, Block Copolymers, Graphene, Liquid Crystal, Artificial Muscle

Molecular self-assembly is an intriguing nanofabrication principle widespread in natural living system. My research group have been working on the directed nanoscale assembly of block copolymers (BCPs) and low-dimensional materials, such as carbon nanotubes (CNTs) and graphene over the past two decades. BCP self-assembly can generate dense, periodic nanopatterns with sub-10-nm scale pattern precision, particularly interested in semiconductor nanolithography. We have contributed to this research field from the early days, such as the birth of directed self-assembly (DSA) principle by nanoscale epitaxy. Recently, we have reported an interesting IoT application of BCP defective fingerprint nanopatterns for physically unclonable function (PUF) label for information security. Low-dimensional carbon materials, including CNTs and graphene, have attracted a great deal of attentions in the era of nanotechnology, whose potential for real-world application can be greatly boosted up by nanoscale assembly. In this regard, our discovery of graphene oxide liquid crystal (GOLC) triggered a big transition in the solution processing of graphene based structures, such as 1D graphene fibers, 2D graphene membrane/film, and 3D nanoporous graphene assembly. Recently, we demonstrated human muscle like strong artificial muscles of graphene based composite structures for the reversible biomimetic movements by light driven remote control.

[소프트2-2 | 10:25] 초청강연

Material design strategies for intrinsically stretchable quantum dot light-emitting diodes: Moon Kee Choi* (Ulsan National Institute of Science & Technology (UNIST))

Keywords: quantum dot, intrinsically stretchable light emitting layer, quantum dot light-emitting diodes, quantum dot composites

As next-generation electronic devices evolve, the demand for high-performance, high-definition displays with flexible and deformable form factors continues to grow. Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) have emerged as a promising candidate due to the intrinsic advantages of quantum dots (QDs), including high photoluminescence quantum yield, a broad color gamut, and excellent color purity. However, the development of intrinsically stretchable QLEDs with stable optoelectronic performance under mechanical deformation remains a significant challenge. In this presentation, we will explore material design strategies for intrinsically stretchable QLEDs by leveraging ternary QD composite systems comprising QDs, an elastomeric polymer matrix, and a hole transport layer. By optimizing the composition and interface engineering of these materials, we aim to achieve enhanced mechanical compliance while maintaining superior optical and electrical properties. These deformable QLEDs hold great potential for next-generation form-factor displays, surpassing conventional foldable and rollable technologies and paving the way for highly durable, stretchable electronic platforms.

[소프트2-3 | 10:50] 초청강연

Revisiting biomimetic self-assembling nanomaterials for cryoprotectants: Nayeong Jeon, Lee Seo Kim, and Eunji Lee* (Gwangju Institue of Science and Technology (GIST))

Keywords: Cryopreservation, self-assembly, ice-binding proteins, ice recrystallization inhibition, soft nanomaterials

Biomimetic self-assembling nanomaterials inspired by Ice-binding proteins (IBPs) have emerged as promising cryoprotectants for preserving drugs, vaccines, foods, cells, tissues, and organelles during cryopreservation. The precise molecular arrangement of ice crystal-matching binding moieties in IBPs enables freezing point depression and ice recrystallization inhibition after freeze-thaw cycles. While these unique properties have driven the development of artificial cryoprotectants mimicking IBP structures and functions, existing organic mimetics lack structural stability against external stimuli, and inorganic alternatives often exhibit cytotoxicity, limiting their bio-applications. To address these challenges, we investigate self-assembling organic-inorganic nanohybrids that combine the advantages of both components, particularly focusing on the enhanced performance achieved through the collective behavior of ice-binding functional groups within the self-assembled nanostructures. Our approach focuses on controlling thermodynamic interactions at the ice-water interface using colloidal nanohybrids composed of short-peptide-derived ice-binding molecular building blocks that self-assemble with inorganic nanoparticles. The collective arrangement of multiple ice-binding functional groups through self-assembly significantly amplifies their interaction with ice crystals, leading to superior cryoprotective properties compared to individual molecular units. The ice-water interface curvature can be precisely tuned through the size and shape control of colloidal nanoparticles. Leveraging the optical properties of tethered nanoparticles, we directly visualize the enhanced ice recrystallization inhibition effects resulting from the cooperative action of clustered ice-binding moieties in these self-assembled colloids. We systematically explore the optimal conditions for thermodynamic control of the ice-water interface by matching the self-assembled nanohybrids to the ice crystal lattice, emphasizing how the collective behavior of functional groups contributes to improved performance. This study not only demonstrates the feasibility of our self-assembling nanohybrids for practical cellular cryopreservation but also establishes a foundation for applications in organ transplantation, cord blood storage, and vaccine/drug preservation, while highlighting the importance of collective molecular behavior in enhancing cryoprotective efficiency.

[소프트2-4 | 11:15] 초청강연

Self-assembly of bottlebrush copolymers in solution: YongJoo Kim* (Korea University)

Keywords: polymer, simulation, bottlebrush copolymers

In this study, we present extensive dissipative particle dynamics simulation studies of bottlebrush copolymers in solution having different grafting sequences: block and random. Distinct morphology of the grafting sequence-controlled bottlebrush copolymer micelles is investigated through backbone chain distribution along with the micelle structure. As a result, bottlebrush block copolymer (BBCP) micelles exhibit backbone chain primarily dependent on length scale of micelle size, while bottlebrush random copolymer (BRCP) exhibits side chain-dependent length scale. We further quantify the dependence of the micelles on the length scale of the backbone chain and side chain using the scaling relationship. We decouple the size of the micelles into core radius and corona thickness, and scaling behavior of these structures is quantitatively explained by the conformation of backbone chains and side chains. Also, the experimental scaling of BBCP and BRCP micelles in water shows consistent results of the sequence-dependent scaling exponents calculated by simulation. This work reveals the scaling behavior of the sequence-controlled graft copolymer micelles which potentially guides how one can modify the solution self-assembled complex micelles by controlling architecture and structure parameters of the bottlebrush copolymer.

[소프트3-1 | 14:00] 초청강연

Technological Issues and Solutions in Ionic Tactile Sensors: Unyong Jeong* (Pohang University of Science and Technology (POSTECH))

Keywords: tactile sensor, ionic sensor, wearable sensor

Since the biological nerves and transmission of plants and animals are based on electrolytes, they can maintain the same function without being broken under external impacts or mechanical deformations. Recently, many researches using the electrolytes to manufacture highly deformable electronic devices have been conducted for the uses as wearable sensors, healthcare sensors, and electronic skins for robots. This presentation will discuss the technological issues in fabricating the ionic sensors and suggest possible directions to solve the issues. In particular, the presentation will focus on the issues about environmental stability, structural miniaturization, rapid signal acquisition, and noise removal.

[소프트3-2 | 14:25] 초청강연

Centimeter- to nanometer-scale 3D contact sensing: Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Keywords: Contact sensors, elastomer

Contact sensors are used for centimeter-scale human–computer interfaces, also in applications that require detecting contacts at the nanometer scale. In these sensors, the appropriate use of elastomers—capable of accommodating dimensional changes upon contact—is crucial. Moreover, advanced elastomer engineering, which enables three-dimensional touch, is of great importance. In this talk, I will demonstrate contact devices that operate across scales—from centimeters to nanometers—and showcase three-dimensional contact sensing that captures not only x–y plane interactions but z-axis information. I will discuss the significance of using elastomers effectively to achieve three-dimensional contact and imaging, as well as various methodologies for implementing 3D contact sensing and visualization.

[소프트3-3 | 14:50] 초청강연

Bio-Inspired Self-Adaptive Materials and Their Applications to Reprogrammable Self-Folding Structures: Sung Hoon Kang* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: bone-inspired, soft composite, self-adaptive, mechanical behaviors, self-folding

Adaptability is one of the hallmarks of living systems that provide resilience to survive and flourish in a dynamically changing environment. I will present our efforts to study multifunctional materials toward mechanically adaptive materials for dynamically changing loading environments [1]. Nature produces outstanding materials for structural applications, such as bone and wood, that can adapt to their surrounding environment. For instance, bone regulates mineral quantity proportional to the amount of stress. However, it has been challenging for synthetic materials to change and adapt their structures and properties to address the changing loading condition. To address the challenge, we are inspired by the findings that bones are formed by mineralizing ions from blood onto collagen matrices. I will present a material system that triggers proportional mineral deposition from electrolytes on piezoelectric matrices upon mechanical loadings so that it can self-adapt to mechanical loadings. For example, the mineralization rate could be modulated by controlling the loading condition, and a 30-180% increase in the modulus of the material was observed upon varying the cyclic loading condition. Moreover, our preliminary results showed that the material system showed a decrease in crack propagation speed by ~90%, resulting in significantly improved fatigue lifetime. To expand the environment that the material can be utilized, we have investigated synthesis of liquid-infused porous piezoelectric composites inspired by bone and pitcher plant [2]. I will present our synthesis approach and resulting mechanical properties. The material showed over 3,600% increase in modulus and 3,000% increase in dissipation after 12 million cycles. I will also present our approach for reprogrammable self-folding structures based on the material for potential use in soft robotics [3]. We envision that our findings can contribute to new strategies for making resilient and sustainable materials for dynamically changing mechanical environments, with potential applications including vehicle, infrastructure, and healthcare [4]. References: [1] Orrego S, Chen Z, Krekora U, Hou D, Jeon S-Y, Pittman M, Montoya C, Chen Y, Kang S H. Bioinspired materials with self-adaptable mechanical properties, Advanced Materials, 2020, 32: 1906970. [2] Wong T-S, Kang S H, Tang S K Y, Smythe E J, Hatton B D, Grinthal A, and Aizenberg J. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity, Nature, 2011, 477: 443-447. [3] Sun B, Kitchen G, He D, Malu D K, Ding J, Huang Y, Eisape A, Omar M M, Hu Y, Kang S H, Science Advances, 2025, 11: eadt3979. [4] Kitchen G, Sun B, Kang S H. Bioinspired nanocomposites with self-adaptive mechanical properties, Nano Research, 2024, 17:633-648.

[소프트3-4 | 15:15] 초청강연

Magnetic Anisotropy of Materials for Selective Sensing and Actuation in Soft Robotics: Minjeong Ha* (Gwangju Institute of Science and Technology)

Keywords: Magnetic, anisotropy, soft robot, magnetic sensors, magnetic origami

Soft robots, inspired by the adaptive sensing and movement capabilities of living organisms, excel in performing delicate tasks, navigating confined spaces, and interacting with complex environments. However, their inherently viscoelastic structures pose

significant challenges in control due to non-linear and unpredictable responses. To address these limitations, we have developed innovative sensors and actuators based on magnetic materials to enhance selectivity, precision, and directional functionality. To ensure reliable signal acquisition and overcome size constraints in small-scale robots, we introduce flexible magnetoresistive (MR) sensors based on ferromagnetic-nonmagnetic multilayer superlattices. These sensors utilize interlayer exchange coupling to detect magnetic field variations with exceptional sensitivity. By optimizing the sensor design, we prevent strain-induced shifts in magnetic anisotropy, enabling robust performance even under mechanical deformation. Additionally, we present magnetic soft origami capable of shape reconfiguration and controlled motion in response to external stimuli such as magnetic fields and light. These actuators, when integrated with ultra-thin MR sensors, enable self-monitoring and autonomous operation in untethered robotic systems. The anisotropic material properties allow dynamic adaptation under mechanical, electrical, or electromagnetic stimuli, providing a new pathway for precise and autonomous operation in diverse and complex environments.

[소프트4-1 | 16:00] 조청강연

Soft Crafing for More Powerful and Rigid Electrocatalysts: Yeon Sik Jung* (KAIST)

Keywords: Electrocatalysis, nanotransfer printing, block copolymer, self-assembly

Electrocatalysis plays a pivotal role in energy conversion technologies, including fuel cells and electrolyzers, where catalyst efficiency and durability dictate overall system performance. Conventional approaches to catalyst design often rely on high novel material loading and empirical optimizations, leading to trade-offs between activity, stability, and cost-effectiveness. In this work, we present a soft nanolithography-based strategy for the rational engineering of 3D electrocatalyst, enabling precise control over nanoscale morphology and active site distribution. By leveraging template-assisted patterning and self-assembly techniques, we achieve highly ordered, low-tortuosity architectures that maximize both intrinsic catalytic activity and long-term operational stability.

[소프트4-2 | 16:25] 조청강연

Soft, transparent, elastic, size-adjustable human brain: Juhyuk Park* (Seoul National University)

Keywords: Polymer processing, Neuroengineering, Biotechnology

The ability to manipulate biological tissues at multiple scales is crucial for advancing biomaterials and tissue engineering applications. However, the intrinsic fragility, opacity, and size constraints of human organs—particularly the brain—pose significant challenges for structural and molecular analyses. This presentation introduces mELAST (magnifiable entangled link-augmented stretchable tissue-hydrogel), a polymer-based biohybrid material that chemically transforms intact human brain tissue into a soft, elastic, transparent, and size-adjustable construct, enabling multi-scale structural and molecular interrogation. At the core of mELAST is a materials-driven approach that employs in situ polymer network engineering within the brain's native extracellular matrix. By synthesizing highly entangled, superhydrophilic polymer chains directly within tissue nanopores, mELAST enhances mechanical elasticity, increases tissue expandability, and preserves biomolecular integrity. This process results in a structurally stable yet deformable hydrogel-tissue hybrid that can undergo controlled thinning-assisted multiround immunolabeling, expansion imaging, facilitating multiplexed multiscale 3D imaging across organ-scale samples. We will discuss how mELAST integrates polymer science principles with biological tissue engineering, demonstrating how its tunable mechanical and optical properties enable seamless compatibility with conventional histological and imaging workflows. This bioadaptive material opens new possibilities for studying biomechanical behavior, cellular networks, and pathological features within human brain tissues at unprecedented scales. Moreover, its ability to retain and visualize molecular markers—including protein aggregates in neurodegenerative diseases (here, Alzheimer's disease)—demonstrates its potential for disease modeling, biomaterial-tissue interface studies, and next-generation organ-scale diagnostics. Ultimately, mELAST represents a transformative advance in soft materials for biomedical applications, offering a scalable, mechanically adaptive, and optically transparent platform for large-scale tissue imaging and functional analysis. By bridging polymer physics, hydrogel mechanics, and biomolecular retention strategies, this material paves the way for next-generation soft biomaterials that enable unprecedented insights into organ-level structures and disease mechanisms.

[소프트4-3 | 16:50] 조청강연

Development of functional lignogel: YounSoo Kim* (POSTECH)

Keywords: Lignin, Zwitterionic polymer, Adhesive hydrogel, Wound healing

Lignin is one-third of the material found in plant cell walls and is considered the world's second most abundant natural polymer. However, it is still rarely applied to actual industries due to the irregular structure of lignin and its incompatibility with other substances. In this study, a biocompatible and viscoelastic lignin hydrogel (lignogel) was developed. The lignogel was easily synthesized by irradiating microwaves to an aqueous solution in which lignin and imidazolium-based zwitterionic monomers were dispersed. It is developed by a three-dimensional polymer network formed by specific bonds such as cation-pi and dipole-dipole interactions between zwitterionic polymers and the lignin surface. The viscoelastic properties were optimized by adjusting the composition of the total weight ratio of lignin and zwitterionic monomers. The optimized lignogel showed high electrical conductivity and excellent adhesion and further showed an effective wound-healing effect, indicating its potential as a multifunctional bioelectronic material.

[소프트4-4 | 17:15] 조청강연

Next-generation Biomedical and Neural Interfaces using Multifunctional Thermally Drawn Fibers with Soft Materials: Seongjun Park* (Seoul National University)

Keywords: Fiber, Brain, Hydrogel, Implant

Understanding and controlling the dynamics of biological or neural systems requires developing technologies that can record the signals used by cells or neurons and control bio-systems. However, current engineering technologies for this purpose have limitations in many factors, such as the lack of cell-specific stimulation for precise control, severe invasiveness and bio-incompatibility that are difficult to apply to actual medical treatment. Therefore, developing a new micro-interface system that is biocompatible while fully exerting multi-functionality and can precisely manipulate and monitor cell and nerve activity is a major demand in the current biomedical and brain engineering fields. In this presentation, I would like to introduce various strategies of our laboratory to solve these problems: (1) First, I will introduce a flexible and stretchable fiber-based probe for interfacing with biological and neural systems. Through this technology, I intend to predict the appearance of future biomedical devices in various fields such as ultra-long-term brain-machine interface. (2) Second, I will introduce tissue regeneration support technology using biocompatible materials and fibers, and introduce an engineering approach for tissue engineering. (3) Lastly, I will introduce various wearable and biomedical applications using the soft materials and new manufacturing processes. The technologies to be introduced in this presentation will not only contribute to human health and well-being by enabling natural interfacing between biological/neural circuits and external machines/computers, but are also expected to contribute to the development of a future with hyper-connectivity.

[소프트4-5 | 17:40] 조청강연

3D-printed modular microrobots for multi-environment navigation.: Jeong-Yun Sun* (Seoul National University)

Keywords: soft robots, 3d printing, multi-environmental nevigation

Microrobots are expected to push the boundaries of robotics by enabling navigation in confined and cluttered environments due to their sub-centimeter scale. However, most microrobots are designed for specific conditions, limiting their versatility and requiring complete redesign and fabrication for new tasks or environments. Here, we introduce design and fabrication strategies to create microrobots capable of navigating multiple environments, interacting with other robots and humans in real time, and performing demanding tasks through multi-unit collaboration. For efficient structural and functional adaptation, the microrobots were subdivided into a main body and three types of modules that can be independently designed, fabricated, and replaced. For the fabrication of the wide range of mesoscale components required for the modular microrobots, we utilized digital light processing multimaterial (DLPM) 3D printing technology capable of simultaneously printing multiple photocurable resins ranging from soft to stiff and conductive to dielectric. By simply swapping modules, the developed microrobots swiftly navigated a wide range of environments—including smooth, rough, granular, and aquatic terrains—and facilitated real-time control of other robots' movements or automatically avoided collisions with humans. Additionally, by leveraging the synergy between modular design and DLPM 3D printing technology, which enables the mass production of the main body and modules, the microrobots demonstrate multi-unit collaboration, enhancing speed, force, and control, beyond limits of single-unit robots. Our work presents a design strategy for microrobots that ensures optimal performance across a wide range of environments and tasks with minimal cost and effort, along with the multimaterial mesoscale fabrication technology to implement this strategy.

제33회 피로 및 파괴 심포지엄
Room 402A, 4월 23일

[피로1-1 | 09:00]
파괴인성 인자 K1si에 미치는 시편 크기 및 균열 길이의 영향: 김형규, 장현수, 최현선, 민기득* ((주)피레타)
Keywords: 파괴인성, K1si, 시편 크기, 잔여 ligament

파괴인성은 재료의 균열 확산에 대한 저항성을 파악할 수 있는 인자이며, 건전성이 보장되어야 하는 항공 우주 및 발전소 등에서 널리 활용되고 있다. 파괴인성 평가는 ASTM E399, ASTM E1820에 따라 진행하며, ASTM E399의 경우 K1c 시험에 대해 언급하고 있다. 유효한 K1c 값을 얻기 위해서는 충분한 시편 크기와 유효성 검증 항목들을 통과해야 한다. 하지만 현장 부품에서 시편을 채취하는 경우 시편 크기가 제한되며, 이로 인해 유효성 항목 또한 충족하지 못하는 경우가 많다. 최근 시편 크기 영향을 줄이기 위해 ASTM E399에서는 K1si를 제안하고 있다. K1si는 K1c 비해 KQ 값 산출 시 잔여 ligament에 따른 영향을 적게 받는 차이점이 있다. 여러 문헌에서 유효한 K1si 결과를 언급하고 있지만, 일부 합금의 결과만 존재하며 실제 적용을 위해서는 추가 검증이 필요하다. 그리하여 이번 연구에서는 K1si 검증을 위해 시편 크기, 잔여 ligament를 변수로 두고 시험을 진행하였다. 그리고 K1c 해석 결과와 비교하여 유효한 파괴인성 값을 얻을 수 있는지 확인하였다. *본 연구는 공군 항공기술연구소와 공동으로 진행되었습니다.

[피로1-2 | 09:15]
KF-21 주익-동체 체결부의 손상허용 설계 요구도 검증을 위한 구조시험 및 평가: 강효주*, 신재훈 (한국항공우주산업(주))
Keywords: KF-21, 주익-동체 체결부, 손상허용시험, 구조시험

KF-21 항공기 기체 구조물의 내구성 및 손상허용 요구도 입증을 위해 개발 과정에서 기체 구조물에 대한 해석과 시험을 동시에 수행하고 있다. 시험은 전체 구조물을 사용하여 내구성을 검증하는 전기체 내구성 시험과 주요 영역 8가지 구성품에 대한 내구성 및 손상허용시험을 수행하고 있으며, 그 중 주익-동체 체결부 손상허용시험은 설계하중 스펙트럼에 대한 주익-동체 체결부 구조물의 손상허용능력을 검증하기 위해 수행하는 시험이다. 주익-동체 체결부 구조를 모사하기 위해 주익 구조물과 일부 동체의 구조물로 구성된 시험체를 제작하였으며 주익박스, 조종면, 파일런 영역에 23개의 엑추에이터가 사용되었다. 또한, 주익 구조물 주요 부위에 미리 요구도에 따른 인공 결함을 생성한 후 2배수 스펙트럼 하중을 가하는 손상허용시험과 인공결함이 스펙트럼 하중으로 인해 성장한 후 설계 제한 하중을 버틸 수 있는지를 확인하는 잔류강도 시험을 수행하였다. 시험 중 얻어진 데이터는 주익-동체 체결부의 손상허용 능력을 검증하고, 양산 항공기 구조 건전성 보장을 위한 기초 자료로 활용될 예정이다. 본 연구에서는 이러한 주익-동체 체결부 손상허용 시험을 진행한 일련의 과정에 대해 소개하고자 한다.

[피로1-3 | 09:30]
앨리먼트 손상허용 시험-해석 결과 분석을 통한 항공기 구조설계 적용 사례: 추헌호*, 양성현, 배경동 ((주)한국항공우주산업), 석무영, 권용남 (한국재료연구원), 박태규 ((주)한국항공우주산업)
Keywords: structural design, dyrability and damage tolerance life requirements, element damage tolerance test, control point, crack growth life analysis

항공기 기체는 복합적인 하중을 전달하고 견디도록 설계되어 있는 동시에 항공기 특성상 중량을 최소화하기 위해 최적화 설계되어 있다. 이러한 구조설계(Structural design) 개념을 가진 항공기는 개발단계에서 기체 구조의 내구성 및 손상허용 수명 요구도(Durability and damage tolerance life requirements)를 만족해야 하고, 시편 단위의 쿠폰 시험(Coupon test)부터 동체 단위의 구성품 시험(Component test), 그리고 항공기 전체 형상으로 구성된 전기체 시험(Full-scale test)을 통해 항공기가 요구도를 만족하는지 입증하는 과정을 거치게 된다. 본 논문에서 언급하는 앨리먼트 손상허용 시험(Element damage tolerance test)은 구조설계 개발 시험 항목 중 일부로써 본격적인 구성품 시험 착수 전에 단순 시편 또는 부분 구성품 수준에서 수행하는 시험으로 구조설계의 적합성을 입증하고, 적용된 해석 방법의 적절성을 검증하기 위한 시험이다. 그러나 본 논문에서의 앨리먼트 시험은 항공기 수직미익-동체 체결부 손상허용 시험 수행 중에 발생된 국부적인 구조설계 변경 건에 대하여 적합성을 추가 입증하기 위해 수행되었다. 전기체 기준으로 국부적인 구조설계 변경 부위를 식별하여 부위 특성별로 앨리먼트 시험을 수행하였고, 본 논문에서는 특정 부위 1군데를 선정하여 앨리먼트 시험 수행 후 구조설계 적합성을 입증한 사례를 소개한다. 구조설계 변경된 주요 부위(Control point)에 대하여 항공기 설계 단계에서 수행된 균열 성장 수명 해석(Crack growth life analysis) 결과를 기반으로 수명 요구도를 만족하는 시편 형상으로 설계 및 제작하였고, 요구 수명 동안 초기 균열이 치명적인 파손을 유발하는 임계 균열 크기까지 성장하는지 확인하여 설계 형상의 구조 건전성을 입증하였다. 향후 항공기 구조물에 대해 국부적인 설계변경이 불가피할 경우, 본 논문에서 다룬 앨리먼트 시험 방법을 이용한다면 구조설계의 적합성을 입증하는 데 유용할 것으로 예상된다.

[피로1-4 | 09:45] 초청강연
센서나 게이지없이 피로균열성장 시험을 수행하는 혁신적 방법: 이봉상* (한국원자력연구원)
Keywords: 피로균열성장시험, 탄성해중법, 시험기변위, 예비피로균열, 자동화

피로균열성장 시험 중 균열성장량 측정을 위해서는 시편에 COD 게이지를 부착하여 탄성해중법을 적용하는 절차가 표준화되어있다. 하지만 고온/부식 환경 등 게이지를 사용하기 어려운 극한환경에서는 표준방법을 적용하기 어려운 한계가 있다. 본 강연에서는 COD

게이지의 부착없이 시험기의 stroke 변위 데이터를 이용하여 피로균열성장 시험시 시편의 컴플라이언스 변화를 정밀하게 측정해내는 획기적인 방법을 소개하고자 한다. 시험기의 stroke 변위에는 시험편의 균열에 의한 변형 이외에 시험기 체결부의 비선형 탄성변형 및 연결부의 탄소성 압입변형 등이 포함되므로, 이를 적절하게 보상해야 한다. 시험기 체결부의 비선형 컴플라이언스와 시험편 하중점의 탄소성 압입변형을 소프트웨어로 보정하면, 체결된 시험편 자체가 머신컴플라이언스 결정을 위한 기준점이 되므로, 본 방법의 적용을 위해 시편의 초기 노치 길이와 탄성계수 이외에 다른 정보나 장치는 필요없다. 개발된 이론의 적용을 위해 피로 싸이클 도중 주기적으로 탄성해중을하여 총 stroke compliance 선도의 변화를 측정하고, 이를 분석하여 현재의 균열길이를 결정함과 동시에 필요한 경우 피로하중을 제어할 수 있는 시험분석 software를 개발하였다. 해당 소프트웨어는 대표적인 피로시험기인 유압식 MTS의 TestSuite Multipurpose Testware 플랫폼에서 작동하도록 프로그래밍하였다. 탄성계수가 서로 다른 세가지 재료(저합금강, 스테인리스강, 알루미늄)에 대해 검증시험을 통해 균열성장 측정의 정확도가 COD 게이지 혹은 9점 측정 육안검사 결과와 거의 등등함을 확인하였다. 제안된 방법은 시편에 아무런 부가장치를 부착할 필요가 없으므로, 고온/부식/방사선 등 게이지 부착이 어려운 시험환경에서 특히 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 결론적으로, 다음과 같이 센서나 게이지를 사용하지 않는 피로균열성장 시험평가 시스템을 구현하고 검증시험을 통해 성능을 확인하였다 - (1) 고온에서 일정하중진폭 피로균열성장율시험 시스템, (2) 파괴역학 시편의 예비피로균열 생성 자동화 시스템.

[피로2-1 | 10:20]

항공기 구조 피로수명관리를 위한 표준비행데이터 적용 효과 연구: 정민지*, 이호용, 박정규, 장문호, 박재민 (한국항공우주산업(주))

Keywords: ASIP(항공기 구조 건전성 프로그램), IAT(개별 항공기 추적), SFD(표준비행데이터), EFH(등가비행시간)

항공기체는 운용 기간 동안 복잡하고 다양한 피로 하중을 반복적으로 받고 이는 균열 발생 및 진전, 구조 강도 저하 등을 야기한다. 이러한 피로 현상으로부터 대형 항공 사고를 예방하여 항공기를 안전하게 운용하기 위해 ASIP(Aircraft Structural Integrity Program, 항공기 구조 건전성 프로그램)의 개념이 도입되었다. ASIP 도입으로 인해 초기 정하중 관점의 항공기 구조 강도기반 설계 개념에 피로 요구도를 고려한 설계·개발·운영 개념이 추가되고, 운용 항공기의 구조 특성 파악을 통해 예정 정비를 가능하게 되었다. ASIP의 IAT(Individual Aircraft Tracking, 개별 항공기 추적)은 운용 항공기의 비행 및 정비 데이터를 획득 및 평가하여 항공기 구조 계획 및 변경 등 운용에 대한 의사결정에 정량적인 정보를 제공하는 업무이다. 피로 수명 추적이 필요한 CP(Critical Point) 대상 균열 성장해석을 수행하여 적절한 구조 정비 및 검사 주기를 설정하기 위해서는 운용 비행자료가 필요하다. 일반적으로 항공기에는 FDR(Flight Data Recorder, 비행데이터 저장장치)가 장착되어 운용 비행자료를 기록한다. 하지만 실제 운용 환경에서는 데이터 누락, 노이즈 등의 문제로 균열 성장해석 입력자료로 활용 불가능비행자료가 다수 발생한다. 부재 혹은 비유효한 실제 비행자료를 대체하기 위해 표준비행데이터(SFD, Standard Flight Data) 개발이 필요하고, 본 연구 대상 항공기의 표준비행데이터는 사전에 개발되었다. 본 연구에서는 총 5개 호기의 19,650회 및 20,844시간 비행데이터를 사용하였다. 대상 항공기의 IAT CP 12개를 대상으로 균열 성장해석을 수행하고 해석 결과인 균열길이를 기준 균열 성장곡선에 투영한 등가비행시간(EFH, Equivalent Flight Hour)을 산출하였다. 대상 항공기에 적용된 구조 정비 및 검사 주기 산출 알고리즘을 기준으로 IAT CP의 균열 성장률이 기준 대비 유사 및 가혹할 경우, 보수적 운영이 가능하다. 표준비행데이터를 비율 별로 대체하여 산출한 등가비행시간을 평균한 결과, 11개의 IAT CP에서 실제 비행자료가 약 80% 이상(표준비행데이터 대체 비율 20% 미만)인 경우, 양의 등가비행시간을 가져 보수적으로 구조 정비 및 검사 주기 산출이 가능함을 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 대상 항공기의 적정 표준비행데이터 대체 가능 비율은 군사 표준에서 권고한 유효 비행데이터 비율 90% 기준 대비 관대하다. 대상 항공기의 현재 운용 상태 기준 11개의 IAT CP는 보수적으로 구조 정비 및 검사 주기를 계획하고 있다. 본 연구를 통해 항공기 개별 기종의 유효 비행데이터 비율 기준을 설정할 수 있고, 이를 통해 안전하고 효율적인 항공기 운영에 기여할 수 있다.

[피로2-2 | 10:35]

항공기 구조 수명관리 Airframe Digital Twin 적용을 위한 개발 전략 수립 - 무기체계 디지털 트윈 활용 지침 적용과 분석기법 위주로: 장문호*, 박정규, 이호용 (한국항공우주산업(주))

Keywords: Aircraft Structural Integrity Program(항공기 구조건전성 프로그램), Digital Twin(디지털트윈), Individual Aircraft Tracking(개별항공기추적), Load/Environment Spectra Survey(운용도분석), Crack Growth(균열성장)

군용 항공기는 MIL-STD-1530 ASIP(Aircraft Structural Integrity Program, 항공기 구조 건전성 프로그램)에 의거 임무에 따른 기동에 의해 저장되는 비행데이터를 기반으로 항공기 운용도와 각 호기별 정비주기를 분석하여 운용되고 있다. 이러한 항공기 운용에 대한 분석 결과는 운영 및 유지보수에 직결되는 사항이다. 최신 항공기 개발국에서는 기존 확정론적 수명 해석을 적용한 수명관리를 포함하여 더욱 정확하고 신뢰도 있는 정비주기를 예측하여 운용 유지비 절감에 기여하고자 Airframe Digital Twin을 적용한 항공기 구조 수명관리 기법을 개발하여 시범기술 연구를 수행해오고 있다. Airframe Digital Twin은 각국에서 기존 운용되고 있는 항공기(Legacy)의 일부 구성품을 활용하여 균열을 탐지하고 이를 ASIP 기준 문서에서 언급하고 있는 Structural Risk Analysis(SRA)을 적용하여 확률론적 균열 성장 해석에 의한 정비주기를 제시하는 방식이다. 국내 운용 항공기 수명관리에 Airframe Digital Twin 개발을 위해서는 무기체계에 적용되는 디지털 트윈 활용 지침을 준수하고 기준이 되는 문서를 파악 후 적용해야 한다. 또한 최근 각 산업에는 AI와 Machine Learning(ML)을 활용하여 절차 및 시간을 감소하고 정확도를 개선하기 위해 노력하고 있다. 항공 분야 또한 방대한 운용 데이터를 기반으로 AI와 ML을 활용하여 효율을 높이는 노력을 하고 있고 Airframe Digital Twin으로 이어질 수 있다. 본 논문에서는 국내 운용 중인 항공기에 대해 Airframe Digital Twin을 적용 개발 전략을 수립하기 위해 무기체계 디지털 트윈 활용 지침 적용과 AI와 ML을 활용한 분석 기법 방안에 대해 검토하였다. 향후 개발 전략을 기반으로 장기적으로 구체화된 항공기 구조 수명관리용 Airframe Digital Twin 통합 모델을 구현할 예정이다.

[피로2-3 | 10:50]

항공기 구조물 변형률-수명 피로해석 기법 적용에 대한 검토: 양대규*, 권정식, 서창보 (한국항공우주산업(주))

Keywords: Stess-Life Fatigue Analysis(응력-수명 피로해석), Strain-Life Fatigue Analysis(변형률-수명 피로해석), Mean Stress Correction(평균응력 보정), Cycle Counting, ASTM E606/E739

본 논문은 구조물의 균열생성(Crack Initiation) 예측에 사용되는 변형률-수명(Strain-Life) 피로해석에 대하여 개발 및 운용항공기 구조물에 적용한 사례들을 확인하고, 해당 사례에서 적용된 주요 기법들에 대하여 고려되어야 할 주요 인자들에 대하여 검토한다. 또한, 응력-수명(Stress-Life) 피로해석과 변형률-수명 피로해석의 차이를 분석하고 항공기 구조물 해석 시 각 기법에 따른 피로수명의 변동성과 주요한 인자들을 검토한다. 변형률-수명 피로해석은 재료의 탄성한계 내에서 적용되는 낮은 응력 수준의 고주기 피로(High Cycle Fatigue) 특성뿐만 아니라, 소성영역 근방의 높은 응력 수준, 즉 저주기 피로(Low Cycle Fatigue) 특성까지 포함하여 피로수명을 계산할 수 있다. 또한, 항공기 구조물에 가해지는 복잡한 응력 상태를 고려하기 위해 적용되는 평균응력 보정(Mean Stress Correction) 방법은 기존의 응력-수명 선도에서 개발되었던 방법을 포함하여 여러 형태로 개발되어 왔다. 대표적인 평균응력 보정식은 Morrow, SWT, 그리고 Walker 식과 더불어 항공기 제작사에 의해 개발되고 채택된 개별 경험식이 존재하며, 이들의 적용 사례를 통해 각각의 특성을 분석한다. 항공기 구조물에 적용되는 복잡한 응력 스펙트럼을 단순화하는 다수의 Cycle Counting 방식들이 존재하며, 각 방식들을 비교하고 이에 따른 구조물 손상지수(Damage Index) 변동성을 분석한다. 응력 스펙트럼에 포함되어 있는 평균응력 효과를 고려하기 위해 각각의 평균응력 보정식에 의한 손상지수 변동성을 분석하고 문헌을 검토하여 주요 변수를 설정한다. 재료 변형률-수명 선도에서의 인자, Cycle Counting 방식에 따른 인자 그리고 평균응력 보정 방식에 의한 인자들을 분류하고, 해당 인자들이 구조물 손상지수와 피로수명에 끼치는 영향을 비교 분석하여 주요 인자를 재선별한다. 이를 통해 재료물성 DB의 구축과 항공기 구조물 해석 시 설정되어야 할 주요 인자들을 선별한다. 피로수명에 주요한 영향을 미치는 인자들에 대하여 상용 변형률-수명 피로해석 프로그램의 가용 기능과 제한사항을 비교하고 사용자 정의 프로그램의 개발현황과 방법을 소개한다. 변형률-수명 해석용 재료물성 DB를 구축하고 평균응력 효과를 검증하기 위해 ASTM E606, E739에 기반한 시편설계 방법, 시험에서 고려되어야 할 주요사항과 시험 절차를 소개한다. 재료물성 DB를 구성하는 인장물성, Cyclic Stress Strain 선도, 그리고 변형률 수명 선도를 산출하기 위한 시험 데이터 분석법을 제시한다. 결론적으로 향후 항공기 구조물 피로해석 수행 시 수행되는 응력 스펙트럼의 분석, Cycle Counting, 평균응력 보정 과정에서 반드시 고려되어야 할 주요 인자들에 대하여 앞서 검토된 사례들을 기반으로 적합성을 평가하고, Guide Line을 제시한다.

[피로2-4 | 11:05]

인공지능 기반 F-15K 항공기 피로수명 예측 연구: 양지민, 김남규, 이홍철 (공군 항공기술연구소)

Keywords: 피로수명 해석, 항공기 피로취약 부위, 균열성장 해석, 인공지능

본 연구는 인공지능(Artificial Intelligence, Al) 기반 F-15K 항공기의 피로수명 예측에 관한 것으로, 비행 파라미터와 피로손상계수간 학습을 통해 Al 모델을 생성하여 항공기 피로취약 부위별 피로수명을 예측하였다. 현재 F-15K 항공기의 피로수명은 비행 파라미터 및 부위별 하중/응력 스펙트럼을 활용하여 제작사(Boeing) 개발 프로그램을 통해 계산된다. 하지만, 각 프로그램에 내재된 세부 알고리즘에 대한 접근 제한과, 도래하는 4차 산업혁명에 대비해 데이터 기반 AI 기술을 활용한 항공기 수명관리 연구 수행 필요성의 대두에 따라 본 연구를 수행하였다. F-15K 항공기 수명관리 장비에 저장되는 다량의 데이터 중 유의미한 변수를 식별하여 학습에 활용하였으며, 불필요한 변수 제거, 스케일링 수행, 파생변수 생성 등의 데이터 전처리 과정을 수행하여 학습 정확도를 높이고자 하였다. 이때, 각 비행 파라미터 (고도, 수직하중배수, 마하수 등) 뿐만 아니라, 항공기 호수, 임무, 비행일자 등의 데이터를 추가로 활용하여 학습을 수행하였다. F-15K 항공기의 피로취약 부위 총 75개에 대해 학습을 진행하여 피로손상 계수를 예측하였으며, 실제 값의 분산 대비 예측값의 분산 비율을 나타내는 결정계수(R-squared, R^2)값을 통해 평가를 수행하였다. R^2값은 부위별로 상이하게 나타났으나, 대체적으로 높은 정확도로 피로손상 값을 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 부위별 손상계수 값에 영향을 많이 끼치는 주요 변수도 파악할 수 있었으며, 주로 수직하중배수나 속도의 영향을 많이 받았으나, 받음각, 비행시간, 항공기 호수 등의 영향도 받는 것으로 나타났다. 제안하는 본 연구의 내용이 향후 AI와 연계한 항공기 수명관리 분야에서 활용되어 효율적인 정비 활동을 수행할 수 있기를 기대한다.

[피로2-5 | 11:20]

변형률-수명 방법을 이용한 높은 인장 응력을 받는 항공기 구조물의 피로 수명 평가: 김건욱*, 양대규, 권정식, 서창보 (한국항공우주산업(주))

Keywords: 변형률-수명 방법, 피로 수명 평가, 높은 인장 응력

반복적인 피로 하중을 받는 항공기는 수명 평가가 필수적으로 요구되며, 그 기준이 지속적으로 강화되고 있다. 항공기 구조물의 수명 평가 방법으로는 응력-수명 방법, 변형률-수명 방법 그리고 선형탄성 파괴역학적 방법이 있으며, 구조물의 재료나 비행 안전 특성에 따라 적용 방법이 달라진다. 선형탄성 파괴역학적 방법은 존해하는 초기 균열에 대하여 적용하는 응력에 의한 균열 성장 예측에 사용되며, 응력-수명 방법은 구조물에 작용하는 응력이 재료의 탄성 영역 내에 있을 때 주로 사용된다. 본 연구에서는 수명 평가 부위에 초기 균열이 없고 높은 응력이 작용함에 따라 변형률-수명 방법을 사용하였으며, 이 방법은 수명 평가시 탄성 변형률뿐 아니라 소성 변형률도 고려하기 때문에 응력에 의해 재료에 소성 변형이 생길 때 응력-수명 방법보다 정확도가 높다. 이를 고찰하기 위해 수명 평가 부위에 대해 응력-수명 방법, 변형률 수명 방법에 따른 수평 평가 차이를 비교하하였다. 본 연구에서는 탄성 응력 기반 변형률-수명 해석을 수행하는 절차를 정리하고 이를 항공기 내구성 시험체에 적용하여 시험 결과와 비교하였다. 응력 스펙트럼은 선형 탄성 해석으로 얻어진 응력과 수명 평가 부위의 하중 스펙트럼으로 생성하였다. 하중 스펙트럼은 항공기 기동에 따른 하중의 변화를 나타내는 것으로 가변 진폭으로 구성되어 있다. 가변 하중 스펙트럼을 받는 구조물의 수명을 예측하기 위해서는 유효한 하중

이력을 산출하는 것이 중요하며, 이를 위해 다양한 사이클카운팅 기법이 개발되었다. 대표적인 사이클카운팅 기법으로는 Range-pair, Rainflow 사이클 카운팅 기법 등이 있으며, 본 연구에서는 응력 스펙트럼에서 가장 큰 응력 사이클을 정확하게 식별하고 모든 닫힌 사이클을 식별하기 위해 simplified rainflow 사이클 카운팅 기법을 사용하였다. 생성된 응력 스펙트럼은 탄성 응력이므로 Neuber's rule과 Ramberg-Osgood 방정식 형태의 Cyclic stress-strain curve를 사용하여 탄소성 응력으로 변환하였고 이력효과 또한 반영하였다. 식별된 사이클에 대한 변형률 진폭과 재료의 Strain-Life curve를 이용하여 구조물의 수명을 평가하였다. 실제 구조물에서는 하중이 단순한 완전교번응력으로 작용하지 않기 때문에 평균 응력의 영향을 고려해야 정확한 피로 수명 예측이 가능하다. 따라서 SWT(Smith-Watson-Topper)방정식을 이용하여 평균응력보정을 수행하였으며, 평균응력보정 방식에 따른 수명 차이도 고찰하였다. 대표적인 평균응력보정 방정식 중 하나인 SWT방정식은 인장 응력이 피로 손상에 미치는 영향을 강조하며, 주로 높은 인장 응력이 작용하는 구조물이나 균열 발생 가능성이 높은 부위의 피로 해석에서 Morrow 방정식보다 정확도가 높다. 본 연구에서는 항공기 내구성 시험체에서 블렌딩 처리 된 균열 부위에 대하여 응력-수명, 변형률-수명 방법을 적용하여 수명 평가하고 실제 시험과 비교하였다. 변형률-수명 해석에 영향을 미치는 인자들과 기법들을 소개하고 그들에 따른 수명 차이를 고찰하였다.

[피로3-1 | 14:00] 초청강연

Approaches to Fatigue Life Estimation of Aircraft Structures Implementing Quantitative Fractography: Hongchul Lee* (Aero Technology Research Institute, Logistics Command)

Keywords: Quantitative Fractography, Fatigue Crack Initiation Life, Flight Spsectrum, Striation

Fractography is a technique used for studying the cause of failed parts with the aid of high resolution photographs of fractured surfaces. Its main focus is to study the cause of failure by observing the origin of a crack or fracture in the part due to various reasons like inclusions, voids, foreign materials, and points of stress concentrations. Especially, quantitative fractography extracts physical measurements such as fatigue crack propagation life, assumed initial flaw size for Nondestructive inspection, deducing the associated fatigue crack initiation life, and quantification of the effect of surface conditions on fatigue crack initiation life by correlation of such features with specific spectrum load conditions. In this presentation, several quantitative fractographicmethodologies are suggested to estimate structural fatigue life of military aircraft. Also, the information obtained from quantitative fractography has been used to understand failures, develop prediction methodologies to avoid further failures, define inspection intervals, and optimize the design of repairs.

[피로3-2 | 14:25]

Influences of microstructure and oxidation processes on fatigue failure mechanisms in advanced turbine disc Ni-based superalloy: Donghyuk Kim* (Hanwha Aerospace)

Keywords: Ni based superalloy, High temperature fatigue, Dwell fatigue, Material characterisation

Aircraft gas turbine disk components are subjected to extreme temperatures above 700ºC and high mechanical loads, causing both mechanical and chemical degradation. To endure these conditions, Ni-based superalloys, known for their exceptional high-temperature strength and resistance to oxidation and corrosion, are commonly used in gas turbines. This study investigates the microstructure of Ni-based superalloys and examines the relationship between microstructural characteristics, controlled through heat treatment, and mechanical properties, with a focus on fatigue crack initiation, propagation mechanisms, and overall fatigue life. Fatigue tests were conducted under varying loading conditions, including high- and low-frequency cyclic loading with sinusoidal and trapezoidal waveforms (to understand dwell fatigue mechanism) at elevated temperatures. Microstructural analysis was carried out using conventional 2D imaging techniques, such as optical and electron microscopy, alongside advanced 3D imaging techniques via non-destructive X-ray computed tomography (CT) scanning. The findings of this study enhance the understanding of fatigue behaviour in Ni-based superalloys, providing insights for the development of next-generation materials with improved durability and performance in gas turbine applications.

[피로3-3 | 14:40]

고온 환경에서의 터빈 블레이드 수명 예측 연구: 김홍석 (서울대학교), 김영찬 (공군 항공기술연구소), 김도년* (서울대학교)

Keywords: 수명 예측, Creep, Fatigue, Dynamic Bayesian Networks (DBNs)

일반적으로 고온에서 작동하는 부품은 수명 제한 품목으로 지정되어 부품의 상태와 관계없이 제작사에서 설계단계에서 결정한 수명에 이르면 신품으로 교체한다. 하지만 설계 시 고려한 운영 조건과 실제 운영환경의 차이가있고, 경제적인 비용 절감을 위해 운영단계의 데이터를 분석하여 수명 재평가가 필요하다. 본 연구에서는 엔진 부품 중 가장 작동 환경이 가혹한 터빈블레이드에 대한 수명예측 연구를 수행하였다. 터빈 블레이드의 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 것은 고온에 의한 Creep와 반복 하중에 의한 Fatigue Damage이다. 열-구조 해석을 통해 작동 환경에서의 온도 분포와 회전 속도에 의한 열응력 분포를 구하고. 이를 이용하여Creep 수명. Fatigue 수명해석을 통해 블레이드의 취약 부위를 식별하였다. 식별된 취약 부위에 대한 수명평가는 시간에 따른 블레이드의 열화를 반영하기 위하여 Dynamic Bayesian networks를 사용하였다. Creep. Fatigue Damage 하에서 터빈 블레이드의 등가 수명 분포를 구축하고, 사용 시간에 따른 블레이드의 터빈 확률을 통해 최종 수명을 예측하였다._ 또한 운영 환경. 재료물성치 등에 의해 발생할 수 있는 불확실성을 감소시키기 위해 실제 엔진 운영 시간에 따른 균열 길이 데이터를 이용하여 수명예측 모델을 Calibration하였다. 이를 통해 기존 설계단계에 제작사에서 설정한 수명보다 약 1.5배 긴 수명을 사용할 수 있을 것으로 예측되었다.

[피로3-4 | 14:55]

KF-21 전기체 내구성 시험의 2배수 완료 결과 (2nd Life Result of the KF-21 Full Scale Durability Test): 이호혁*, 윤성진, 추헌호, 심호진, 박태규, 서창보 (한국항공우주산업(주))

Keywords: Full Scale Durability Test, Crack Growth, Inspection, KF-21, Trend Monitoring

KF-21 항공기 기체 구조물의 내구성 입증을 위해 2022년부터 전기체 내구성 시험을 진행 중 이다. 약 40개월 동안 설계수명의 2배수에 해당하는 스펙트럼 하중을 시험체에 부가하여 광범위한 피로 손상이 발생하지 않음을 입증하고, 해석 또는 다른 구성품 시험에서 식별되지 않은 기체 구조물의 잠재적인 피로 취약 부위를 식별하기 위함이다. 또한 이를 통해 얻은 결과를 양산 설계에 반영하고 해석 보정을 위한 시험데이터도 확보 하는 것 또한 주요 목적이다. KF-21 전기체 내구성 시험체는 단좌 형상이며 일부 계통 구조물들은 더미 형상으로 대체되었지만, 별도의 구성품 시험으로 검증되는 수평 미익과 기타 비구조물을 제외하면 완전한 기체 구조물이다. 이 시험체 구조물의 전역에 약 3,000여개의 변형률 게이지와 변위 게이지를 부착하여 스펙트럼 시험하중에 대한 시험체의 데이터를 획득하고 있다. 이렇게 얻은 데이터로 시험체의 응력 분포 및 하중경로 변화를 상세분석과 실시간 트렌드 모니터링으로 시험체에서 발생 할 수 있는 손상을 조기에 발견 할 수 있다. KF-21 설계 운용하중 스펙트럼은 임무 묘사도 및 운용도에 기반을 둔 비행 대 비행(Flight by Flight) 하중 스펙트럼이며, 단위 블록으로 구성된 하중 스펙트럼을 설계 수명기간동안 반복해서 부가하는 형태이다. 하지만 설계 운용하중 스펙트럼을 시험에 그대로 사용하게 되면 시험 기간이 지나치게 길어지기 때문에 스펙트럼 응축 과정을 거친 작동기 시험하중으로 변환하여 부가한다. 또한 제한된 수량의 작동기로 외부하중을 모사해야 하므로 수명 영향성을 고려하여 주요 위치의 주요 하중 성분을 선택적으로 모사한다. 이렇게 단위 블록 하중 부가와 주기 검사 및 변형률 데이터 분석을 반복적으로 수행하였고, 2배수 시험 종료 후 검사에서도 광범위한 피로손상이 발생하지 않았다. 본 연구에서는 이러한 시험체 형상, 시험셋업, 시험하중생성, 시험절차 및 주기검사 결과 등의 일련의 과정과 2배수까지의 시험결과를 설명하고자 한다.

[피로4-1 | 15:20]

육군 군용 헬기(AH-1S) **Cross Tube 파단 발생원인 분석 연구**: 권혁준, 이홍철 (공군 항공기술연구소)

Keywords: 알루미늄 합금, 이방성, 압출성형 , 입계균열, 피로파단

AH-1S 코브라 군용 헬기는 '88년 도입된 대한민국 국군 최초의 공격 헬기로 수십 년간 육군 작전에 주요하게 투입되었다. 본 연구는 AH-1S 후방 Cross Tube 파단 원인을 분석한 것으로 손상은 지상 작동검사를 위한 이동 중 발생하였다. 아치 형상의 Cross Tube는 전/후방 각 1개씩 동체 하부 Support 에 장착되며 Landing Gear 역할을 수행하며, 이/착륙시 발생하는 하중을 견디는 구성품이다. 파단은 동체에 장착되는 지점에서 약 45도 기울기로 일어났는데, 손상 Cross Tube는 재질 규격상 압출 성형된 Al 7075-T6의 문헌상 경도값과 유사하였으며, 채취된 시편의 미세조직 관찰결과, 비정상적인 결정립 및 석출상 내부 균열 등의 결함은 확인되지 않았다. 파단면은 전체적으로 일시파단면을 보였으나, 하부쪽에서 전체 파면 대비 약 20% 정도 입계파면이 함께 관찰되는 피로 파면이 확인되었으며, 형성된 파단면 형태에 따라 세 가지로 구분되었다. 피로 균열 Origin을 포함한 파단면을 수직으로 절단하여 관찰한 결과, 피로 균열이 시작되기 전 이미 입계균열이 수 mm 발생하였으며, 특히 파단면의 형태가 구분되는 부분에서 입계균열이 주 파단면과는 다른 방향으로 진전되었음이 확인되었다. 압출 성형된 Al 7075-T6의 경우, 압출방향과 하중 방향에 따라 충격 및 인장강도가 다른 이방성의 띄며, 거시적으로는 하중 방향의 45도로 파단면이 형성되나, 0도의 경우, 미시적 파단면은 결정립을 따라 균열이 전파되는 입계파단의 특징을 보인다. 따라서 Cross Tube는 초기 재료의 파단(충격)강도를 상회하는 높은 하중이 순간적으로 작용함에 따라 입계균열이 형성되고, 이후 운용 간 발생한 다소 작은 하중에 의해 피로균열이 진전되어 최종적으로 파단된 것으로 판단되었다.

[피로4-2 | 15:35]

초음파 공진 피로시험편 형상에 따른 Al-Si 주조합금의 고주기 피로특성평가: 윤상일, 최지석, 송호섭 ((주)삼기), 박재순 ((주)한국주조산업), 이지용, 강희삼 (현대자동차), 조인식* (선문대학교)

Keywords: 초고주기 피로, 피로파괴, 피로결함, 초음파 공진 피로

알루미늄 다이캐스팅 합금의 피로수명 평가에서 가장 중요한 내용은 가속화되는 부품수명향상과 더불어 재생소재에 대한 내구성 확보가 최근 중요한 연구이면서 현장에서 필요로 하고 있는 실정이다. 이러한 피로수명을 결정하는 인자로는 다양한 주조결함으로써 주조결함을 최소화하기 위한 많은 공정개선 기술들을 개발하여 그에 따른 결함의 크기와 형상 또한 다양하고 미세화 되고 있을 뿐 아니라 결함을 정확하고 쉽게 평가할 수 있는 기술 또한 적극적으로 개발 활용 중에 있다. 이러한 평가 기술 중 전통적인 피로시험은 정확한 결함을 기점으로 수명을 평가할 수 있는 방법이지만, 고주기 피로수명을 평가하기에는 장시간이 걸릴 뿐만 아니라 시편 제작 또한 정밀해야 정확한 평가가 가능하다는 단점을 가지고 있다. 최근 고주기 이상의 피로수명을 평가하는 방법 중 20KHz의 초음파 공진 피로시험 방법이 있으며, 다양한 합금 소재를 대상으로 쉽게 시험편 공진설계가 가능하며, 정확하고 빠른 시험결과를 도출할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 Al-Si 주조합금에 대한 주조결함의 수명평가를 위한 방법으로 유압식(20Hz)과 초음파 공진(20KHz) 피로시험평가를 하기 위한 시험 조건으로 동일한 응력비(stress ratio : R=-1)와 동일한 시편 규격으로 평가하여 주파수 영향에 따른 영향을 평가를 할 뿐 아니라 피로응력대 교정을 통하여 초음파 공진피로 시험편 형상에 따른 고주기 피로파괴 거동을 분석하고자 하였다.

[피로4-3 | 15:50]

배열회수보일러 P92 배관 손상 분석 및 변형 모니터링: 이한상*, 한수지 (한전 전력연구원), 이승욱 (한국서부발전), 이길재, 박진근 (한국동서발전)

Keywords: 내열강, 열피로, 압력용기, 보일러

기동정지 및 부하변동이 확대되는 유연운전 환경 하에서 발전소 배관 및 압력용기는 기존 크리프 뿐 아니라 열피로 손상이 가중된다. 최근 J-class 가스터빈 배열회수 보일러 내 재열증기 배관에서 분기된 start-up vent 배관에서는 P92 모재와 보수용접부에서 균열이 발생하였으며, 손상분석을 실시하였다. 단면 미세조직 분석결과 균열은 열피로손상이 지배적인 형태로 결정립 내로 성장하였으며 주위 결정립계를 따라 성장방향이 변화하지 않았다. 손상 원인규명과 수명평가를 위하여 배관 손상부에서 기동정지와 정상운전 시 온도와 변형량을 측정하였다.

[피로4-4 | 16:05]

PT-6A-62 엔진 CT 블레이드 고온 부식 발생 메커니즘 연구: 조형진*, 이병현, 이홍철 (공군 항공기술연구소)

Keywords: 군용기, 엔진, 블레이드, 고온부식

본 연구에서는 군용항공기 중 KT-1 항공기 주기검사 間 확인된 PT-6A-62 엔진 압축기 터빈 블레이드(CT Blade) 표면 손상 사례를 통해 Blade에 발생 가능한 고온부식 발생 메커니즘을 분석하였다. 해당 손상 사례는 창정비 입고 엔진 다수에서 관찰되었으며, 특히 엔진 CT Blade의 Platform 부위에서 집중적으로 관찰되었다. 엔진 CT Blade 거시적 관찰결과, Blade Platform 부위에서 수포(Blister) 형태의 표면손상이 확인되었으며, 표면 박리로 인한 코팅층 내부 노출 등이 관찰되었다. 손상 부위 SEM-EDS 분석결과, 고온 부식의 주요 특징인 내부 황화물(Internal Surfides)과 내부 금속 고갈(Alloy depletion)이 함께 확인되었다. Blade 단면 주사전자현미경(SEM) 관찰을 통해 표면 손상 깊이 및 면적을 분서한 결과, 최대 손상 깊이의 경우 약 43 마이크로미터 이내로 관찰되었으며, 손상 면적은 최대 27.1%로 확인되어, 표면손상은 Blade 코팅층에 한하여 발생한것으로 판단되었다. 또한 기술도서에 포함된 CT Blade 표면 손상 허용 기준 이내임을 확인하였다. 해당 엔진 작동환경 분석결과, CT Blade는 엔진 연소실에서 형성된 고온/고압가스 및 연료산화물에 최초 노출되는 부위이며, 특히 표면손상이 발생한 Platform의 경우 Tip 부위 대비 회전속도가 낮아 연료산화물 퇴적이 용이한 부위임을 확인하였다. 작동환경 및 관찰결과를 종합 분석한 결과, Blade Platform의 표면손상은 고온부식결함이며, 연료산화물 퇴적 및 고온 운영환경으로 인해 발생한것으로 판단되었다. 이러한 분석결과를 바탕으로, 항기소에서는 운영기관에 고온 부식에서 시작되는 부식-피로(Corrosion-Fatigue) 균열 진정 가능성을 제시, 손상 Blade 추적 관리 및 추가적인 관리대책 수립을 권고하였다.

[피로4-5 | 16:20]

군용 항공기 주익 BL 0 Rib 부위 SCC 발생 메커니즘 연구: 정회성, 이병현, 이홍철 (공군 항공기술연구소)

Keywords: 금속, 알루미늄 합금, 부식, 응력부식균열(SCC)

본 연구에서는 군용 항공기 중 KT-1 항공기의 동체와 주익 사이에 위치한 BL 0 Rib 부위에서 발생한 SCC(응력부식균열) 발생 메커니즘 연구를 통해 발생 원인을 규명하고, 부식관리 대책을 수립한 결과를 제시한다. KT-1 항공기 총 78대에서 주익 BL 0 Rib 부위에 SCC가 발생하였고 일부 항공기의 경우 주익 MLG 빔 플랜지에서도 발생하였다. 이 중 1대의 BL 0 Rib 관찰을 진행하였고 와전류 검사결과, Hole 주변부 9개 위치에서 SCC가 발생하였다. 균열면 강제개방 후 광학현미경 관찰결과, 부식으로 인한 입계균열의 거시적 특징인 Woody Fracture가 관찰되었다. 주사전자현미경(SEM) 관찰결과, 부식으로 인한 입계균열의 특징인 Leaf와 표면 산화로 인한 Mud Crack이 관찰되었고, 표면에서 부식 유발물질인 염소(CI), 황(S)가 검출되었다. 균열면 미세조직 관찰결과, SCC의 특징인 균열 분기(Crack Branching) 및 Leaf를 관찰하였다. 균열면 단면 확인결과, BL 0 Rib 표면처리 기법은 알로다인(Alodine)으로 확인되었으며 부식으로 인한 표면 손상 및 미세 균열을 관찰하였다. 위 관찰결과를 바탕으로 SCC 발생 메커니즘을 분석한 결과, 외부 표면 염화물 제거를 위해 수행되는 세척(Rinse) 작업 간 유입된 수입이 오히려 해상비행 중 유입된 염화물과 반응을 촉진 시켜, SCC 손상을 유발시켰으며, 그 손상을 가속화 시켰다고 판단하였다. 이는 알루미늄 합금이 수분, 염화물 및 부식환경에 노출되면 국부적인 부식 반응이 발생하고, 양극과 음극 반으으로 이루어진 산화-환원 반응이 촉진되면서 부식이 진행된다는 양극 용해 이론이 바탕이 되었다고 판단하였다. 이러한 분석결과를 토대로, 항기소에서는 운영기관에 Rinse 전면 중단을 권고하였다. 추가로 Rinse 중단에 따른 세척절차 및 주기 최적화를 위해 세척절차를 개선하고 세척주기 연장 검토를 권고하였다.

저탄소 알루미늄소재 기술개발 심포지엄
Room 402B, 4월 23일

[저탄소1-1 | 10:00] 초청강연

데이터 기반 저탄소 재활용 알루미늄 소재의 용탕 품질 관리 방안: 김진관, 강희삼* (현대・기아자동차)

Keywords: 알루미늄 재활용, 용탕 품질, 정량 분석 기법, 데이터 기반 품질 관리 체계

원소재 제조 단계에서의 탄소배출량 비중이 절대적으로 높은 알루미늄 분야에서는 효과적으로 탄소중립에 대응하기 위해서 알루미늄 재활용 확대를 위한 기반 기술 개발이 필수이다. 알루미늄 재활용 기반 기술은 부품화 연계 위한 LCA 기반 저탄소 재활용 알루미늄 밸류체인 구축을 주목적으로 진행되며, 최종 부품 및 자동차에 사용되는 소재의 투명성, 추적성, 신뢰성을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 알루미늄 재활용 소재의 품질 신뢰성을 확보하기 위해서는 우선 타겟 부품에 적합한 재생원료의 선정 및 전처리 공정을 최적화해야 하며, 또한 재활용 소재의 품질을 정량적으로 손쉽게 검증할 수 있는 방안을 도출해야 한다. 소재 품질의 정량적인 검증을 위해서는 전통적인 Prefil, K-mold, 감압응고법을 활용한 DI분석 외에도 이미지 분석 기반의 미세조직 정밀 분석 기법을 활용하는 방안을 함께 활용하고자 하며, 현장에서 단시간내에 적용가능한 다양한 비파괴/파괴분석 기법들의 개발도 동시에 진행하고자 한다. 다만 각각의 품질 분석 기법들은 정확성, 용이성, 현장적용성 관점 외에도 분석에 필요한 시간/비용, 전문인력 관점에서도 그 차이가 매우 크기 때문에 하나의 특정 분석기법을 이용한 품질 기준을 확정하기보다는 다양한 분석 기법들에서 도출된 정량 데이터들 간 상관성 분석을 통해 표준화된 기준에 맞춰 다양한 분석 기법들이 상황에 맞춰 활용될 수 있도록 만들어야 되며, 궁극적으로는 데이터 기반의 품질 관리 체계를 구축해야 할 것으로 판단된다.

[저탄소1-2 | 10:25] 초청강연

전기자동차에서 필요한 알루미늄 소재 부품 기술: 성시영* (케이에이랩스)

Keywords: 전기자동차. 알루미늄 소재, 고전압 파워트레인, 열관리

내연기관자동차에서 전기자동차로 산업이 전환이 진행되고 있는 현 시점에서 기존에 적용되던 소재와 부품에서도 다양한 변화가 발생되고 있다. 특히 알루미늄 소재 부품의 경우에는 내연기관에서는 파워트레인의 핵심 소재였으며, 새시 및 차체 부분에서는 고급차종에 적용되는 소재 부품이었지만, 전기자동차로 전환이 되면서 파워트레인에서는 기존의 경량화 측면의 중요성만이 아니라 열관리라는 기능성의 측면까지 부각되면서 다양한 소재와 부품의 형태로 적용이 증가하고 있으며, 새시 및 차체 부품의 경우에도 일충전 주행거리 향상을 위하여 적용이 증가될 수 밖에 없는 이유를 글로벌 메이커의 전기자동차 Teardown 및 주행모니터링 결과를 바탕으로 살펴보고, 향후 알루미늄 소재 부품에서 필요한 기술에 관하여 논의하고자 한다.

[저탄소1-3 | 10:50] 초청강연

저탄소·다특성 알루미늄 합금소재 및 고성능 전기부품 개발: 오승환*, 노주현 ((주)에이알알루미늄)

Keywords: 알루미늄 재활용, 저탄소 알루미늄, 전기 아크용해, 전기부품, 케이블용 전선

2015년 파리 협정에 의거하여 EU에서는 권내의 모든 기업에 지속적인 저탄소 배출 규제를 지속해오고 있으나, 유럽 내 기업들은 저탄소 제품 생산으로 인해 가격 경쟁력을 잃어버렸고, EU권 외에서 탄소 배출량을 절감하지 않은 제품의 수입으로 인한 피해를 억제하고 환경을 보호하기 위해서 탄소중립 정책 등 제도를 강화하는 실정에 이르렀다. 탄소중립 정책의 일환으로 '탄소국경조정제도'(이하 CBAM)로 인해 유럽으로 수출되는 제품에 대한 추가 세금이 부과될 것이다. 대한민국도 유럽으로 수출하고 있는 물품이 많으며 그 중 알루미늄의 비중은 10.6억 달러로 높은 비중을 차지하고 있다. 또한, 자동차와 같이 완제품으로 수출되는 비중을 합산한다면 CBAM에 대한 영향은 더욱 클 것으로 예상된다. 이러한 세계적인 흐름은 국내뿐만 아니라 국외에서도 저탄소 제품에 대한 수요를 증가시키고 있으며, Standard Chartered의 보고서(Carbon Dated)에 '2025년부터 글로벌 대기업의 경우 탄소중립 미이행 공급업체와 거래를 중단할 것'으로 발표했다. 대한민국의 알루미늄 산업은 알루미늄 잉곳을 인도, 아랍에미레이트, 러시아 순으로 전량 수입에 의존하고 있다. 인도와 아랍에미레이트, 러시아 모두 탄소배출량 높은 국가이다. 기본적으로 탄소배출량이 높은 제품을 구매하여 사용하고 있으므로 대한민국에서 CBAM을 대응하기위해서는 사용 후(End of Life) 스크랩을 사용하여 재활용하는 방법이 유일하다. 대한민국의 알루미늄 산업에서도 스크랩을 사용하고 있으나, CBAM을 만족하기 위해서는 기존에 사용하는 스크랩의 비율을 높일 수 밖에 없고 높은 품질 수준을 요구하는 제품이 많은 상황에서 스크랩의 별도 처리없이 곧바로 용해하여 제품을 제조하기에는 위험부담이 높다. 이를 해소하기 위해서 본 과제에서는 3개의 세부별로 롤을 부여하여 저탄소 잉고트 제조 및 공급을 통해 전기자동차 관련 부품 및 송전용 알루미늄 도체를 생산하여 품질 평가부터 전주기 탄소배출량 측정을 진행할 예정이다. 이를 통해 용해 및 주조 기술 확보를 통하여 기술 경쟁력 확보하고 탄소중립에 기여하고자 한다.

[저탄소1-4 | 11:15] 초청강연

내식성 및 냉각성능이 향상된 두께 50 μm 이하급 열교환기용 클래드재 국산화 기술개발: 김민중* (㈜한국클래드텍)

Keywords: 재활용, 알루미늄, 클래드

최근 CBAM 등의 탄소배출량관련 이슈가 부각되어지고 있으며, 특히 탄소발생량이 많은 알루미늄에 대해 이의 개선을 위한 다양한 방법들이 개발되어지고 있는 상황이다. 본 개발에서는 "내식성 및 냉각성능이 향상된 두께 50 μm 이하급 열교환기용 클래드재 국산화 기술개발"을 목표로 재활용을 위한 첫단계인 알루미늄 스크랩의 분류기술을 확보하고, 분류된 스크랩을 활용하여 알루미늄을

주조하여 요구특성치를 제어하는 기술을 확보하는 것을 1세부에서 진행하고, 이렇게 제조된 재활용 소재를 활용한 알루미늄 소재를 압연하여 알루미늄 클래드 메탈의 제조기술, 재압연 및 열처리조건의 확보하여 컨덴서 및 칠러용 알루미늄 클래드 메탈을 제조하는 것까지 2세부에서 진행할 예정입니다. 3세부에서는 냉각성능 5%향상을 위한 설계기술 및 앞서 1,2세부를 통해서 제조되어진 알루미늄 클래드 메탈을 이용하여 컨덴서 및 칠러부품을 제조하여 열교환기 검증기술을 개발함을 목표으로 한다.

[저탄소2-1 | 14:00] 조청강연

글로벌 탄소규제의 배경과 알루미늄 산업 대응 전략: 오광명* (오후두시랩)

Keywords: 저탄소알루미늄, 탄소저감, 탄소규제, 탄소국경조정제도, 에너지관리시스템

글로벌 탄소규제가 강화되는 가운데, 국내 알루미늄 산업은 심각한 도전에 직면해 있다. 본 발표는 다양한 형태로 발전하는 탄소규제의 특성을 분석하고, 국내 알루미늄 산업의 효과적인 대응 방안을 제시하고자 한다. 현재 탄소규제는 제품단위규제와 사업장단위규제로 구분되며, 각각의 규제는 서로 다른 목적과 특성을 가지고 있다. EU의 탄소국경조정제도(CBAM)는 역내 탄소누출 방지를 위해 철강, 알루미늄과 같은 원자재의 탄소배출량을 규제하고 있으며, 공급망실사법은 관계사들의 탄소배출 관리도 강화하고 있다. 알루미늄 산업의 탄소규제 대응을 위해서는 궁극적으로 기존의 다양한 에너지원을 전력기반으로 전환해야 한다. 전력기반으로 전환할 때 탄소배출량을 저감할 수 있는 신재생에너지 활용과 같은 선택지를 확보할 수 있으며, 데이터의 생성과 축적이 가능하다. 아울러, 제조실행시스템(MES)과 공장에너지관리시스템(FEMS) 같은 생산현장 관리 시스템의 도입을 통해 탄소데이터를 체계적으로 관리해야 한다. 이러한 노력들은 향후 새롭게 편재될 글로벌 제조 공급망에서 신규 네트워크에 편입될 수 있는 탄소경쟁력 확보로 이어질 수 있다.

[저탄소2-2 | 14:25] 조청강연

재활용 친화형 알루미늄 합금설계 기술: 조영희* (한국재료연구원)

Keywords: 알루미늄, 재활용, 불순물, 합금설계, Fe계 금속간화합물

알루미늄은 경량성과 우수한 기계적 성질로 인해 자동차, 항공우주, 건축, 전자기기 등 다양한 산업분야에 필수적인 소재로 사용되고 있다. 특히, 알루미늄 합금은 뛰어난 내구성과 가공 용이성 그리고 우수한 전기 및 열전도성을 제공하여 산업전반에 걸쳐 광범위하게 활용되고 있다. 세계적으로 연간 약 1억톤의 알루미늄이 생산되고 있으며, 이 중 약 35%는 스크랩을 재활용하고 있고 ~40%는 이미 제조 과정에서 스크랩화된다. 알루미늄 재활용은 금속을 재용해하는 공정을 포함하며, 보크사이트 광석에서 원소재(primary)를 생산하는데 필요한 에너지 (45 kWh/kg, 12 $kgCO_2$ 배출)의 5% (2.8 kWh/kg, 0.6 $kgCO_2$ 배출) 수준의 에너지만 필요한 장점을 갖는다. 즉, 알루미늄 생산에 필요한 에너지 관점에서 비교해보면, 원소재 대비 재활용재(secondary)가 약 95% 생산에너지를 감소시키고 90% 이상의 CO2 배출량을 감소시키는 효과가 있다. 따라서, 알루미늄 재활용 기술은 에너지 및 탄소 중립 관점에서 훨씬 더 큰 지속가능성(sustainability)으로 전환시킬 수 있는 중요 연구분야로, 전 세계적으로 다양한 재활용 방법과 공정이 활발히 개발되고 있다. 최근 유럽연합(EU)에서 도입중인 탄소국경조정제도 (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)로 인해 알루미늄의 탄소배출량 저감은 환경적인 이슈 뿐만이 아니라 산업적으로 필수적 사안이 된 것만은 분명하다. 알루미늄 원소재에서 재활용재로 전환을 위해서는 스크랩에 기인한 불순물이 알루미늄 합금에 미치는 영향에 대한 이해가 필수적으로 요구된다. 본 발표에서는 한국재료원의 재활용 기술 개발 사례를 중심으로 알루미늄 산업의 지속 가능한 발전 해법을 간단히 소개하고자 한다. 한국재료연구원에서는 최근 기보유 액상금속 외부에너지 인가 기술을 활용하여 생성상, Fe계 금속간화합물 제어를 통한 강도, 연신율 및 열전도도의 복합적인 상반특성 향상이 가능함을 확인하였다. 특히, 용탕의 액상선보다 200-300ºC 높은 온도에서 thermal-rate 처리시 조성변화없이 Fe계 금속간화합물의 결정구조 변화 (monoclinic à cubic)와 더불어 형상 개량화(침상 à Chinese script 형상)의 효과 및 미세화 효과가 모두 극대화 되었다. 소재 및 부품 적용을 통해 허용 Fe 함량 범위를 확장가능성을 검증하였고, 연신율, 열전도도 및 내부식 복합특성 평가를 바탕으로 다이캐스팅용 재활용 친화형 신합금 설계안을 제안하고자 한다.

[저탄소2-3 | 14:50] 조청강연

사용 후 스크랩 재활용 기반 신지금급 알루미늄 합금 소재화 기술개발: 임재철*, 강태웅* ((주)알멕)

Keywords: 알루미늄, 사용후 스크랩(EOL SCRAP), 빌렛, 압출, 저탄소

최근 글로벌 환경 규제가 강화되면서 알루미늄 산업에서도 탄소 배출 저감과 자원 순환이 중요한 과제로 떠오름. 그러나 국내 알루미늄 리싸이클 산업은 기반이 취약하며, 사용 후(EOL) 알루미늄 스크랩의 고부가가치 활용 기술이 부족한 상황임. 이에 따라 저품위(Zorba) 스크랩을 효과적으로 재활용할 수 있는 기술 개발이 필요함. 본 연구에서는 스크랩의 파쇄 및 분류 시스템을 최적화하고, 정련 및 합금 기술을 개발하여 고강도 알루미늄 소재로 재활용하는 방안을 제시함. 이를 통해 전기자동차, 건축, 전자 산업 등에서 활용할 수 있는 맞춤형 소재를 개발하고자 함. 또한, 탄소국경조정제도(CBAM) 등 국제 환경 규제에 대응하기 위해 재활용 과정에서의 탄소 배출 저감 효과를 정량적으로 분석하고, 경제성과 물성 평가를 종합하는 지속가능성 플랫폼을 구축함. 이 연구를 통해 국내 알루미늄 산업의 경쟁력을 강화하고, 친환경적인 자원 순환 체계를 마련하며, 글로벌 환경 규제에 효과적으로 대응할 수 있는 기반을 구축하고자 함.

[저탄소2-4 | 15:15] 조청강연

알루미늄 스크랩 용탕제어 및 비금속개재물 품질 평가기술: 김덕*, 김명균 (포항산업과학연구원)

Keywords: 알루미늄, 용탕, 개재물, 정량분석, 정량평가

알루미늄 제품의 특성은 사용된 합금의 조성 외에도 제조공정 중 알루미늄 용탕의 품질에 크게 영향을 받는다. 알루미늄 용탕의

품질은 주로 내부에 포함된 수소가스와 비금속개재물에 의해 결정되며, 상대적으로 평가 및 제거가 용이한 수소가스와는 달리 비금속개재물은 이와 같은 대응에 한계가 있어 여러 가지 측면에서 문제가 되고 있다. 따라서, 알루미늄 용탕의 품질을 정확하게 평가하고 제어하기 위해서는 용탕 내 비금속개재물을 종류별로 파악하여 정량적으로 분석하는 것이 필수적이다. 종래 기술 중에도 이와 같은 알루미늄 용탕 내 비금속개재물 정량평가가 가능한 것들이 존재하나, 고가의 장비와 전문인력 그리고 장시간의 분석이 필요하거나, 반대로 지나치게 간략화된 결과만을 확보할 수 있는 등 현장에서 손쉽게 용탕의 비금속개재물 관련 품질을 정확하게 평가하기에는 어려운 점들이 많았다. 본 연구에서는 알루미늄 용탕 내 비금속개재물을 정량적으로 분석하여 용탕의 품질을 평가할 수 있는 용탕여과 방식의 자체 제작 설비와 이를 이용해 제조한 다양한 샘플의 분석 결과에 대해 공유하고자 한다. 2.5kg 내외의 알루미늄 소재를 용해하고 준비된 도가니를 40분 내외로 예열한 뒤 일정한 기공도를 갖는 필터를 통해 용탕을 2분 내외에 걸쳐 여과함으로써 용탕 내에 존재하는 비금속개재물을 빠르고 간단하게 농축하여 획득할 수 있다. 농축된 비금속개재물을 포함하는 용탕 여과 후 잔존 샘플을 경면 연마 후 광학현미경을 통해 미세조직을 관찰하고 이미지분석 기법을 활용하여 비금속개재물의 종류, 크기, 비율 등의 정량화된 평가 결과를 확보할 수 있었다. 이와 같은 기구와 분석 방법은 기존보다 빠르고 경제적이면서도 꼭 필요한 만큼의 정확도로 분석 결과를 얻을 수 있어 향후 비금속개재물 제어를 통한 알루미늄 용탕 품질 개선에 매우 효과적인 수단이 될 것으로 기대된다.

[저탄소3-1 | 15:50] 초청강연

알루미늄 스크랩의 비금속 개재물 제거를 위한 플럭스 디자인: 정인호* (서울대학교)

Keywords: 알루미늄 스크랩, 재사용, 플럭스, 열역학 계산

최근 알루미늄 산업에서도 탄소중립을 이루기 위해서 알루미늄 스크랩의 사용을 높이는 제품을 개발하기 위해 다양한 연구가 진행중이다. 특히 알루미늄 스크랩의 재사용에서는 철 및 구리와 같은 이종 합금들이 부탁되어 문제가 되는 경우와 알루미늄 소재 자체의 산화 부식등에 의해서 유발되는 개재물이 스크랩 사용을 저하하는 주요 원인으로 알려지고 있다. 본 발표에서는액상 플럭스를 이용해서 알루미늄 스크랩의 개재물을 화학적으로 제거하는 방법에 대해서 간단히 리뷰를 하고 FactSage CALPHAD 열역학 데이터베이스를 사용한 열역학적 계산을 통해서 효과적으로 플럭스를 디자인 하는 방법과 이를 통해서 디자인된 플럭스를 소개하고자 한다.

[저탄소3-2 | 16:15] 초청강연

LCA 기반 친환경 자동차 소재 부품 탄소배출량 평가기법 및 저탄소 소재-공정 활용 탄소배출량 25% 이상 저감 알루미늄 다이캐스팅 부품 제조기술 개발: 윤상일*, 최지석 (삼기), 김동옥, 김진평 (한국자동차연구원)

Keywords: 탄소중립, 알루미늄 재활용, 전과정평가, 다이캐스팅, 탄소배출량 산출방법

친환경 자동차 소재, 부품의 전과정평가를 확인하기 위하여 완성차 및 자동차의 주요 부품 구성품에 대한 원료 채취, 제조, 사용, 재활용 및 폐기까지 잠재점 환경 영향을 종합적으로 분석, 평가하는 방법이 필요함. 우리는 친환경 자동차에 장착하는 다양한 부품군에 대해 평가를 진행할 예정이며, 평가 소재로는 플라스틱, 마그네슘, 철강 제품 등과 다이캐스팅 부품에 대한 한국형 탄소배출량 평가 방법 개발하고자 함. 특히 다이캐스팅 소재는 용해 공정 개선, 내외부 스크랩 활용, 회수율 최적화 디자인 설계 등의 연구개발 계획과 대표적인 친환경 자동차용 소재, 부품 탄소배출량 평가 기법 개발으로 적용 및 저감율에 대한 산출을 실시하고자 함. 상기 결과를 바탕으로 국내 자동차 산업과의 협업을 통해 최종 산출물 검증 방안에 대한 검토를 수행하고자 함.

[저탄소3-3 | 16:40] 초청강연

알루미늄 용탕의 Fe 저감 및 기능성 고방열 알루미늄 합금 개발: 김용호*, 손현택, 유효상, 이병권, 고은찬 (한국생산기술연구원)

Keywords: 알루미늄 합금, 방열 프레임, 압출, Fe 저감, 알루미늄 재활용

대표적인 경량 소재인 알루미늄 합금은 소형 경량화에 대한 기술적 요구로 인해 각 부품 적용에 대한 연구 개발 및 상용화가 가속되고 있고, 최근 대두되는 에너지 효율 및 전기 부품의 장수명화를 위해 고방열 및 고강도 특성을 갖는 Al 합금 개발이 필요하며, 이러한 특성을 가지는 합금은 자동차 및 전자기기 등 경량, 고강도 및 방열 특성이 요구되는 다양한 분야에 응용이 가능하며, 시장 확대를 위해 유동성이 향상된 알루미늄 합금 개발이 필요하다. 특히 본 연구는 알루미늄 재활용 필요성에 따른 Fe 저감 기술을 고려하여 추가 연구를 수행하였고, 알루미늄 재활용은 에너지 소비를 최대 95% 절감할 수 있고, 온실가스 배출 감소에 따른 환경적 경제적 이점을 제공한다. 하지만 스크랩 내 높은 Fe 함량은 전기적 특성을 저하시킬 수 있으므로 이를 저감하기 위한 기술 개발이 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 알루미늄 합금의 방열 특성 향상을 위한 연구, 유도전동기 프레임 제조 공정 최적화 및 Al 용탕 내 Fe 저감에 관한 연구를 수행하였다.

[저탄소3-4 | 17:05] 초청강연

PIR/PCR 스크랩 활용 저탄소 알루미늄 판재 부품화 기술: 김용신*, 김병규, 신승현 ((주)동신모텍)

Keywords: 탄소배출량, 알루미늄, 재활용, 자동차, 경량화

2015년 195개국이 참여한 파리협정에서 범지구적 차원으로 온실가스 감축을 위해 2050년까지 CO2를 포함한 온실가스 배출 Net Zero에 합의하면서, 유럽연합은 다가오는 2026년 탄소국경조정제도 시행을 예고함과 동시에 글로벌 기업들은 기업에서 사용하는 전력 100%를 재생에너지로 대체하는 자발적 캠페인 RE100을 선언하는 등 국제적인 환경규제가 확산되고 있다. 우리나라는 2020년 G20 정상회의에서 2050 탄소중립 계획을 발표하고 2022년 기후위기 대응을 위한 탄소중립/녹색성장 기본법을 시행하고 있다. 이와 관련하여 자동차 산업에서는 내연기관차에서 전기차로 전환하고 있으며, 배터리로 인한 중량증가 문제를 해소하기위해 차제를 알루미늄과 같이 경량소재로 대체하고 있다. 경량소재 중 1 kg 생산시 발생하는 탄소배출량의 경우, 알루미늄은 약 16.5 kg, 마그네슘은

36 kg, 탄소섬유(CFRP)는 21 kg으로 알루미늄이 가장 적게 발생하지만, 스틸 2kg 대비 8배 이상 발생하기 때문에, 스틸 소재를 대체하여 알루미늄 소재를 적용하는 것이 탄소배출량 감축을 위한 노력으로 보기 어렵다. 하지만 알루미늄을 재활용하는 과정에서 발생하는 탄소배출량이 약 0.5 kg으로 확인되어, 재활용 알루미늄을 차체에 적용하는 것이 필연적이지만 국내에는 알루미늄을 재활용하여 캔을 만들거나 탈산제로 소비하고 있으며, 차체로 적용하기 위한 연구가 전무한 것으로 확인된다. 본 연구에서는 재활용 알루미늄을 차체에 적용하기위해 공정 내외 발생하는 스크랩을 활용하여 재활용 잉곳을 생산하고, 적정한 강도를 확보하기위해 1차 지금과 혼합하여 탄소배출량 20% 이상 저감가능한 자동차용 알루미늄 판재를 생산하고자 한다. 또한, 본 연구를 통해 생산된 판재를 Under Body 차체 부품과 배터리 모듈 프레임에 적용하여, 대체 소재로의 실효성을 검토하고자 한다. 여기서 적정한 강도 확보와 경량화를 바탕으로 Under Body 차체 부품은 기존의 스틸 소재를 대체하여 이종소재간의 활용성을 살펴보고, 배터리 모듈 프레임은 1차 알루미늄 소재를 대체함으로써 다양한 관점에서 생산성을 검토할 수 있다.

인공지능재료과학
Room 201A, 4월 24일

[인공1-1 | 09:00]
조립 모델 생성 AI를 이용한 다이캐스팅 품질 예측 모델 개발: 이창선* (인하대학교)
Keywords: 조립 모델 생성 AI, 설계 문서 기반 API, 다이캐스팅, 충진 변수와 응고 변수

모델은 데이터 간의 관계, 즉 변수 간의 관계를 나타낸다. 모델은 비조립 모델과 조립 모델로 분류될 수 있다. 비조립 모델은 모든 예측 변수가 반응 변수와 직접 연결되는 형태이며, 조립 모델은 매개 변수를 활용한 요소 모델로 구성된다. 제조 공정이 복잡해지고 예측 변수가 많아질수록 조립 모델의 필요성은 더욱 커진다. 제조용 인과 예측 모델의 성능을 향상시키려면 기계학습 AI 지식과 제조 도메인 지식을 융합해야 하며, 이를 통해 설명력, 신뢰성, 확장성을 확보할 수 있다. 이질적인 지식을 효과적으로 융합하기 위해서는 조립 모델이 필요하다. 조립 모델은 기계학습 지식 또는 도메인 지식을 활용하여 개발된 요소 모델들을 결합하여 구성된다. 이를 통해 보다 정교하고 신뢰성 높은 인과 예측 모델을 구축할 수 있다. 지식 융합의 필요성에 대한 공감대는 형성되어 있지만, 이를 효과적으로 실현할 수 있는 쉬운 방법론이 필요하다. AI 전문가는 기계학습에 대한 지식은 풍부하지만 도메인 지식이 부족하고, 도메인 전문가는 도메인 지식은 깊지만 AI 지식이 부족하기 때문이다. AI 지식, 데이터 분석 지식, 코딩 지식이 부족한 도메인 전문가도 본인이 필요한 AI 예측 모델을 쉽게 개발할 수 있도록, 조립 모델 생성(AMG: Assembly Model Generation) AI 솔루션을 개발하였다. 이 솔루션은 API(Application Programming Interface) 형태로 제공되며, 도메인 전문가가 직접 사용할 수 있도록 설계되었다. AMG AI 솔루션은 모델 설계와 구현을 분리하여 수행한다. 도메인 전문가는 엑셀을 활용하여 데이터 전처리, 탐색적 데이터 분석(EDA, Exploratory Data Analysis), 예측 모델 설계 등을 수행할 수 있으며, 설계된 내용은 AMG AI 엔진에 의해 자동으로 구현된다. AMG AI 엔진은 AI 전문가가 개발하며, AutoML 기술 등을 활용하여 도메인 전문가의 설계를 자동으로 구현하고 다양한 분석 결과를 출력한다. 이처럼 설계는 도메인 전문가가, 구현은 AI 전문가가 담당하는 방식으로 업무를 분할함으로써 예측 모델 개발의 생산성을 높일 수 있다. 또한, 신기술 도입이나 신설비 구축으로 인해 모델을 재개발해야 할 경우, 도메인 전문가가 직접 모델을 설계하고 수정할 수 있기 때문에 모델의 지속성이 우수하다. 기존 API는 코딩 방식, 로우코드-노코드 워크플로우 다이어그램 방식, 대화 방식으로 구분된다. 코딩 방식은 모든 기능을 활용할 수 있지만, 학습 부담이 크다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 워크플로우 다이어그램 API가 개발되었으며, 대화 방식 API는 ChatGPT와 같은 대화형 인터페이스를 활용하여 자연어로 명령을 입력하는 형태이다. 워크플로우 다이어그램 방식과 대화 방식 API는 일정 수준의 데이터 분석 및 AI 지식을 요구하지만, AMG AI에서는 이러한 지식의 필요성이 최소화된다. 예측 모델 생성 절차가 표준화되어 AI 엔진에 내재되어 있기 때문이다. 공장 현장에서 작업 지시는 대화 또는 표준화된 작업 지시서를 통해 이루어진다. AMG AI는 작업 지시서와 같은 설계 문서 기반 API로 설계되어, 도메인 전문가가 직관적으로 활용할 수 있도록 지원한다. KAMP(Korea AI Manufacturing Platform)에서 제공하는 다이캐스팅 데이터를 활용하여 품질 예측 모델을 개발하였다. 다이캐스팅 공정에서의 다양한 제조 변수는 충진 변수와 응고 변수로 구분할 수 있다. 주조압, 비스켓 두께, 고속 속도, 저속 속도 등은 충진 변수이며, 용해 온도, 냉각수 온도, 사이클 타임 등은 응고 변수에 해당한다. 응고 변수의 이력은 금형 온도에 영향을 미치며, 금형 온도는 주조 냉각 속도를 변화시키고, 결국 제품의 품질을 결정짓는다. 다이캐스팅 불량 예측 모델은 두 개의 요소 모델로 구성된다. 첫 번째 요소 모델은 응고 변수와 매개 변수인 금형 온도 간의 관계를 나타낸다. 두 번째 요소 모델은 충진 변수와 금형 온도를 예측 변수로 하여 불량 여부를 예측하는 모델이다. 이 두 개의 요소 모델을 조립하면 충진 변수와 응고 변수의 변화에 따른 불량 발생 가능성을 예측할 수 있다.

[인공1-2 | 09:15]
인코딩 및 디코딩 작업을 위해 구현된 광학 행렬-벡터 곱 연산기를 활용한 이미지 처리: 김예림, 김민주, 박원일* (한양대학교)
Keywords: 광학신경망, 광학 행렬-벡터 곱 연산기, 오토인코더, 광학 디코딩, 스칼라 곱 연산

본 연구에서는 효율적인 이미지 처리를 위한 광학 신경망 기반 오토인코더를 소개하며, 인코딩 및 디코딩 작업을 수행하기 위해 특화된 광학 행렬-벡터 곱 연산기(Optical Matrix-Vector Multipliers)를 활용한다. 디코딩 과정에서 직면하는 도전적인 이슈를 해결하기 위해, 우리는 출력 처리를 스칼라 곱 연산을 통해 최적화하는 방법을 제안하여 고차원 출력을 생성하는 성능을 향상시킨다. 또한, 시스템 내 반복 튜닝(On-system iterative tuning)을 적용함으로써 하드웨어의 불완전성과 노이즈를 보정하여 이미지 복원 정확도를 점진적으로 개선했으며, 그 결과 MNIST 데이터셋에서 MSE loss 값이 초기 0.07에서 최종적으로 0.03까지 감소하는 것을 확인하였다. 더 나아가, 우리의 접근 방식은 노이즈 제거에도 효과적으로 활용될 수 있으며, 노이즈 제거 오토인코더(Denoising autoencoder) 모델에 적용하여 성능을 검증하였다. 실험을 통해 ONN 기반 시스템은 기존 전자 시스템보다 우수한 에너지 효율성을 보일 가능성이 있음을 확인하였고, 이를 통해 의료 영상 처리, 자율주행, 엣지 컴퓨팅 등 다양한 분야에서 실시간 저전력 이미지 처리가 가능할 것으로 기대된다.

[인공1-3 | 09:30]
컬러 이미지 인식을 위한 광학 신경망 기반 컨볼루션 연산: 김민주, 김예림, 박원일* (한양대학교)
Keywords: 광학 신경망, 광학 컨볼루션, 컬러 이미지 인식, 에너지 효율적 연산

기존에 광학 신경망 아키텍쳐는 디지털 이미지에서 변환된 단색 광원에 의존하여 다양한 색상을 포함한 실제 세계 이미지를 효과적으로 분류하는 데 어려움이 있다. 이에, 본 연구에서는 기존 디스플레이 기술과 통합된 RGB 픽셀 배열을 활용한 광학 컨볼루션

연산 기반의 광학 신경망을 제안한다. 제안된 신경망은 Normal Convolution과 Depth-wise Convolution 연산을 수행하며, 컬러 이미지 인식을 위한 효율적인 광학 신호 처리를 가능하게 한다. Normal convolution에서는 rank-4 커널을 사용하여 5개의 과일 이미지를 분류하는 신경망을 구축하였으며, 3000개의 학습 데이터셋을 7번의 반복 학습을 통해 96%의 분류 정확도를 달성하였다. 또한, 1000개의 테스트 데이터셋에서도 94% 이상의 높은 성능을 유지하면서 MAC 연산당 평균 34 aJ 미만의 광학 에너지를 소모하는 뛰어난 연산 효율을 보인다. 추가로, 일반적인 CNN에서 사용되는 3×3 커널 기반의 슬라이딩 윈도우 방식과 달리, 커널을 복제하여 병렬적으로 컨볼루션을 수행함으로써 연산 효율성을 높이는 방안을 제안한다. 또한, rank-3 커널을 활용한 Depth-wise convolution을 구현하여, RGB 신호를 개별적으로 분석함으로써 각 RGB 채널에 독립적으로 인코딩된 혼합 숫자 이미지를 성공적으로 분류하였다. 본 연구는 실제 컬러 이미지를 효과적으로 인식할 수 있음을 보여주며, 광학 컴퓨팅과 뉴로모픽 비전 분야에서의 활용 가능성을 제시한다. 또한, 실시간 고효율 광학 연산 및 신경망 기반 이미지 분석 시스템 개발에 기여할 것으로 기대된다.

[인공1-4 | 09:45]

Python을 활용한 이미지 일괄처리 기반 상분율 정량 분석의 자동화 연구: 허성준*, 박노근*, 박재형, 천해영, 조진우 (영남대학교)

Keywords: 상 분율 분석, 파이썬, 자동화 분석, ImageJ, 미세조직 분석

금속 재료의 상분율 분석은 미세구조 연구에서 중요한 요소이며, 일반적으로 XRD 데이터 기반 분석(HighScore Plus)과 이미지 분석 프로그램(ImageJ)이 널리 활용된다. 그러나 기존 방법들은 여러 한계를 가지고 있다. ImageJ의 경우, 배경과 유사한 색상을 가진 상을 탐지하는 데 어려움이 있으며, 이미지마다 대비 및 밝기를 수동 조정해야 하는 비효율성이 존재한다. 또한, XRD 기반 상분율 분석에서는 피크 중첩으로 인해 다중 상 정량화가 어렵고, 벌크 시편에서는 텍스처 효과와 내부 조직의 비균질성으로 인해 실제 상분율을 반영하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 Python 기반 자동 이미지 분석 기법을 활용하여 상분율 측정을 효율적으로 수행하였다. 다수의 이미지를 일괄 처리할 수 있으며, 동일한 임계값을 적용하여 신뢰도 높은 데이터를 얻을 수 있도록 설계되었다. 또한, CLAHE(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) 알고리즘을 도입하여 국부적인 밝기 조정을 수행함으로써 대비를 최적화하고, 이미지의 균일성을 유지할 수 있도록 하였다. 데이터 처리 과정에서 결과를 자동으로 엑셀 파일로 저장함으로써 분석의 재현성과 효율성을 극대화하였다. 실험 결과, Python 기반 자동 분석 기법은 기존의 ImageJ 및 XRD 분석법 대비 높은 재현성과 일관성을 보였으며, 특히 대량 데이터를 빠르게 처리할 수 있는 장점을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 자동화된 상분율 분석 기법은 향후 다양한 금속 미세구조 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[인공2-1 | 10:10]

인공지능 활용한 자동차용 구상화 어닐링 강선의 기계적 물성 예측 기술: 최중길*, 이중규 (현대자동차)

Keywords: 구상화 어닐링, 강선, 물성 예측, 자동차, 머신러닝, 인공지능

자동차용 강선은 사용 목적에 따라 적합한 기계적 물성 (강도, 성형성)이 요구된다. 이러한 물성을 만족하기 위해 매우 많은 공정 인자들을 고려해야 하며, 이를 검증하기 위해서는 매 로트 물성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 생산 효율성 증대 및 품질 확보를 위해 인공지능을 접목하여 많은 공정 인자와 강도 물성간의 관계에 대해 예측하고 검증하였다. 먼저 머신러닝 위해 탄소함량, 열처리 조건, 구상화율, 감면율, 경도, 강도 등 5년간의 양산 데이터를 확보 하였다. 그리고 모델링을 하기 전, 데이터 활용성을 위해 변수 정리 등 데이터 가공을 하였다. 이 데이터를 통해 조건별 상관성 도출 및 반복 학습을 통한 강도 예측 모델을 구축하고, 사용 편의를 위한 입력값 (공정 조건)에 따른 결과 (강도) 도출 프로그램 제작을 하였다. 머신러닝을 통해 얻어진 예측 값의 정합성 검증을 위해 실제 시험편 인장시험을 실시하였고, 실제 평가 값과 예측 값 비교 결과, 2% 이내의 오차로 물성 예측 가능하였다. 본 연구 결과를 바탕으로, 구상화 어닐링 생략 등 공정 축소형 선재 개발에 본 기술 활용할 예정이며, 품질 관리 향상을 위해 양산 공정에 시범 적용 중에 있다

[인공2-2 | 10:25]

철근 재질 예측 모델 활용을 통한 항복강도 600 MPa급 고강도 철근 개발: 이주상*, 정준호 (현대제철)

Keywords: 철근, 재질, 예측, 모델

전 세계적으로 지구 온난화로 인해 지진, 태풍 등의 자연재해 빈도가 지속적으로 증가하고 있으며, 재난의 강도도 높아지고 있다. 이러한 상황에서 국민의 생명 보호를 위해 건축물의 안전이 확보 되어야 하고 이에 대응하기 위해 철강사들은 고강도 안전강재 개발에 노력하였다. 최근, 전 세계적으로 최고의 화두는 인공지능 기술이다. 제품의 균일한 기계적 물성과 안정적 생산이 가능하도록 철근 생산 공정 데이터를 기반으로 기계적 특성의 예측 모델을 구축하였다. 예측 모델을 통해 도출된 제조 조건으로 실 제품 생산 및 물성 평가 결과 목표 성능을 만족하는 것으로 확인되었으며, 이를 통해 기계적 특성 예측 모델의 신뢰성을 확인 하였다.

[인공2-3 | 10:40]

TC-Python 기반 신속 열역학 데이터 생성 및 머신러닝 기법을 활용한 마르텐자이트 소재 역설계 비교 연구: 김성환* (써모칼크소프트웨어코리아유한회사)

Keywords: 재료 역설계, 마르텐자이트, Deep learning

본 연구에서는 Thermo-Calc의 TC_python 인터페이스를 활용하여 마르텐자이트 소재의 열역학 데이터를 신속하게 생성하고, 이를 바탕으로 역설계 모델을 구축하는 새로운 접근법을 제안한다. 소재 설계 과정의 효율성을 극대화하기 위해, 본 연구에서는 Bayesian Optimization, Mixture Density Networks(MDN), 그리고 대규모 언어 모델(LLM) 등 세 가지 머신러닝 기법을 적용하였다. 각각의 기법은 고유의 이론적 배경과 실용적 강점을 지니는데, Bayesian Optimization은 불확실성을 효과적으로 반영하며 최적해 탐색에 있

어 빠른 수렴을 기대할 수 있는 반면, MDN은 복잡한 다중 모달 분포를 정밀하게 모델링하여 설계 변수 간의 비선형 관계를 포착하는 데 강점을 보인다. 한편, LLM은 방대한 데이터로부터 고차원 특징을 추출하고 복잡한 패턴을 인식하는 능력을 통해 기존 방법으로는 얻기 어려운 통찰을 제공할 가능성을 제시한다. 본 발표에서는 Thermo-Calc를 통한 데이터 생성과 각 머신러닝 기법의 특징을 중심으로, 마르텐자이트 소재의 역설계 문제에 대한 접근법을 비교 분석하고, 이들 기법의 융합이 향후 소재 설계 및 최적화에 미칠 잠재적 영향을 논의한다.

[인공2-4 | 10:55]

Unlocking the Synthesis Order for Bespoke Nanoparticle via Autonomous Laboratory: Hyuk Jun Yoo*, Donghun Kim*, and Sang Soo Han* (Korea Institute of Science and Technology)

Keywords: Autonomous Laboratory, Self-Driving Labs, Nanoparticle, Machine Learning, Optimization

Recent advances in AI-driven experiment planning for autonomous laboratories have significantly improved search efficiency for finding optimal conditions, even in complex chemical spaces with interdependent variables. However, recent AI models have mainly focused on continuous variables, such as concentrations and injection rates. The challenge now lies in addressing categorical variables, such as synthesis sequences, which are often predetermined, potentially limiting material discovery. However, simultaneous optimization of synthesis sequences and conditions in heterogenetic parameter spaces remains underdeveloped. Therefore, we developed AI optimization model that integrates synthesis sequences and conditions into a homogenous parameter space using positional encoding. Before applying the model to real experiments, we conducted virtual experiments to optimize the model architecture. This approach enabled the simultaneous optimization of both variables, allowing the model to predict target properties more accurately. Our deep learning model could identify relationships between reagents and synthesis sequences without prior knowledge, facilitating novel chemical knowledge discovery. This method demonstrates the potential for bespoke nanoparticle synthesis, particularly useful for energy-related applications like catalysis and photovoltaics.

인공2-5 | 11:10]

You Only Put Your Nanoparticles : A Fully Automated Nanoparticle Washing System: Heeseung Lee (KIST, Korea Univ.), Seok Su Sohn* (Korea Univ.), Donghun Kim*, and Sang Soo Han* (KIST)

Keywords: Autonomous Lab, Experimental automation, Computer Vision, Nanoparticle purification

The Materials Acceleration Platform (MAP), which integrates automated chemical experiments with artificial intelligence (AI), is emerging as a transformative approach in chemistry. While precisely established automation protocols can effectively digitize chemical experiments for an unmanned MAP, a key limitation of current chemical automation lies in its reliance on fixed robotic systems, which struggle in adaptive environments. Specifically, existing static protocols face challenges in dynamically handling chemical containers and pipetting processes based on material phase variation. To address this, we propose a deep learning-based AI model that recognizes the status of chemical tasks and provides feedback for robotic motion planning. In a fully unmanned, computer vision-based chemical system, AI models must be chosen not only for their high accuracy but also for their ability to predict uncertainty in noisy environments, such as those with overlapping objects and varying lighting conditions. In this study, we developed a fully automated nanoparticle washing system that utilizes computer vision-based robotic motion planning to adapt to complex chemical laboratory environments. Our approach detects the varying positions of centrifuges and translates them into precise robotic coordination for accurate chemical container placement. Furthermore, we employ Latent Mask R-CNN to predict uncertainties when distinguishing between solution and precipitate from fixed camera angles. By ensuring precise and reproducible nanoparticle washing, our system reduces researchers' workload and integrates with other automated systems. This enables its application not only in quantum dot and catalyst research but also in nanoparticle analysis such as XRD, TEM, and SEM, ultimately enhancing research efficiency.

[인공3-1 | 14:00]

머신러닝을 활용한 배터리 소재 설계 공간의 효율적 탐색: 이선화, 예인수, 박인철* (포스코미래기술연구원)

Keywords: 이차전지, 머신러닝, 소재 최적화, 실험계획법, 전이학습

배터리 소재 성능은 다양한 설계·공정 변수가 복합적으로 상호작용하면서 결정되기 때문에, 전통적인 일변량 실험 방식(OFAT)만으로는 고차원 설계 공간을 충분히 탐색하기가 어렵다. 또한 원자재 비용, 재활용 회수량, 정교한 성능 요구사항 등 경제·기술적 조건이 더욱 엄격해지면서, 전문가의 경험적 지식에만 의존하는 최적화 접근은 한계를 드러낸다. 이러한 문제를 해결하기 위해 머신러닝(ML)과 실험계획법(DoE)을 결합하는 시도가 점차 늘고 있으나, 실패 데이터 부족, 기존 데이터셋에 내재된 편향, 그리고 새로운 물질 설계가 기존 데이터의 적용 범위를 벗어날 수 있다는 점이 걸림돌로 지적된다. 본 연구에서는 전이학습(transfer learning)과 액티브 러닝(active learning)을 병행하여, 제한된 데이터 환경에서도 실험 결과를 모델에 순차적으로 반영함으로써 예측력을 향상하는 전략을 제안하였다. 일관된 프로토콜로 수집된 기존 소재의 설계·공정·성능 데이터에서도 인위적 편향이 확인되었으나, 액티브 러닝을 통해 편향을 완화하고 중요한 물리적 변수를 도출할 수 있었다. 초기에는 "제로샷" 모델이 기존 소재 범위에 국한된 최적 조건만 예측했으나, 추가 실험 결과를 반영하는 반복 과정을 통해 새로운 물질 개발 가능성을 높였다. 그 결과, 시험 횟수를 대폭 줄이면서도 최적 조건 도출 속도를 높였으며, 전통적 에디슨식(Edisonian) 접근 대비 연구 자원과 시간을 절감하였다. 이러한 결과는 데이터 중심 배터리 소재 설계 패러다임을 확립하는 토대를 마련하고, 분야 전반에서 더 풍부하고 신뢰도 높은 데이터 수집을 촉진할 것으로 기대된다.

[인공3-2 | 14:15]

An Interpretable Machine Learning Framework for Gaining Insights and Advancing Cathode Materials of Li-ion Batteries: Jieun Kim (POSCO N.EX.T Hub), Injun Choi (Research Institute of Industrial Science & Technology), and Inchul Park* (POSCO N.EX.T Hub)

Keywords: Li-ion battery, Li-rich cathode materials, Machine learning

Lithium-rich layered oxide (LRLO) materials have garnered attention as promising cathode candidates for high-energy-density lithium-ion batteries. However, their commercial viability is hindered by challenges such as structural instability and complex electrochemical degradation. In this work, we introduce an advanced machine learning framework that integrates large-scale electrochemical datasets with experimental techniques to uncover key degradation mechanisms in LRLO materials. By analyzing charge curves from over 30,000 cycles, we identify critical factors influencing material performance, such as changes in charge-transfer resistance and element reduction. This framework connects empirical data with physical phenomena, enabling the prediction of full charge curves and detection of abnormal cycling patterns. Through this data-driven approach, we provide new insights into the behavior of LRLOs, paving the way for more reliable and efficient battery materials. By leveraging unsupervised learning methods alongside in-depth electrochemical and spectroscopic analysis, we present a robust methodology that highlights the potential of machine learning in battery diagnostics. This approach allows for a better understanding of the material's performance and degradation, offering a clearer path towards the development of next-generation, high-performance cathode materials for energy storage.

[인공3-3 | 14:30]

User-Centric Machine Learning-Assisted Non-Destructive Prediction of Lithium-Ion Battery: Shin Seyeon, Nam Chihyun, and Lim Jongwoo* (Seoul National University)

Keywords: Machine learning, Lithium ion battery, Capacity

The growing demand for lithium-ion batteries has naturally heightened interest in critical issues such as performance and stability. Real-time diagnosis of the battery is crucial to ensure its safe usage. However, managing the exponentially increasing data during operation, without disassembling the battery, presents a significant challenge. To address this issue, predicting the complete the complete charge/discharge curve using machine learning methods has been widely adopted. Accurately predicting the battery's maximum capacity during its cycle provides valuable insights into its state. It helps to optimize battery lifespan and enables more effective energy management based on the specific usage environment. Recently, many studies have reported on machine learning-based curve prediction models. These models, developed using machine learning techniques, are capable of handling large amounts of data and variables, learning non-linear patterns within the data, and performing real-time prediction. Especially, efforts have been made to predict the cycle index at SoH (State of Health) 80 using only the initial cycle data, or to predict the charging curve utilizing only a partial section of the corresponding cycle. While making predictions using data from the initial cycle or a fraction of the inputs is practical for real-time prediction, this approach has limitations when applied to data from actual battery users. Battery charging/discharging characteristics vary based on factors such as temperature, c-rate, and component materials, making it difficult to collect sufficient data across a wide range of operating conditions. Since studies often rely on cycled data generated under consistent conditions and protocols, this can lead to poor prediction performance when applied to batteries with different chemical compositions or in varied operating environments. To ensure reliable predictions for battery users, it is important to train models using datasets that reflects real-world usage patterns. In other words, the dataset should represent various states of battery degradation. Battery materials undergo different degradation modes depending on their exposure to specific voltage. By analyzing dQ/dV plot, it can be inferred that phase transitions occur within certain voltage ranges, which are the primary contributors to degradation. While most battery users tend to fully charge their batteries, the discharging patterns vary significantly. Therefore, this work is focuses on discharging patterns by selecting six different cutoff voltages around the peak from the dQ/dV plot to construct a dataset captures key degradation modes. This study utilizes partial voltage range, voltage shifts, and peak drops at the maximum points of dQ/dV peaks compared to the first cycle as features to predict the entire corresponding discharge curve. The data with different discharging cutoff voltages reflect consistent degradation levels, only 20 cycles with different cycle indices are used up to SoH 80 for each cutoff voltage data. This model demonstrated error less than 2% on the test datasets. To validate the model's performance in a real-life use environment, a dataset cycled with 50 different discharge voltages, representing randomly cycled data, was generated. The prediction performance was confirmed, showing an error less than 4% on the new dataset. This study demonstrates that entire discharge curve, regardless of the degree of degradation. The model's robustness and potential for practical application in battery management system under real-world scenarios are highlighted. It suggests that further refinement and validation across a broader range of operating conditions will enable more effective implementation to optimize battery performance and extend battery life. [1] Severson, K. A. et al. Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation. Nat Energy 4, 383–391 (2019). [2] Su, L., Zhang, S., McGaughey, A. J. H., Reeja-Jayan, B. & Manthiram, A. Battery Charge Curve Prediction via Feature Extraction and Supervised Machine Learning. Advanced Science n/a, 2301737.

[인공3-4 | 14:45]

From Text to Tech: AI-Driven Discovery of Soft Magnetic Materials: Sejin Park, YeonJoo Lee (Kookmin University), Youngsin Choi, HwiJun Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Hyunjoo Choi, and Kisub Cho* (Kookmin University)

Keywords: Soft magnetic materials, Artificial Intelligence, Natural Language Processing (NLP), Semi-supervised learning

Soft magnetic materials are essential for power conversion systems in electric vehicles, defense, and aerospace applications, where efficient energy conversion and strong electromagnetic shielding are critical. As the demand for lightweight and high-efficiency power units increases, optimizing magnetic properties and minimizing energy loss have become critical challenges. Traditionally, soft magnetic materials have been optimized through experimental approaches. However, the complex relationships between composition, processing conditions, and material properties make empirical optimization difficult. To address these challenges, recent studies have explored data-driven methods using open-source data to predict and optimize material properties. As magnetic properties are highly sensitive to alloy composition, processing parameters, and external research conditions, securing high-quality, reliable datasets remains a challenge despite these efforts. Especially since most data are in unstructured text formats, there are limitations in direct analysis and utilization. In this study, we developed a data extraction framework using a Large Language Model (LLM). This framework automatically extracts composition, processing, and magnetic property data from the literature. The extracted data are then integrated with experimental datasets to build a refined database. To enhance predictive accuracy, we applied a semi-supervised learning approach. This method combines pseudo-labeling via an autoencoder with active learning using a Gaussian Process Regressor (GPR) model. By leveraging minimal data, this approach enables effective property prediction and optimization.

[인공3-5 | 15:00]

물리식 기반 인공지능 모델을 활용한 Ti-Nb계 초탄성 거동 분석: 유진영, 천세호, 이성호 (부산대학교), Shuanglei Li (Huaqiao University), 임진환, 남태현 (경상국립대학교), 이태경* (부산대학교)

Keywords: physics-informed neural network, pseudoelasticity, phase transformation, titianium

일부 β-타이타늄 합금에서 나타나는 형상기억 및 초탄성 거동은 의료기기 및 항공재료 분야에서 활용되고 있으며, 타이타늄의 생체적합성과 우수한 내식성으로 인해 더욱 주목받고 있다. Ti-Nb계 합금은 오스테나이트와 마르텐사이트 간의 가역적 변태를 통해 초탄성 거동을 보이는 것으로 알려져 있으며, 마르텐사이트 변태 온도, 분율, 그리고 합금의 격자상수는 합금 조성과 후열처리 조건에 의해 영향을 받는다. 마르텐사이트 분율은 초탄성 거동을 평가하는 중요한 지표이지만, 하중이 가해지는 조건에서 실시간으로 측정하기 어려운 한계가 있다. 본 연구에서는 Helmholtz 자유에너지를 활용하여 마르텐사이트 증분을 예측하고, 반복 하중에 따른 마르텐사이트의 소성 변형을 추가로 고려하였다. 물리식 기반 인공지능 모델을 활용하여 마르텐사이트 분율을 미분방정식의 해로 도출하였으며, 추가로 집합조직 효과 및 합금 조성에 따른 격자상수 변화의 영향을 고려한 실험을 통해 모델의 예측을 검증하였다.

[인공4-1 | 15:25]

Design of green solvents for perovskite solar cells: Jin Soo Kim, Hyun-Sung Yun, Jae-won Kim, Juhwan Noh*, Jino Im*, and Nam Joong Jeon* (Korea Research Institute of Chemical Technology)

Keywords: Perovskite solar cells, green solvents, machine learning, density functional theory

Eco-friendly solvents should be used in the mass production of solution-processed perovskite solar cells (PSCs) to enable sustainable renewable energy generation. Typically, toxic organic solvents, such as N,N-dimethylformamide (DMF) have been commonly used to fabricate PSCs. Here, we identified dimethyl malonate (DMM) as an alternative to DMF through machine learning (ML), density functional theory (DFT), and experimental validation. We screened about 169 million molecules from PubChem, the largest database of compounds. To screen green solvents, boiling point, flash point, melting point, surface tension, and toxicity of the molecules were predicted using ML models. The ML models were constructed using experimental data collected from PubChem. Then, the binding strength with perovskite precursors was calculated using DFT, to find molecules that show similar binding energies with that of DMF. As a result, we found that a 1:1 mixture of DMM and dimethylsulfoxide (DMSO) could replace DMF. DMM is eco-friendly molecule like DMSO and its price is lower than that of DMF. The photoconversion efficiency of formamidinium lead tri-iodide perovskite solar cells fabricated using the DMM/DMSO solvent is comparable to or even higher than that of solar cells made with the DMF/DMSO solvent.

[인공4-2 | 15:40]

Atom Attention: Zero-Shot Approach for Improving Adsorption Energy Prediction: Wongyu Park and Jeong Woo Han* (Seoul National University)

Keywords: Machine learning potential, catalyst

Computational catalysis research utilizing ab initio methods, including Density Functional Theory (DFT), enables highly accurate calculations of energies and forces. However, due to its high computational cost, handling the vast structural space of catalytic materials remains a significant challenge. With the release of large-scale DFT datasets such as the Open Catalyst Project, there have been increasing efforts to develop machine learning potentials (MLPs) that retain DFT's high accuracy while significantly improving computational efficiency. Most of the recent MLPs demonstrating excellent predictive performance have been developed based on

Graph Neural Networks (GNNs). However, the adsorption energy prediction accuracy of current MLPs remains insufficient to fully replace DFT, necessitating further improvements. In this study, we propose Atom Attention, a methodology to enhance the performance of GNN-based MLPs by leveraging the assumption that an atom's energy should change more significantly when its atomic environment undergoes substantial changes before and after an adsorption reaction. We validated the effectiveness of Atom Attention using the Open Catalyst 20 dataset. The atomic environment was represented using the Smooth Overlap of Atomic Positions (SOAP) descriptor, and changes in atomic environments before and after the reaction were quantified using differential entropy (δH) based on atomistic information entropy. We considered only the energy changes of atoms whose differential entropy exceeded a predefined threshold. If an atom's environment changed only slightly, but its predicted energy varied significantly, we treated it as an error. These erroneous predictions were eliminated to improve adsorption energy prediction accuracy. During this process, we observed that even atoms with relatively unchanged atomic environments exhibited energy variations under MLP predictions. By statistically filtering out these erroneous predictions, we achieved a reduction of approximately 1 eV in the Mean Absolute Error (MAE) of adsorption energy predictions. The proposed Atom Attention methodology does not require additional training. Since it only involves computing atomic representations using SOAP and measuring atomic environment variations based on information theory, it is not computationally demanding. Consequently, this approach is expected to enhance prediction accuracy without significantly impacting computational efficiency.

[인공4-3 | 15:55]

Effective Design of High-Entropy Alloy Catalysts Using Combined Approach of Density Functional Theory and Active Learning: Kwangsoo Kim (Korea Institute of Energy Research, Yonsei University) and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

Keywords: High-entropy alloys, Density functional theory, active learning, Water electrolysis

The production of green hydrogen is a pivotal technology in the pursuit of a carbon-neutral society, necessitating the development of highly active and stable electrocatalysts for water electrolysis. Although precious metal-based catalysts exhibit outstanding performance, their high cost and scarcity hinder large-scale commercialization. Therefore, the development of alternative electrode materials that reduce precious metal content while maintaining high catalytic activity is imperative. High-entropy alloys (HEAs) have recently garnered significant attention as next-generation electrode materials due to their unique multi-element effects, which enhance catalytic activity and durability. However, the vast computational space of HEAs presents a major challenge in identifying optimal catalytic compositions. In this study, active learning was employed to achieve high model training performance with minimal computational cost, enabling the design of optimal catalysts for the hydrogen evolution reaction (HER) and oxygen evolution reaction (OER). The Ni-Cu-Pt-Ag-Pd multi-element system was utilized, integrating density functional theory (DFT) calculations with machine learning-based predictive models to quantitatively evaluate catalytic performance. By strategically selecting essential computations, active learning significantly reduces redundant calculations, thereby minimizing computational resource consumption and reducing simulation time. This approach enables the rapid identification of highly active and cost-effective catalyst compositions, and such strategy is expected to contribute to the development of other high-performance and cost-effective materials.

[인공4-4 | 16:10]

CatBench: Benchmark of Machine Learning Potentials for Adsorption Energy Predictions in Heterogeneous Catalysis: Jinuk Moon and Jeong Woo Han* (Seoul National University)

Keywords: Machine Learning Potential, Heterogeneous Catalysis, Adsorption Energy Prediction, Benchmark Library

Density functional theory (DFT) has been instrumental in material design yet is limited by high computational costs and scalability. Machine Learning Potential (MLP) has emerged as alternatives, offering ab initio-level accuracy with reduced costs and extended scalability. However, MLP models are highly dependent on model architecture and training data, necessitating a comprehensive performance benchmark platform essential. Especially for heterogeneous catalysis, accurate predictions of atomic force and energy are crucial, as they determine adsorption energies, a key metric in catalytic activity and stability. This work introduces CatBench library, a benchmarking platform designed to evaluate MLP performance for predicting adsorption energies. The CatBench library offers a highly versatile platform for benchmarking a wide range of MLP models on various datasets of interest. Through seamless integration with catalysis-hub, a web-based repository for catalyst-related DFT datasets, it enables users to benchmark MLP models on all datasets available within the repository. Furthermore, CatBench extends this flexibility to user-generated DFT datasets, allowing consistent and efficient performance evaluation. The primary feature of CatBench is generating comparison tables for multiple MLP models using various metrics. The automatically generated table includes evaluation metrics such as the mean absolute error (MAE) of adsorption energies for the entire dataset, the MAE for normal data, the MAE for outlier data, the normal rate (the proportion of normal data), the total calculation time, and the calculation time per step (time/step), etc. In this study, we introduce the adsorption energy prediction performance of pretrained MLP models and discuss potential application of CatBench. Our comprehensive findings are categorized into slab materials and the size of adsorbates. Furthermore, CatBench application can be extended to validate transfer-learning effects, assess different optimizers, and explore various additional machine learning methodologies.

표면계면
Room 201B, 4월 24일

[표면계면1-1 | 09:00]
자유형상 조명 장식을 위한 오간자-폴리에스터 메시 이종소재 접합 기술: 배은혁, 박창규* (서울과학기술대학교)
Keywords: 오간자, 폴리에스터 메시

빛은 실내 분위기와 사물의 미적 효과를 극대화하는 중요한 요소로, 자연광과 인공조명을 통해 공간에 다양한 시각적 효과를 연출할 수 있다. 빛의 색과 밝기를 조절하면 감정 변화에 영향을 줄 수 있으며, 개성을 표현하는 수단이 되기도 한다. 최근에는 개성 있는 디자인을 중시하는 경향에 따라 다양한 재질과 패턴의 패브릭 소파 및 인테리어 패브릭에 대한 관심이 증가하고 있다. 기존의 조명 장식에 활용되는 투과성 소재로는 유리, PMMA(Poly(methylmethacrylate)), PVC(Polyvinyl chloride), 그리고 Barrisol stretch ceiling 소재가 있다. 그러나, 이러한 소재들은 각각의 한계를 지닌다. 유리는 취성이 강해 쉽게 깨질 위험이 있으며, 자유로운 형상 변형이 어렵다. PMMA(Poly(methyl methacrylate))는 충격에 약하고, PVC(Polyvinyl chloride)는 재활용이 어렵다. 또한, Barrisol stretch ceiling 소재는 가격이 비싸고 하중을 지탱하기 위해 내부에 금속 구조물이 필요하며, 섬유를 활용할 때 보다 요철, 깊이감, 중첩에 의한 색감을 표현하는 것이 어렵다. 이러한 기존 투과성 소재의 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 오간자와 폴리에스터 메시(polyester mesh)를 활용하였다. 오간자는 중첩을 통해 한복의 우아함을 연상시키며, 빛과 투과성을 이용하여 조형적 가능성을 넓힐 수 있다. 반복적인 배열을 통해 집단성을 형성하고 균형감과 조화를 표현할 수 있으며, 중첩 방식에 따라 다양한 시각적 효과를 창출할 수 있다. 그러나 오간자 단독으로는 강성이 부족해 형태를 유지하기 어려운 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 폴리에스터 메시와 열 접합하여 강성을 높였으며, 이를 통해 한옥 창호지에 비치는 그림자 실루엣과 같은 효과를 연출하였다. 본 연구에서는 다양한 색상의 오간자와 조밀도가 다른 폴리에스터 메시 소재를 활용하여 다양한 강도, 색상, 투과도를 구현하였다. 두 소재의 열접합 공정을 최적화한 이후 접착 강도, 투과율, 색상 코드를 측정하여 오간자-폴리에스터 이종소재 접합의 DB를 구축하였다.

[표면계면1-2 | 09:15]
나노초 레이저를 이용한 각형 배터리의 레이저 전해질 클리닝 기술 연구: 박창규*, 성연수 (서울과학기술대학교)
Keywords: 전해질, 레이저 클리닝, 각형 배터리, 알루미늄, 용접성

기후 위기에 따른 전기차에 대한 수요가 증가에 따라 고성능 배터리 수요 가 확대되고 있다., 특히 장거리 주행, 고출력 요구 자율주행 자동차 도입에 따라 고용량 배터리에 대한 수요가 빠르게 증가하고 있다. 이러한 산업계의 흐름 속에서 각형 배터리는 높은 공간 활용도와 내구성으로 차세대 배터리 패키징 기술인 CTP(Cell to Pack)은 최적화된 구조로 고려되고 있다. 배터리 제조 공정에서는 캔-캡 표면의 오염 제거가 필수적이며, 특히 배터리 캔-캡 및 씰 커버 용접 에서 알루미늄 표면 오염 제거는 용접성을 확보하고 부식을 방지하는 공정으로 작용하며, 이를 효과적으로 수행할 수 있는 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다. 현재 리튬 이온 배터리 캔-캡 에는 가벼우면서도 우수한 부식 저항성과 용접성을 가진 알루미늄이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 전해질은 캔-캡 용접 후 전해질 투입구인 Seal Cover의를 통해 주입되지만, 주입 과정에서 흘러나온 일부 전해질이 방치된 경우 알루미늄과 배터리 전해질과 반응하여 피팅부식 및 산화피막이 형성될 수 있으며, 이는 용접성 저하로 이어질 수 있다. 따라서, 각형 배터리 알루미늄 표면의 잔류 전해질을 효과적으로 제거할 수 있는 공정이 필요하다. 본 연구는 비접촉 방식으로 표면 손상 및 공정 tact time 최소화 할 수 있는 나노초 레이저 클리닝을 기술을 활용하여 잔류 전해질 제거에 대한 공정 가능성을 검토하였다.레이저 클리닝은 $LiPF_6$ 기반 리튬 이온 배터리 전해질을 AA3003 표면에 도포 후 1,064 nm 파장의 나노초 레이저를 이용하여 전해질 제거 조건을 확인하고, Electron Probe Micro Analyzer (EPMA)와 X-ray Diffraction 분석(XRD)을 통하여 클리닝 전후의 AA3003 표면 상태를 분석하여 레이저 클리닝을 통한 전해질 부식 방지 효과를 확인하였다.

[표면계면1-3 | 09:30]
알루미늄 프레스 금형 오염물질 레이저 클리닝 기술 개발: 강현식, 박창규* (서울과학기술대학교)
Keywords: 금속, 알루미늄, 레이저 클리닝

6000 계열 알루미늄은 석출경화계 Al-Mg-Si 합금으로 내식성 및 내열성이 우수하고, 강도가 양호하며 건축 등의 구조용재 및 차량의 엔진 후드, 문, 트렁크 및 지붕 등의 소재로 사용됨. 소재 가공은 프레스 금형을 통해 진행 가능하며 반복된 작업과 높은 연성으로 인한 알루미늄 칩, 버, 슬러리 등이 발생하며 가공 중 높은 압력에 의해 금형 표면에 소착될 수 있음. 소착 발생시 장비 성능 저하와 제품 불량이 야기되며 경제적, 시간적 손실이 발생하므로 이를 해결하기 위한 클리닝 기술이 요구됨. 본 연구에서는 고속 공정이 가능한 레이저 클리닝을 적용하여 소재에 소착된 알루미늄 소착물질을 제거함. 레이저 클리닝은 고출력 레이저 빔을 물질에 조사하여 소재 표면의 오염물질을 제거하는 기술로, 레이저 빔에 의해 물질 표면에서 레이저 어블레이션이 발생하여 오염물질이 제거됨. 본 연구에서는 금형 소재 HK600에 소착된 알루미늄을 나노초 펄스 레이저를 이용한 레이저 클리닝을 통해 완전히 제거하는 조건을 찾고, 레이저 빔에 의해 발생한 금형 표면의 미세조직 변화를 분석하고 물성 변화를 관찰함. 그 결과, 레이저 클리닝 후 미세조직, 표면 조도의 변화가 관찰됨. 또한 금형 표면의 경도, 내마모성 등 물성 변화가 관찰되었으며 정밀한 미세조직 및 물성 분석을 위한 주사전자현미경, 마모시험기, X선 회절 분석을 진행하였음.

[포면계면 1-4 | 09:45]

Sensitive Hydrogen Gas Sensor based on Pd-decorated SWCNTs networks: Beom Joon Jung and Young Lae Kim* (Gangneung-Wonju National University)

Keywords: Hydrogen, SWCNT, Sensor, Pd, Carbon

This paper explores the hydrogen detecting sensor using Single Walled Carbon Nanotubes(SWCNT)-Pd double layers. The device performed with various depth of DC Sputtered Pd layers in different hydrogen concentration. With our design, the device can detect tiny leakage of hydrogen. Recently, as the movement to Net-zero emission society, the hydrogen energy is spotlighted as an eco-friendly energy because of its characteristics-Emits no greenhouse gases. However, hydrogen is a material which has highly chemical reactiveness, colorless, tasteless, odorless and flammable with low concentration over 4%. So it is essential to find a way to detect the flow of hydrogen energy safely. SWCNT, Single Walled Carbon Nanotubes, SWCNTs have found a wide range of applications, from molecular electronics to field effect transistors, in micro electronics, opto-electronics, gas storage, sensing, field emission devices and components in high performance composites, nano-biotechnology, and nano-medicine. And Pd is used as materials for resistor hydrogen sensor. In our experiment, the device was fabricated Pd layer on SWCNTs layer to make interconnections between two layers and detect hydrogen 1ppm, 10 ppm, and 50 ppm. Based on the analysis of actual measured data, a hydrogen concentration of 50 ppm showed a sensitivity of 0.7%, which is 3 times increased sensitivity compared to pure SWCNTs without Pd deposition. For a lower concentration of 1 ppm hydrogen, it showed a sensitivity of about 0.43%, showing a performance about 4 times higher compared to the sensitivity (0.15%) of the state without Pd deposition. This confirms that using Pd can significantly enhance the sensitivity between SWCNTs and hydrogen. Furthermore, considering that these results were measured at room temperature, it confirms that it is an even more excellent performance device, and it can be said that it is a device with greater applicability since there is no process with a high thermal budget in the device manufacturing process. This hydrogen sensor using SWCNTs-Pd will be an excellent sensor platform for safely detecting and monitoring the flow of hydrogen in all areas where there is a possibility of hydrogen leakage, such as hydrogen cars, charging stations, and power plants.

[포면계면 1-5 | 10:00]

원자층 반도체-초전도체 계면 형성 기반의 전계 효과 트랜지스터: 김지연, 박규민, 김유나, 서강훈, Abhishek Patil, 윤아연, 이상진, 이문상, 함명관* (인하대학교)

Keywords: 전이 금속 칼코젠화물, 화학 기상 증착법, 전계 효과 트랜지스터

2차원 나노 소재는 독특한 물리적, 화학적, 전자적 특성으로 인해 다양한 과학 및 산업 분야에서 큰 주목을 받고 있다. 이러한 2차원 소재 중에 준금속 특성의 $NbSe_2$는 낮은 온도에서 초전도성을 띄며 높은 전도도를 가지기 때문에, 양자 컴퓨팅, 양자 정보 처리 및 광전자 소자와 같은 응용 분야에서 유망한 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 기존의 기계적 박리 방법 대신, 화학 기상 증착법을 이용하여 균일하고 고품질의 2차원 소재를 합성할 수 있도록 초전도성 $NbSe_2$ 및 반도성 WSe_2 를 합성하였다. 본 연구팀에서는 성장 온도와 전구체 농도를 조절함으로써 삼각형 및 육각형 형태의 WSe_2 및 $NbSe_2$ 박막이 형성됨을 확인하였다. 또한, 본 연구팀에서는 반도성 물질인WSe_2를 채널로 사용하고 저온에서 초전도성을 띄는 $NbSe_2$를 전극(소스 및 드레인)으로 사용하여 2차원 나노소재 간 계면을 형성하여 반도체-초전도 접합 전계 효과 트랜지스터를 화학 기상 증착법 기반으로 제작하여 전기적 특성을 평가하였으며, 기존 WSe_2을 채널로 사용하고 금속 전극을 이용한 전계 효과 트랜지스터와 비교했을 때 더 뛰어난 특성을 보이는 것을 확인하였다. 향후 추가 연구를 통해 저온 소자 특성 평가를 통해 양자 컴퓨터용 소자로의 적용 가능성을 확인할 예정이다.

[포면계면 1-6 | 10:15]

화학기상증착법을 이용한 Atomic-layered 2D alloy의 합성과 전기화학적 특성: 서강훈*, Abhishek C. Patil, 박규민, 김유나, 김지연, 윤아연, 이상진 (인하대학교), Narayanan T. Narayanan (Tata Institute of Fundamental Research Materials & Interface Engineering), 함명관* (인하대학교)

Keywords: 2D 합금 구조, 수소 발생 반응(HER), 전기화학적 특성, 화학 기상 증착(CVD), 에너지 응용

2차원(2D) 합금 구조는 구조적, 전자적, 촉매적 특성의 조절 가능으로 인해 전기화학적 응용 분야에서 많은 관심을 받고 있다. 고엔트로피 합금(HEA) 개념을 기반으로 한 2D 합금 구조는 다수의 전이 금속을 포함하여 재료의 안정성과 기능적 다양성을 향상시킨다. 본 연구에서는 $Nb_xW_yMo_{(1-x-y)}Se_2$ 기반 2D 합금 구조의 합성, 특성 분석 및 수소 발생 반응(HER)에 대한 전기화학적 성능을 조사하였다. 2D 합금 구조는 NaCl을 촉매로 활용한 화학 기상 증착(CVD) 공정을 통해 제어된 환경에서 합성되었다. 구조적 및 화학적 분석을 통해 $MoSe_2$, WSe_2 및 $NbSe_2$ 나노플레이크의 형성이 확인되었다. 전기화학적 특성은 전기화학 임피던스 분광법(EIS)과 선형 주사 전압법(LSV)을 통해 분석되었으며, 결과적으로 우수한 전하 전달 성능과 낮은 과전압을 나타냈다. 이는 20 wt.% Pt/C 촉매와 유사한 HER 활성을 보였다. 본 연구는 2D 합금 구조의 수소 생산 및 에너지 변환 응용 분야에서의 잠재력을 강조한다.

[포면계면 1-7 | 10:30]

수열합성법을 이용한 원자층 Tellurene의 다양한 반도체 소자로의 응용: 김유나, 김지연, 박규민, 서강훈, 윤아연, Abhishek Patil, 허지훈, 이상진, 이문상, 함명관* (인하대학교)

Keywords: 텔루렌(Tellurene), 수열합성법, 2차원 소재, 반도체

원자층 정도의 얇은 2차원 나노 소재는 강한 정전 조정성, 기계 및 열적 안정성, 저전력 소비와 같은 독특한 특성이 있어 다양한 분야에 사용될 수 있다. 그중에서도 2차원 Tellurene은 뛰어난 환경 안정성, 높은 캐리어 이동도, 조절 가능한 밴드갭, 우수한 유연

성을 가져 차세대 반도체 소자의 재료로 주목받고 있다. 하지만 기존의 합성 방식에는 여러 한계가 존재한다. 화학 기상 증착법(CVD)은 성장 과정에서 기판에 영향을 받고, 성장 분위기를 섬세하게 통제해야 한다. 또한 top-down 액상 박리법(liquid-phase exfoliation)은 대량 생산이 용이하지만 두께 균일성 확보 문제로 상용화에 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 기판 없이 합성 가능한 수열 합성법을 적용하여 고품질, 대면적의 2차원 Tellurene을 합성할 수 있었다. 합성된 Tellurene은 두께에 따라 밴드갭이 조절되는 P형 반도체 특성을 가지며, 이를 활용하여 다양한 반도체 응용 소자를 제작하였다.

[표면계면 1-8 | 10:45]

철강 소재의 계면특성과 계면물성 상관성 규명: 송연균*, 조재동, 박중철, 유윤하 (㈜포스코)

Keywords: 금속, 표면, 계면,형상,산화성원소

철강소재의 계면은 소강성분(Bulk) 와 상이한 조성을 갖는다. 최근 철강소재의 고강도를 구현하기위해 첨가되는 Si, Mn, Cr 등 친산화성 원소는 계면(표면)에 집적하여 내부 Bulk 상태의 소강 성분과는 다른 산화상태로 존재하게 된다. 이러한 친 산화성 원소의 계면 집적은 기존 일반강의 액상과의 계면반응과는 상이한 기구와 특성을 나타낸다. 통상의 계면 반응은 탈지, 인산염, 내식성등을 의미하며 산화성 원소의 집적은 이러한 계면반응의 불균일을 유발하며 계면성능을 열위하게 만든다. 또한, 계면 형상(Morphology) 변화또한 용액과의 접촉면적의 변화를 유발한다. 본 고에서는 친산화성 원소 집적에 의한 계면특성의 변화가 계면성능의 변화를 유발시키는 과정을 규명하였다.

[표면계면 1-9 | 11:00]

자동차용 초고강도강의 인산염 처리성에 미치는 소둔 중 이슬점의 영향 연구: 박중철 (포스코, 고려대학교), 박지우 (고려대학교), 허윤욱 (포항공과대학교), 이준호* (고려대학교)

Keywords: 인산염, 초고강도강, 이슬점, 표면산화

본 연구는 자동차용 초고강도 강판의 인산염 처리성에 미치는 표면 산화물의 영향을 규명하는 것을 목표로 합니다. 소둔 과정에서 이슬점을 -30ºC와 +10ºC로 조정하여 표면 산화물을 제어하였고, 이에 따른 인산염 처리성의 변화를 조사했습니다. 샘플의 표면 특성은 GDS, XPS, TEM을 이용하여 분석하였으며, 이슬점 변화에 따른 산화물의 분포를 이해하기 위해 FactSage를 이용하여 열역학적 계산을 수행하였습니다. 이슬점 -30ºC에서는 인산염 반응이 거의 일어나지 않았으나, 이슬점이 10ºC로 증가함에 따라 인산염 처리성이 크게 향상되었습니다. 이러한 개선은 표면 산화물의 화학적 조성에 의해 영향을 받는 구조적 변화, 특히 Si 함량의 감소와 상대적으로 높은 Mn 함량, 그리고 10ºC의 이슬점에서 발생한 내부 산화로부터 기인한 것으로 나타났습니다.

[표면계면 1-10 | 11:15]

절단방법에 따른 삼원계 (Zn-Mg-Al) 용융 도금 강판의 절단면 특성 연구: 정현주*, 고정경 (POSCO)

Keywords: 삼원계 (Zn-Al-Mg) 용융 도금 강판, PosMAC, 부식, 절단면, 레이져커팅

삼원계 (Zn-Mg-Al) 용융 도금 강판은 일반 용융아연 도금강판대비 높은 내식성을 보유하여 강건재, 가전, 및 자동차 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 본 연구는 POSCO에서 개발한 삼원계 고내식강(PosMAC3.0(Zn-Mg 3%-Al2.5%))을 적용하여 연구를 수행하였다. 일반 도금강판은 가공부 및 절단부가 부식에 취약한 특성을 가지고 있으나 삼원계(Zn-Mg-Al) 도금 강판의 경우 self-healing effect 에 의해 노출된 절단부에 치밀한 산화피막이 형성되어 보호하는 특성을 가지고 있다. 절단부의 경우 절단방법, 절단부 형상, 소재 강도에 따라 부식 특성이 다를 수 있으며 산화피막 형성의 특성이 차이가 날 수 있다. 따라서 삼원계(Zn-Mg-Al) 도금 강판의 절단 방법 및 표면 특성에 따른 부식 거동에 대한 연구를 수행하였다. 쉬어링 커팅의 경우 절단면은 롤 오버-전단면-파단면으로 이루어져 있다. 절단면의 전단면 대비 파단면이 부식에 취약한 특성을 가지고 있다. 이에 쉬어링 커팅면에 따른 부식 특성에 대한 연구를 수행하였다. 최근 다양한 산업군에서 레이져 커팅이 널리 사용되고 있으며 레이져 커팅 시 상면에 도금층의 상면이 손실(melting)되고 하면에는 버(burr)가 형성될 수 있으며 이러한 환경이 단면부를 부식을 가속시킬 수 있다. 레이져 커팅면에 따른 부식 거동 및 산화피막 특성에 대한 연구를 수행하였다. 절단 방법에 따른 절단부의 특성 분석을 위하여 가속부식 실험(SST, CCT)을 통하여 산화피막을 형성시키고 FE-SEM, EPMA, 및 XRD 분석을 통하여 피막 특성을 상세 분석하였다.

[표면계면 1-11 | 11:30]

The Pickling Process: HyunJong Kim* (POSCO)

Keywords: pickling, acid, environment, additive, scale

With the development of iron and steel industry, progress in the pickling directly affects the enterprise's economic toward social benefit. The purpose of this study is based on the optimization of each process parameter in the pickling process, such as the useful method of acid washing liquid and concentration of additives and control of inclusion. Application of this method to the actual pickling work were introduced at the current pickling process. This study showed that the current acid concentration control for the most appropriate pickling time, the inclusion content, and temperature should be modified with the different pickling condition in a certain range. Finally the resulting composition formula as pickling additives were adapted to the process line. The additives have positive effects on accelerating pickling and acid mist inhibition. With Application of the optimized pickling process, the resulting surface quality of the metal plate and pickling efficiency were improved obviously, including the production of acid mist volatilization and waste acid are decreased. It proved certain environmental friendliness and playing a positive role in the metal plate production from this process optimization. In addition, the cold rolling process efficiency from the the pickling process variation was analyzed.

[포면계면2-1 | 14:00]

Laser Induced Selective Etching 기술을 이용한 Through Glass Via (TGV) 제작 기술 개발: 김해탄, 박창규* (서울과학기술대학교)

Keywords: 유리, Femtosecond Laser, Laser Induced Selective Etching, 나노인덴테이션, 라만 분광법

AI 반도체가 중요해짐에 따라 각광받고 있는 2.5D 패키징 기술은 기판과 반도체 칩 사이를 인터포저(Interposer)로 연결하여 여러 개의 반도체 칩을 수평으로 붙여 단일 패키지로 통합하는 기술이다. 현재 상용되고 있는 실리콘 인터포저는 고비용, 대면적화의 문제, 복잡한 공정 등으로 인한 단점이 존재하며 이를 극복하고자 유리 인터포저 제작에 대한 연구가 이루어지고 있다. 유리 소재 특성상 Cracking으로 인해 Hole 제작이 어려운 연유로, 균열 발생을 최대한 억제하고자 본 연구에서는 Laser Induced Selective Etching 기술을 이용하여 TGV (Through Glass Via)를 형성하였다. 레이저 유도 선택적 에칭 기술은 고출력 레이저 빔을 물질에 조사하고, 레이저 조사로 인한 조사 부의 결합구조 변화, 미세 크랙 등을 유도하여 레이저 조사부를 선택적으로 에칭하는 이방성 에칭 기술이다. 본 연구에서는 Borosilicate Glass에 Femtosecond Laser를 조사한 후 Wet etching을 진행하여 유리기판에 Via hole을 형성하였다. 나노인덴테이션 분석을 통해 모재와 TGV 주변부의 유리의 압입탄성계수(EIT), 잔류응력 등을 비교하였으며, 레이저 조사로 인한 유리의 화학 결합상태 및 밀도 변화를 연구하기 위하여 라만 분광 분석을 진행하였다.

[포면계면2-2 | 14:15]

$LiCoO_2$ 침출수로부터 리튬 전구체 및 $LiFePO_4$ 합성: 이준재, 안정빈 (서울과학기술대학교), 김재연 (재료연구원), 변재원, 박창규* (서울과학기술대학교)

Keywords: 배터리재활용, 수열합성, Li_3PO_4, $LiFePO_4$

전기차 시장의 성장과 함께 배터리 사용량이 증가하면서 폐배터리 발생량도 급격히 증가하고 있다. 폐배터리에는 코발트, 니켈, 리튬 등 가치 있는 금속 원소가 포함되어 있어 이를 회수하여 재활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 자원 순환과 환경 보호뿐만 아니라 배터리 소재 공급 안정성 확보를 위해 필수적이다. 본 연구에서는 $LiCoO_2$ 침출수에서 리튬을 회수하기 위해 Na_3PO_4를 활용하여 Li_3PO_4를 합성하였다. 합성된 Li_3PO_3와 $FeSO_4{\cdot}7H_2O$을 이용하여 수열 반응을 통해 $LiFePO_4$를 제조하였다. Li_3PO_4와 $LiFePO_4$는 X선 회절 분석과 주사전자현미경을 활용하여 결정구조 및 미세구조를 확인하였으며, $LiFePO_4$를 양극으로 사용하여 코인셀을 제작한 후 전기화학적 성능을 평가하였다. 2.3~4.2 V의 전압 범위에서 0.2 C-rate로 충·방전을 수행하였으며, CC-CV 방식으로 충전 후 CC방식으로 방전을 진행하였다. 이를 바탕으로 회수한 리튬을 활용한 배터리 소재 재활용 공정을 검토하였으며, 차세대 배터리 소재 연구의 기초 자료로 활용될 것으로 예상된다.

[포면계면2-3 | 14:30]

용매가 담지된 알루미나 필터를 사용한 코발트 및 네오디뮴의 선택적 분리 및 추출 효과 분석: 신동민, 윤소희, 정민성 (국립부경대학교), 김동현 (한국세라믹기술원), 문형석 (한국생산기술연구원), 이정훈* (국립부경대학교)

Keywords: 코발트, 네오디뮴, 용매추출, 알루미나 필터, 소수성 표면

코발트(Co)와 네오디뮴(Nd)은 전기차, 재생 에너지, 반도체, 항공우주 산업 등 다양한 첨단 산업에서 필수적인 금속 자원으로 사용된다. 하지만, 수요 증가와 제한적인 매장량으로 인해 효율적인 재활용 기술의 개발이 필수적이다. 기존 용매 추출 공정은 금속 이온의 선택적 회수에 주로 사용되지만, 다량의 유기용매 사용과 다단계 공정이 요구되어 경제성과 환경적인 문제를 야기한다. 이에 따라 지속 가능한 재활용 기술을 개발하기 위해서는 경제적이면서도 환경 친화적인 새로운 금속 이온 분리 공정이 필요하다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 용매 추출과 용매가 담지된 다공성 알루미나 필터를 결합하여 기존 용매 추출의 단점을 극복하였다. 코발트와 네오디뮴을 선택적으로 추출하기 위해 Cyanex 272, Di(2-ethylhexyl)phosphoric acid (D2EHPA)를 추출 용매로 사용하였다. 코발트, 니켈, 네오디뮴을 혼합한 용액과 황산을 각각 공급액과 탈거 용액으로 사용하였다. 1 mm 두께의 다공성 알루미나는 최소 100 nm의 매우 작은 기공 구조에 용매를 담지하였다. 이는 필터 표면에 Slipery liquid-infused surfaces (SLIPS)를 구현하여 수용액과 접촉할 때 구조 밖으로 이탈하는 것을 방지한다. 용매가 담지된 기공 구조는 금속 이온이 공급액으로부터 탈거 용액으로 이동하는 통로 역할을 하며, 필터는 소수성 처리하여 유기 용매와의 화학적 반응을 촉진하였다. 결과적으로, 공급액으로부터 탈거 용액으로 코발트와 네오디뮴만을 각각 선택적으로 추출 및 분리하였다. 본 연구에서 개발된 알루미나 필터 기반의 용매 추출 공정은 기존 용매 추출 공정의 단점을 극복할 수 있는 새로운 접근법으로, 소량의 용매 사용과 장시간 연속적인 금속 이온 회수가 가능하여 경제성과 환경적 지속 가능성을 동시에 확보할 수 있는 기술임을 확인하였다.

[포면계면2-4 | 14:45]

Composition-Driven Interphase Regulation for Li Metal Batteries Using Non-fluorinated LHCEs: 허유민, 임종우* (서울대학교)

Keywords: 이차전지, 리튬메탈배터리, 액체전해질, 표면분석

전기차(EV)의 보급이 확대됨에 따라, 더 긴 주행 거리, 빠른 충전 속도, 높은 내구성을 갖춘 배터리의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 리튬이온배터리(LIB)의 고전압 작동, 용량 증가, 에너지 밀도 향상 등의 성능 개선이 필수적이다. LIB의 안정성과 수명은 전극/전해질 계면의 특성에 의해 크게 좌우된다. 안정적인 계면이 형성되지 않으면 전해질 분해로 인해 부반응이 지속적으로 발생하여 전극과 전해질이 열화되며, 이는 배터리의 장기적인 수명과 성능을 저하시킨다. 최근 전해질 설계를 통해 전극/전해질 계면을 최적화하고 배터리 성능을 개선하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 국소 고농도 전해질(LHCE)은 리튬 금속 음극(LMA) 배터리의 계면 안정성 문제를 해결하기 위한 유망한 접근법으로 주목받고 있다. LHCE는 리튬-용매 상호작용보다 리튬-음이온 상호작용을 강화하는 weak li ion solvating cosolvent를 활용한다. 이를 통해 용매화 구조를 조정하여 무기물 기반 고체전해질계면(SEI) 형성을 유도하고, 기존 유기물 기반 계면보다 높은 기계적 강도를 가지는 SEI를 형성하여 장기적인 안정성을

확보할 수 있다. LHCE는 주로 리튬 금속 음극의 안정성을 향상시키기 위해 개발되었으나, 대부분의 시스템이 ether계 용매를 기반으로 하여 고전압 환경에서 산화되기 쉬우며, 이로 인해 양극의 안정성이 저하될 수 있다. 전해질 내 염과 용매뿐만 아니라 cosolvent의 비율은 전해질 구조 형성과 리튬-음이온 상호작용을 조절하는 핵심 요소로 작용하며, 그 비율에 따라 양극 계면 안정성과 수명이 크게 달라진다. 따라서 리튬 금속 음극과 고전압 양극의 동시 안정성을 확보하기 위해서는 정밀한 LHCE 설계 전략이 필요하다. 본 연구에서는 LiFSI/DME 기반 LHCE에서 cosolvent로 퓨란(furan)과 1,1,2,2-테트라플루오로에틸-2,2,3,3-테트라플루오로프로필 에터(TTE)를 활용하여, 전해질 조성이 리튬 금속 음극과 양극의 안정성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. Li|Cu 셀과 LFP|Thin Li셀을 이용하여 용매화 구조, 계면 형성 및 전기화학적 성능을 평가한 결과, 높은 퓨란 및 염농도의 전해질은 리튬-음이온 상호작용을 강화하여 음극 안정성을 개선하지만, 양극-전해질 계면(CEI)에서 두꺼운 유기물 기반 계면층 및 이온전도도가 낮은 LiF를 과생성하여 양극 성능을 저하시킨다는 것을 확인하였다. 전기화학 임피던스 분광법(EIS)과 X-선 광전자 분광법(XPS) 분석 결과, 과도한 퓨란 함량은 계면 저항을 증가시키고, 양극 계면에서 전하 이동 속도를 저하시켜 성능 열화를 유발하는 것으로 나타났다. 본 연구는 리튬 금속 음극과 고전압 양극의 안정성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 전해질 조성을 규명하고, 차세대 리튬 금속 배터리 개발을 위한 효과적인 LHCE 설계 전략을 제시한다.

[포면계면2-5 | 15:00]

$LiCoO_2$ 침출수로부터 리튬 전구체 및 $LiFePO_4$ 합성: 이준재 (서울과학기술대학교), 안정빈 (울산과학기술원), 김재연 (재료연구원), 변재원, 박창규* (서울과학기술대학교)

Keywords: 배터리재활용, 수열합성, Li_3PO_4, $LiFePO_4$

전기차 시장의 성장과 함께 배터리 사용량이 증가하면서 폐배터리 발생량도 급격히 증가하고 있다. 폐배터리에는 코발트, 니켈, 리튬 등 가치 있는 금속 원소가 포함되어 있어 이를 회수하여 재활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 자원 순환과 환경 보호뿐만 아니라 배터리 소재 공급 안정성 확보를 위해 필수적이다. 본 연구에서는 $LiCoO_2$ 침출수에서 리튬을 회수하기 위해 Na_3PO_4를 활용하여 Li_3PO_4를 합성하였다. 합성된 Li_3PO_4와 $FeSO_4{\cdot}7H_2O$을 이용하여 수열 반응을 통해 LiFePO4를 제조하였다. Li_3PO_4와 $LiFePO_4$는 X선 회절 분석과 주사전자현미경을 활용하여 결정구조 및 미세구조를 확인하였으며, $LiFePO_4$를 양극으로 사용하여 코인셀을 제작한 후 전기화학적 성능을 평가하였다. 2.3~4.2 V의 전압 범위에서 0.2 C-rate로 충·방전을 수행하였으며, CC-CV 방식으로 충전 후 CC방식으로 방전을 진행하였다. 이를 바탕으로 회수한 리튬을 활용한 배터리 소재 재활용 공정을 검토하였으며, 차세대 배터리 소재 연구의 기초 자료로 활용될 것으로 예상된다.

The 6th KIM-CSM Symposium
Room 202A, 4월 24일

[KC1-1 | 09:10] Invited Talk

Development and Application of Integrated Hot Stamping Parts: Zijian Wang* (Soochow University), Xiao Liang, Ze Peng (Jiangxi Hot Stamping Automotive Component Co., Ltd.), Chongchen Xiang, and Hanlin Ding (Soochow University)

Keywords: Hot stamping, Dooring, Numerical simulation, Die design, Crack and wrinkle

Hot stamping is a crucial manufacturing process for achieving automotive lightweighting and enhancing vehicle safety performance. With the widespread adoption of hot stamping in the automotive industry, the integrated door ring design has gradually gained application. This integrated design effectively reduces overlapping areas between components, optimizes force transmission paths during collisions, thereby achieving dual benefits of reducing total vehicle weight and improving crash performance. Meanwhile, the reduced number of body structural components lowers both die and vehicle assembly costs, making the integrated door ring design more cost-effective. In the design process of integrated door ring dies, special attention must be paid to the impact of weld seam positions on component formability. To ensure relatively uniform cooling rates across different regions of the door ring, varied die materials and customized cooling channel designs are required in distinct areas to maintain cooling consistency, ultimately guaranteeing dimensional accuracy of formed components. During the process design phase, numerical simulation methods are employed to predict potential cracking and wrinkling defects, with subsequent modifications made to component geometry and forming processes to prevent forming failures. The integrated door ring design methodology presented in this study has been successfully implemented in GAC Aion vehicles, demonstrating enhanced vehicle performance and delivering significant economic benefits.

[KC1-2 | 09:30] Invited Talk

Enhancement of Hydrogen Delayed Fracture Resistance in High-Strength Hot-Stamped Boron Steel: Hye-Jin Kim* (Tech. University of Korea), Seung-Pill Jung, Hee-Gun Shin, Seung-Chae Yoon, Jae-Yeul Gong, Byung-Gill Yoo, and Dong-Yeul Lee (Hyundai Steel Company)

Keywords: Hot stamped boron steel, diffusible hydrogen, hydrogen-induced delayed fracture, application

A widely adopted hot stamping method is direct hot stamping, in which a blank is heated in a furnace, transferred to a press, and subsequently formed and quenched in a cooled die. This process results in a fully martensitic transformation, significantly increasing the tensile strength of the steel. However, a major drawback of martensitic steels produced through hot stamping is their high susceptibility to hydrogen-induced delayed cracking. This issue arises from the diffusion of hydrogen into the material, which occurs due to surface reactions with the aluminum coating in the furnace atmosphere during heating. Furthermore, hydrogen-assisted cracking becomes a concern when the steel is exposed to corrosive environments during vehicle operation. To mitigate hydrogen-related failures, it is essential to understand the factors influencing hydrogen-induced delayed fractures, such as microstructure, diffusible hydrogen concentration, and stress-strain behavior. In particular, newly developed hot-stamped martensitic steels with an 1800 MPa tensile strength require a thorough investigation of hydrogen behavior to ensure their reliable application in the automotive industry. This study aims to optimize process parameters to improve the resistance of hot-stamped boron steel to hydrogen embrittlement by analyzing hydrogen uptake and desorption characteristics. This study focuses on the behavior of diffusible hydrogen in aluminum–silicon-coated hot-stamped boron steel during the hot press forming process used in automotive manufacturing. Using thermal desorption spectroscopy (TDS), we analyzed hydrogen absorption and desorption mechanisms during the hot stamping process and the automotive pre-treatment line for aluminized low-carbon steel. The findings indicate that during the hot stamping process, prolonged soaking in the heating furnace under specific dew point conditions during austenitization leads to increased hydrogen absorption in hot-stamped boron steel. TDS analysis further revealed that the activation energy for hydrogen trapping, is related to hydrogen embrittlement. A key factor influencing resistance to hydrogen-induced delayed fracture was identified as the prior austenite grain size. This study highlights the importance of optimizing process parameters to enhance the hydrogen embrittlement resistance of hot-stamped boron steels, providing valuable insights for improving the structural integrity and durability of ultrahigh-strength steel components in automotive applications.

[KC1-3 | 09:50] Invited Talk

Research and application of 1500 MPa free-coating and free-shot-blasting Nb-bearing press hardening steel for integrated door rings: Xiangxing Deng*, Cong Long, Jiaqi Song, Shuangshuang Liu, Jian Wang, Lintao Gui, Yongsheng Gao, and Yan Zhao (Beijing Institute of Technology)

Keywords: free-coating, Si-Cr micro-alloyed press hardening steel, oxidation resistance, mechanical properties

To address high costs associated with Al-Si coated 22MnB5, this study introduces LumiSword, a novel uncoated, free-shot-blasting press hardening steel. By optimizing Si and Cr micro-alloyed composition, LumiSword spontaneously forms a dense protective layer during heating, achieving high strength-toughness, oxidation resistance, and excellent weldability. Experimental results show a yield

strength of 1190 MPa, tensile strength of 1734 MPa, elongation of 7%, with oxidation weight gain reduced by 87% compared to 22MnB5. Its corrosion resistance after 720-hour salt spray testing approached that of Al-Si coated 22MnB5. LumiSword demonstrated excellent welding performance, producing fully martensitic weld seams (510-560 HV2) without filler wires. On the industrial production line, LumiSword steel was successfully used for small-batch manufacturing of integrated door rings. Without shot blasting, these components underwent production line coating, achieving adhesion grade 0 with defect-free surfaces. Simulation analysis further verified that LumiSword's three-point bending fracture energy surpasses 22MnB5, enhancing impact resistance. Economically, LumiSword reduced costs by 15%-30% compared to Al-Si coated steel, while eliminating shot blasting lowers mold wear and energy consumption. By overcoming high cost and welding restrictions on Al-Si coatings, LumiSword provides a cost-effective solution for automotive lightweighting. Its industrial application is expected to accelerate multi-part integration technology in structural components, and low-carbon transformation in automotive industry.

[KC1-4 | 10:10] Invited Talk

Laser-assisted Robotic Roller Forming of Ultrahigh Strength Steels: Junying Min* (Tongji University), Songgang Zheng (MASTER), and Zeran Hou (Tongji University)

Keywords: Robotic forming, Laser-assisted forming, Battery tray

A novel flexible forming process has been proposed to fabricate ultrahigh strength steels with tensile strengths higher than 1400 MPa, where the steel sheet is synchronously heated with a laser spot and formed by a roller or two rollers that are equipped on industrial robots. The novel process is termed as Laser-assisted Robotic Roller Forming (LRRF). The temperatures and microstructures of steel sheets during LRRF are investigated experimentally and numerically. We will present some applications of LRRF to ultrahigh strength steel beams of lightweight battery tray and car body structure.

[KC2-1 | 10:40] Invited Talk

Springback of high strength steels predicted by finite element simulations using self-consistent polycrystal model: Youngung Jeong*, Bohye Jeon, and Jaeseong Lee (Changwon National University)

Keywords: Dual-phase steel, anisotropy, forming, springback, texture

An elasto-visco-plastic self-consistent model (ΔEVPSC) has been employed to predict the springback of dual-phase 980 steel subjected to U-draw bending, which corresponds to the Numisheet '93 benchmark. The user material subroutine (UMAT) of ΔEVPSC polycrystal model was utilized with a commercial finite element (FE) solver, Abaqus/standard. The electron back-scattered diffraction (EBSD) scan was performed to obtain the separate crystallographic textures of ferritic and martensitic phases from the as-received sample. Despite the simplicity of the employed hardening model, various complex features of the flow stress behavior, including the Bauschinger effect and non-linearity in elastic loading and unloading, have been accurately captured by ΔEVPSC polycrystal model. With accurately describing the stress relaxation, the FE-predicted springback was in excellent agreement with experiment.

[KC2-2 | 11:00] Invited Talk

Lightweighting Technology and Application of Battery Packs for New Energy Commercial Vehicles: Rui Ge* (Wuhan University of Science and Technology)

Keywords:

The battery pack is a crucial safety component that houses the power battery system of new energy vehicles. It plays a vital role in ensuring the safe operation and protection of the product, and is directly related to the safety of the entire vehicle. Currently, aluminum alloys and composite materials used in the industry have prominent lightweight advantages. However, they suffer from issues such as high material costs, complex manufacturing processes, low production efficiency, and poor impact resistance. Traditional high - strength products, on the other hand, have low costs but are heavy in weight, which affects the driving range. To develop ultra - high - strength steel battery pack boxes with higher strength levels, high strength - toughness, and lightweight characteristics, the following key technical problems need to be overcome: ①High Precision: High - strength steel thin sheets have significant springback during forming, which increases the difficulty of product shape control. It is necessary to combine heat treatment processes with advanced forming processes to ensure product accuracy and improve the strength - plasticity product of ultra - high - strength steel sheets to meet comprehensive mechanical property requirements. ②Lightweight: When using steel to replace the current aluminum - based structures, it is essential to optimize the structural design and select materials rationally to offset the weight increase caused by the higher density of raw materials. At the same time, the safety requirements of the battery pack must be ensured. Aiming at the above technical challenges, this project takes the development and application of lightweight, low - cost ultra - high - strength steel battery packs for new energy vehicles as its goal, and focuses on key technologies such as the structural design of steel battery packs, precision machining and forming of parts, and manufacturing, to effectively achieve the engineering demonstration application of products. The main research contents are as follows: Optimization Design of Lightweight Steel Battery Packs Based on the Integration of Structure - Material - Safety Performance. According to the design indicators of the entire vehicle, a finite - element model of the battery pack box is created, and modal and strength analyses are performed on the created finite - element model. According to relevant regulatory requirements, a

simulation of the extrusion condition of the battery pack is carried out to evaluate the collision safety, and the safety design requirements for each condition are determined based on the simulation results. (2) Combining the geometric features of part surfaces, the continuous cooling transformation characteristics of material heat treatment, and a new path for profile processing and forming, a set of integrated equipment for high - precision forming of parts and ultra - high strengthening and modification is developed. Furthermore, through the optimization of forming temperature, forming passes, and forming roll profiles, short - process and low - cost processing and manufacturing of ultra - high - strength profiles during the forming process are achieved. (3) Two typical high - strength, tough, and lightweight battery pack products have been successively developed and successfully tested on vehicles and applied for demonstration. The battery pack box developed for new energy light trucks reduces the weight by approximately 107 Kg compared to the product developed with ordinary steel Q355 in the original plan. The ultra - high - strength lightweight battery pack box for commercial vehicles can reduce the weight of the battery pack for battery - swapping heavy trucks by approximately 124 Kg compared to the product developed with traditional high - strength steel QSTE700TM in the original plan.

[KC2-3 | 11:20] Invited Talk

A new technology for determining plastic anisotropy in structural materials: Kyeongjae Jeong* (Sungkyunkwan University) and Heung Nam Han* (Seoul National University)

Keywords: Neural networks, Spherical indentation, Finite element analysis, Plastic anisotropy, Strain field

Plastic anisotropy plays a critical role in the mechanical behavior and formability of structural materials, making its accurate characterization essential for engineering applications. Conventional uniaxial tensile tests are destructive and costly, limiting their practicality for material evaluation. To overcome these challenges, we propose a novel, non-destructive approach to determining the anisotropic plastic properties of materials using an instrumented indentation technique combined with an advanced data-driven framework. Our methodology leverages finite element simulations of spherical indentation to generate a comprehensive dataset. A neural network-based inverse model is then trained on this dataset to predict the plastic anisotropy of materials, including yield stresses and Lankford coefficients at different orientations relative to the rolling direction. The model utilizes indentation-derived in-plane and out-of-plane displacement fields, as well as load-depth curves, as key input features. Experimental validation demonstrates that the proposed technology accurately reconstructs anisotropic plastic flow characteristics, with predicted stress-strain responses closely matching those obtained from conventional uniaxial tensile tests. This approach provides a robust, efficient, and non-destructive alternative for assessing plastic anisotropy, paving the way for its widespread application in material characterization and structural integrity assessment.

[KC2-4 | 11:40] Invited Talk

Evaluation and modeling of the interfacial heat transfer coefficient between 1500 MPa press hardening steel sheet and die surface in hot stamping: Kyungseok Oh*, Hyunsung Son, a nd Honggee Kim (POSCO)

Keywords: Safety, Hot press forming, Press-hardening steel, Forming, Simulation, Heat transfer

Computer-aided engineering (CAE) analysis on the hot stamping simulation of press-hardening steel (PHS) needs a set of interfacial properties between part and tool such as a heat transfer coefficient (HTC) suitable for commercial software. In general, the simulation input cards consist of solver, history output, contour output, blank model, tool model, boundary condition and interfacial contact setup. The interfacial HTC between part and tool has a direct impact on the temperature distribution and consequently affects the microstructure and mechanical properties of the formed and quenched part. Press hardening steel (PHS) at an elevated temperature 930ºC is Austenite, and which transforms into other phases such as Ferrite, Pearlite, Bainite and Martensite during subsequent thermal histories. The phase transformations during hot stamping strongly depend on cooling speed at each element that is determined by heat transfer from part to nearby tool. Gap between part and tool as one of key factors that influence HTC was investigated. Before considering the “HTC to tool”, several factors should be preliminary determined such as heat capacity (HC), thermal conductivity (TC) and “HTC to air”, and then the “HTC to tool” is modeled and optimized. A tool having several gaps and contact pressure was designed and applied to experimentally simulate “HTC to air” and “HTC to tool”. The tool has six gaps (0.2~1.2mm) and two contact zones where were utilized to evaluate effects of gap and pressure on “HTC to tool” and determine HC, TC and “HTC to air”. Thermal cycle for testing the “HTC to tool” at an elevated temperature is divided into three stages: The first step is heating a coupon up to 930ºC and soaking for 75sec for full Austenizing, and the next step is to transfer the coupon on the test tool, and the final step is to cool the coupon until the temperature drops below 200ºC. The temperature profiles obtained in the six zones are used to optimize the “HTC to tool” model parameters. Tensile grade 1500MPa PHS with three different thickness were evaluated. The optimized model parameters were validated by comparing the simulated temperature profiles to experimentally obtained ones.

[KC3-1 | 14:00] Invited Talk

High cycle fatigue properties of thick plate steel for seashore structure depending on microstructures: Yong-Nam Kwon*, Hyunsung Choi (Korea Institute of Material Science), and W.Kim (Hyundai Steel)

Keywords: Steel, Plate, High cycle fatigue, Microstructure

Due to the increasing demand for high-strength steel, there is a growing need to develop thick plate steel with a grade of 60K or higher for use in seashore structures. To improve the mechanical properties of these steels, techniques are required to control microstructures, including grain size, phase type, and phase fraction. Furthermore, analytical techniques for identifying constituent phases are needed for high-strength steels with complex microstructures, such as ferrite, acicular ferrite, upper and lower bainites, etc. Analysis using high-resolution electron microscopy is time-consuming and limited in terms of analysis area. Therefore, this work aims to identify constituent phases and develop practical methods for easy microstructure analysis, which can aid in developing thick plate steel with high strength. Specifically, high-cycle fatigue properties were investigated under three different R ratios and discussed

[KC3-2 | 14:20] Invited Talk

Nb-enhanced FNC low dust emission brake rotors--A potential solution for Euro7 brake dust regulation: Yanchun Shi* (CITIC Metal Co., Ltd.), Bernardo Barile (CBMM), Jianfeng Wang (General Motors China Science Lab), Mike Holly (CBMM), Hongzhou Lu, Wenjun Wang, and Aimin Guo (CITIC Metal Co., Ltd.)

Keywords: Nb alloyed GCI, Ferritic Nitrocarburization, brake dust emission

The Euro 7 emission standard has been approved by European Commission in April,2024 and entered force in May 2024. The New standard requires to reduce “dust emissions” for both brake disc and friction materials. The conventional gray iron disc and brake pad combination is facing severe challenges in meeting new standards. Ferritic Nitrocarburization (FNC) is a mature surface treatment technology to increase surface strength, hardness and corrosion resistance. Niobium is an effective strengthening element in gray iron to enhance matrix strength, hardness and wear resistance. Preliminary lab trials have proven that niobium-alloyed ferritic nitrocarburized gray iron brake discs can offer the desirable combination of corrosion and wear resistance, therefore it becomes a potential solution for Euro 7 brake dust regulation. Preliminary industrial trial shows that 0.2% Nb addition combined with FNC treatment could provide gray iron disc nearly 50% particle emissions reduction. It is a promising low-cost solution to meet Euro7 brake dust regulation.

[KC3-3 | 14:40] Invited Talk

Advanced Non-Flammable Ca/Y-Containing Magnesium Alloys for Lightweight Structural Applications: Young Min Kim* (Korea Institute of Materials Science)

Keywords:

Magnesium alloys are the lightest structural metallic materials used in commercial applications. Their low density, high specific strength, and excellent damping capacity encourage their application in mobile components such as electronic devices and transportation vehicles, especially in aircraft seat structures. However, low resistance to ignition and corrosion, poor room-temperature formability, and relatively high costs compared to competing metals like steel and aluminum lead end users to regard magnesium alloys as unsafe, unreliable, and expensive. To overcome these fundamental limitations, significant effort has been devoted to developing new alloys and processes. In this context, a series of non-flammable magnesium alloys containing both Ca and Y has been developed at KIMS, which simultaneously improve non-flammability, corrosion resistance, and formability. As a result, it is considered applicable not only to automotive components and electronic devices but also to train bodies and interior parts. To meet the target properties required by specific applications, optimal chemical compositions and process parameters that control the microstructure and texture have been determined. For instance, an Mg-8Al-0.3Zn-0.1Mn-0.3Ca-0.2Y alloy extruded by a low-temperature, low-speed process exhibits a high tensile strength exceeding 420 MPa and low yield asymmetry, making it suitable for aircraft interior components. Moreover, an Mg-1Al-1Zn-0.2Ca-0.2Y alloy sheet subjected to cold rolling and subsequent recrystallization annealing achieves a fine-grained structure with random texture, which leads to excellent room-temperature formability (LDH over 9 mm). Further details on the application-oriented research of these non-flammable magnesium alloys will be presented.

[KC3-4 | 15:00] Invited Talk

Composite slippery liquid-infused porous surfaces for superior self-healing of Mg alloys: Wenhui Yao*, Junyao Xu, Yan Yang, Jiangfeng Song, and Bin Jiang (Chongqing University)

Keywords: Magnesium alloy, Surface treatment, Surface hydrophobicity, Self-healing

Light weighting of vehicles plays a crucial role in energy conservation and emission reduction. As one of the lightest engineering materials, magnesium (Mg) alloys show great potential for automotive lightweighting, due to their low density, excellent vibration damping, and good castability. Currently, they are primarily used in components such as steering wheels, seat brackets, and transmission housings. However, the relatively poor corrosion resistance of Mg alloys significantly restricts their wide applications in practice. Inspired by nature, slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPSs) are developed to alleviate corrosion of metallic materials. Nevertheless, conventional SLIPSs provide relatively limited corrosion protection for Mg alloys. Herein, corrosion inhibitor of 8-hydroxyquinoline (8-HQ) was incorporated into UiO-66 (denoted as 8-HQ@UiO-66), and then dispersed in silicone oil at different concentrations to fabricate nanoparticles-enhanced-SLIPSs with improved corrosion resistance and self-healing properties. Especially, when the concentration was 1 mg mL^{-1}, the synergistic interaction of 8-HQ and UiO-66 resulted in outstanding anti-corrosion properties. This was demonstrated by the lowest corrosion current density of 1.24×10^{-10} A cm^{-2} and the highest impedance modulus of 9.88×10^{8}

Ω cm^2 at 0.01 Hz. Furthermore, self-healing performances were assessed using scanning vibration electrode technique (SVET) in combination with electrochemical behaviors of scratched samples, suggesting the superior active corrosion protection of the as-developed SLIPS. This was primarily attributed to the synergistic effects of fluidity of silicone oil, ability to capture Cl^- ions of Mg-Al LDH, and exceptional corrosion inhibition of 8-HQ. Hence, the nanoparticles-enhanced-SLIPSs demonstrate considerable potential for practical application in corrosion protection of Mg alloys.

[KC3-5 | 15:40] Invited Talk

Effects of User-Defined Parameters on Cluster Analysis in Al-Mg-Si Alloys: MiYoung Lee (Korea Institute of Industrial Technology, Jeonbuk National University, Korea Institute of Science and Technology), Sara Song (Korea Institute of Industrial Technology), JiWook Park (Korea Institute of Industrial Technology, University of Science & Technology), Dieter Isheim, David N Seidman (Northwestern University), Seok-Jae Lee (Jeonbuk National University), and JaeHwang Kim* (Korea Institute of Industrial Technology, Korea Institute of Science and Technology, University of Science & Technology)

Keywords: Nanocluster, Age-hardening, Atom Probe Tomography

Nanocluster formed during low temperature aging affects the age-hardening behavior in aluminum alloys. This study investigates the cluster analysis of Al-Mg-Si alloys using atom probe tomography (APT).The parameters such as D_{max} and N_{min} can be derived from random labelling process (RLP). The parameters were highly affected by the researcher. There was limitation in detecting cluster in the case of fixed parameter. On the other hand, the parameters set by RLP accurately reflected the atomic arrangement inside cluster. The normalization was applied to clarify the effect of microalloying elements on the chemical composition of the cluster. Detail of cluster analysis will be introduced.

[KC3-6 | 16:00] Invited Talk

Research on non-homogeneity of super-large thin-walled aluminum alloy die-casting vehicle structural parts: Bo Liu* (University of Science and Technology Beijing), Jian Yang (University of Science and Technology Beijing, Nanyang Technological University), and Dongwei Shu (Nanyang Technological University)

Keywords: Automobile lightweighting, Giga-casting, Process parameter, Property prediction, Data driven

Giga-casting technology is a revolutionary technology for lightweighting of new energy vehicles. However, for the ultra-large complex thin-walled giga-casting aluminum alloy automobile body structure parts process defects amplification, complex residual stress distribution, the feed end and the distal end of the mechanical properties of the large differences in the inhomogeneity of the outstanding, resulting in riveted parts easy to crack. And due to the inconsistency of the wall thickness, there is a large difference in the performance of the part, which cannot be analyzed as a uniform part with equal performance. This project intends to investigate the melt flow behavior, strain distribution law, and defect generation mechanism of heat-treatment-free aluminum alloy ultra-large complex thin-walled giga-castings from casting molding simulation. Meanwhile, a series of high-vacuum high-pressure casting experiments are carried out from the application level to analyze the effects of different process conditions on the organization and performance. Through tools such as big data and machine learning, construct data-driven process-organization-defect-property correlation models based on data. The unknown region mechanical properties are predicted by known parameters. The project will solve the problem of variation in part performance due to process and localized thickness variations by accurately predicting the performance of each part prior to molding and riveting. This ensures molding and joining quality, reduces the number of trial molds and rivets, shortens the development cycle, and lowers product costs. .

New-Horizon International: Nano Convergence Materials Symposium

Room 202B, 4월 24일

[Nano1-1 | 09:10] Invited Talk

Diamond and cubic Boron Nitride grown in new ways in Metal Flux: Rodney Ruoff* (IBS CMCM and UNIST)

Keywords: metal flux, crystal growth, diamond, cubic boron nitride, MLFF and DFT modeling

Synthetic diamond has not been easy to achieve, although impressive progress has been made with high pressure high temperature (HPHT) growth in molten metals typically using a diamond seed, and by CVD (PE-CVD, HF-CVD) growth on a variety of substrates including CVD on diamond itself (such as from HPHT growth). Nanodiamonds are typically produced by detonation methods. It is rather widely perceived and also has been true to date that graphite is much easier to synthesize than diamond. Mother nature on Earth seems to concur. About 1.5M metric tons of natural graphite is mined annually, but a much smaller number of metric tons of industrial-type diamond is mined. About 3.5M metric tons of synthetic graphite are made annually and about 3,500 metric tons of synthetic industrial diamond is produced annually. And yet. Diamond and graphite are essentially isoenergetic from 0K to high temperature--at 1 atm pressure. There seems to be a rather strong perception on the part of humans that diamond is very rare and *must* also be very difficult to make. But if we assume chemical equilibrium at room temperature and 1 atm pressure, the mass percentage of diamond in an assumed pure carbon consisting of diamond and graphite, would be about 50 mass percent. Yes. About 50 mass percent diamond and 50 mass percent graphite. We agree that it is fortunate that diamond does not turn to graphite due the very large kinetic barrier: it is equally or more astonishing, and thanking that large kinetic barrier from the other direction--that 5 million metric tons of graphite does not spontaneously form a large fraction of diamond, either. I will discuss my propposal of new methods to grow diamond at 1 atm pressure and moderate temperatures from metal flux, in modfied Czochralski growth systems and Bridgman-type or Bridgman-Stockbarger-type growth systems, using diamond as crystal seeds. I will also give an example of how cubic boron nitride can be targeted for 1 atm and low T growth in metal flux, versus hexagonal boron nitride. Support by the Institute of Basic Science is appreciated.

[Nano1-2 | 09:40] Invited Talk

Ion transport within van der Waals crystals: Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Keywords: Ion transport within van der Waals crystals

The force-flux relationship is a fundamental concept in explaining mass transport under a driving force in non-equilibrium conditions. This relationship is captured by the Onsager relation, which describes how gradients in concentration, temperature, and voltage drive the transport of mass, heat, and charge, while also considering cross-effects. In this presentation, I will explore how ion transport driven by a voltage gradient varies depending on the diffusion medium, and how this transport can be harnessed in various technological applications. Specifically, I will focus on layered materials with van der Waals gaps, which facilitate ion movement along pathways with low diffusion energy barriers. These materials hold significant potential in semiconductors, metals, and insulators, where they could serve as memory devices, switching devices, and ion-sieving membranes.

[Nano1-3 | 10:10] Invited Talk

Development of two-dimensional nanomaterials for energy applications: Shintaro Ida* (Kumamoto University)

Keywords: 2D materials, oxide, oxynitride, and MOF nanosheets, proton conductivity

Various types of free-standing nanosheet membranes can be fabricated using suction filtration and spin coating methods with inorganic 2D nanosheet dispersions. These include a 200 nm-thick titanium oxide nanosheet membrane, a flexible oxynitride $Ca_2Ta_3O_9N$ nanosheet membrane capable of bending with a 1 mm curvature, perovskite-type oxide nanosheet membranes, and Bi-MOF nanosheet membranes. These membranes exhibit an oriented structure, with nanosheets perfectly stacked in a face-to-face configuration. Proton conductivity measurements of these free-standing nanosheet membranes demonstrated remarkable anisotropy, with in-plane conductivity exceeding out-of-plane conductivity by factors ranging from 10 to over 1000. Additionally, these inorganic nanosheet membranes exhibited excellent hydrogen gas barrier properties and functioned effectively as proton-conducting electrolytes in hydrogen/oxygen fuel cells. In this presentation, we will discuss the fabrication techniques and proton transport properties of these free-standing inorganic nanosheet membranes, as well as their performance as proton-conducting electrolytes in fuel cells. Fuel cells play a crucial role in enabling a sustainable future, as they generate electricity with water as the only byproduct and produce no carbon dioxide emissions. Two primary types of fuel cells used in automotive applications—polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) and solid oxide fuel cells (SOFCs)—face significant challenges in meeting the performance targets set for 2030. To address these challenges, our research focuses on developing next-generation fuel cell electrolytes based on inorganic nanosheets, including oxide nanosheets, oxynitride nanosheets, silicate nanosheets, and MOF nanosheets.

[Nano1-4 | 10:40] Invited Talk

Ion beam-induced high-aspect-ratio nanopatterns on metals for energy and environmental applications: Seohyun Cho, Eun Ji Seo, Chan Young Oh, Young A Lee, Sang Jin Park, and Myoung-Woon moon* (Korea Institute of Science and Technology)

Keywords: Ion Beam Patterning, Nanostructures, Functional nanometals, Current collectors

As materials and devices become increasingly sophisticated, surface engineering of functional materials is of growing interest in a wide range of scientific and technological applications, from environmental protection to renewable energy. Recently, ion-beam or plasma technologies, one of major methods for surface engineering, have provided robust techniques for controlled surface modification by creating functional structural features at nanometer scale on any surfaces including polymers or metals. In this talk, we present a robust technique for controlled surface engineering on metals using ion beam irradiation, which can not only form high aspect ratio nanoscale patterns such as ripples, hairs, or walls, but also enable scale-up applications. We discuss the underlying mechanisms of the evolution of these structural features through high flux Ar ion beam irradiation in the context of a co-deposited third element. We then introduce two characteristic nanopatterns of nanopillars and nanowalls evolved on the current-collecting metal foils of Al and Cu in lithium batteries, respectively. The nanofillers are demonstrated to be highly adhesive linkers between the Al and the cathode material, while the nanowall Cu exhibits highly lithiophilic sites on the anode current collector.

[Nano1-5 | 11:10] Invited Talk

Empowering inorganic-organic hybrid crystallization for sustainable future: Bumchul Park* (Korea University)

Keywords: Plasticity, anisotropy, strength, modeling

The rapid advancements in science and technology today come with their own set of challenges, much like two sides of the same coin. Key issues, including the surge in electricity demand, global warming, and the scarcity of mineral resources, present significant obstacles to the development of sustainable technological models. To overcome these barriers, breakthroughs that move beyond existing technological paradigms are essential. In nature, the formation of inorganic-organic hybrids through processes such as mineralization, chirality induction, and biogeochemical cycling plays a crucial role in sustaining healthy ecosystems. These natural processes offer valuable insights for materials scientists seeking solutions to address aforementioned contemporary issues. However, natural reactions often exhibit low efficiency and slow kinetics over large time scales. We aim to overcome these limitations by developing inorganic-organic hybrid crystallization processes that are more engineerable and possess faster kinetics. Here, we will present strategies for designing inorganic-organic hybrid crystallization to develop new materials and redox chemical reactions that offer greater efficiency, are abundant in nature, are more functional, and can be recycled, all aimed at fostering sustainability. In particular, we are controlling the crystallization processes of transition metal-based oxides and chalcogenides by hybridizing them with organic molecules. Two different approaches are covered in this talk: firstly, to regulate material formation at the atomic scale, enabling the engineering of new lattices; secondly, to leverage the crystallization process as a novel redox reaction applicable to various sustainable applications, including electrochemical batteries, catalysis, and environmental remediation.

[Nano2-1 | 14:00] Invited Talk

Metals, Oxides, and Hydrogen: The Chemistry and Function: Soshi Iimura* (National Institute for Materials Science.)

Keywords: hydrogen, metals, oxides, ion conduction, diffusion

Hydrogen is present in a variety of materials, including metals and oxides, and sometimes significantly alters the properties of the host material and itself. In steel and semiconductor materials, hydrogen generally degrades the functionality, but some materials such as hydrogen storage alloys, various fuel cell components, and amorphous silicon solar cells, actively exploit various forms of hydrogen's functionality, namely its fast diffusion, chemical, and electronic properties. In this talk, I will focus on hydrogen ions that are stabilized in highly polarized materials such as oxides and intermetallic compounds, and discuss the chemical properties (ionic states, chemical bonds, and positions) and functions (diffusion, electronic properties, and catalytic properties). In particular, I introduce the conduction properties of hydrogen anions in oxides, and the influence of the valence and bonding state of hydrogen ion in polar materials on the reactivity of hydrogen.

[Nano2-2 | 14:30] Invited Talk

Electrochemical Conversion of CO_2 using Single Atom Decorated Catalysts: Soo Young Kim* (Korea University)

Keywords: CO_2 reduction, Single Atom Catalyst, ZIF, MOF

The pursuit of a circular carbon economy and the need to surmount the constraints of CO_2 electroreduction technology has prompted the development of single-atom catalysts (SACs) for electrocatalysts. SACs consist of isolated metal atoms dispersed on a support material. First, zeolitic imidazolate framework (ZIF)-8 containing various transition metal ions—Ni, Fe, and Cu—at varying concentrations upon doping were fabricated for the electrocatalytic CO_2 reduction reaction (CO2RR) to CO without further processing. The electron-rich sp_2 C atoms of optimized copper doping on ZIF-8, leading to a local effect between the Zn–N_4 and Cu–N_4 moieties, achieve a maximum Faradaic efficiency for CO_2 to CO of 88.5% at -1.0 V (vs. RHE) with a stability over 6 h. Second, compared to nanoparticles, SACs have been shown to significantly enhance the efficiency of metal atom utilization by nearly 100%, which results in

a higher concentration of active sites, leading to outstanding catalytic activity, excellent product selectivity, and stability. Among the diverse support materials, the ZIFs, a sub-class of metal-organic frameworks (MOFs) with high nitrogen content, have been widely used to prepare metal-nitrogen-doped carbon (M-NC) SACs with dense active sites. Herein, we utilized an eco-friendly approach to produce two-dimensional ZIF-8 nanosheets (ZIF-8-NS) as an optimal support material for SACs. Additionally, we introduced Ni precursor into the synthesis process of Ni-ZIF-8-NS, which was then subjected to pyrolysis at 950 °C under a N_2 atmosphere to yield the final product, Ni-NC-NS. Ni-NC-NS demonstrated an outstanding CO2RR performance by exhibiting excellent Faradaic efficiency (FE) toward CO of ~100% both in the H-cell and flow-cell reactors as well as a remarkable turnover frequency (TOF) of 23,699 h^{-1}. Finally, we will present a facile strategy for synthesizing M–NC SACs using metal-chelating ligands, eliminating the need for additional processing steps. Specifically, the method to use ethylenediaminetetraacetic acid as a strong metal-chelating ligand will be shown.

[Nano2-3 | 15:00] Invited Talk

Development of graphene oxide fuel cell and other applications: Shinya Hayami* (Kumamoto University)

Keywords: graphene oxide, fuel cell, agri-bio, natural resource recycling

Despite graphene oxide (GO)-based proton conductor materials exhibiting notable research focus due to their fast proton conduction behavior, adequate fuel-cell performance with the GO-based proton conducting membrane still remains a major challenge. The proton conduction of GO in two different directions, in-plane and out-of-plane, is well established. In the former type, the in-plane conductivity represents the proton conductivity of GO in the same direction as the GO layer, while the out-of-plane conductivity shows the proton conduction on the opposite side of the GO layer. In practice, GO shows a very high proton conductivity value in the in-plane direction, while the proton conductivity value in the out-of-plane direction is comparatively low. Unfortunately, in the fuel-cell membrane electrode assembly (MEA), the direction of the proton conductivity is required in the out-of-plane direction. Therefore, the enhancement of proton conductivity in the out-of-plane direction is the key route to design a high-performance GO-based proton exchange membrane fuel cell. Furthermore, other applications in GO also will be discussed based on natural resource recycling.

[Nano3-1 | 15:50] Invited Talk

Composition and Interfacial regulation of photocatalytic heterostructures to promote hydrogen evolution performance: Junying Zhang* (Beihang University)

Keywords: Photocatalysis, heterostructure, hydrogen, interface, first-principle calculation

There are many factors affecting the properties of photocatalytic materials. To broaden the light absorption region, photocatalytic heterostructures have been extensively explored, wherein the interface states play a decisive role in the photocatalytic activities. My research group has been engaged in the investigation of photocatalytic materials by combining first-principle calculation with experimental research, especially focusing on the interfacial charge transfer process. In this talk, I will present some of our recent research advances in photocatalytic heterostructures for hydrogen production, showing how we can improve the solar-light-driven photocatalytic hydrogen evolution performance by modulating the composition and microstructure of the materials to broaden the absorption spectrum and improve the utilization of photogenerated charge-carriers through efficient interfacial charge transfer.

[Nano3-2 | 16:20] Invited Talk

Development of cascade systems and novel catalysts for CO_2 upcycling to C_4 hydrocarbons: Mi Gyoung Lee* (Incheon National University)

Keywords: CO_2 conversion, Electrochemistry, Thermochemistry, Cascade system, Metal-organic frameworks

Carbon neutrality The electrochemical CO_2/CO reduction reaction (eCO_2RR/eCORR) to value-added chemicals and fuels offers one potential pathway to lower greenhouse gas emissions. Substantial progress has recently been made in the performance of the eCO_2RR/eCORR system for hydrocarbons below C_3. To date, though, longer, valuable, hydrocarbons, C_{4+}, have so far been limited by low selectivity (< 5%) and limited production rates at near ambient conditions. The factors imply the need for more costly product separation to meet high industrial purity standards (> 99%) for the provision of a single C_4 isomer. To overcome these limitations, herein we developed a cascade route that could exploit recent progress in the electrified synthesis of low-carbon-intensity ethylene (C_2H_4) from C_1(CO_2/CO) all the way to C_4 hydrocarbons. We pursued a route to feed the outlet of the ethylene system into the dimerization reactor without purification, our goal to save both energy and cost. Cascade systems have been explored to permute electrochemical and thermochemical reactions in CO_2/CO upgrades to multi-carbon products. We found that CO, which is present alongside C_2H_4, enhances C_2H_4 dimerization selectivity to give C_4H_{10} to 95%, a much higher performance than when a CO_2 electrolyzer is used instead. We achieved an overall two-stage CO-to-C_4H_{10} cascade selectivity of 43%. Mechanistic investigations, complemented by density functional theory calculations reveal that increased CO coverage favours C_2H_4 dimerization and hydrogenation of $*C_xH_y$ adsorbates, as well as destabilizes the $*C_4H_9$ intermediate, and so promotes the selective production of the target alkane. This example of a combined electrochemical-thermochemical system offers a renewable-electricity-powered pathway for the selective production of C_4H_{10} at ambient conditions while avoiding separation costs between two reactors. Also, the engineered presence of CO may provide a useful degree of freedom in influencing electrochemical and thermochemical reactions to produce higher-molecular-weight hydrocarbon.

Furthermore, this study could be extended to produce other C_4 products, such as 1-butene based on developing the advanced MOF-based catalysts. Herein, I cover the two directions – system and catalyst engineering for value-added long-chain hydrocarbons.

[Nano3-3 | 16:50] Invited Talk

U-GQD-Si- based framework: synthesis, characterization, and application: Adila Rani*, Kim Jewook, and Jeon Seokwoo (Korea University)

Keywords: GQD, urea, thiourea, APTES, framework

Mesoporous silica nanoparticles can be used to create organic frameworks, which are functional porous crystalline, or amorphous ‘‘molecular Legos’’ made of light elements. Recently, carbon dots (CDs) are being combined with silica nanoparticles to create a Si-base framework, enabling CDs to generate room temperature phosphorescence (RTP) emission by suppressing intermolecular vibration. However, current CDs-based RTP materials face issues such as short lifetime, low quantum efficiency, and poor stability. To achieve efficient RTP, key features and principles must be satisfied in the fabrication strategy, including constructing a rigid network, forming stable covalent/ionic bonds between the matrix network and CDs, and tightly fixing CDs in 3D nano-space. Graphene quantum dots (GQDs) have recently received a lot of attention for their low toxicity, good solubility, tunable photoluminescence (PL), biocompatibility, and photo-induced electron transfer. The limitations of GQDs include a short lifetime, low quantum efficiency, and poor stability due to extrinsic characteristics. The objective of this study is to create metal-free multi-confined graphene quantum dots (u-GQDs-Si) with high PLQY, low FWHM, and exceptional stability using an effective multi-confinement effect. The multi-confinement effects are achieved by utilizing urea or thiourea as nitrogen or sulfur sources, respectively, and silica to create a rigid structure around the GQD. This presentation will go over the synthesis of a rigid GQD framework, as well as potential property improvements. Specifically, the PL and PLQY of various GQD sizes (1, 2, and 5 nm) and concentrations (5, 10, and 15 mg) in urea/thiourea and silicon matrix will be thoroughly discussed. Finally, the presentation will highlight the u-GQD-Si framework application.

철강B I-제선,제강,환경,에너지
Room 201A, 4월 24일

[철강B1-1 | 09:00]
저탄소 연원료 사용을 통한 고로기반 CO2 저감기술 개발 현황: 박지욱*, 이운재 (POSCO기술연구원), 이상호 (POSTECH 친환경소재대학원), 이영석, 라기호, 최규인 (POSCO기술연구원)
Keywords: 제선, CO2, 함수소가스, 수소, 대체철원

기후변화 대응을 위한 탈탄소 요구가 증대되는 가운데, 국내 CO2 배출량의 14% 이상을 점유하고 있는 한국 철강산업은 탈탄소 요구에 대응하고자 탄소 저감을 위한 다양한 기술을 개발 중에 있다. 철강산업에서 100% 수소 환원을 통한 넷제로 달성까지는 수소 생산/운송등 인프라 구축을 위한 시간이 필요하기 때문에 수소제철 이전 가교역할을 할 수 있는 기존 고로 공정 기반의 CO2 저감 기술이 필요하다. 이러한 관점에서 전세계적으로 일본의 COURSE50 project, 중국의 HyCROF 공정과 같이 고로내 함수소가스 풍구/Shaft 취입, CO2 분리, 연원료 개선을 통한 고로 기반 CO2 저감 기술에 여전히 많은 노력을 기울이고 있다. 우리나라도 COOLSTAR project를 통해 고로를 기반으로 CO2를 저감할 수 있는 기술개발을 추진해 왔다. 그 일환으로, 본 연구에서는 고로 풍구 함수소가스 취입 및 저탄소 대체철원인 LRI(Low Reduced Iron) 장입 통한 고로 공정 CO2 배출량 저감 가능성을 확인하고, CO2 저감 효율을 개선할 수 있는 방안을 도출/검증하고자 하였다. 또한 순수 수소를 사용하였을 경우 고로 CO2 한계 저감량을 평가하고 해외 사례와 비교함으로써 향후 고로 저탄소 기술 개발 방향을 제시하고자 한다.

[철강B1-2 | 09:15]
Influence of Flowability and Sticking Behavior on Fluidized Bed Stability in Hydrogen Reduction Process: Jae Dong Kim (Graduate Institute of Ferrous and Energy Materials Technology, Pohang University of Science and Tech, Hydrogen Reduction Research Group, Technical Research Laboratories, POSCO), Tae Hyeon Kim, Chang Kuk Ko, Young Seok Lee* (Hydrogen Reduction Research Group, Technical Research Laboratories, POSCO), and Youn Bae Kang* (Graduate Institute of Ferrous and Energy Materials Technology, Pohang University of Science and Tech)
Keywords: Hydrogen reduction, Fluidization, Sticking behavior , Flowability

The fluidized bed reduction process utilizing hydrogen as a reducing agent has gained significant attention as a promising route for carbon-neutral ironmaking. However, defluidization due to interparticle sticking of Direct Reduced Iron (DRI) remains a major challenge, affecting process stability and scalability. This present study aimed at investigating the influence of flowability and sticking behavior on the stability of a fluidized bed during H_2 reduction. A series of experiments were conducted using different types of iron ores to evaluate their impact on fluidization stability. Hematite-based Ore A, characterized by high total iron content and low alumina content, exhibited defluidization across the temperature range of 750–850ºC. While defluidization could be significantly delayed at 750ºC, it could not be completely prevented due to the formation of conical whiskers on particle surfaces, which subsequently transformed into Fe layers. Conversely, Goethite-based Ore B did not exhibit defluidization under identical conditions, as no whisker formation was observed. Quantitative rheological analysis using a ring shear tester demonstrated that the onset of defluidization was strongly correlated with a transition in flowability from easy-flowing to cohesive behavior, occurring when interparticle cohesion exceeded specific value. To mitigate defluidization, blending strategies were explored, After several trials, a mixing 20% of Ore B with Ore A effectively maintained easy-flowing behavior while lowering cohesion below the critical value. This optimization technique successfully prevented defluidization, demonstrating the potential for customized ore blending to enhance fluidized bed stability. The findings of the present study provide key insights into the sticking mechanism of DRI in H2 reduction and propose critical powder characteristics necessary for stable fluidization. By identifying optimal ore blends and rheological properties, this research contributes to the development of sustainable and efficient H2-based fluidized bed ironmaking process.

[철강B1-3 | 09:30]
함수소가스 취입 고로용 Coke 품질에 대한 원료탄 배합 및 사전처리 영향: 이운재*, 이승재, 박지욱, 라기호 (포스코기술연구원)
Keywords: 고로, 저탄소, 코크스, 함수소 가스

한국은 2050년 탄소중립 선언('20.12) 이후, 제26차 '유엔 기후변화협약 당사국 총회(COP26)'에서 2030년까지 2018년 대비 40% 감축을 '국가 온실가스 감축 목표(NDC)'로 제시하였다. 이러한 상황에서 국내 이산화탄소 배출량의 17% 이상을 점유하고 있는 철강산업은 전통적인 고로-전로 방식에서 탈피한 저탄소 체제로의 전환이 더욱 중요해지고 있다. 기존 탄소기반에서 수소기반의 철강제조 방식으로의 변화는 전세계적인 동향이며, 수소환원제철로 전환과정의 Bridge 기술로 고로-전로 방식에서 탄소배출을 저감하기 위해 함수소가스 고로 풍구취입 기술이 개발되고 있다. 수소함유 가스를 고로에 취입시 수소에 의한 광석 환원속도 증가 및 H_2O에 의한 탄소의 가스화반응 속도증가로 고로 환원제비가 감소되어 고로에 장입되는 Coke 층의 두께가 감소된다. 고로에 장입된 Coke 가 열원, 환원제, 통기/통액성의 역할을 수행하기 위해서는 기존 Coke 대비 고강도의 Coke 가 요구된다. 고로용 Coke의 품질을 증가시키기 위해 Coke 제조용 원료탄의 배합 및 장입조건 제어가 필요하다. Coke 제조용 고석탄화도 석탄은 결정화도가 높고 벤젠환 고리가 많아 Coke의 CO_2 반응성이 낮아 열간강도 확보에 유리하다. 또한 Coke 제조시 석탄의 장입밀도는 Coke 품질에

밀접한 영향을 주기 때문에, 장입밀도를 증가시키기 위한 방안으로 배합탄의 입도제어, 건조, 첨가제 혼합 및 일부를 성형하는 기술에 대한 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에는 함수소 가스 취입 고로용 고강도 Coke 제조를 위해, Coke 제조용 배합탄에 고석탄화도 석탄 배합 및 배합탄의 사전처리 조건의 순차적 복합적용에 따른 Coke의 품질 영향을 고찰하였다.

[철강B1-4 | 09:45]

스테인리스 전로 슬래그 잔류량 예측 기술: 정은주*, 하창수, 한승민 (포스코 기술연구원)

Keywords: 스테인리스, 전로, 슬래그 배재, 탈산 시간

스테인리스 강을 제조함에 있어 전로 및 AOD 공정을 이용하고 LT등의 후속 공정 작업을 진행하기 전에 용강 내로 개재물 등의 유입을 최대한 방지하기 하고자 래들 내 용강위에 존재하는 슬래그를 제거하는 작업을 진행한다. 본 논문은 래들 내 슬래그를 제거하고 난 뒤 남은 슬래그량을 수치화하고 후속 공정으로 그 정보를 전달함으로써 후속 공정에서의 정련 작업을 안정화시키고자 하였다. 그 방법으로 STS 제강공장 내 전기로, 전로 및 AOD에서 정련 과정 중에 발생한 슬래그를 제거하고 후속 공정으로 진행하기 전 래들 상부 표면을 카메라로 촬영한다. 촬영된 이미지를 통해 래들과 용강의 경계면은 이미지 검출 기법을 이용하여 그 정보를 확보하고, 이 경계면 내부에 존재하는 슬래그 량을 수치화하였다. 이 수치화된 슬래그량은 후속 공정에서 산화된 크롬을 환원하고, 용강 내 존재하는 산소를 제거하는데 투입하는 환원/탈산재 투입량 예측식에 parameter로 적용함으로써 후속 공정의 성분 적중률을 향상시킬 수 있었다. 이상과 같이 본 기술을 통해 강종에 따라 최대 26%이상의 탈산 시간 저감될 수 있음을 확인하였고, 이는 생산량 증대로 연결할 수 있다. 또한, 탈산 적중률이 향상됨에 따라 정련 시간 감소에 따른 내화물 원단위 저감 및 부원료 저감 등의 제강 원가 저감도 기대할 수 있다. 또한, 본 기술은 슬래그 배재 공정을 포함하고 있는 모든 제강 공정에 확대 적용이 가능하다.

[철강B1-5 | 10:00]

Reoxidation and Inclusion Evolution in Ti-added Ultra Low C steel: Thermodynamic and Diffusion Study: Young-Joon Park (GIFT, POSTECH) and Youn-Bae Kang* (GIFT, POSTECH, DMSE, POSTECH)

Keywords: Ti-ULC steel, Fe-Al-Ti-O system, Diffusion, Al-Ti-complex oxide

Interstitial-free (IF) steel achieves enhanced mechanical properties through the addition of Ti during steelmaking process. However, the low C content and Ti addition significantly increase susceptibility to reoxidation, leading to challenges in process control and inclusion evolution. Although various thermodynamic models have been developed to analyze Al-Ti complex inclusions, the diffusion behavior of solutes in ultra-low-carbon (ULC) steel under different reoxidation conditions remains a critical factor influencing inclusion stability. In the present study, one-dimensional diffusion simulation integrated with thermodynamic calculations (DST) was employed to investigate the equilibrium evolution of inclusions over time under varying reoxidation conditions. The refined thermodynamic model, incorporating the solubility of Fe, Al, and Ti in equilibrium oxides, enables accurate predictions of compositional changes in inclusions influenced by diffusion. The DST model evaluates O diffusion under different reoxidation scenarios, including Fe_tO, Fe_tO-containing slag, and Al_2TiO_5, along with the equilibrium phases and mass distribution at different spatial positions. Simulation results indicate that in Ti-added ULC (Ti-ULC) steel, despite the stability of Al_2O_3, reoxidation depletes both Al and Ti, leading to Fe oxidation and the formation of Fe-Al-Ti complex oxides. Experimental validation using reoxidation by Al_2TiO_5 confirmed these findings, where transiently formed Fe-Al-Ti oxides exhibited high Fe solubility that decreased over time as solutes diffused. The decomposition of Fe-Al-Ti oxides triggered oxidation-reduction reactions, forming additional Al_2O_3, Fe droplets, and Fe-Al-Ti oxides. These results suggest that Al-Ti complex inclusions act as oxygen carriers in Ti-ULC steel, promoting additional inclusion generation and submerged entry nozzle (SEN) clogging. Furthermore, the incorporation of Fe within oxides increases the effective density of inclusions, complicating their flotation and removal to the slag phase. The study highlights the critical role of solute diffusion in the evolution of inclusions and provides new insights into managing reoxidation-related challenges in Ti-ULC steelmaking.

[철강B1-6 | 10:15]

Corrosion of Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) by the CaF2-free mold flux: Jeong-Min Cheon (Seoul National University, Seoul, South Korea), Stephano Papadopoli Tonelli Piva, Zoé Bernard, Ata Fallah-Mehrjardi (Vesuvius, Ghlin, Belgium), and In-ho Jung* (Seoul National University, Seoul, South Korea)

Keywords: Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ), mold flux, continuous casting, submerged entry nozzle, Y2O3-ZrO2-Na2O-CaO-Al2O3-SiO2 system

In the submerged entry nozzle (SEN) of the continuous casting process, CaO-stabilized ZrO_2 (CSZ) has been widely used as a sleeve material due to its high-temperature stability. However, in mold fluxes with high CaO content, the formation of $CaZrO_3$ accelerates the corrosion of CSZ, leading to a significant reduction in the service life of the SEN nozzle. To address this issue, Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ), in which Y_2O_3 replaces CaO as a stabilizer, is being considered as a next-generation SEN sleeve material. This study aims to evaluate the feasibility of YSZ as a sleeve material in the CaF_2-free mold flux system composed of Na_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2. To investigate its corrosion behavior, crucible corrosion tests were conducted using YSZ crucibles and simplified mold slag compositions within the Na_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2 system. Post-mortem analyses were carried out to assess the corrosion behavior including interfacial reactions, elemental distribution, and slag infiltration using SEM/EDS. Moreover, thermodynamic modeling of the Y_2O_3-CaO-ZrO_2 system was performed to understand $CaZrO_3$ formation on both CSZ and YSZ sleeve material. This study found that YSZ can withstand

higher CaO content in mold flux compared to CSZ before the $CaZrO_3$ formation, and that ZrO_2 fluorite can be co-stabilized by Y_2O_3 and CaO simultaneously. The present thermodynamic database of the Y_2O_3-ZrO_2-Na_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2 system successfully reproduced the observed corrosion behavior from the present crucible corrosion tests.

[철강B2-1 | 10:40]

MgO-C 내화물 내산화성 향상을 위한 B4C의 효과: 박찬근, 정용석* (한국공학대학교)

Keywords: MgO-C 내화물, 산화방지제, B_4C

MgO-C 내화물은 Carbon의 높은 열전도도와 우수한 슬래그 저항성으로 인해 전기로 및 전로 공정에서 내벽 소재로 널리 사용된다. 그러나 고온 환경에서 Carbon은 산소와의 산화 반응($2C(s) + O_2(g) \rightarrow 2CO(g)$) 및 자체 열화 반응($C(s) + MgO(s) \rightarrow Mg(g) + CO(g)$)을 겪으며, 이로 인해 내부에 기공이 발생하고, 슬래그 및 용강의 침투로 손상된다. 이를 방지하기 위해 다양한 산화방지제에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 Al 및 Si과 같은 금속 산화방지제는 낮은 가격과 우수한 내산화성으로 가장 널리 사용되고 있다. 최근에는 B_4C와 같은 보론계 산화방지제의 효과에 대한 연구도 진행되고 있으나, Al과의 조합에 따른 내산화성 향상 효과에 대한 체계적인 연구는 미비하다. 본 연구는 Al 산화방지제의 함량을 고정하고, B_4C 산화방지제를 0~3%로 설계하여 B_4C의 함량에 따른 MgO-C 내화물의 내산화특성에 대해 연구하였다. 한편, 온도에 따른 특성 변화를 대기 분위기에서 1300~1500°C 로 변화시키면서 실험하였다. 본 연구에서는 B_4C 함량 및 온도에 따른 내화재의 기계적 특성 및 기공도, 밀도 변화와 내산화 특성을 제시하고자 한다. 또한 탈탄 반응에 대한 중량 감소 및 탈탄 면적을 Shrinking Core model을 통해 반응속도적 해석을 제시하고자 한다.

[철강B2-2 | 10:55]

Evaluating the Nitrogen Solubility in Iron with Ammonia Injection: GYOKHANG PARK, Wan Ho Kim, and Il Sohn* (Yonsei university)

Keywords: Hydrogen reduction, DRI, Nitrogen, Ammonia direct reduction

In the steel industry, hydrogen direct reduction methods for producing direct reduced iron (DRI) or hot briquetted iron (HBI) have become crucial for reducing CO_2 emissions. These iron units can be linked to electric arc furnaces (EAF) or smelters. However, the challenges associated with hydrogen transport, storage, and use have led to exploring ammonia as an alternative hydrogen carrier. Furthermore, the introduction of carbon-free DRI or HBI in the steelmaking process has raised concerns about nitrogen infiltration and its dissolution into steel, which can affect product quality. This study investigates the solubility of nitrogen in steel, when ammonia is used directly in the reduction process. Experiments were carried out in a vertical furnace at temperatures between 500 and 800 °C, injecting nitrogen and ammonia gases to study nitrogen solubility and the formation of nitrides in iron (>99.5%Fe, electrolytic iron). The range of temperatures simulate typical hydrogen reduction conditions in shaft or fluidized bed reactors. The sample was loaded at room temperature and heated at a heating rate of 4.4 K/min to the target temperature before injecting the reaction gas. After the gas injection, the sample was removed at target temperature and then cooled and purged by helium gas. Nitrogen content was measured using a LECO ONH-836 analyzer, and XRD analysis was performed on quenched samples to identify the phases present. This research also explored the relationship between nitrogen solubility, carbon content in iron, and the partial pressures of ammonia, aiming to find conditions that minimize nitrogen dissolution. Maintaining nitrogen levels below 50 ppm is critical, especially for high-quality steels like Interstitial Free (IF) steels. This study addresses how to manage nitrogen solubility as the industry shifts towards hydrogen reduction methods, contributing to sustainable iron and steel production.

[철강B2-3 | 11:10]

Coupled thermodynamic modeling and experimental phase diagram study of the ZrO2-B2O3-SiO2 system for the refractory-mold flux interaction: Seungjae Park and In-Ho Jung* (Seoul National University)

Keywords: Refractory, Mold flux, Thermodynamics, CALPHAD, Phase diagram

Zirconia-based refractories play a crucial role in steelmaking due to their excellent thermal stability and resistance to slag corrosion. These refractories are commonly used in submerged entry nozzles (SEN), slide gate plates, and mold sleeves, where they frequently interact with mold fluxes during continuous casting. Understanding the phase equilibria and thermochemical behavior of zirconia-based refractories in contact with mold flux is essential for predicting their corrosion resistance and optimizing their performance in high-temperature steelmaking environments. In this study, the phase equilibria of the ZrO_2-B_2O_3-SiO_2 ternary system were investigated through experimental phase equilibrium studies and thermodynamic modeling. High-temperature equilibration followed by quenching and microstructural analysis using XRD and EPMA techniques was conducted to determine stable phases and phase boundaries. The CALPHAD (CALculation of PHAse Diagrams) approach was employed to develop a thermodynamic database for the refractory-mold flux system, enabling accurate prediction of phase stability and interactions under various steelmaking conditions.

[철강B2-4 | 11:25]

BOF Slag-Based Glass Fertilizers for the Marine Ecosystem: Jisun Lee, Seon-jin Kim (Pohang University of Science and Technology), Tae-min Yeo (Seoul National University), and Jung-wook Cho* (Pohang University of Science and Technology)

Keywords: BOF Slag, Glass fertilizer, Marine ecosystem

Slag production, alongside steel production, has increased significantly over the past decade. To reduce the environmental impact of the steel industry and ensure its sustainability, landfilling of slag should be avoided, and innovative recycling methods should be explored. In South Korea, most slags generated in the steel industry are recycled as embankments, pavements, or fillers for soil and public water projects. On the other hand, the chemical composition of BOF slag makes it a promising candidate for environmental applications, such as ecosystem restoration. BOF slag is rich in Fe and Si, both essential nutrients for marine environments. In particular, the release of Fe ions from iron-rich slag into seawater can stimulate the growth of phytoplankton, promoting photosynthesis and atmospheric CO_2 absorption, ultimately leading to CO_2 fixation. Since BOF slag contains a significant amount of Fe^{2+}, the preferred form of Fe for microorganisms, it has the potential to revitalize the marine ecosystem. However, Fe^{2+} is rapidly oxidized to Fe^{3+} by dissolved oxygen in seawater, necessitating a controlled and sustained release mechanism. Additionally, excessive nutrient release can increase seawater pH, inhibiting phytoplankton growth. To address this challenge, we vitrified BOF slag into chemically durable silicate glass for controlled release of nutrients. The structural properties and corrosion behaviors of each glass sample were analyzed, with a particular focus on the behavior of Fe during seawater corrosion. The overall glass network structure was examined using Raman spectroscopy, while the local chemical environment of Fe was investigated through XAFS spectroscopy. After corrosion, ToF-SIMS depth profiling was performed to study the surface chemistry of the corroded glass. This work presents a novel approach to recycling BOF slag for marine applications and provides valuable insights into the corrosion behavior of glass.

[철강B2-5 | 11:40]

폐Al2O3 내화물 및 재활용 콘크리트 페이스트를 이용한 탈황 래들 플럭스 개발: 김기원, 명재우, 차은환, 정용석* (한국공학대학교)

Keywords: 탈황 Flux, API강, 폐Al_2O_3 내화재, 재활용 콘크리트 페이스트

산업 공정에서 내화성 폐기물은 매년 수십만 톤의 속도로 부산물로 발생하며, 이로 인해 환경 부담이 증가하고 있습니다.[1] 탄소 중립 목표를 달성하기 위해 산업 폐기물의 재활용이 중요한 전략으로 떠오르고 있으며, 특히 소진된 내화물을 플럭스로 재활용하는 노력이 지속적으로 증가하고 있습니다.[2,3] 이를 통해 원료 사용을 최소화하고 공정의 에너지 효율을 향상시켜 탄소 배출을 저감할 수 있습니다. 본 연구는 다양한 폐알루미나 내화물과 재활용 콘크리트 페이스트(RCP)를 활용하여 탈황 래들 플럭스를 개발하는 데 중점을 두고 있습니다. 낮은 녹는점을 가진 플럭스가 우수한 성능을 보이고 슬래그에 더 효과적으로 용해되는 것으로 보고되었습니다.[4] 조성 설계는 낮은 녹는점 $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 기반 플럭스를 목표로 RCP($CaO-SiO_2$)와 혼합된 70~99%의 알루미나 재활용 내화물로 구성된 플럭스를 목표로 했습니다. 실험에는 API 강의 래들 슬래그에 플럭스의 10~30wt%를 도입하여 성능을 평가하는 것이 포함되었습니다. 이 연구는 슬래그 내의 최대 유황 농도와 유황 분포 비율(L_S)을 결정하여 1550°C에서 탈황에 대한 플럭스의 효과를 입증합니다. 슬래그와 플럭스의 녹는점은 다음과 같이 평가했습니다. 샘플은 수평 튜브로 가열되었고, 용융 중 플럭스의 이미지는 전하 결합 소자(CCD) 카메라를 사용하여 얻었습니다. 표준 방법에 따라 샘플이 원래 높이의 절반(= 반구 온도; T_H)과 1/3(= 유동 온도; T_F)으로 감소했을 때 온도를 측정했습니다. 한편, 탈황 성능은 FactSage 계산과 후속 실험을 통해 검증되었습니다. 래들 슬래그의 고형 분율은 13.4%였고, 기존 래들 슬래그에 플럭스를 더 많이 첨가함에 따라 슬래그의 녹는점과 고형 분율이 감소하여 고형상이 약 1% 이하로 감소했습니다. 저알루미나가 포함된 플럭스를 사용하면 슬래그 액화에 가장 큰 효과가 나타났습니다. 용광로 슬래그의 Sulfide capacity(C_S^{2-})의 log값은 -2.08이었습니다. 플럭스를 첨가함에 따라 log C_S^{2-}는 감소하여 -2.11의 최소값에 도달했습니다. 그러나 플럭스를 더 많이 첨가함에 따라 L_S가 증가했습니다. 용광로 슬래그의 L_S는 32.4였고, 10 wt% 플럭스를 첨가함에 따라 35.0, 34.5, 34.2로 증가했습니다. 20 wt% 플럭스를 첨가함에 따라 L_S는 각각 37.3, 36.5, 36.0으로 더욱 증가했습니다. 30wt% 플럭스를 첨가함에 따라 L_S는 37.6, 38.4, 37.7로 상승했습니다. 저알루미나를 첨가한 플럭스는 10 wt% 및 20 wt% 첨가에서 가장 좋은 탈황 성능을 보인 반면, 중알루미나를 첨가한 플럭스는 30 wt% 첨가에서 가장 높은 탈황 효율을 보였습니다. 이러한 결과에 대한 자세한 해석과 분석은 프레젠테이션에서 제공될 것입니다.

[1] “Posco Future M achieves 100% recycling of refractory waste”, The Korea Herald, Oct.16. 2023 [2] Horckmans, Liesbeth, et al. Resources, Conservation and Recycling 140 (2019): 297-304. [3] Viklund-White, C., Johansson, H., & Ponkala, R. Sixth Interntational Conference On Molten Slags, (2000). [4] Wang, Hongming, et al. ISIJ international 51.5 (2011): 702-706.

[철강B3-1 | 14:00]

Phase Transition of Silico-Ferrite of Calcium and Aluminum: Comparison between In-situ Observation and Thermodynamic Calculation: Haeun Kim and Joonho Lee* (Korea University)

Keywords: Sinter, SFCA, phase transition, in-situ observation, thermodynamic calculation

Silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) serves as a bonding phase in iron ore sinter. While numerous researchers have explored the composition and crystal structure of SFCA, a widely applicable thermodynamic database for this compound has been lacking. Recently, Murao et al. reported a new database for SFCA, which is evaluated in this study. The phase transition during the melting of SFCA was analyzed using Differential Scanning Calorimetry and Confocal Laser Scanning Microscopy. Initial melting was observed at 1183.2°C, with significant melting occurring between 1351.1°C and 1358.2°C. A phase transition-melting was noted in the range of 1476.5°C to 1478.7°C. The experimental findings were compared with the calculated results derived from the new database. This comparison highlighted the limitations of the new database and suggested future directions for phase transition research.

[철강B3-2 | 14:15]

고로 슬래그의 점성 예측모델: 신현우, 정택용, 강영조*, 이학성 (동아대학교), 이혜란 ((주)영풍 Green)

Keywords: 고로, 용융슬래그, 점도, 점도예측모델, 머신러닝

고로 공정 중 슬래그의 점도가 증가하게 될 때 고로 Bosh 하부에서 생성되는 선철과 용융 슬래그가 공존하는 조건에서 용철 적하가 곤란한 문제가 발생할 수 있다. 또한 환원가스의 통기성이 억제되어 조업에 있어서 고로 상부로 열전달 효율이 감소할 수 있다. 이에 고로 내 용융 슬래그의 점도 예측은 중요하다. 고온에서 용융 슬래그의 점도에 대한 연구는 오랜 기간동안 활발하게 수행되어 왔고, 과거 점도 측정 결과를 바탕으로 Iida, Urbain, Riboud 등의 여러 연구자들에 의해 점도 예측 모델이 제안된 바 있다. 그러나 일부 모델은 적용 가능한 슬래그 성분에 한계가 있고, 점도의 측정 값과 예측 값의 차이가 크게 나타나는 경우가 있다. 이에 본 연구에서는 CaO-SiO2-Al2O3-MgO-FeO-TiO2 다원계 슬래그의 점도를 1600ºC - 1450ºC의 온도 범위에서 측정하였으며, 각 슬래그 시스템에 대해서 염기도(CaO/SiO2)와 다양한 조성(Al2O3, MgO, FeO, TiO2)의 변화가 점도에 미치는 영향을 분석했다. 측정된 실험 데이터를 다중회귀를 통해 아레니우스 식을 기반으로 하는 점도 예측 모델을 도출하였으며, 도출된 모델은 실 측정 데이터와 비교하였을 대 양호한 일치도를 예측하는 것이 가능하였다. 또한 도출된 점도 예측 모델을 머신 러닝 기법으로 개발한 모델과 비교하여 타당성을 평가하였다. 본 모델을 활용하여 고로 슬래그의 점도를 통합적으로 예측함으로써 조업의 효율성이 높이는데 도움이 될 것으로 기대된다.

[철강B3-3 | 14:30]

고로 슬래그 중 CaO의 용해 속도와 용해 메커니즘 연구: 이자성, 김영재* (인하대학교), 이성희 (포스코)

Keywords: 고로 슬래그, 용해 속도, 제선 공정, 용해 거동

탄소 중립 실현을 위하여 고로 공정에서 발생하는 이산화탄소 배출을 저감하는 것은 세계 철강 산업이 당면한 주요 과제 중 하나이다. 현재의 고로 공정은 소결광을 원료로 이용하며, 소결광을 생산하는 소결 공정에서 발생하는 온실가스는 전체 철강 공정의 20%를 차지하는 것으로 보고되어 있다. 이러한 관점에서 소결 공정을 생략하여 제선 공정을 단순화시키고 이산화탄소 배출을 저감시키려는 연구가 주목받고 있으며, 고로 공정에서 소결광의 사용량을 저감하기 위하여 펠렛과 환원철을 원료로 이용한 브릿지 기술의 적용이 검토되고 있다. 하지만 소결광 사용량의 저감은 고로 공정에서의 염기도 저하를 야기하며, 안정적 조업을 위해서는 염기도에 대한 보상이 필수적이다. 본 연구에서는 고로 조업에서의 염기도 보상을 위하여 CaO를 첨가하였을 때를 상정하여, 고로 슬래그에서 CaO의 용해 거동에 미치는 인자를 평가하고, 슬래그 중 CaO의 용해 메커니즘을 연구하였다. CaO-SiO_2-Al_2O_3-FeO_t-MgO 5원계의 고로 슬래그 조성에 대하여 CaO의 용해 속도에 미치는 온도, 염기도, FeO, MgO 농도의 영향을 평가하였다. 고로 내의 정적 상태를 가정하여 가스 주입이나 외부 교반 없이 용융 슬래그 중 CaO의 용해 속도를 평가하였으며, 열역학적 용해 구동력을 평가하기 위해 열역학 계산 소프트웨어인 Factsage를 사용하여 다양한 슬래그 시스템에서 CaO의 이론적 포화 농도를 도출하였다. 이를 통하여 슬래그 중 CaO의 화학 포텐셜 차이가 CaO 용해 속도를 결정하는 주요 인자임을 확인하였다. 끝으로 주사전자현미경을 이용하여 고로 슬래그 중 CaO의 용해 메커니즘을 규명하였다. 슬래그 중으로 CaO가 녹아들어갈 때, 먼저 저융점의 Olivine 상을 형성하고, 이후 CaO가 용해됨에 따라 Olivine 상 중 MgO를 CaO가 치환해 들어가면서 고융점의 dicalcium silicate 상을 형성하는 것으로 예측되었다.

[철강B3-4 | 14:45]

H_2-DRI 용융 슬래그 내 FeO의 환원 속도에 미치는 맥석(MgO, Al_2O_3)의 영향: 배성준, 박주현* (한양대학교)

Keywords: 수소환원 DRI, 전기용융로, FeO 환원, 맥석 성분

철강 산업의 온실가스를 절대적으로 감축하기 위해서는 기존의 일관제철 공정에서 수소 기반 환원제철 공정으로의 전환이 필수적이다. 그러나 철광석의 품위는 시간이 지남에 따라 점점 저하될 것으로 예상되며, 이러한 흐름 속에서 지속 가능한 철강 생산을 위해 저급 분철광석을 활용한 수소환원철(H_2-DRI)을 용해하여 용선을 생산하는 전기용융로 공정이 주목받고 있다. 저급 분철광석을 수소로 환원한 DRI는 기존 상업화된 DRI보다 금속화율이 낮을 것으로 예상되며, 이를 전기용융로에 투입하면 FeO 함량이 높은 슬래그가 생성된다. 따라서 Fe 실수율 증가 및 슬래그 재활용을 위해서는 탄소에 의한 슬래그 내 FeO의 신속 환원이 중요하다. DRI 제조에 사용되는 철광석의 종류에 따라 DRI 내 맥석 성분의 조성이 달라지며, 이러한 차이는 슬래그 내 FeO의 환원 거동에 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 대표적인 맥석 성분인 MgO와 Al_2O_3의 함량이 슬래그 내 FeO 환원 메커니즘과 환원 속도에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, FeO 환원 속도에 대한 맥석 성분의 영향뿐만 아니라, 도가니 재질이 미치는 영향을 평가하기 위해 MgO 도가니와 Al_2O_3 도가니를 각각 사용하여 실험을 진행하였다. 실험은 고주파 유도로에서 용융환원 반응을 진행하였으며, 실시간 배가스 분석을 통해 슬래그 내 FeO 환원속도를 분석하였다. 또한, 환원 과정에서 시간에 따른 슬래그 조성 변화를 관찰하기 위해 실시간 샘플링 기법을 적용하였다. 실험 결과, 고체 탄소에 의한 용융 슬래그 내 FeO 환원 반응은 ① 유도기(incubation), ② 정상 상태(steady state), ③ 감속기(degradation)의 세 단계로 진행됨을 확인하였다. 유도기 단계에서는 MgO와 Al_2O_3의 질량비에 따라 유도기의 지속 기간이 달라졌으며, 이는 슬래그의 물리적 특성이 탄소 주변에서의 기포의 핵생성과 성장 속도에 영향을 미친 결과로 해석된다. 정상 상태 단계에서는 MgO 도가니를 사용한 경우 상대적으로 높은 환원 속도를 보였으며, Al_2O_3 도가니를 사용한 경우 환원 속도가 저하되었다. 이는 도가니로부터 용출된 Al_2O_3가 슬래그 내에서 network former 역할을 하여 슬래그의 점도를 증가시켰기 때문으로 해석된다. 본 연구를 통해 전기용융로 슬래그 내 FeO의 신속 환원을 위한 최적의 슬래그 설계를 위한 기초 데이터를 제시하고자 하며, 이를 바탕으로 Fe 실수율 증가 및 슬래그 재활용성을 향상시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

[철강B3-5 | 15:00]

Investigations of Carburization and Melting Behavior of Various Reduced Iron Sources for Rapid Melting in the ESF Process: Won-Bum Park, Jooho Park (POSTECH), Sang-Chae Park (POSCO), and Youn-Bae Kang* (POSTECH)

Keywords: Hydrogen Based Iron and Steelmaking, Direct Reduced Iron, Carburization, In-situ Observation

The iron and steel industry are undergoing a major transition toward hydrogen-based reduction processes to mitigate CO_2 emissions. Conventional carbon-based reduction relies on C/CO as a reductant, which inevitably results in CO_2 emissions. In contrast, the hydrogen-based direct reduction process eliminates carbon-related emissions, making it a promising alternative. However, this process presents a fundamental challenge: Direct Reduced Iron (DRI) produced through hydrogen reduction has a melting temperature close to that of pure iron (~1538°C), making efficient smelting difficult. Introducing carbon into DRI is essential to lower its melting temperature and improve its smelting behavior. Melting kinetics and overall energy consumption are influenced by the presence of carbon influences during smelting. This study aims to comprehensively analyze the carburization and melting characteristics of DRI, focusing on the effects of carbon content, different carbon-bound forms (graphite (C) vs. cementite (Fe_3C)), and gangue contents. Microscale observations of carbon-containing DRI (C-DRI), Hot Briquetted Iron (HBI), and Hydrogen reduced-DRI (H-DRI) were conducted using a Confocal Scanning Laser Microscope (CSLM) at temperatures up to 1550°C. Additionally, the melting behavior DRI was investigated in a resistance furnace at temperatures up to 1550°C to observe the melting onset, slag-metal interactions, and potential reductions in thermal energy requirements during smelting. The results indicate that Fe_3C appears to be more effective than graphite in lowering the melting point of DRI. While graphite reacts with FeO, producing CO(g), cementite does not generate gas but instead melts simultaneously with the DRI. In macroscale observations, gangue components melted at an early stage in the DRI. However, their geometric effect was minimal, suggesting a limited impact on the structural collapse of DRI and its melting behavior. The findings of this study provide valuable insights into optimizing H-DRI carburization and melting behavior.

[철강B3-6 | 15:15]

전기용융로(ESF) 내 탕면 특성과 아크 길이에 따른 아크 불안정성 분석: 김현진, 양현진* (인하대학교)

Keywords: 브러시아크(brush arc) 조업, 다물리모델(Multiphysics), 자기유체역학(MHD)

철강산업의 탈탄소화를 위해 저품위 분광을 활용할 수 있는 유동환원로(Fluidized Bed)와 전기용융로(Elecric Smeting Furnace)의 조합이 주목받고 있다. 용융로 내 직접환원철(DRI) 용융에 필요한 충분한 발열량 확보를 위해 브러시 아크 조업기술에 대한 검토가 필요할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 다상열유동과 자기유체역학(MHD)의 결합을 통해 구축된 다물리모델(Multiphysics model)을 활용하여 전기용융로(ESF) 내부에서 브러시 아크 조업 중 아크-탕면 간 상호작용으로 발생할 수 있는 아크 불안정성을 연구하였다. 탕면 조건(flat surface vs. deforming surface) 및 조업 조건(long arc vs. brush arc)에 따른 아크거동을 비교하여 탕면과의 상호작용에 의한 아크 불안정성을 비교분석 하였다. 탕면이 변형가능한 조건에서의 브러시아크 조업일 경우 복잡한 상호작용을 통해 아크 불안정성이 유발되는 것이 관찰되었으며 이러한 현상이 조업에 미칠 수 있는 영향에 대해 고찰하였다.

[철강B4-1 | 15:40]

Assessment of iron ore reduction behavior and microstructure evolution using turquoise hydrogen: Jooho Park, Tae-Gyu Wi, and Youn-Bae Kang* (POSTECH)

Keywords: Hydrogen reduction, Turquoise hydrogen, Carburization

In efforts to address climate change, steel industry has been actively pursuing strategies to reduce Green House Gas (GHG) emissions. Hydrogen (H_2) has recently attracted interest as a reducing agent for iron ore, serving as an alternative to fossil fuels. By employing H_2, it is possible to reduced GHG and produce an iron source known as Hydrogen Direct Reduced Iron (H-DRI). However, it remains challenging to lower the energy consumption in the smelting process. Therefore, carburization using some of carbon source should be considered. Among the hydrogen production methods, methane (CH_4) pyrolysis stands out for its relatively low GHG emission potential and comparatively economic energy consumptions. In addition, it is expected that the remaining CH_4 can be used for carburization of DRI. In order to evaluate the applicability of this approach, iron ore reduction experiments were conducted using pyrolysis gas called turquoise hydrogen (H_2–CH_4) at various compositions and examined the reduction behavior and microstructural evolution of the resulting iron ore samples. Experimental results show that increasing H_2 content in the pyrolysis gas accelerates the initial reduction rate of iron ore. Nevertheless, there was no significant difference in reduction rate once the H_2 fraction exceeded a certain limit. Notably, under conditions where CH_4 content was relatively high, the later stages of reduction proceeded rapidly. This phenomenon is assumed to the result of CH_4 decomposition, which is promoted once a small quantity of Fe forms, generating additional H_2 that rapidly reduces the iron ore. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the formation of Fe_3C after a certain extent of reduction. Although Fe_3C was detected by XRD, it was not clearly observed in scanning electron microscopy (SEM) images. As a result, it was revealed that gas composition has no significant effect on the overall microstructure of DRI. In summary, if the pyrolysis process of methane gas was coupled to reduction process of iron ore, in view of H-DRI production, this approach is expected to facilitate both effective reduction kinetics and manageable carbon incorporation into the DRI.

[철강B4-2 | 15:55]

Pyrolysis char 활용 Mill-scale의 용융 환원 반응에 대한 염기도의 영향: 김용우, 김선중* (조선대학교)

Keywords: Pyrolysis char, Mill-sclae, 환원 반응

2050 탄소 중립을 위해 CO_2 배출량을 줄여야 하며, 궁극적으로 화석 연료의 사용량을 줄이고 새로운 대체 환원재를 개발할 필요가 있다. 탄소와 수소가 주요 성분인 다양한 종류의 폐 폴리머 및 폐 타이어는 전기로 공정에서 탄소원으로 코크스를 부분적으로 대체하고, 전기 및 탄소 사용량 절감의 가능성을 보여주었다. 폐 폴리머의 열분해에서 발생하는 고체 잔류물 중 회분 함유량이 낮은 카본 블랙은 타이어의 보강재로 사용되지만, 생활 폐 폴리머 혼합물의 열분해로 생산된 Pyrolysis char는 회분 함유량이 높아 타이어 보강재로 사용이 적합하지 않다. 본 연구에서는 철강 공정에서 발생하는 Mill-scale과 폐 폴리머의 열분해 후 회수된 회분 함유량이 높은 고체 잔류물을 혼합하여 1723~1873K 온도 범위에서 용융 환원 시 발생하는 가스와 혼합물의 염기도에 따른 환원 거동을 파악하였다. CaO 장입에 의한 염기도 제어와 Al_2O_3 및 MgO 포화 조건에서 진행한 환원 반응 실험에서 발생하는 CO와 CO_2 가스 농도를 통해 환원율을 도출하였다. 또한 반응 후 회수된 슬래그 샘플을 분석하여 FeO 활동도 및 농도 변화에 대한 염기도의 영향을 확인하였다.

[철강B4-3 | 16:10]

MgO-C 내화재의 B_4C 첨가에 따른 내산화 특성 및 슬래그와의 계면특성 연구: 조한울, 박찬근, 정용석* (한국공학대학교)

Keywords: MgO-C, B_4C, 슬래그, 접촉각, 내산화성

기존의 내화재는 MgO에 C를 첨가하여 열팽창성, 슬래그와의 젖음성과 같은 단점을 보완한 MgO-C 내화재를 사용해왔다. MgO-C 내화재와 용융 슬래그가 접촉 시 탈탄으로 인해 기공이 형성되고, 이로 인해 MgO의 침식, 스폴링 등의 손상이 발생하기 때문에 MgO-C 내화재 내 C를 안정적으로 유지하는 것이 중요하다. 최근 내화재의 산화를 억제하는 B_4C가 효과적인 산화방지제로 대두되고 있으나, 전로 및 제강 공정에 앞서 대기 분위기에서 승온하는 동안 탈탄 반응이 발생할 수 있다. 그러나 이 과정에서 B_4C의 역할과 슬래그와의 계면 반응 특성에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 내화재의 슬래그 계면 반응 특성을 평가하기 위해서 슬래그에 대한 젖음성을 분석하는 것이 필수적이며, 이를 위해 접촉각이 중요한 지표로 활용된다. 본 연구에서는 Dispensed Drop Technique을 이용하여 MgO-C 내화재의 B_4C 첨가에 따른 슬래그 접촉각을 측정하고, 슬래그와 MgO-C 내화재 간 계면 특성을 분석하였다. B_4C를 각 0 wt%, 0.5 wt%, 1.0 wt%, 2.0 wt%, 3.0 wt% 첨가한 MgO-C 내화재를 조업 환경을 모사하기 위하여 1500ºC, 대기 분위기에서 산화 처리 후 산화층 형성 정도를 분석하였으며, 산화된 내화재를 1600ºC, 99.999% Ar 분위기에서 CaO-SiO2-MgO-Al2O3의 4원계 용융 슬래그에 대한 젖음성 실험을 진행하였다. 그 결과, B_4C 첨가가 MgO-C 내화재의 내산화 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 내화재의 B_4C 첨가량에 따른 접촉각 변화를 정량적으로 비교하여 B_4C 첨가가 MgO-C 내화재의 슬래그 저항성에 미치는 영향을 평가하였다.

[철강B4-4 | 16:25]

Al 탈산 Ti-첨가 페라이트계 스테인리스강 내 비금속 개재물의 진화 거동: 정동율, 전영진 (한양대학교), 박성진, 강수창 (POSCO), 박주현* (한양대학교)

Keywords: 페라이트계 스테인리스강, 타이타늄, 실수율, 비금속 개재물, 알루미늄 탈산

고-Cr Ti-함유 페라이트계 스테인리스강(Ti-FSS)은 다른 강종들에 비해 우수한 내식성과 성형성을 가지는 동시에 냉연판의 높은 청정도가 요구된다. 특히, VOD와 래들정련(LT)공정에서 Al 탈산 최적화 등을 통해 Ti-함유 FSS의 청정도가 향상되어왔지만, 합금철 투입 이후 슬래그-용강 반응 등 다양한 요인으로 인해 용강 내 Ti 실수율과 비금속 개재물의 형성 또는 제거 거동의 변동폭이 크다는 문제점이 남아있다. 게다가, Ti 합금철 투입 이후 용강 내 형성된 TiN과 Mg(Al,Ti)2O4 spinel-type 개재물은 노즐 막힘과 최종 제품의 표면 결함을 유발한다. 따라서, 비금속 개재물 제거율이 우수한 슬래그를 설계하고 VOD 공정에서 탈산 공정을 최적화할 필요가 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 Ti-FSS 용강과 VOD 슬래그 사이 반응에서, 슬래그의 TiO2 함량 또는 Al과 Ti 투입 조건을 변화시키면서 Ti-FSS 용강 내 Ti 실수율과 용강 내 비금속 개재물의 진화거동과 단위면적당 개재물 수(number density)를 확인하였다. 슬래그의 TiO2 함량이 증가함에 따라 용강 내 Ti 실수율이 증가하였으며 Ti 첨가 후 비금속 개재물의 평균 Ti2O3 함량이 증가하였고, Al/Ti 투입 비율 증가 시 용강 내 Ti 실수율이 증가하였다. 또한, Al/Ti 투입 비율 증가함에 따라 슬래그로부터 Mg pick-up이 증가하여 비금속 개재물의 MgO 함량이 증가하였고, 그 결과, spinel-type 개재물이 MgO 개재물로 개질 됨을 확인하였다.

[철강B4-5 | 16:40]

Liquidus of MgO and $MgAl_2O_4$ in the CaO-MgO-Al_2O_3 system at 1550-1650 ºC: Dahee Gwak, Jaesung Lee, Seungjae Park, and In-Ho Jung* (Seoul National University)

Keywords: Phase diagram, FactSage, Steelmaking

The CaO-MgO-Al_2O_3 system is one of the most fundamental oxide systems in pyrometallurgy and ceramics applications. In particular, CaO-Al_2O_3-based slag is widely used as a secondary refining slag in the steelmaking process due to its high sulfide capacity and ability to control oxide inclusions. Magnesia and spinel-containing refractories are commonly used in steel ladles, where they inevitably dissolve into liquid slag. Therefore, many studies have been conducted to determine the accurate phase diagram of the CaO-MgO-Al_2O_3 system and construct a reliable thermodynamic database. In this study, we investigated the liquidus of MgO and Spinel at 1550, 1600, and 1650ºC using classical quenching methods with Pt crucible. Our results showed discrepancies compared to previously

reported experimental results, in particular, regarding the solubility limits of spinel. To verify whether this difference originated from experimental methods, additional saturation experiments were conducted at 1600°C using crucibles and pre-melted CaO-MgO-Al_2O_3 slag, replicating the conditions of previous studies. We found out that there might be a potential problem in the previous experiments using ceramic crucible to determine the liquidus of spinel. Based on the new experimental data, we propose new phase diagrams of the CaO-MgO-Al_2O_3 system at 1550, 1600 and 1650 °C.

[철강B4-6 | 16:55]

턴디쉬 슬래그 내 Al_2O_3 입자 크기 및 조성 변화에 따른 Al_2O_3 용해 거동 연구: 곽태준, 정용석* (한국공학대학교)

Keywords: 턴디쉬 슬래그, 제련, 비금속 개재물, Al_2O_3 용해, Al_2O_3 크기 효과

탈산 공정에서 생성되는 Al_2O_3 비금속 개재물은 노즐 클로깅 및 강철의 피로 파괴 등 다양한 문제를 일으킨다. 따라서 제강 공정에서 Al_2O_3 비금속 개재물을 제거하는 것이 중요하다. Al_2O_3 비금속 개재물은 최종적으로 턴디쉬 슬래그 내에서 용해 · 제거되므로, 이를 이해하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 현재까지의 슬래그 내 Al_2O_3 입자 용해에 대한 연구는 주로 수백 마이크로미터 크기 범위에 초점을 맞춰 이루어졌다. 그러나 실제 턴디쉬 슬래그에서 용해되는 Al_2O_3 비금속 개재물의 크기는 주로 수십에서 수 마이크로미터 범위에 해당한다. Al_2O_3 입자의 용해 메커니즘이 확산에 의해 지배될 경우, 슬래그 내 Al_2O_3 입자의 완전 용해 시간은 초기 입자 크기의 제곱에 비례한다고 알려져 있다. 또한 Valdez등의 연구에서는, 입자의 용해 메커니즘이 화학 반응에 의해 지배될 경우 용해 시간은 초기 입자 크기에 선형적으로 비례한다고 보고하였다[1]. 이처럼 실제 턴디쉬 공정과 같이 Al_2O_3 입자 크기가 작은 영역에서의 용해 거동은 단순히 예측하기 어려우며, 실험적 결과 또한 부족한 편이다. 또한 턴디쉬 슬래그 내 Al_2O_3와 SiO_2 등의 조성은 공정이 진행됨에 따라 변하게 된다. 본 연구에서는 Al_2O_3 입자의 크기 및 슬래그 내 Al_2O_3, SiO_2 등의 조성을 변화시키며 Al_2O_3 입자의 용해 거동을 조사하였다. 이를 바탕으로, 수 마이크로미터 크기의 Al_2O_3 입자의 용해 거동을 예측하고 이에 적합한 모델을 제안하고자 한다. [1] Martin Valdez, K. P., Cramb, A. W., & Seetharaman, S. (2001). A study of the dissolution of Al_2O_3, MgO and $MgAl_2O_4$ particles in a CaO-Al_2O_3-SiO_2 slag. steel research, 72(8), 291.

재료정책 세션I
Room 삼다A, 4월 24일

[정책1-1 | 10:00] 초청강연

Key Projects of the Division of Information and Convergence Technology, NRF: Chong-Yun Kang* (National Research Foundation of Korea)

Keywords: Division of Information and Convergence Technology, Nation Research Foundation (NRF), Directorate of national strategic R&D

In this presentation, the Division of Information and Convergence Technology, Nation Research Foundation (NRF) of Korea is introduced including its main policy direction, budget, key projects, and promising future projects. First, the vision, mission, and organization of NRF is introduced. Second, the Directorate of national strategic R&D is also introduced briefly. The role of the directorate is mentioned compared with the Directorate of Basic R&D. The recent key direction and issues of the division are discussed. Finally, the key project and future promising project of the Division of information & Convergence Technology.

재료정책 세션II
Room 삼다A, 4월 24일

[정책2-1 | 10:45] 초청강연

과기정통부 소재 R&D 사업 발굴 및 기획: Sang-Kwan Lee*, Taeyeon Kim, and Jeongho Shin (Korea Institute of Materials Science)

Keywords: 미래소재, 첨단소재, 소재 R&D 기획

현재 글로벌 기술경쟁은 첨단기술 중심의 공급망 확보로 치열해지고 있으며, 특히 미중 기술패권 경쟁으로 인해 공급망 리스크가 증가하고 있습니다. 이러한 상황에서 각국은 자국 내 공급망 강화를 위해 첨단기술의 자체 역량을 강화하고 있으며, 주요 전략 산업의 공급망 확보를 위한 정책을 발표하고 있습니다. 이러한 글로벌 환경 변화에 대응하기 위해서는, 파급력 있는 신소재 발굴과 체계적인 기술 개발을 통해 글로벌 기술 우위를 선점하고, 미래 신시장을 창출하는 것이 무엇보다 중요합니다. 이에 과학기술정보통신부는 첨단소재 기술 확보를 위한 '첨단소재 R&D 발전전략(2024.12)'을 발표하고, 첨단소재와 미래소재 확보를 위한 투자 및 체계를 강화하고 있습니다. 최근 소재 R&D는 AI와 데이터 기술을 활용하여 연구개발의 효율성을 높이고 있으며, 주요국들은 소재 연구 데이터 플랫폼을 구축하여 선도 기술 확보에 박차를 가하고 있습니다. 우리나라 역시 AI를 활용한 신소재 개발을 가속화하기 위해 소재연구데이터 생태계 플랫폼 구축 등 다양한 R&D 사업을 추진하고 있으며, 이를 통해 첨단소재 기술력 확보와 글로벌 기술 경쟁력 강화를 추진하고 있습니다. 이번 발표에서는 과학기술정보통신부가 주도하는 첨단소재 및 미래소재 확보를 위한 R&D 사업의 발굴과 기획에 대해 간략하게 소개하고자 합니다. 또한 본 발표를 통해서 연구 기획을 추진함에 있어서 연구자 컨소시엄을 구성, 기획 절차 및 의견을 경청하여 반영하는 사례도 함께 소개해서 향 후 소재 R&D 기획을 하시는 연구자들에게 미약하지만 도움이 되고자 합니다.

학회상 수상기념강연
Room 삼다A, 4월 24일

[AW1-1 | 14:00] POSCO학술상 수상기념강연

전류/전하 하에서의 재료거동: 한흥남* (서울대학교)

탄소중립을 위한 노력의 일환으로 다양한 재료에 전류를 인가하여 사용하는 방식이 급증하고 있다. 최근의 연구에 따르면, 이러한 전류 인가는 단순히 줄발열로는 설명할 수 없는 다양한 재료 거동을 유발한다. 본 발표에서는 전류 인가로 인한 재료 거동의 변화를 여러 예를 통해 설명하고자 한다. 주요 예로는 통전소성(electroplasticity), 통전 유기 변태(Phase Transformation Enhanced by Electric Current or Charge), 통전 치유(Electric Current Induced Healing), 통전 고상 접합(Electric Current Induced Solid-State Joining) 등이 있으며, 각 현상은 재료의 미세조직에 중요한 변화를 일으키며, 이를 통해 새로운 재료 공정 개발이 가능하다. 본 발표에서는 전류/전하 인가가 재료 거동에 미치는 근본적인 기구를 제시하고, 전류/전하가 재료 내부의 결함과 구조 변화에 미치는 영향을 설명한다. 마지막으로, 재료의 상태를 기술하는 전통적인 열역학적 변수인 온도와 압력 외에도 전류/전하 및 결함의 양을 중요한 변수로 도입하는 개념을 제시한다. 이러한 연구는 탄소중립을 위한 다양한 전류/전하 환경에서 재료의 특성 변화를 이해하는 데 중요한 자료를 제공할 것이다.

[AW1-2 | 14:25] 현송공학상 수상기념강연

고온 밸브 디스크 하드페이싱부 파손 원인 분석: 정우상* (한국과학기술연구원)

Keywords: F91, Stellite#6, Hardfacing, GTAW, Fe dilution

고온의 유체나 가스를 안전하게 제어하고 차단하는 기능을 수행하는 발전용 밸브 소재는 뛰어난 내열성, 내식성이 요구되며 특히, 밸브 개폐 접촉부에서의 내마모성 확보가 필수적이다. 일반적으로 증기터빈 발전소용 밸브는 9Cr 페라이트계 내열강에 고온 내마모성이 우수한 Co계 합금인 Stellite를 밸브 개폐 접촉부에 다양한 방법으로 코팅하여 사용한다. 본 연구에서는 사우디아라비아 Rabigh IPP에서 스팀온도 560ºC 조건으로 5만 시간 동안 사용한 밸브 디스크 하드페이싱부에서 발생한 크랙의 원인을 조사하였다. F91 소재에 Stellite#6를 GTAW법으로 육성용접한 사용재와 신재를 대상으로 모재로부터의 거리에 따른 미세조직, 조성분석, 경도, 접합강도를 평가하였다. 신재는 주로 접합면 근처에서 크랙이 발생하나 사용재는 육성용접부 1st bead 중앙부에서 크랙이 발생하였으며 크랙부위의 경도가 높아짐을 확인하였다. 고온에서 장시간 노출되는 경우 F91 로부터 하드페이싱 영역으로 Fe 가 확산되어 확산층 내부에 취성이 강한 σ 상이 형성됨에 따라 경도가 증가하는 것으로 보인다. 디스크 개폐시 σ 상과 기지 계면에 응력이 집중되어 크랙이 형성 및 전파되어 하드페이싱부의 박리가 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 σ 상의 형성 억제를 위해서는 1st bead 형성시 용융되는 모재의 두께를 작게 하여 Fe dilution을 지연시키기 위한 GTAW 공정 최적화가 요구된다.

[AW1-3 | 15:00] LS학술상 수상기념강연

탄소 중립: 전기변색, 인공광합성 그리고 탄자니아: 이선영* (한양대학교)

이번 강연에서는 NPDS (Nano Particle Deposition System)라는 독특한 건식 증착 방식을 이용한 다양한 전기변색 소자의 지속적인 개발을 공유하고자 한다. 나노 입자 적층 시스템 (NPDS)는 최근 개발된 건식 증착 기술로, 압축 공기를 사용하여 저진공 상온에서 나노 및 서브 마이크론 크기의 금속 및 세라믹 입자를 증착할수 있다. 여기서 나노 입자는 압축공기를 운반 가스로 사용하여 초음속 노즐을 이용하여 가속되는 시스템으로 증착 메커니즘의 특성으로 인하여 전극의 표면을 개질할 수 있다는 장점이 있다 본 연구에서는 이러한 다양한 전극 표면과 전해질 내의 이온과 상호작용을 이용하여 소자 성능을 제어하는 사례를 발표하고자 한다 또한 상용화된 분말을 이용한 건식 증착은 용매 뿐 아니라 전처리, 후처리 또한 필요하지 않아 증착 공정이 간단하고 친환경적이다 이러한 건식 적층 기술을 통해 전체 태양 스펙트럼을 아우르는 다이나믹 스마트 윈도우부터 저전압 구동 다색 전기 변색 시스템, 그리고 전기변색 슈퍼 캐패시터에 이르는 다양한 전기 변색 소자 뿐 아니아 가스센서등에 응용되고 있어 소개하고자 한다 인공광합성은 외부 에너지가 추가적으로 필요 없이 오직 반도체 광촉매와 태양에너지만으로 이산화탄소와 물로부터 탄화수소 연료 생산이 가능해 각광을 받고 있는 기술 중 하나로 지속가능한 대체에너지 생산을 가능하게 하는 무한한 에너지원인 태양에너지를 이용하는 연구로 중요성이 커지고 있다. 그 중, 광 효율을 최대한으로 높이기 위해서는 효율적인 반도체 광촉매 재료를 디자인하여 경제적인 방법으로 제작하고, 열역학적 또는 역학적 요소들을 고려하여 개발해야 한다. 이번 강연에서는 귀금속이 없는 반도체 광촉매를 적용한 효율적인 인공 광합성 시스템 사례를 소개하고자 한다. 저차원 나노구조를 이용하여 조합한 헤테로구조를 인공광합성에 적용하여, 흡광도 범위를 조절하고, kinetic overpotential 및 활성화 면적을 최대한으로 확장하므로 빛을 이용하여 유해한 가스를 무해한 연료로 변환하는 사례를 발표하고자 한다. 마지막으로 2020년부터 수행하고 있는 국제협력 선도 대학 사업에 대하여 소개하고자 한다. 본 사업은 탄자니아내 아루샤 공과대학(ATC)의 신재생 에너지 활용 교육역량 강화사업이라는 이름으로 기계공학과 내에 메카트로닉스 및 재료공학 융합 학사과정을 신설하여 탄자니아 현지에서 필요한 신재생에너지 관련 분야의 역량을 강화하고자 하는 목적을 가지고 있다. 이 사업으로 탄자니아 현지에서 중요하게 생각되는 신재생 에너지 분야의 실무형 엔지니어를 배출할 뿐만 아니라 창업 프로그램 및 연합 봉사단 활동을 통한 현지 지역 봉사 활동을 수행하는 사례를 발표하고자 한다.

[AW1-4 | 15:25] 아모공학상 수상기념강연

광학기반 3차원 나노구조 제작과 그 응용: Seokwoo Jeon* (Korea University)

The mass production of precise three-dimensional (3D) nanostructures has long been a goal for the fabrication technology of metamaterial whose material properties are mostly determined by structural factors in sub-micron and nano scale. While proximity-field nanopatterning (PnP) provides partial solutions, limited range of realizable structures and symmetries remain as main problems. Here, we overcome these challenges by implementing an inverse design to the PnP process, as shown in Figure 1. Our inverse design platform based on the adjoint method can efficiently find optimal phase masks for diverse target lattices and motifs. We fabricate rectangular array nanochannels with a phase mask and normally incident UV light, which have been impossible by conventional PnP (hexagonal array nanochannels). It is 2D inverse design as a proof-of-concept study. With further demonstration of material conversion, we will discuss further possibility of those designed 3D nanostructures for various applications with new material properties, especially in the field of nanomechanics, Li-ion batteries, thermoelectric, optical transmission modulation, and neuromorphic semiconductor devices.

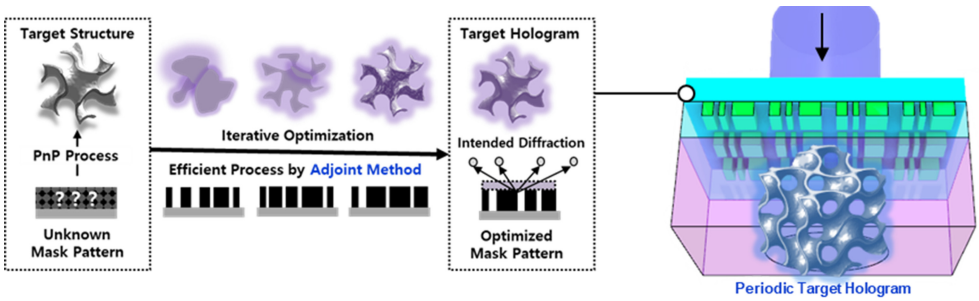


Fig. 1. Schematics of 3D holographic lithography based on PnP with inverse design

첨단 항공엔진 소재 ▪ 부품 기술개발 심포지엄

Room 삼다B, 4월 24일

[항공엔진1-1 | 09:00]

국내 항공엔진 소재 부품 산업 현황: 손인수* (한화에어로스페이스)

Keywords: 항공엔진, 가스터빈, 소재, 부품, 공정

국내 항공엔진용 소재 부품 공업 산업 현황을 설명하고자 하며, 국내 첨단항공엔진 공급망 관련 개발 전략 및 방안에 대해서 발표하고자 함. 해외 공급망 구성에 대한 전략을 돌아보고 국내에서 제한된 자원 내 효율적 산학연이 협업을 통해 소재 국산화에 대한 개발 성공을 달성할 수 있는 방안을 설명

[항공엔진1-2 | 09:15] 초청강연

첨단 항공엔진 개발 기본계획: 심현석* (방위사업청)

Keywords: 공군, 가스터빈, 터보팬 엔진, 정부 연구개발사업

방위사업청은 2027년부터 2040년까지 14년간 약 3.35조원의 예산을 투입하여 16,000lbf 급 추력의 저바이패스 터보팬 엔진을 국내 개발하고자 한다. 새로이 개발될 엔진은 대한민국 공군이 도입할 차세대 전투기의 엔진으로 활용될 전망이다. 엔진 개발사업과 병행하여 원소재 및 부품 가공공정 연구개발 사업이 추진될 것이며, 시험평가를 위한 시설 및 장비 확장 및 증축도 이루어질 것이다.

[항공엔진1-3 | 09:40] 초청강연

항공엔진용 Ni/Co계 내열소재 기술개발 현황: 이재현* (국립창원대학교)

Keywords: Ni base superalloy, Co base superalloy, Gas turbine engine, Single crystal blade

고온재료와 그 제조공정의 개발은 가스터빈의 성능과 효율 개선과 함께 지속적으로 진행되어 왔다. 1940년대 가스터빈의 발명과 함께 고온부를 구성하는 부품의 소재도 그 사용온도가 지속적으로 향상되어져 왔으며 가스터빈의 개발과 함께 지속적으로 새로운 합금들이 개발되어져 왔다. 가스터빈의 고온부에 사용되는 소재 중 현재까지 알려진 가장 우수한 것은 Ni기 초내열합금이다. 초내열합금의 제조공정 개발과 개선이 초내열합금의 내열온도 및 가스터빈 사용온도 향상에 크게 기여하였다. 1940년대 이전의 가스터빈 고온부품은 Fe기 합금을 열간가공(단조)하는 것을 기본으로 하였다. 1940년대에 Co기 합금이 개발되면서 가스터빈의 작동온도를 크게 높일 수 있었으나 Co기 합금의 한계 때문에 더 큰 진전을 이루지 못하였다. 1950년대 진공용해법(Vacuum Induction Melting: VIM)의 도입은 초내열합금의 강화원소를 다량으로 정밀하게 첨가할 수 있을 뿐 아니라 산화나 유해원소의 유입을 막을 수 있을 정도로 혁명적인 개선을 이루었다. 따라서, 현재 상용화된 대부분의 단련용 초내열합금은 모합금을 진공용해에 의해 제조하고 합금의 종류에 따라 2차 또는 3차 용해(double or triple melting)를 거쳐 정련하고 단조, 압연, 압출과 같은 통상의 잉곳 공정을 거쳐 단조재를 제조한다. 이와 같은 첨단 공정의 발전은 고온특성이 우수한 소재의 개발을 가능하게 하였다. 단조에 의해 제조되던 부품들에 더 높은 온도에서 우수한 고온강도를 갖는 합금들을 개발하여 적용하고자 하였으나 이들 합금들의 단조구간의 문제로 단조가 불가능하게 되고 이에 따라 주조공정이 부품제조에 적용되게 되었다. 특히, 터빈 블레이드와 베인은 형상이 복잡한 곡면으로 구성되기 때문에 정밀하게 제조하여야 하고 반복적으로 생산해야 하기 때문에 정밀주조에 의한 생산이 불가피하다. 따라서 초내열합금을 이용한 진공용해와 진공정밀주조 공정이 가스터빈 블레이드 제조공정으로 일반화되었다. 본 발표에서는 항공 엔진용 Ni기 초내열합금과 Co기 초내열합금의 소재 기술개발 동향을 살펴보고, 현재 국내 개발되고 있는 항공 엔진용 소재인 초내열합금의 특성과 부품 개발 현황을 소개하고자 한다

[항공엔진1-4 | 10:05] 초청강연

DKIE-Powered Component-specific Gammalloy Development: Young-Won Kim and Sang-Lan Kim (Gamteck LLC)

Keywords: gammalloy, DKIE, composition-processing/T-microstructure combination, local plasticity, inverse relations

Since the early 1970s, materials based on γ-TiAl have been explored to fulfill aerospace engine designers' aspirations of achieving a drastically enhanced thrust-to-weight ratio. The pioneering projects (1972-1981) led by the Blackburn-Lipsitt team investigated over 150 compositions, laying the groundwork for global research and development activities in gammalloy materials technology. These efforts have flourished across key areas, including: 1) Continuous characterization and exploration of additional compositions 2) Alloy Ti-4822-CDP by technology pull 3) Fundamental and applied research 4) Processing and process development 5) Forming and manufacturing trials of components 6) Modeling and calculations toward the development of ICME These extensive efforts have resulted in a vast and comprehensive DKIE (Data-Knowledge-Information-Experience) base for each area. Still, this base has not yet been thoroughly assessed individually or collectively to realize the material's full potential. This lecture introduces the DKIE-powered approach, a promising avenue in materials science and engineering, to formulate a quantified Composition-Processing/T-Microstructure (C-P/T-M) combination that can generate a balanced set of required properties. The DKIE framework, starting with defining the application-specific microstructure, is essential to optimize the combination through accelerated validation and refining experiments. Extended discussions will be made on the lamellar structures' crucial roles in quantifying the microstructure details by controlling the resistance to fatigue-cracking and fracture through adjusting local plasticity and ductility-toughness inverse relations.

[항공엔진2-1 | 10:40]

항공엔진용 초내열합금 인코넬 718 국산화 개발 진행 현황: 황승욱*, 최주태, 손인수 (한화에어로스페이스)

Keywords: 인코넬718, 항공엔진 소재국산화, 첨단엔진, 초내열합금

첨단 가스터빈 엔진급 소재부품 국산화 제조 및 평가 기술 구축을 위해 정부 지원 하 필수 핵심소재인 석출경화형 인코넬 718 제조기술 개발을 위한 연구를 진행하고 있다. 그 동안 인코넬 718의 소재 및 제조기술 개발과 관련하여 많은 국내 기관에서 연구활동을 진행하였지만, 항공엔진에 장착 가능한 감항인증 수준의 부품에 대한 국내 개발 사례는 전무한 실정이다. 본 심포지엄을 통해, 현재 수행하고 있는 항공엔진용 인코넬 718 주단조품에 대한 개발 진행 현황을 소개하고, 소재 국산화를 위해 극복해야 할 기술적 난제를 논의하고자 한다.

[항공엔진2-2 | 10:55]

인코넬 718 Master Ingot 제조를 위한 진공 유도 용해 기술개발: 유영근*, 이경석, 임광혁 ((주)한스코)

Keywords: 항공 엔진 구조물(Aircraft engine structure), 인코넬 718(Inconel 718, Nickel alloy 718), 진공 유도 용해(Vacuum Induction Melting), 마스터 잉곳(Master Ingot)

인코넬 718은 고온, 고압 환경에서 강도가 우수하고, 내부식성이 강하며 내열성, 내구성이 우수하여 항공엔진에 요구되는 중요 물성을 만족하는 금속이다. 이러한 이유로 항공엔진 제조에 필수적인 금속이다. 아울러 상대적으로 다른 초내열합금과 비교하였을 때 강도가 높으면서도 가공성이 뛰어나기 때문에 다양한 형태로 가공이 가능하여 부품의 생산성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 항공엔진부품에 사용되는 인코넬 718 모합금은 전량 수입에 의존하고 있어, 항공용 소재부품의 경쟁력 확보를 위해서는 국산화 하는 것이 반드시 요구된다. 이를 위해 본 연구는 진공 유도 용해(Vacuum Induction Melting) 기술을 활용하여 인코넬 718 모합금을 제조하고, 제조된 잉곳의 성분, 가스 성분 관리, 미량원소 관리, 비금속 개재물 혼입관리하는 기술 등이 핵심 제조 기술로 분류되며, 인코넬 718 Master Ingot의 국산화 개발을 진행할 것이다.

[항공엔진2-3 | 11:10]

항공용 Alloy 718 소재 제조 공정에서 발생하는 미세조직 결함 분석: 나혜성*, 진인경, 김용근, 최재영* ((주)에이치브이엠)

Keywords: Aerospace Alloy 718, Macrostructure, Phase, Defect

항공용 Alloy 718은 니켈-크롬 기반의 석출 경화형 초합금으로, 650ºC 이상의 고온 환경에서 뛰어난 강도, 크리프 저항, 피로 특성, 내산화성 및 내식성을 유지하는 것이 특징입니다. 특히 금속미세조직의 정밀한 제어를 통해 고온 강도를 극대화하며, 항공기 엔진 터빈 블레이드, 디스크 등 핵심 부품에 광범위하게 사용됩니다. Alloy 718은 제조 과정에서 발생하는 미세조직 결함은 소재의 수명과 안전성을 크게 저해합니다. 특히, 고온 강도, 피로 저항, 내식성 등 핵심 물성에 영향을 미쳐 항공기 엔진 부품의 신뢰성 문제를 야기할 수 있습니다. 따라서, 제조 공정별 결함 발생 메커니즘을 이해하고 제어하는 것은 항공기 안전 운항을 위한 필수적인 연구입니다. 결함 발생 원인을 규명하고 최소화함으로써 소재의 성능을 극대화하고 불량률을 감소시켜 제조 비용 절감에도 기여하기 위한 연구를 수행하였습니다. 본 연구에서는 Alloy 718 소재의 제조 공정 단계별 시편을 채취하여 미세조직 결함 분석을 수행하였습니다. 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM), EBSD를 이용하여 Macrostructure, Phase, 석출상 등 주요 Phase와 미세조직 결함을 분석하였습니다.

[항공엔진2-4 | 11:25]

항공엔진용 Premium Quality Inconel 718 합금의 잉곳/단조재 개발 현황: 김종식, 주경준, 권용혁, 금보경, 이기영* (케이피씨엠)

Keywords: 인코넬718, 항공엔진소재, 진공용해, 단조

터보팬 항공엔진 회전체 디스크 단조품은 수만 RPM의 고속 극한 환경 조건에서 운영되어 높은 신뢰성 확보가 필요하다. Ni기 초내열합금 중 석출경화형 인코넬 718 합금이 일반적으로 가장 널리 사용되고 있으며, 특히 회전체 디스크와 같은 치명성(Critical) 구성품의 경우 3차 용해(VIM-ESR-VAR)의 정련공정을 통해 소재 결함(Freckle, White Spot 등)을 최소화한 프리미엄급 소재가 사용된다. 본 연구에서는 3차 용해를 적용한 항공엔진용 프리미엄급 인코넬 718 합금 잉곳과 피로특성을 향상시키기 위한 결정립 미세화 공정(ASTM No.8이상)이 적용된 10인치급 빌렛 단조재의 개발 현황을 소개하고자 한다.

[항공엔진2-5 | 11:40]

터보팬 항공엔진 주요 구조물을 위한 정밀주조기술개발: 이도훈*, 강경무, 배해광 ((주)성일터빈)

Keywords: 항공 엔진 구조물(Aircraft engine structure), 진공정밀주조(Vacuum precision casting), 터빈프레임(Turbineframe), 디퓨저(Diffuser), 인코넬 718(Inconel 718)

항공엔진용 제트엔진의 주요 부품들은 가동 시 고온, 고압 및 고속 운전환경에서 내구성 및 내열성 등이 요구되며, 특히 터보팬 항공엔진은 고속으로 회전하는 팬과 그 주변에 위치한 압축기를 사용하여 공기를 압축, 이를 연소실에 분사해 연소시켜 추력을 발생시키므로 이러한 가혹 환경 조건에서 운전하기 위해서는 니켈기 초내열합금 소재를 사용해야 한다. 전량 수입되는 인코넬 718 소재 및 항공엔진 주요 구조물(터빈프레임, 디퓨저)의 국산화 개발이 필요하다. 이를 위해, 잉곳(소재)은 미량원소제어를 통한 국산 개발 잉곳을 사용하여 진공정밀주조공정으로 주조품을 제작하였다. 우선 주요 구조물인 터빈프레임은 주조해석(Procast)을 통해 주조방안을 설정하였으며, 이후 진공정밀주조 공정으로 주조품을 제작하였다. 제작된 터빈프레임 주조품은 치수를 측정하였고, X-ray 검사를 하였다. 치수 측정된 주조품을 토대로 왁스 금형 및 세터를 수정하였으며, 이후 터빈프레임 주조품의 주조방안 확립 및 검증을 위해 추가 주조품을 제작할 예정이다. 또한, 복잡한 형상의 터보팬 항공엔진용 구조물인 디퓨저에 대해서도 모델링/도면 등으로 주조성 및

금형 제작을 검토하고 있으며, 주조해석(Procast)을 통해 주조 방안 설정, 진공정밀주조공정(사출, 주형 쉘 코팅, 진공정밀주조, Wax 제거 및 후처리 등) 기술개발 및 정밀주조 이후 비파괴검사, 치수, 결함 확인 및 제어 등을 통하여 국산화 개발을 진행할 것이다.

[항공엔진3-1 | 14:00]

국내 독자 TiAl 합금의 개발 및 항공엔진용 블레이드 제조 기술 개발: 이슬*, 송덕용, 주영규, 손인수 (한화에어로스페이스)

Keywords: titanium aluminide, blade, investment casting, isothermal forging

항공엔진 소재개발의 방향은 고출력, 연료효율 향상 및 저탄소, 친환경의 방향으로 개발되고 있다. 항공엔진의 출력향상과 연료효율을 동시에 증가시키기위해 소재의 경량화는 필수적이다. 따라서, 우수한 고온 물성과 비강도를 갖는 TiAl 합금은 2012년을 시작으로 정밀주조기술과 항온단조기술을 적용하여 항공엔진 부품의 저압터빈블레이드에 적용되고 있다. 항공기구에서 2020년 부터 탄소중립성장의 달성을 위해 국제항공 탄소 상쇄 및 감소계획을 추진중이며, 경량 내열 TiAl 합금의 수요는 지속적으로 증가할 것으로 판단된다. 하지만, 국내 TiAl 합금을 항공엔진에 적용한 사례는 전무할 뿐만아니라, 시제품 수준의 TiAl 합금을 제조할 수 있는 업체도 없다. 본 연구개발 과제에서는 TiAl 합금의 항공엔진 부품에 적용하기위해, 기존 TiAl 합금보다 고온물성을 최대 1000 ℃까지 확장하고 고온 강도를 향상시킨 독자 TiAl 합금을 개발하고자 한다. 또한 고난이도 제작성을 갖는 TiAl 합금의 블레이드 제작에 주/단조 기술을 개발하여, 항공엔진 부품에 TiAl 합금의 적용하고자한다.

[항공엔진3-2 | 14:15] 조청강연

TiAl 저압터빈 블레이드 진공정밀주조 제조 기술 개발: 이만길*, 김성욱, 이준호, 민지후 (진성정밀금속(주))

Keywords: TiAl 합금, 저압터빈 블레이드, 진공정밀주조, ISM(Induction Skull Melting), 원심주조

터보팬 엔진 부품의 국산화를 위해 경량 내열 TiAl 신소재 및 원심주조공정기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 개발 대상품인 저압터빈 블레이드(Low-Pressure Turbine Blade)를 TiAl 신소재로 개발된 마스터 잉곳(Master Ingot)을 이용하여 진공정밀주조인 ISM(Induction Skull Melting)장비를 사용하여 개발하고자 한다. 고온 반응성이 높은 TiAl 합금의 주조기술 개발을 위해 도가니와의 반응이 없는 ISM(Induction Skull Melting)의 적용하여 용해 후 낮은 과열과 박육 부품의 충진성 개선을 위한 원심주조 공정을 적용하였다. 주조 결함 최소화를 위해 ProCAST를 활용하여, 주조방안의 응고해석 및 유동 해석을 진행하였다. 유동해석을 통해 Misrun이 발생하지 않는 주조조건 및 주형을 적용하여, ISM 용해 후 원심주조하여 저압터빈블레이드를 제작하였다. 1차 저압터빈 블레이드 개발은 2가지 Type의 주조방안을 적용하였으나, 실제 주조 결과 미성형 및 산화층이 관찰되었다. 미성형의 원인은 몰드 소성시간 미 확보 및 낮은 G값(중력가속도)값으로 발생한 것으로 판단된다. 주조결함 제어를 위해 주형 예열온도를 증가시켜 용탕의 유동성을 확보하고, 런너 형상 개선을 통해 용탕 주입 압력을 증가시키는 방법으로 주형을 설계하여 주조결함을 제어할 계획이다. 또한, 해석결과와 실제 합금 유동거동의 부합성 확보를 위해 ProCAST 입력 매개변수의 최적화의 연구가 필요하다.

[항공엔진3-3 | 14:40]

항공엔진용 가스터빈 TiAl 블레이드 제작을 위한 6,000톤 항온단조 장치 개발 및 공정기술 연구: 김동권*, 이경훈 (한밭중공업)

Keywords: TiAl Alloy, Turbine Blade, Isothermal Forging, Hot Forging, Aviation engine

현재 국내의 항공기용 가스터빈 엔진에 사용되고 있는 고중량의 Ni기 초내열 합금 블레이드를 경량의 TiAl 블레이드로 대체하기 위한 기술개발이 진행 중이다. 고온에서 성형성이 부족한 TiAl블레이드를 제작하기 위하여 항온단조기술이 필요하며 당사에서는 항온단조 전용 장치를 개발하고 있다. 전용장치는 6,000톤 항온단조 전용 프레스와 항온단조 금형시스템, 항온가열 챔버시스템 외에 금형 혹은 소재 장탈착을 위한 이송시스템 등으로 구성된다. 당사는 Daylight 4,000 mm, Stroke 2,000 mm, Bolster 면적 3,000 x 4,000 mm 크기이며 0.1~20 mm/sec의 단조속도를 구현할 수 있는 6,000톤 항온단조 전용 프레스를 자체 개발하였다. 항온단조 금형시스템은 RIST 연구팀과 협력하여 금형 소재 연구를 진행 중이며, 항온가열 챔버시스템은 첫 단계로 소형 유도가열로와 진공 및 불활성분위기 치환이 가능한 가열로를 각각 제작, 시험 중이다. 금형과 소재, 단조품 이송을 위하여 로봇을 이용하고 있으나, 현재 소재 투입후 가열, 단조 및 단조품 획득까지 하나의 시스템 내에서 처리 가능한 항온가열 챔버시스템을 구축할 예정으로 연구가 진행 중이다. 또한 선행연구의 일환으로 기보유 중인 4,000톤 프레스를 활용하여 항온단조 공정의 구현이 가능한 고온금형, 고온가열로 등을 설계, 제작하였으며 이를 이용하여 항온단조 공정기술 연구를 수행하였다. 몇 가지의 단조공정을 도출하였으며 이를 토대로 납, A6061, Ti6Al4V 합금 등을 적용한 모델실험을 실시함으로써, 향후에 TiAl 본 소재에 대한 단조작업을 수행할 수 있는 기반기술을 확보하였다.

[항공엔진3-4 | 14:55]

항공기 엔진용 TiAl 소재 특성 DB 구축: 이관호, 손진일, 김효진* (테스코(주))

Keywords: Aircraft Engines, Turbine blade, Titanium Aluminide alloy, Design Database, Airworthiness

국내 생산된 TiAl(티타늄 알루미나이드) 합금 소재의 항공용 부품 적용을 위해서는 외산 소재와의 동등성 입증 및 신뢰성 확보를 위한 체계적인 데이터베이스(DB) 구축이 필수적이다. 그러나 현재까지 이러한 평가 체계가 마련되지 않아, 제작사의 요구 사항을 충족시키는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 TiAl 소재의 국산화를 위한 기술 개발과 이를 항공기 부품에 적용하기 위한 신뢰성 검증 절차를 다루었다. 특히, 국내 및 해외 항공기 제작사의 인증 제품 목록(QPL, Qualified Product List)에 등재되기 위한 필수 평가 데이터 패키지(Data Package) 확보와 제조 기술 검증의 중요성이 강조된다. 장수명 엔진의 감항인증 획득을 위해서는 소재 및 부품의 평가와 검증 데이터가 요구되며, 소재 개발 과정에서 물성의 절대적 우수성보다는 공정 및 시간에 따른 물성 변화와 통계적 편차를 최소화하는 전략이 필요하다. 본 연구는 이러한 변동 요인을 분석하고 설계 인자에 반영함으로써 TiAl 소재의 항공 부품 적용 가능성을 높이고, 국내 항공산업의 경쟁력 강화를 목표로 한다.

[항공엔진3-5 | 15:10]

TiAl 합금조성 및 미세조직이 기계적 특성에 미치는 영향: 성효경*, 박윤지, 조기섭 (국민대학교)

Keywords: TiAl, 합금설계, 미세조직, 기계적 특성

TiAl 합금은 높은 비강도, 우수한 고온 산화 저항성, 경량 특성으로 인해 차세대 항공 엔진 소재로 주목받고 있다. 특히, TiAl 합금을 항공기 엔진 부품으로 사용하기 위하여 고온 환경에서의 저주기 피로 특성은 중요한 지표이다. 본 연구에서는 합금의 미세조직이 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 관련 문헌을 조사하고, TiAl 합금의 조성, 미세조직, 시험 환경에 따른 기계적 특성 데이터베이스(DB)를 구축하였으며, 최적의 소재를 제안하고자 하였다. 구축된 DB를 바탕으로, 합금의 조성에 따른 fully lamellar, nearly lamellar, near gamma, duplex와 같은 미세조직이 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. TiAl 합금에서 Al 함량은 기본적인 상을 결정짓는 주요 원소로, 함량에 따라 합금의 물성이 크게 달라진다. 예를 들어, 고온 특성이 우수하여 주로 연구되고 있는 γ-TiAl 합금은 보통 45-50 at.%의 Al 함량을 가지며, Al 함량이 부족할 경우 γ상이 줄어들어 조대한 라멜라 구조를 형성하게 된다. 이로 인해 산화 저항성과 내열성이 감소하여 고온 피로 특성이 저하된다. 반면, Al 함량이 과도하게 높으면 γ상이 과도하게 형성되어 취성이 증가하고 고온 피로 특성이 저하된다. TiAl 합금은 주로 γ상과 α2상으로 이루어진 라멜라 구조를 가지지만, 고온 저주기 피로 환경에서는 균열 전파가 가속화되는 경향이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 추가적인 원소 첨가와 같은 다양한 접근법이 시도되고 있으며, 본 연구에서는 인공지능을 활용하여 항공기 엔진 부품 소재로 적합한 기계적 특성이 우수한 최적의 TiAl 합금 조성을 설계하고자 하였다.

[항공엔진4-1 | 15:35]

항공기 엔진 부품 적층 제조 재생 핵심기술 개발: 안성철*, 신충식*, 손인수 (한화에어로스페이스)

Keywords: 항공엔진, 적층제조, MRO, 3D프린팅

항공기 엔진 부품 적층제조 핵심기술 개발 과제는 각종 항공기 엔진 도입 이 후 항공기 엔진 부품의 마모 및 파손이 증가되는 시점에 실제 정비수리가 가능하도록 적층 수리 기술을 개발하는 것을 목표로 한다. 향후 적층 수리 기술의 안정성이 확보된 후 타 MRO 기업의 기술적 자문 뿐만 아니라 발전용 가스터빈이나 산업용 장비 분야 등 다양한 수리 정비 공정에 접목하여 활용가능하다. 적층제조는 신공정 기술로서 국내외 초기 단계로 국내 항공 엔진 MRO 적용을 위해서는 산학연 협력 개발을 통해 국내 품질 및 원가 경쟁력 확보 가능한 분말 및 공정개발이 필수적이다. 축적된 선행연구, 소재, 설계, AM 제조, 검증 등의 요소 기술들은 향후 다양한 항공엔진의 개발 또는 수리 정비기술 국산화를 위한 기초가 될 수 있다. 현재 국내 적층 제조 연구개발은 활발하나 항공엔진 분야 적용은 초기 단계이므로 본 과제를 통해 기술 확보 후 항공 엔진 MRO 분야에서 경쟁력을 확보할 수 있도록 하겠다.

[항공엔진4-2 | 15:50]

항공우주 산업에서 적층제조 공법을 활용한 수리기술 개발: 신충식*, 안성철, 손인수 (한화에어로스페이스)

Keywords: 적층제조, Additive Manufacturing, 3D Printing, MRO

최근 새로운 제조공법으로서 적층제조(3D 프린팅) 공법에 대한 산업계의 적용이 활발해지고 있다. 항공우주 산업에서도 다양한 부품에 다양한 적층 제조 공법이 도입되며 기존 제조공법(주조, 단조, 용접 등)이 구현하지 못하는 복잡한 형상을 구현하거나, 개발 리드 타임 단축, 소량 프로토타입 개발 등에 활용하고 있다. 뿐만 아니라, 항공우주 산업의 부품 수리에도 적층 제조 공법을 적용하려는 연구가 진행 중이며 일부 선진사에서 수리 전문 공장을 운영 중이기도 하다. 특히 DED(Directed Energy Deposition) 공정은 부품 수리에 적합한 공정으로 두각을 나타내고 있으나, 최근에는 PBF(Powder Bed Fusion) 공정을 활용한 부품 수리 방법도 소개되고 있다. 본 발표에서는 적층제조를 활용한 항공우주 산업에서는 수리 공법 개발 사례를 살펴보고, 향후 기술 발전 방향을 모색해 보고자 한다. 또한 항공우주 산업의 특성 상 요구되는 수리 요구도에 대한 분석을 통해 구체적인 개발 방법론을 소개하고자 한다.

[항공엔진4-3 | 16:05]

L-PBF 기반 IN718 초내열 합금 적층품의 특성 제어 열처리 연구: 강현수*, 하정헌, 김원래, 이택우, 김형균, 김건희 (한국생산기술연구원)

Keywords: L-PBF, IN718, 초내열 합금, 특성 제어, 열처리

Additive manufacturing(AM) 공정 중 Laser powder bed fusion(L-PBF) 방식은 복잡한 형상을 정밀하게 구현할 수 있는 장점으로 인해 다양하게 활용되고 있지만, laser를 열원으로 활용하여 발생하는 급속 용융 및 냉각 공정으로 인해, 합금을 개발할 때 설계한 강화기구를 구현하지 못하고 독특한 초기 미세구조와 기계적 특성을 나타낸다. 특히, IN718과 같이 γ' , γ'' , δ, Carbides, Laves 등의 다양한 2차 상 입자의 석출강화 기반의 초내열 합금은 강화기구 구현을 위한 후열처리 연구가 필수이다. 하지만, 현재 적용되는 PBF 기반의 IN718 적층품 열처리 규격의 경우, 비적층소재에 적용되는 고온 및 장시간 공정조건으로 제안되어 있기 때문에, 생산성 및 독특한 as-built 시편의 미세구조 특성을 고려한 열처리 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 L-PBF 공정으로 적층한 IN718 합금의 열처리 공정 조건을 석출물의 열역학적 데이터 기반으로 설계 제안하고, 기존 규격과 특성을 비교 분석하였다.

[항공엔진4-4 | 16:20]

DED 기반의 금속 적층제조 기술의 연구개발 동향: 서정훈* (화천기계주식회사)

Keywords: 금속 적층제조, DED, LP-DED

금속 적층제조(AM) 분야에서 Directed Energy Deposition (DED) 기술은 대형 부품 제조, 수리 및 재제조(repair & remanufacturing), 이종 재료 적층 및 기능성 재료 구현, 그리고 기존 제조공정과의 융합(hybrid manufacturing) 등에서 강점을 가진다. 이러한 특성으로 인해 향후 항공우주, 자동차, 에너지, 의료 등 고부가가치 산업에서의 수요가 지속적으로 증가할 것으로 예상

되며, 특히 대형 부품 제조와 수리 시장의 확대가 기대된다. 그러나 DED 기술은 Powder Bed Fusion (PBF) 기반의 금속 적층제조 기술과 비교했을 때 해결해야 할 중요한 기술적 과제를 안고 있다. 본 발표에서는 형상 자유도(geometric freedom) 및 표면 품질 향상, 공정 제어 및 최적화, 그리고 사용자 경험 개선이라는 세가지 핵심 문제를 중심으로, 이를 해결하기 위한 화천기계의 연구개발 노력을 소개하고자 한다. 특히, 형상 자유도와 표면 품질의 향상을 위해, 3D 모델 데이터를 기존의 2D 슬라이싱 방식 뿐만 아니라 새로운 개념의 Adaptive 2D 슬라이싱과 3D 슬라이싱 방식을 적용하여 2차원 단면 또는 3차원 곡면을 생성하고, 적층공정에서 단면 또는 곡면의 외곽을 프린팅하는 Contouring 공정과 내부를 채우는 Filling 공정을 함께 적용한다. 또한 3차원 곡면을 조형할 때는 동시 5축 프린팅 또는 로테이티브 프린팅 기술을 사용한다. 아울러, 사용자 경험의 향상을 위한 통합운전환경 구현과 DEXTru AM Processor 소프트웨어 개발을 진행하고 있으며, 공정제어와 머신 러닝을 이용한 공정 최적화를 위한 노력도 설명한다.

[항공엔진4-5 | 16:35]

항공용 적층제조 소재 데이터 개발에 대한 MMPDS 연구현황: 손진일*, 김효진, 은성진 (테스코(주))

Keywords: 감항인증, MMPDS, 적층제조, 통계처리

감항인증이란 항공기의 전주기 수명 동안 비행 안정성을 확보하기 위한 제도로서 시간적으로는 개발 단계부터 도태하기까지를 포함하며, 인증 범위로는 항공기 기체와 엔진, 소프트웨어, 통신, 무장까지 모든 범위를 포함한다. 항공기의 설계 단계에서 사용되는 기본 물성 또한 감항 인증 대상이 되므로 FAA(미국 연방항공청, Federal, Aviation Administration)의 규정에 따라 모든 설계 데이터는 통계 처리된 물성을 사용해야만 한다. MMPDS(Metallic Materials Properties Development and Standardization)는 항공기 설계에 필요한 재료의 물성을 통계적 처리를 거친 후 정리된 데이터 모음집이다. 국내에서도 여러 기관에서 적층제조 공정을 항공기에 적용하기 위하여 다양한 재료에 대한 연구를 진행하고 있거, 향후 MMPDS에 데이터 등재를 목적으로 하고 있으므로, 적층제조 공정을 통하여 연구된 데이터들이 MMPDS에 적용되기 위해서 필요한 과정과 적용 요구도에 대한 이해도를 높이기 위한 자료를 발표하고자 한다.

학생세션 II
Room 300, 4월 24일

[SS4-1 | 09:00]

다중 에이전트 논쟁형 LLM 기반 조건부 이중 페로브스카이트계 소재 탐색: 이인효*, 이준형, 유승화 (한국과학기술원)

Keywords: Large Language Models, Multi-Agents Debating Frameworks, Double Perovskite, Density Functional Theory, Surrogate Models

화학식의 이중 페로브스카이트 (DP) 물질은 500,000개 이상의 높은 조성 디자인 자유도를 제공하며, 이를 통해 전자적/광학적 물성을 효과적으로 제어할 수 있다.[1] 사이트의 원소 종류에 따라 DP는 산화물 DP, 할라이드 DP, 칼코제나이드 DP의 세 유형으로 분류된다. 각 유형과 더불어, 구조 내에 포함된 원소의 종류에 따라 DP의 물성이 변한다. 예를 들어, La-based 산화물 DP는 높은 안정성과 이온 전도도로 인해 배터리 분야에서 주목받고 있으며,[2,3] Li-based 할라이드 DP는 우수한 전력 전환 효율로 태양 전지 등의 산업에 널리 활용된다.4 이처럼, 특정 원소가 포함되거나 특정 조건이 충족된 DP에서 뛰어난 물성이 발현하는 사례가 존재한다.[5,6] 따라서, DP의 방대한 설계 공간을 탐색해 나갈 때 특정 조건을 만족하는 물질들을 우선시한다면 효율적으로 유망한 신물질을 탐색하는 것이 가능하다. 이처럼 목표 물성이나 특정 설계 조건에 부합하는 물질을 생성하기 위해 최근 재료과학 분야에서 Conditional GAN, Conditional VAE 등의 딥러닝 기반 조건부 생성 모델이 많은 관심을 받고 있다.7,8 특히, 대규모 언어 모델 (LLM)은 방대한 학습 데이터를 바탕으로 입력 프롬프트에 따른 유연한 생성이 가능하여 조건부 생성 모델로서 큰 가능성을 보여주고 있다. LLM의 가장 큰 장점 중 하나는 피드백을 통해 추론 능력을 향상할 수 있다는 점이다.9,10 그러나 기존 물질 탐색 관련 LLM 연구들은 단순 프롬프트 기반 조건부 생성에 국한되어 있어, LLM의 잠재력을 충분히 활용하지 못하고 있다.[11-13]

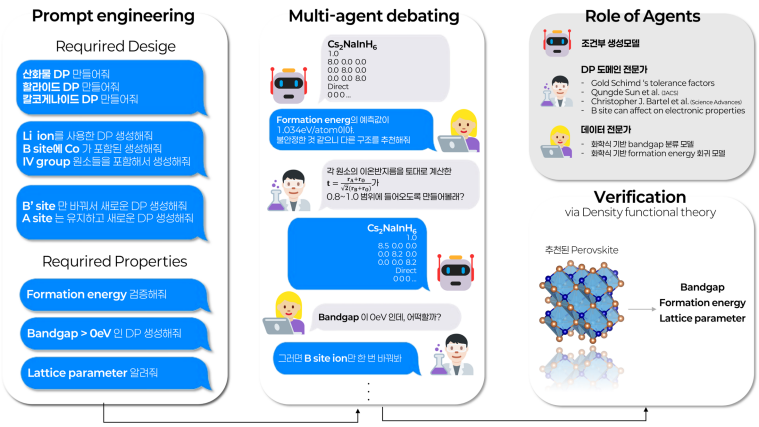


Fig. 1. 본 연구의 전체적인 흐름 및 각 에이전트의 역할

따라서 본 연구에서는 다중 에이전트 논쟁형 물질 개발 프레임워크를 구축하였다. 이를 통해 각 에이전트 간 자율적 상호작용을 통해 추론 능력을 높이고, 유망 신물질 탐색을 가속화 하고자 한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 본 프레임워크에는 1) 조건부 생성 모델, 2) DP 도메인 전문가, 3) 데이터 전문가가 포함된다. 데이터 전문가는 화학식 기반 물성 예측 모델과 데이터 통계 자료, DP 도메인 전문가는 Tolerance factors[14] 등의 도메인 지식을 활용하여 생성된 DP의 물성을 평가하고, 설계 방향성을 결정한다. 생성 모델은 반복적인 Debating iteration을 통해 각 에이전트로부터 물리·화학적 및 데이터 기반 피드백을 종합하여, 요구 물성 (예: Formation energy, Band gap)과 설계 조건 (예: 특정 유형 DP, 특정 원소 포함 및 제외)을 모두 만족하는 DP를 효율적으로 탐색한다. 밀도범함수이론 (DFT)를 통해 최종적으로 추천된 DP의 물성을 검증한다.

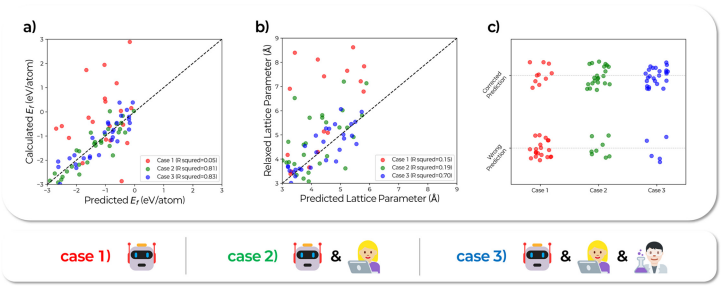


Fig. 2. 각 케이스 별로 추천된 산화물 DP 30개의 (a) Formation energy (예측) - Formation energy (DFT) 산점도, (b) Lattice parameter (예측) - Lattice parameter (DFT) 산점도, (c) conduction type 분류 정확도.

다중 에이전트 논쟁형 프레임워크의 실효성을 검증하기 위해 세 가지 사례로 나누어 분석을 진행하였다. 각 사례는 Case 1) 조건부 생성 모델 / Case 2) 조건부 생성 모델 & 데이터 전문가 / Case 3) 조건부 생성 모델 & 데이터 전문가 & DP 도메인 전문가로 나누어진다. 검증 물성은 Formation energy, Lattice parameter, Conduction type이다. 그림 2 (a)와 (c)에서 볼 수 있듯, 데이터 전문가가 포함된 사례들은 Formation energy 예측 및 Conduction type 분류에서 탁월한 정확도를 보이며, 화학식 기반 물성 예측 모델의 우수성을 입증한다. 또한, Lattice parameter의 경우 Case 3가 약 0.70의 R-squared score를 달성하여, DP 도메인 전문가가 제공한 Tolerance factors 등 구조적 지식 기반 피드백이 생성 모델의 추론 능력 향상에 크게 기여했음을 시사한다. 추가 검증은 다음과 같은 과정을 통해 이루어진다. 첫째, 다양한 설계 조건에 따른 각 사례별 생성 DP의 다양성과 예측 정확도 분석. 둘째, 최종 DP 도출까지의 Debating iteration 횟수 정량적 평가. 셋째, 각 사례별 생성 모델의 추론 변화 과정 추적 및 에이전트들의 피드백 수용 결과 검증. 이러한 다각적 분석을 통해 다중 에이전트 논쟁형 프레임워크의 타당성과 실효성을 엄밀히 검증한다.

참고문헌(References) (1) Gayathri, P.; Ghosh, S.; Ghosh, A. Predictive Design of Hybrid Improper Ferroelectric Double Perovskite Oxides. Chemistry of Materials2024, 36(2), 682–693. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c02067. (2) Amores, M.; El-Shinawi, H.; McClelland, I.; Yeandel, S. R.; Baker, P. J.; Smith, R. I.; Playford, H. Y.; Goddard, P.; Corr, S. A.; Cussen, E. J. Li1.5La1.5 MO6 (M = W6+, Te6+) as a New Series of Lithium-Rich Double Perovskites for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries. Nat Commun2020, 11(1). https://doi.org/10.1038/s41467-020-19815-5. (3) Zhang, C.; Zhang, Y.; Nie, Z.; Wu, C.; Gao, T.; Yang, N.; Yu, Y.; Cui, Y.; Gao, Y.; Liu, W. Double Perovskite La2MnNiO6 as a High-Performance Anode for Lithium-Ion Batteries. Advanced Science2023, 10(18). https://doi.org/10.1002/advs.202300506. (4) Al-Daraghmeh, T. M.; Zayed, O.; Zelai, T.; Saba, S.; Mustafa, G. M.; Hakami, O.; Albalawi, H.; Bouzgarrou, S.; Mahmoud, Z.; Mahmood, Q. Study of Mechanical, Optical and Transport Aspirants of Double Perovskites Cs2XInI6 (X = Li, Na) for Solar Cells and Clean Energy Applications. J Solid State Chem2023, 322. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2023.124003. (5) Li, B.; Wu, X.; Zhang, S.; Li, Z.; Gao, D.; Chen, X.; Xiao, S.; Chueh, C. C.; Jen, A. K. Y.; Zhu, Z. Efficient and Stable Cs2AgBiBr6 Double Perovskite Solar Cells through In-Situ Surface Modulation. Chemical Engineering Journal2022, 446. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137144. (6) Li, J.; Meng, X.; Wu, Z.; Duan, Y.; Guo, R.; Xiao, W.; Zhang, Y.; Li, Y.; Shen, Y.; Zhang, W.; Shao, G. Pinning Bromide Ion with Ionic Liquid in Lead-Free Cs2AgBiBr6 Double Perovskite Solar Cells. Adv Funct Mater2022, 32(25). https://doi.org/10.1002/adfm.202112991. (7) Li, S. G.; Chen, Q. R.; Huang, L.; Chen, M.; Wei, C. Di; Yue, Z. J.; Liu, R. X.; Tong, C.; Liu, Q. Data-Driven Approach to Predict the Fatigue Properties of Ferrous Metal Materials Using the CGAN and Machine-Learning Algorithms. Adv Manuf2024, 12(3), 447–464. https://doi.org/10.1007/s40436-024-00491-3. (8) Chen, Z. Q.; Shang, Y. H.; Liu, X. D.; Yang, Y. Accelerated Discovery of Eutectic Compositionally Complex Alloys by Generative Machine Learning. NPJ Comput Mater2024, 10(1). https://doi.org/10.1038/s41524-024-01385-5. (9) Chan, C.-M.; Chen, W.; Su, Y.; Yu, J.; Xue, W.; Zhang, S.; Fu, J.; Liu, Z. ChatEval: Towards Better LLM-Based Evaluators through Multi-Agent Debate. 2023. (10) Khan, A.; Hughes, J.; Valentine, D.; Ruis, L.; Sachan, K.; Radhakrishnan, A.; Grefenstette, E.; Bowman, S. R.; Rocktäschel, T.; Perez, E. Debating with More Persuasive LLMs Leads to More Truthful Answers. 2024. (11) Fu, N.; Wei, L.; Song, Y.; Li, Q.; Xin, R.; Omee, S. S.; Dong, R.; Siriwardane, E. M. D.; Hu, J. Material Transformers: Deep Learning Language Models for Generative Materials Design. Mach Learn Sci Technol2023, 4(1). https://doi.org/10.1088/2632-2153/acadcd. (12) Yue, J.; Peng, B.; Chen, Y.; Jin, J.; Zhao, X.; Shen, C.; Ji, X.; Hsieh, C. Y.; Song, J.; Hou, T.; Deng, Y.; Wang, J. Unlocking Comprehensive Molecular Design across All Scenarios with Large Language Model and Unordered Chemical Language. Chem Sci2024, 15(34), 13727–13740. https://doi.org/10.1039/d4sc03744h. (13) Bhattacharya, D.; Cassady, H. J.; Hickner, M. A.; Reinhart, W. F. Large Language Models as Molecular Design Engines. J Chem Inf Model2024. https://doi.org/10.1021/acs.jcim.4c01396. (14) Bartel, C. J.; Sutton, C.; Goldsmith, B. R.; Ouyang, R.; Musgrave, C. B.; Ghiringhelli, L. M.; Scheffler, M. New Tolerance Factor to Predict the Stability of Perovskite Oxides and Halides. Sci Adv2019, 5(2). https://doi.org/10.1126/sciadv.aav0693.

[SS4-2 | 09:13]

데이터 증강을 활용한 내열강의 크리프 수명 기계학습: 조태현*, 최윤석 (부산대학교)

Keywords: 내열강, 크리프, 기계학습, 데이터 증강, 생성형 인공지능

(연구의 필요성 및 목표) 내열강은 증기 터빈 블레이드와 같이 고온, 고압 하에서 자주 사용되는 재료로서, 상온에서 사용되는 일반적인 재료들과 달리 온도에 의한 영향을 많이 받게 된다. 따라서, 사용 환경을 고려하여 고온 내열물성을 파악해야 하지만, 고온 내열물성의 특성 상 특성 평가에 드는 시간적·비용적 소모가 매우 크다. 이를 해소하기 위해 최근에는 기계학습을 이용하여 내열물성을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 기계학습은 실제로 실험을 진행하지 않고도 실제와 유사하게 결과를 예측하는 기법으로서 실험이 어려운 내열물성의 예측에 효율적인 점이 여러 연구에서 입증1)되었으며, 문헌 자료로부터 수집한 조성 및 크리프 수명 데이터를 활용하여 연구가 진행되고 있다. 그러나 문헌 자료로부터 수집할 수 있는 조성 영역은 매우 한정적이며, 이 때문에 문헌 자료에서 연구되고 있는 특정 조성군(P92, STS316 등)과 관련된 조성 외에는 연구의 진행이 힘들다. 따라서 최근에는 유전 알고리즘 혹은 베이지안 최적화와 같은 최적화 기법2) 혹은 Generative Adversarial Network (GAN), Variational Auto Encoder (VAE)와 같은 생성형 인공지능 모델3)을 활용하여 조성 영역을 넓히고자 하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 수집한 내열강의 크리프 수명 데이터를 바탕으로 생성형 인공지능인 Diffusion model을 활용하여 수집한 조성과 비슷하지만, 기존에 존재하지 않던 새로운 가상의 조성을 생성하고 해당 데이터를 통해 학습함으로써 충분한 조성 영역을 통해 예측의 일관성을 높이고, 기존에 연구되고 있던 조성 영역을 넓히는 것을 목표로 하고 있다. (연구내용 및 방법) 본 연구에 사용된 모델은 신경망(ANN) 모델로서, 학습에 사용하기

위해 다양한 종류의 내열강에 대해 크리프 수명을 문헌 자료로부터 수집하여 총 9,000여개의 데이터를 수집했다. 수집된 데이터의 경우, 조성 - 열처리 조건 - 크리프 시험 조건 - 크리프 수명의 정보를 갖고 있으며, 수집된 데이터를 단순화하기 위해 각 조성별로 열처리 조건을 하나만 남긴 이후, 데이터의 분포상 가장 많은 데이터를 가진 특정 시험조건에서 데이터를 추출하여 데이터를 조성-크리프 수명으로 단순화했다. 추출된 데이터에 대해 이상치를 제거한 후, 추출된 데이터를 원본 데이터로 하여 차원축소 기법 및 클러스터링 기법을 활용하여 데이터의 분포를 확인하고 클러스터별로 데이터를 분리했다. 또한, 모델의 예측능을 비교하기 위해 Bootstrap 방식을 활용하여 총 60번씩 원본 데이터를 학습 데이터와 예측 데이터(전체 데이터의 20%)로 나눈 이후, 각 학습 데이터별로 클러스터링을 적용한 후, 클러스터별로 데이터를 20,000건씩 생성하여 데이터를 증강하고, 원본 데이터와 생성된 데이터를 활용하여 신경망 모델의 학습을 진행했다. 데이터의 생성 과정을 차원축소를 통한 시각화와 함께 <그림 1>에 요약했다.

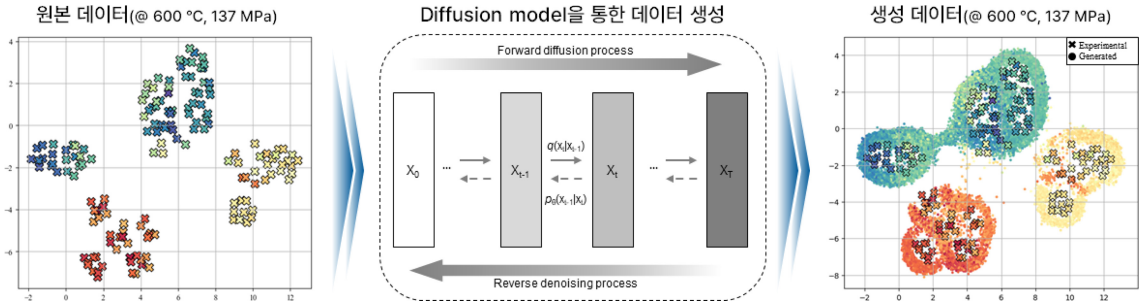


Fig. 1. Diffusion model을 통한 데이터 생성 과정 모식도

(주요 연구 결과) 본 연구는 모델의 예측능을 개선하는 방향으로 진행되었으며, 각각 클러스터링을 적용하지 않고 원본 데이터에서 학습 데이터 전체를 사용하여 예측 데이터를 예측한 경우(1)와, 원본 데이터에서 학습 데이터를 클러스터별로 분리하여서 각각 학습하여 예측한 경우(2), 마지막으로 학습 데이터를 클러스터별로 분리하고, 클러스터별 데이터를 생성형 데이터로 20,000건씩 생성하여 예측(3)했다. 해당 결과를 <그림 2>으로 요약했다.

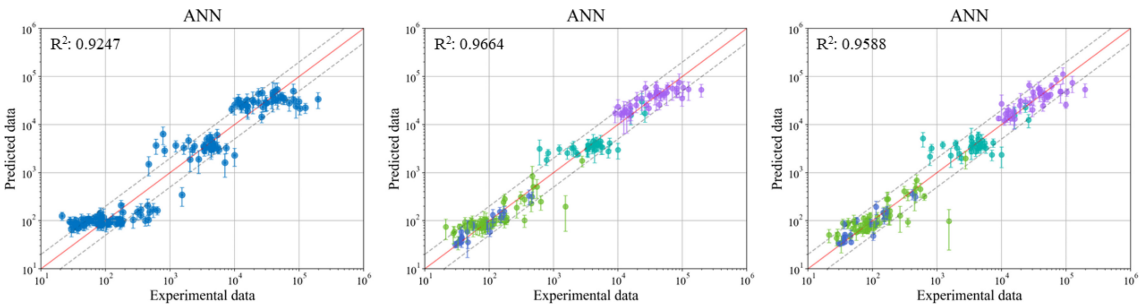


Fig. 2. 각각의 방식(1, 2, 3)에 따른 신경망 모델의 학습 결과 parity plot

참고문헌(References) 1) Shin, D., Yamamoto, Y., Brady, M. P., Lee, S., & Haynes, J. A. (2019). Modern data analytics approach to predict creep of high-temperature alloys. Acta Materialia, 168, 321-330. 2) Wang, C., Wei, X., Ren, D., Wang, X., & Xu, W. (2022). High-throughput map design of creep life in low-alloy steels by integrating machine learning with a genetic algorithm. Materials & Design, 213, 110326. 3) Mamun, O., Wenzlick, M., Sathanur, A., Hawk, J., & Devanathan, R. (2021). Machine learning augmented predictive and generative model for rupture life in ferritic and austenitic steels. Npj Materials Degradation, 5(1), 20.

[SS4-3 | 09:26]

Grade 5 Ti와 AlTiCrVFe계 경량 고엔트로피 합금 하이브리드 구조체의 열처리 및 미세조직 변화 연구: 이용건 (아주대학교 에너지시스템학과), 이한성 (아주대학교 첨단신소재공학과), 송은효 (아주대학교 에너지시스템학과), 윤교식 (아주대학교 첨단신소재공학과), 안병민* (아주대학교 에너지시스템학과, 아주대학교 첨단신소재공학과)

Keywords: high entropy alloy, Grade 5 Ti, hybrid structure, interface, heterogeneous coherent, mechanical properties

α+β 이중상 구조를 갖는 grade 5 Ti 합금은 높은 비강도, 우수한 내식성으로 항공우주, 자동차 엔진 부품 등의 분야에 사용되고 있으나, 낮은 경도 및 내마모성으로 일부 고부가가치 산업의 적용에 한계를 보인다. 이를 극복하기 위해 코팅, 열처리, 복합재 등 다양한 방향의 연구가 진행되고 있다. 하이브리드 구조체는 서로 다른 2개 이상의 재료를 용접, 확산 접합 등의 방법으로 결합시킨 재료로, 최근 이를 이용하여 재료의 구조 및 성능을 개선하는 연구가 주목받고 있다. 본 연구에서는 이를 grade 5 Ti 합금에 적용하고자 하며, 상대 재료로는 고엔트로피 합금(high entropy alloys, HEAs)를 선정하였다. HEA는 계면에서의 원소 확산 및 상변태를 최소화 할 수 있는데, 이는 하이브리드 구조체의 계면 물성과 결합력에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이에 HEAs와 grade

5 Ti 합금의 하이브리드 구조체를 제조하고 다양한 열처리를 진행하여 미세조직과 물성 간의 상관성을 연구하였다. 본 연구에서는 기계적 합금화를 통해 AlTiCrVFe HEAs 분말을 제조하고 방전 플라스마 소결(spark plasma sintering, SPS)을 통해 하이브리드 구조체를 제조하였다. 제조된 하이브리드 구조체에는 풀림 열처리(annealing, 750°C), 균질화 열처리(homogenization treatment, 900°C), 용체화 열처리(solution treatment, 1050°C)를 실시하였다. 열처리에 따른 하이브리드 구조체의 미세조직은 XRD, SEM-EDS로, 계면 물성은 경도 mapping과 나노인덴터로 분석하여 두 결과를 비교하였다. 하이브리드 구조체의 기계적 물성은 굽힘시험과 인장시험으로 측정하였다. 미세조직 분석 결과, 열처리 온도가 증가함에 따라 Grade 5 Ti 합금에서는 α 상이 감소하고, β 상이 증가하며, HEAs에서는 BCC 상이 증가하고, 금속간 화합물인 laves 상과 δ 상이 감소하는 양상을 보였다(Fig. 1(a), 1(b)). 이를 통해 고온에서 일부 금속간화합물이 BCC 상으로 용해됨으로써 헤테로 계면의 정합률을 높일 수 있음을 확인하였다. 또한 열처리 온도가 증가할수록 계면 두께가 증가하는 경향을 보였으며, 열처리 조건에 따라 α' 상이 소멸하고 α 상과 β 상의 미세조직이 변화하는 것이 관찰되었다(Fig. 1(c), 1(d), 1(e), 1(f)). 하이브리드 구조체의 계면 물성 분석 결과(Fig. 2(a), 2(b), 2(c), 2(d)), 계면과 천이면에서 원자 확산에 의한 고용체 강화로 격자 변형이 발생하여 원재료보다 높은 경도가 측정되었으며, 열처리에 따른 계면 정합성 향상이 결합력의 상승에 미치는 영향을 미세구조 결과와 비교하여 분석하였다. 이후 구조적 물성 및 결합 안정성을 판단하기 위해 굽힘시험과 인장시험을 수행하였다.

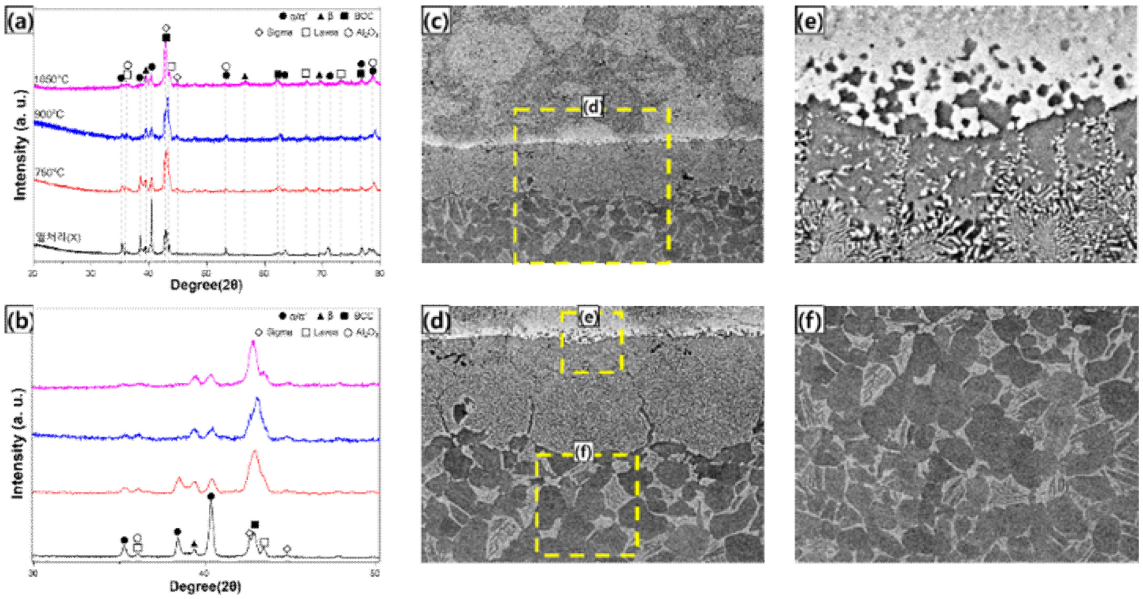


Fig. 1. (a) XRD results of hybrid structure, (b) magnified (a), (c) SEM result of hybrid structure, (d) magnified (c), (e) magnified (d) at interface, (f) magnified (d) at grade 5 Ti

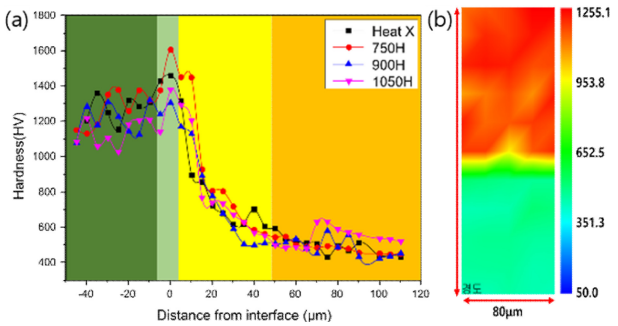


Fig. 2. (a) Hardness result of hybrid structure, (b) hardness mapping of hybrid structure

본 연구는 Grade 5 Ti/HEA 하이브리드 구조체의 열처리를 통한 계면 거동과 물성 간 연관성을 분석하여, 고성능 하이브리드 구조재료 개발에 유용한 기초 데이터를 제공한다는 점에 의의가 있다.

참고문헌(References) 1) M. J. Donachie, Titanium: A Technical Guide, ASM International (2000). 2) R. Boyer, E.W. Collings, and G. Welsch, Materials Properties Handbook (1994). 3) Anatoliy Popovich, Vandim Sufiiarov, Materials Science and Engineering (2014).

[SS4-4 | 09:39]

강·상유전체를 복합화한 LiCoO2의 고전압과 초고전압에서의 수명 및 용량 개선: 허석하* (부산대학교), 최문희 (한국세라믹기술원), 김양도 (부산대학교)

Keywords: Li-ion battery, cut off voltage 4.3V and 4.5V, LiCoO2, BaTiO3, Ba(Zr,Ti)O3, high-rate chargeability, cyclability

LiCoO2 (LCO) 양극은 뛰어난 체적 에너지 밀도로 인해 상업용 리튬 이온 배터리에 널리 적용되고 있다. 최근 LCO는 고용량, 고전압 등 많은 장점으로 인해 가장 일반적으로 상용화되었다. 그러나 LCO의 실용적인 사용은 높은 전위에서의 전기화학적 및 구조적 불안정성으로 인해 제한되었다. 따라서 이러한 문제를 해결하고 차세대 고전압 LCO 배터리를 개발할 수 있는 접근 방식을 찾는 것이 중요한 과제이다. 특히, 전극 표면의 보호층은 코팅에 의해 형성될 수 있으며, 이는 구조적 안정성과 Li?의 삽입/탈리가 촉진되어 고속 충·방전 성능이 향상될 수 있다. 본 연구에서는 강유전체 및 상유전체 코팅을 통해 LCO의 전기화학적 성능을 개선하고, 구조적 안정성을 향상시키는 것을 목표로 한다. 이를 위해 LCO(12.4 μm)의 전기화학적 성능 향상을 위해 강유전체 및 상유전체인 $BaTiO_3$(250 nm)와 Ba(Zr, Ti)O_3(200 nm)를 각각 0.1 wt% 및 1 wt%로 코팅하였다. $BaTiO_3$(BT)와 Ba(Zr, Ti)O_3(BZT)의 유전율은 각각 1,793.9ε 및 15,423.3ε이며, hysteresis 손실은 각각 298.2 J/cm^2 및 47.6 J/cm^{2}이다. 또한, 고전압 및 초고전압에서의 수명과 용량을 개선하기 위해 cut-off 전압을 3–4.3V 및 4.5V로 설정하여 충·방전 특성을 비교하였다.

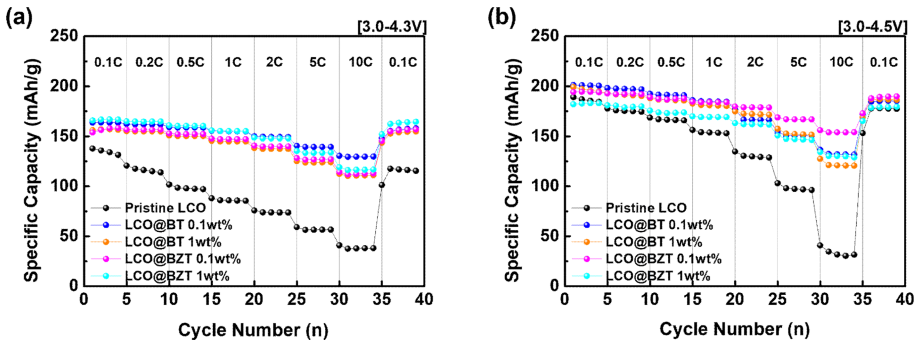


Fig. 1. (a) 4.3V, (b) 4.5V cut-off 전압에서 C-rate (0.1C, 0.2C, 0.5C, 1C, 2C, 5C, 10C)에서의 방전 곡선.

C-rate 충·방전 분석 결과, LCO@BT 및 LCO@BZT는 pristine LCO 대비 4.3V 및 4.5V에서 더 높은 방전 용량을 나타냈다. 그림 1(a)에서 2C까지는 LCO@BZT의 방전 용량이 높았으나, 더 높은 속도에서는 강한 분극 효과로 인해 LCO@BT가 더 우수한 성능을 보였다. 반면, 그림 1(b)에서는 고속 충·방전 시 LCO@BZT의 용량 특성이 우수하였으며, 이는 높은 유전율과 낮은 hysteresis 손실로 인해 충·방전 안정성이 향상된 결과로 해석된다. 본 연구를 통해 유전물질 코팅이 LCO의 구조적 열화를 완화하고 전해질 분해를 감소시켜 배터리의 수명과 안전성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 코팅된 LCO 양극은 비코팅 LCO 대비 현저히 향상된 성능을 보였으며, 이는 고성능 리튬이온 배터리를 위한 유망한 개질 방법으로 평가될 수 있다. 이러한 성능 개선은 높은 출력과 장기적인 안정성이 요구되는 응용 분야에서 특히 중요하며, 코팅된 LCO 양극이 차세대 에너지 저장 시스템의 유망한 후보가 될 수 있음을 시사한다.

참고문헌(References) 1) Teranishi, Takashi, et al. “Low-Temperature High-Rate Capabilities of Lithium Batteries via Polarization-Assisted Ion Pathways.” Advanced Electronic Materials 4.4 (2018): 1700413. 2)Yasuhara, Sou, et al. “The effect of relative permittivity of surface supporting materials for high-speed rechargeable LiCoO2 cathode film.” Journal of Power Sources 441 (2019): 227194. 3) Jayasree, Silpasree S., Shantikumar Nair, and Dhamodaran Santhanagopalan. “Ultrathin TiO2 coating on LiCoO2 for improved electrochemical performance as Li–ion battery cathode.” ChemistrySelect 3.10 (2018): 2763-2766. 4) Xu, Leimin, et al. “Understanding the role of TiO2 coating for stabilizing 4.6 V high-voltage LiCoO2 cathode materials.” Electrochimica Acta 478 (2024): 143862.

[SS4-5 | 09:52]

적층 제조 공정을 통해 제작된 Ti-6Al-4V 합금 기반 산화물 분산강화 합금의 미세조직 및 기계적 특성 분석: 김우혁 (국립한밭대학교), 고의준, 박형기 (한국생산기술연구원), 김한수 (KONASOL), 윤중열 (한국재료연구원), 김정한* (국립한밭대학교)

Keywords: titanium alloy, oxide dispersion strengthened alloy, additive manufacturing

Ti-6Al-4V 합금은 가벼운 무게와 높은 강도 그리고 우수한 내식성을 가져 많은 산업 분야에서 활용되어지고 있다. 하지만 고온에서 기계적 물성이 하락하는 문제점이 있어 300 ℃ 이상의 고온 작동 환경에서는 사용이 제한된다. 따라서 일반적인 타이타늄 합금은 고온 환경 및 차세대 원자로와 같은 극한 환경에서의 사용이 어려운 실정이다. 고온에서 우수한 기계적 물성을 확보하기 위한 방법으로 고에너지 볼밀링과 같은 기계적 합금화를 통해 산화물을 기지 내에 분산시키는 산화물 분산 강화가 있지만 타이타늄 기지 내에 Y2O3 같은 산화물들이 서로 뭉쳐 편석되어 철계 또는 니켈계 합금에 비해 기지 내 분산이 매우 어렵다. 타이타늄 합금 내에 산화물들을 고르게 분산시키기 위해서는 고에너지 볼밀링 공정이 장시간 요구되어 시간 소모가 매우 크고 화재 및 폭발의 위험성도 존재하여 타이타늄 기반의 산화물 분산 강화 합금 제작에 큰 어려움이 있다. 적층 제조 공정을 이용한 타이타늄 합금 제조는 기존의 난가공성 문제를 해결할 수 있고 높은 설계 자유도를 가져 복잡한 모양의 제품도 기존 공정에 비해 용이하게 제작이 가능하며

재료 손실도 감소하여 적층제조를 이용한 타이타늄 합금 관련 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 하지만 기계적 합금화를 통하여 분말 제작 시 구형의 형상을 유지할 수 없어 적층 제조용 분말로 사용이 제한된다. 최근 연구 결과에서 분말 제조 공정 중 전극 유도 가스 분무 (EIGA) 방식을 통하여 타이타늄 합금 내에 이트륨을 고용시킬 수 있는 가능성이 제시되었다. EIGA 방식을 통한 분말 제조 공정은 산화물을 Ti-6Al-4V 분말 내에 고용시킬 수 있을 뿐만 아니라 구형의 형상을 유지할 수 있어 적층 제조가 가능하다. 이러한 방식을 통하여 제작된 산화물 분산 강화 합금은 기계적 합금화 과정을 거치지 않아 제작 시간이 감소하고 화재 및 폭발의 위험성이 적다. 또한 기존 공정에 비해 설계 자유도가 높아서 원하는 형상으로 제작이 용이하여 다양한 분야에 적용이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 기계적 합금화를 공정을 거치지 않고 EIGA 공정을 통해 Ti-6Al-4V 합금 기지 내에 이트륨을 고용시킨 분말을 생산하여 적층 제조 공정을 통한 타이타늄 분산 강화 합금을 제작하였고 미세조직과 상온 및 고온에서의 기계적 특성을 분석하였다. 미세조직 분석은 광학 현미경 및 주사전자 현미경과 후방산란 회절 분석기를 통하여 분석하였다. 또한 투과전자 현미경을 통해 기지 내 나노 산화물 생성 여부를 분석하였다. 기계적 특성 분석을 위해 인장시험편을 제작하여 상온 및 600 ºC 에서 인장시험을 실시하였으며 비커스 경도는 10초 동안 200 gf 의 하중을 가하여 경도 분석을 진행하였다. 또한 차세대 원자로에서의 사용 가능성을 확인하기 위해 용융염 환경에서 침지 실험을 통하여 부식 저항성을 분석하고 원자로 소재 적합성 여부를 확인하였다. 미세조직 분석 결과, 일반적인 Ti-6Al-4V 합금과 비교하였을 때 alpha lath의 두께 변화는 크지 않았으며 prior-beta grain의 크기가 감소하는 결과를 보였다. 또한 적층제조 시 발생되는 이방성이 기존 Ti-6Al-4V 합금보다 감소하였다. 또한 투과전자 현미경 분석 결과에서 기지 내에 수십 나노 사이즈의 산화물이 분산되어 존재하는 것을 확인하였으며 EDS 조성 분석 및 SAED 패턴 분석 결과 Y2O3 산화물임을 확인하였다. 상온 인장 시험 결과에서 이트륨이 포함된 Ti-6Al-4V 합금이 일반적인 Ti-6Al-4V 합금보다 낮은 연성을 보였지만 항복 강도와 인장 강도는 증가된 결과를 보였으며 이는 고온 인장 강도에서도 유사한 결과를 보였다. 이는 나노 사이즈의 Y2O3 산화물이 고온에서도 전위의 이동을 방해하여 상대적으로 우수한 고온 물성을 유지한 것으로 판단된다. 비커스 경도 시험 결과에서도 더 높은 비커스 경도를 보이는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 EIGA 공정을 통해 이트륨이 포함된 Ti-6Al-4V 합금 분말을 제작하였고 적층 제조를 통해 타이타늄 합금 기반 산화물 분산 강화 합금을 제작하였다. 기존의 기계적 합금화 공정보다 시간과 에너지 소비를 효과적으로 줄일 수 있었고 우수한 고온 물성을 유지하는 결과를 보여 기존 Ti-6Al-4V 소재에서 제한되었던 300 ºC 이상의 고온 작동 및 극한 환경에서도 적용 가능함을 보였다.

참고문헌(References) 1) Herzog D, Seyda V, Wycisk E, et al. Acta Mater. 117: 371–392 (2016). 2) Liu S, Shin YC. Mater Des. 164, 107552 (2019). 3) Im HT, Kim WJ, Kim NS, et al. Journal of Materials Research and Technology. 24, 8348-8356 (2023).

[SS4-6 | 10:05]

Core(Anatase)-Shell(Rutile) TiO2를 이용한 Ba(ZrxTi1-x)O3 유전체의 특성 향상: 남원일* (부산대학교, 한국세라믹기술원), 최문희 (한국세라믹기술원), 김양도 (부산대학교)

Keywords: barium zirconate titanate, ultrahigh dielectric materials

현대사회의 전자제품들은 고전압화, 고성능화와 동시에 경량화, 소형화를 추구하고 있으며, 4차 산업혁명과 함께 전래없던 속도로 변화하고 있다. 이를 달성하기 위하여 배터리를 비롯한 다양한 에너지 저장 장치는 물론 더 나아가 전자소자 또한 경박단소를 추구하며 MLCC도 이러한 흐름을 피해 갈 수 없다. MLCC 산업에서 경박단소와 고용량화를 위해서는 높은 에너지 밀도로 초거대 유전상수를 갖는 초거대 유전체 (Colossal Permittivity, CP)의 개발이 필수 불가결하다. 이러한 이상적인 초거대 유전체는 높은 에너지 저장밀도를 바탕으로 104 이상의 유전율을 가지며, 10-3 이하의 유전손실과 낮은 온도의존성, 낮은 주파수 의존성을 가져야 한다. 이를 위하여 Doping을 통해 defect-dipole cluster를 형성시키는 것이 중요하다, 이 방법은 물질 내부에 Electron, Hole을 형성시켜 전기적 분극이 극대화되고 에너지 밀도를 상승시키는 것으로 보고되었다, 주로 TiO2를 기반으로 희토류나 3가 이온, 5가 이온 등을 도핑하는데 이는 높은 비용과, 높은 휘발성, 높은 유전손실과 같은 문제점으로 상용화에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 상기와 같은 문제점을 갖는 Dopant를 사용하는 것이 아니라 TiO2의 구조적 제어를 통하여 Rutile에서 Anatase로 전자가 이동하는 N/N` Doping이 발생하도록 유도하고 이를 고상합성의 전구체로 활용하여 유전물질 내부에 Carrier와 Oxygen Vacancy를 증가시키며 defect-dipole cluster를 형성시키고자 하였다. XRD 분석을 통하여 2차 상과 잔류 상을 확인하였을 때 일반적인 상용 Anatase 또는 상용 Rutile TiO2를 사용하여 합성된 Barium Zirconate Titanate (Ba(ZrxTi1-x)O3, BZT)는 1100ºC 이상에서 2차 상과 잔류 상이 모두 사라진 것을 확인하였고 제어한 TiO2를 사용하여 합성을 유도한 BZT의 1000ºC 에서 2차 상과 잔류 상이 모두 제거되는 것을 확인하였다. 더 나아가 SEM 분석을 통해 소결 치밀화 과정에서도 동일한 온도 조건에서 제어된 TiO2를 사용하는 경우 더 조대한 크기의 결정이 형성되는 것을 확인하였다. 전기적 특성 평가에서는 상용 TiO2를 사용하여 합성된 BZT는 2,000~7,000 사이의 유전율(ε)을 확인하였고, 제어된 TiO2를 사용한 BZT의 경우 전구체의 높은 Electrion, Hole, Oxygen Vacancy 농도로 인해 합성된 유전체에서 defect-dipole cluster를 형성하며 증가한 에너지 저장밀도로 최대 33,000의 유전율(ε)을 확인하였다. 이를 통하여 전구체의 구조적 제어를 통한 초거대 유전체 합성이라는 새로운 연구 방향을 제시하였고 이러한 방법은 유전체뿐만 아니라 전고체 전지나, 태양전지와 같은 다른 에너지 분야 재료에서도 적용해 볼 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌(References) 1) Dong, Wen, et al. “Colossal permittivity with ultralow dielectric loss in In+ Ta co-doped rutile TiO 2.” Journal of Materials Chemistry A 5.11 (2017): 5436-5441. 2) Taniguchi, Hiroki, et al. “Permittivity boosting in “yellow”(Nb+ In) co-doped TiO 2.” Journal of Materials Chemistry C 8.39 (2020): 13627-13631. 3) Scanlon, David O., et al. “Band alignment of rutile and anatase TiO2.” Nature materials 12.9 (2013): 798-801. 4) Zhang, Daoyu, Minnan Yang, and Shuai Dong. “Electric-dipole effect of defects on the energy band alignment of rutile and anatase TiO 2.” Physical Chemistry Chemical Physics 17.43 (2015): 29079-29084.

[SS4-7 | 10:18]

금 단일원자가 증착된 이차원 페로브스카이트 광촉매를 통한 이산화탄소 환원: 김수영*, 박성욱 (고려대학교)

Keywords: 페로브스카이트, 금속 단일원자, 광촉매, 이산화탄소 환원, 쇼트키 접합

할로겐화 페로브스카이트는 우수한 광전기적 특성으로 인해 광촉매 분야에서 높은 관심을 받고 있다. 이들은 우수한 전하 이동도 및 긴 전하 확산 거리를 가지며, 특히 높은 광 흡수 계수를 가져 이산화탄소 환원을 위한 광촉매로 활용될 수 있다. 그러나, 벌크 페로브스카이트는 상대적으로 제한된 표면적으로 인해 효율적인 광촉매 반응에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해서, Cetyltrimethylammonium Bromide(CTAB) 리간드를 첨가하여 빛을 받는 표면적은 높이면서 전하 전달 거리를 단축할 수 있는 2D 나노판상 $CsPbBr_3$를 합성하였다. 광발광(PL) 분석 결과, 3D 나노결정 구조에서 2D 나노판상 구조로 전환될 때, 양자 구속 효과로 인한 밴드갭 에너지 증가에 따라 발광 피크의 청색 이동이 관찰되었다. X선 회절 분석 결과, 나노판상 구조의 우선 성장 및 이방적 정렬로 인해 (100), (200) 피크만 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 CTAB 리간드가 (100) 면을 따라 성장하면서 다른 방향의 결정면 성장을 억제할 수 있음을 시사한다. 주사전자현미경 이미지 분석을 통해서도 얇은 두께의 나노판상 구조가 형성되었음을 확인할 수 있다.

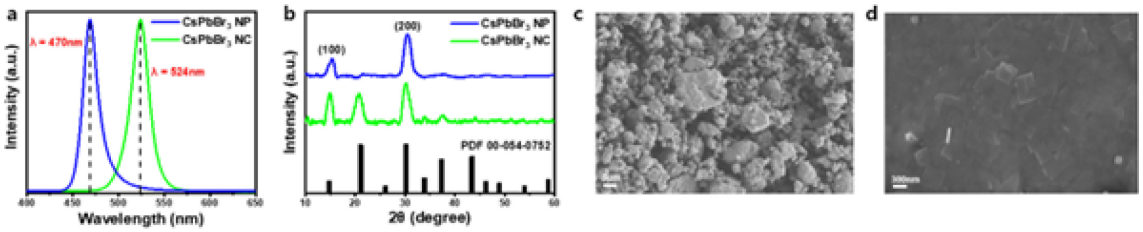


Fig. 1. 나노결정 구조와 나노판상 구조를 갖는 CsPbBr3의 (a) 발광 스펙트럼 (b) X선 회절 패턴 (c) 나노결정 구조를 갖는 CsPbBr3의 SEM 이미지 (d) 나노판상 구조를 갖는 CsPbBr3의 SEM 이미지

이산화탄소 환원 효율 측정을 위한 가스크로마토그래피 분석 결과, 나노판상 구조에서의 메테인 생성 수율이 나노결정 구조 대비 단위 시간 및 단위 질량 기준으로 1.5배, 전체 기체 생성 수율은 1.8배 증가함을 확인하였다. 이러한 결과는 2D 나노판상 구조의 얇은 두께가 전하 이동 거리를 효과적으로 단축시켜, 이산화탄소 환원 반응의 효율을 크게 향상시킬 수 있음을 시사한다.

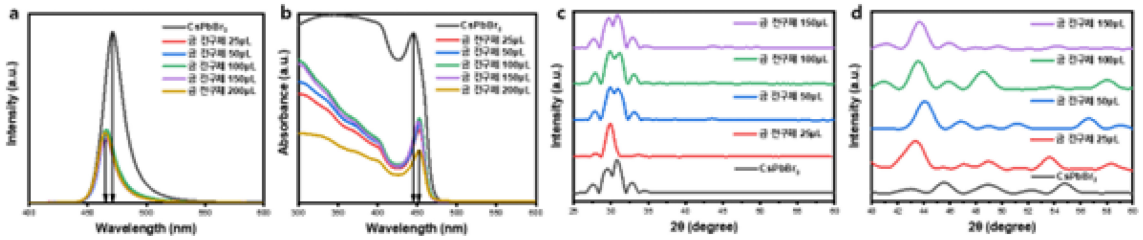


Fig. 2. 금 전구체 양에 따른 (a) 발광 스펙트럼 (b) 흡광 스펙트럼 (c), (d) X선 회절 패턴

그러나, 단일 페로브스카이트 광촉매는 높은 방사성 재결합 비율로 인해 CO_2 환원 효율이 낮다는 한계를 가진다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 금 단일원자를 조촉매로 도입하여 활성 부위 제공 및 전하 분리 효율을 향상시키는 전략을 적용하였다. 금 단일원자는 $CsPbBr_3$와의 계면에서 쇼트키 접합을 형성하여 전하 분리를 효과적으로 유도하고, 전하 재결합을 억제함으로써 촉매 성능을 개선하였다. 또한, 금속 나노입자나 나노클러스터 대신 단일원자를 증착함으로써 모든 원자가 활성 부위로 작용하여 CO_2 환원 효율을 극대화하였다. 금 단일원자는 광증착법을 이용해 AM 1.5G 태양광 조사 하에서 증착되었다. $CsPbBr_3$ 표면에 금을 증착한 결과, 표면 결함의 효과적인 수동화로 인해 전자-정공 재결합 경로가 조정되었으며, 이에 따라 발광 스펙트럼에서 청색이동이 관찰되었다. 반면, 흡광 스펙트럼에서는 표면 플라즈몬 공명에 의해 유도된 플라즈몬-엑시톤 상호작용으로 적색 이동이 나타났다. 이러한 결과는 금이 $CsPbBr_3$ 표면에 성공적으로 증착되었음을 시사하며, X선 회절 분석에서도 새로운 격자 구조 형성에 따른 피크의 생성 및 이동이 확인되었다.

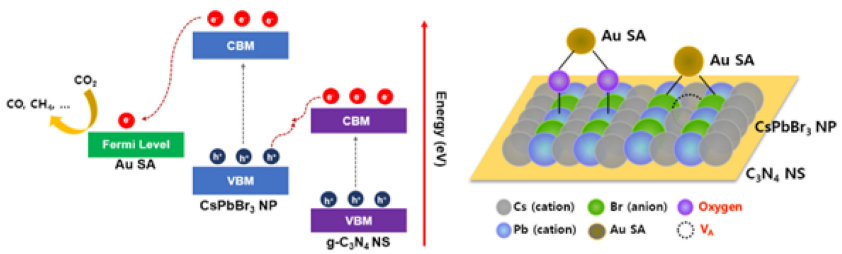


Fig. 3. CsPbBr3/C3N4 이종 접합 광촉매에 금 단일원자를 증착한 최종적인 광촉매 모식도

추가적으로, $CsPbBr_3$ 나노판상을 C_3N_4와 같은 탄소 기반 지지체에 증착하면 이종 접합 광촉매를 형성하여 전하 분리 효율을 더욱 향상할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 따라, $CsPbBr_3$ 나노판상의 형태를 유지하면서 응집 없이 C_3N_4 나노시트 위에 안정적으로 증착할 수 있는 방법을 연구 중이며, 각 물질의 두께를 조절하여 밴드갭 에너지를 최적화함으로써 이산화탄소 환원 효율을 극대화할 수 있는 Z-scheme 구조의 광촉매 합성을 시도하고 있다.

참고문헌(References) 1. J. Am. Chem. Soc. 2017, 139 (32), 11117–11124. (Band Gap Tuning via Lattice Contraction and Octahedral Tilting in Perovskite Materials for Photovoltaics.) 2. J. Environ. Chem. Eng. 2022, 10 (6), 108693. (Z-scheme heterojunction WO_3/BiOBr supported-single Fe atom for ciprofloxacin degradation via visible-light photocatalysis.) 3. J. Phys. Chem. C 2011, 115 (1), 145–151. (Facile Synthesis of Single-Crystalline $Ag_2V_4O_{11}$Nanotube Material as a Novel Visible-Light-Sensitive Photocatalyst.) 4. ACS Nano 2014, 8 (10), 10403–10413. (Stable Quantum Dot Photoelectrolysis Cell for Unassisted Visible Light Solar Water Splitting.) 5. Chemosphere 2023, 339, 139765. (Recent advances in perovskite-based Z-scheme and S-scheme heterojunctions for photocatalytic CO_2 reduction.) 6. Nat. Photonics 2014, 8, 506–514. (The emergence of perovskite solar cells.) 7. Chem. Sci. 2017, 8, 2522–2536. (Metal halide perovskite nanomaterials: synthesis and applications.) 8. Energy Environ. Sci. 2022, 15, 1271–1281. (An organometal halide perovskite supported Pt single-atom photocatalyst for H_2 evolution.)

[SS5-1 | 10:40]

고강도 Al-Zn-Mg-Cu 합금에서 피로균열개시 및 성장에 미치는 과시효처리의 영향: 이동윤 (한국재료연구원, 부산대학교), 김용유 (한국재료연구원), 황효진 (한국재료연구원, 부산대학교), 석무영 (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교), 김형욱*, 조용희* (한국재료연구원)

Keywords: Al-Zn-Mg-Cu alloy, Over-aging treatment, High-cycle fatigue, Fatigue crack initiation, Fatigue crack propagation

탄소배출 저감을 위해서 미래 친환경 수송기기의 수요가 증가함에 따라 고강도 알루미늄의 수요도 증가하고 있다. 특히 비강도가 우수한 7000계 알루미늄 합금은 항공기 구조재로서 상용화되고 있으며, 최근에는 친환경 전기차 배터리의 무거운 중량을 고려하여 가벼우면서 강하고 내식성이 뛰어난 알루미늄 소재의 활용이 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다. 본 연구에서는 고비강도 7000계 알루미늄 합금 판재를 제조하기 위해 주요 강화상인 ’(MgZn2)상을 다량 석출할 수 있는 개량된 7068 합금을 DC주조 및 열간 압연하여 제조하였다. 또한, 냉간압연 및 용체화 처리된 판재에 대하여 다양한 시효처리를 행하였다. 제조된 7068 합금의 석출거동에 의한 기계적 특성을 비교하기 위해 120ºC와 160ºC에서의 등온 시효 처리에 따른 비커스 경도(Vickers hardness)와 전기전도도 측정을 하였으며, 아시효(Under-aging), 최대강도시효(Peak aging), 그리고 과시효(Over-aging)에 대한 열처리 조건을 선정하여, 그림 1로 나타냈다. 과시효 처리에 따른 석출거동의 변화를 TEM을 통해 관찰하였고, FFT패턴에 따른 상 분석을 진행하여 그림 2로 나타냈다. 7000계 알루미늄 합금의 석출거동(GP zone metastable ’ phase stable phase)에 따라 GP zone의 분포가 줄어들고, phase의 분포가 점차 증가하는 경향을 보였다. 또한, 시효처리가 진행됨에 따라 GBP(Grain boundary precipitate)가 조대해지며, PFZ(Precipitate free zone)의 폭이 증가하는 모습을 관찰하였다. 그리고, 피로균열 개시 및 성장의 영향을 고주기 피로 시험(Fatigue test) 및 피로균열 전파 시험(Fatigue crack propagation test)을 행하여 기계적특성 변화를 관찰하였으며, SEM으로 관찰한 피로 주름(fatigue striation)과 파면 형상을 그림 3으로 나타냈으며, 피로 균열 형성 및 전파에 미치는 과시효 처리에 대한 영향을 고찰하였다.

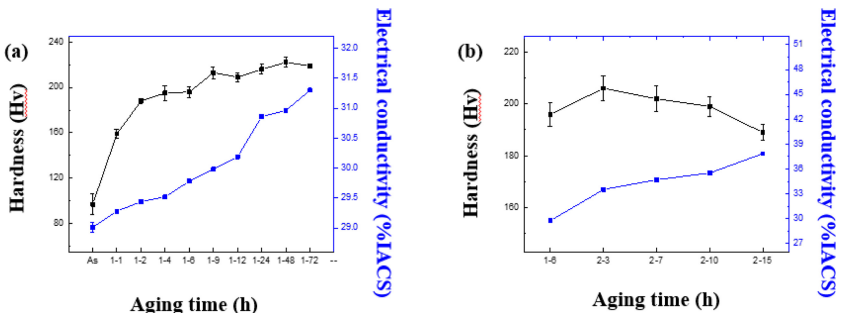


Fig. 1. (a) 120oC와 (b) 160oC에서의 시간에 따른 비커스 경도 및 전기전도도의 변화

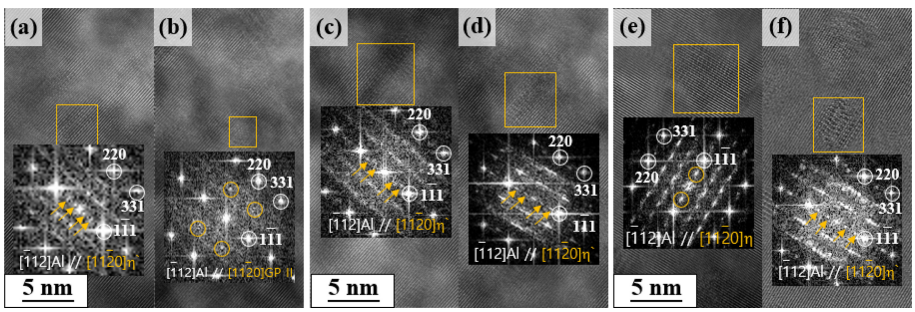


Fig. 2. [112]Al zone axis에서 촬영한 세 가지 합금의 HR-TEM 이미지

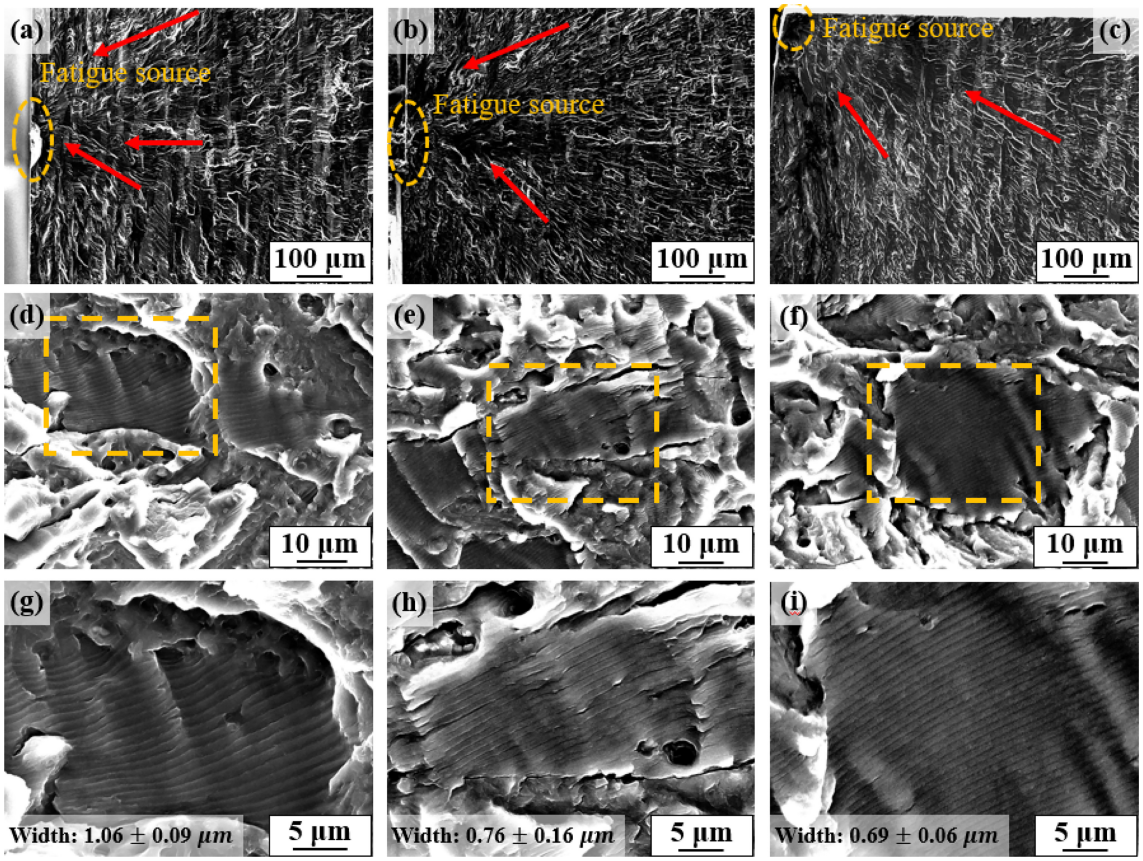


Fig. 3. SEM으로 촬영한 세 가지 합금의 피로파괴 파면 이미지: (a, d, g) 아시효, (b, e, h) 최고경도처리, (c,f,I) 과시효처리

[SS5-2 | 10:53]

L-DED 공정으로 제조된 BN 강화 AlSi10Mg 알루미늄 복합재의 미세조직 및 기계적 물성 평가: 김수민*, 최윤석, 이욱진 (1. 부산대학교)

Keywords: Aluminum matrix composites, BN, Microstructure, Tensile properties

알루미늄 매트릭스 복합재(Aluminum Matrix Composites, AMC)는 알루미늄의 우수한 기계적 성질과 경량성을 유지하면서, 강화재를 첨가함으로써 기계적 성질을 더욱 향상시킬 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다. AMC는 일반적으로 세라믹 입자(SiC, Al2O3, TiB2, AlN, BN 등) 또는 섬유(CNTs, Graphene 등)를 강화재로 사용하여 제조되며, 강화재의 종류 및 공정 조건에 따라 인장 강도, 경도, 내마모성, 열적 특성 등이 조절될 수 있다. 특히 질화붕소(BN)는 낮은 밀도와 열팽창계수, 높은 열전도도 및 녹는 점, 전기 저항성과 같은 우수한 물리적 특성을 갖추고 있어 주목받고 있다. BN이 첨가된 AMC는 다른 세라믹 강화재를 포함한 AMC에 비해 우수한 젖음성을 보인다는 연구가 다수 보고되었다. 또한, BN 강화재를 포함한 AMC에서는 강화상(AlN, AlB2등)의 형성을 유도하여 기계적 강도 향상에 기여할 수 있는 것으로 알려져 있다. [1] BN 강화 AMC는 일반적으로 SPS, PM, Stir Casting과 같은 전통적인 제조 공정을 통해 제작되어 왔으며, 이러한 방식으로 제조된 BN 강화 복합재의 강화 메커니즘 및 기계적 성질, 미세조직에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔다 [2], [3]. 그러나 DED 공정을 이용하여 BN 강화 AMC를 제작하고, 그 최종 제품의 기계적 성질 및 미세조직을 분석한 연구는 현재까지 진행되지 않았다. 본 연구에서는 BN 강화 AMC의 L-DED 공정을 통한 제조를 위해 최초로 Stir Casting과 Gas Atomization 이중 공정을 이용하여 복합재 분말을 제작하였다. 평균 직경 70 μm의 AlSi10Mg 분말과 직경 10 μm 이하의 복합재 분말을 중량 비율 93:7로 혼합한 후, Stir Casting을 수행하여 BN 입자가 알루미늄 합금 내에 균일하게 분산되도록 하였다. 이후, 가스 분무 공정을 거쳐 평균 직경 101 μm의 구형 복합재 분말을 제조하였다. L-DED 공정을 통해 제작된 시편의 크기는 알루미늄 합금 및 알루미늄 복합재 시편 모두 35 × 15 × 4 mm^3로 설정되었다. 주요 적층 공정 변수는 다음과 같이 설정되었다. (Laser power : 250 W, Scan speed : 840, 180, 1320, 1560 mm/min). 인장 시험을 위한 시편은 사전에 단면적 OM 이미지를 확인하여 최적의 적층 조건을 도출한 후 제작되었으며, 표면 산화 방지를 위해 아르곤(Ar) 가스를 공급하였다. 제조된 시편의 미세구조 분석은 주사전자현미경(FE-SEM), 에너지 분산형 X선 분광기(EDS), 투과 전자현미경(TEM)을 활용하여 수행되었으며, 기계적 특성 평가를 위해 인장 시험을 실시하였다. 분석 결과, BN 강화 알루미늄 복합재는 단일 알루미늄 합금의 평균 인장강도(244.0 MPa), 연신율(4.0 %) 대비 평균 인장 강도(285.6 MPa) 및 연신율(7.47 %)이 각각 20 %, 85 % 증가함을 확인하였다.

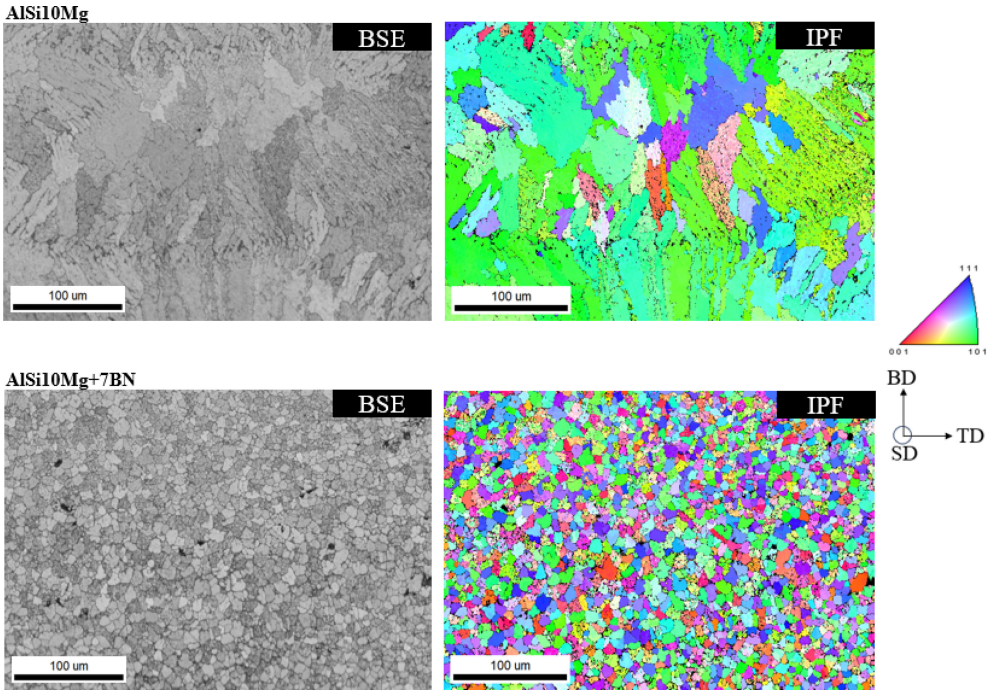


Fig. 1. AlSi10Mg 및 AlSi10Mg+7BN 시편의 SEM - BSE 이미지 및 EBSD - IPF 이미지

또한, SEM 및 EBSD 분석을 통해 응고 미세조직이 Columnar Cell에서 Equiaxed Cell로 변형되었으며, 결정립 크기가 약 6배 감소하는 것을 확인하였다 (Fig. 1). 이러한 결과를 통해, BN 세라믹 강화재의 첨가는 알루미늄 복합재의 결정립 성장을 억제하여 미세구조를 균일하게 개선함으로써 인장 강도 및 연성을 향상시키는 데 기여함을 확인하였다.

참고문헌(References) 1) K. L. Firestein, S. Corthay, A. E. Steinman, A. T. Matveev, A. M. Kovalskii, I. V. Sukhorukova, D. Golberg, and D. V. Shtansky, Materials Science & Engineering A, 681, 1 (2017). 2) D. G. Kvashnin, K. L. Firestein, Z. I. Popov, S. Corthay, P. B. Sorokin, D. V. Golberg, and D. V. Shtansky, J. Alloys Compd. 782, 875 (2019). 3) A. S. Konopatsky, D. G. Kvashnin, S. Corthay, I. Boyarintsev, K. L. Firestein, A. Orekhov, N. Arkharova, D. V. Golberg, and D. V. Shtansky, J. Alloys Compd. 859, 157765 (2021).

[SS5-3 | 11:10]

액체 금속 기반 화학 기상 증착법을 이용한 고품질 MoP 단결정 합성 및 결정면 조절: 김서현 (성신여자대학교 청정신소재공학과), 김정현 (동국대학교 화공생물공학과), 박보근, 김병현 (한양대학교 응용화학과), 최민재 (동국대학교 화공생물공학과), 한혁진* (성신여자대학교 청정신소재공학과)

Keywords: 단결정 합성, 몰리브덴 인화물, 결정면 제어, 액체 금속 보조 화학 기상 증착, Liquid Metal-Based Synthesis

몰리브덴 인화물(MoP)은 높은 열전도성과 전기 전도성을 갖추고 있을 뿐만 아니라 수소 발생 반응에서 경제적이고 효율적인 촉매로 작용하여 최근 주목받는 전이금속 인화물 중 하나이다.1,2) 이러한 특성으로 인해 MoP는 배터리, 저전력 인터커넥트, 촉매 등 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있으나, 기존의 졸-겔 합성법 연구에서는 결정 성장 과정에서 핵 형성 및 성장 속도의 불균일성으로 인해 주로 다결정 형태의 MoP가 생성된다는 한계가 있다.3) 특히 다결정 물질은 입계에서 발생하는 전자 산란의 영향으로 본질적인 물성을 정확히 분석하고 응용하는 데 어려움이 있어, 결함이 적고 입계의 영향을 최소화한 우수한 전도도를 갖춘 단결정 MoP의 합성법 개발은 여전히 해결해야 할 기술적 과제로 남아 있다. 최근 액체 금속을 매개체로 활용한 다이아몬드, 이차원 재료 및 고엔트로피 합금의 합성 연구는 단결정 성장의 새로운 가능성을 제시하고 있으며,4-6) 이러한 혁신적인 기술을 다양한 재료에 확대 적용하는 것은 차세대 응용 분야에서 단결정의 잠재력을 극대화하는 데 필수적이다. 본 연구에서는 액체 금속을 이용한 화학 기상 증착(Chemical Vapor Deposition, CVD) 공정을 통해 MoP 단결정을 합성하는 새로운 전략을 제시하고, 나노구조를 가진 단결정의 대량 생산이 가능함을 실험적으로 규명한다. 특히, 기존 합성 방법에서는 특정 결정면의 선택적 성장이 어려웠던 반면, 본 연구에서는 합성 온도를 조절함으로써 성장하는 결정면을 정밀하게 제어할 수 있음을 확인하였다.

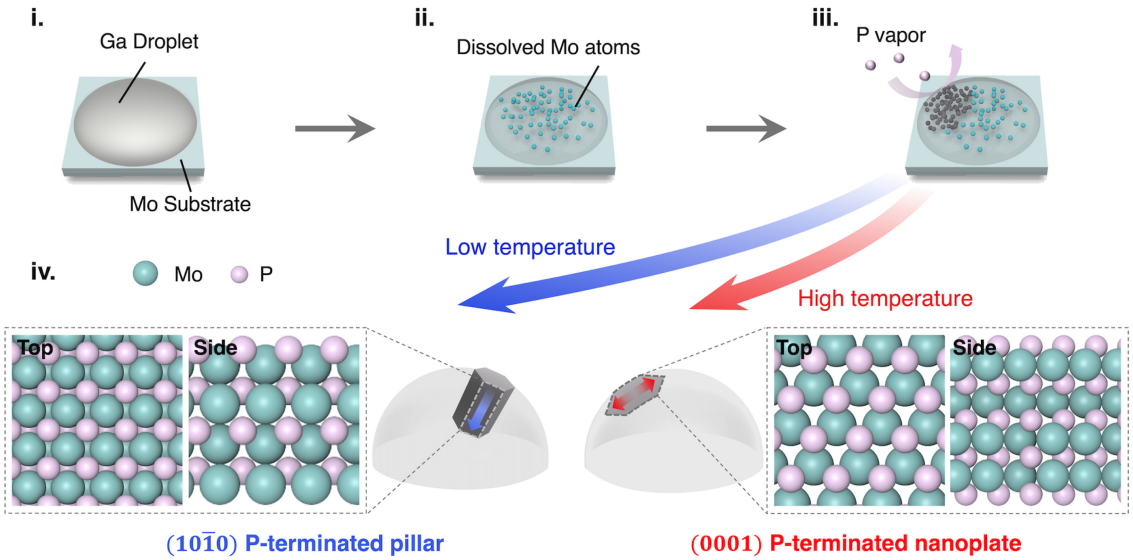


Fig. 1. MoP 단결정의 합성 순서 및 온도 효과

구체적으로, 본 연구에서 사용된 합성 방법은 다음과 같다. 먼저, 몰리브덴(Mo) 기판 위에 소량의 액체 갈륨(Ga)을 도포한 후, 이를 수평형 튜브 반응로의 중심부에 배치하였다. 합성은 아르곤(Ar)과 수소(H_{22}) 분위기에서 진행되었으며, 합성 온도는 700°C와 900°C로 조절하였다. 이 과정에서 반응로 상류에서 기화된 인(P)이 갈륨 표면을 통해 확산되어 Mo와 반응하였고, 합성 온도에 따라 우세한 결정면과 형태가 다른 MoP 단결정이 형성되었다(그림 1).

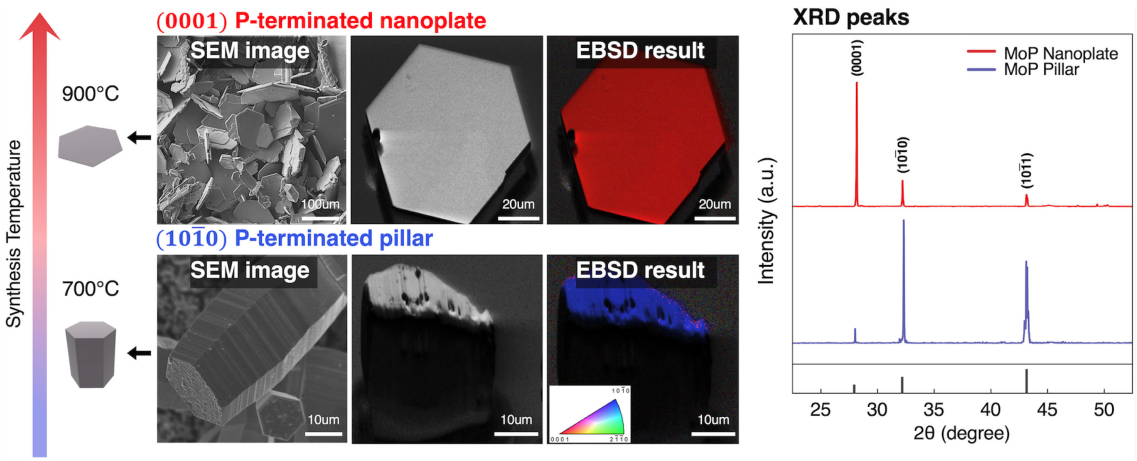


Fig. 2. MoP 단결정 결정면 분석

주사전자현미경, X-선 회절, 전자 후방산란 회절 분석을 통해 합성 온도에 따른 MoP 단결정의 주요 결정면 및 구조적 특성을 확인하였다. 그 결과, 900°C에서는 (0001) 면이 우세한 나노플레이트(Nanoplate) 구조가, 700°C에서는 (10-10) 면이 우세한 기둥(Pillar) 구조가 형성되었으며, 이는 합성 온도가 결정 성장 방향과 형태적 특성에 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다 (그림 2). 본 연구는 액체 금속을 활용한 대규모 단결정 합성 기법의 새로운 가능성을 제시함과 동시에, 고품질 MoP 단결정의 효율적인 제조 방안을 제안한다. 특히, 결정학적 면을 정밀하게 조절함으로써 다양한 물성을 구현할 수 있으며, 이는 차세대 전자소자, 고성능 촉매, 에너지 변환 소재 등 다양한 산업 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 본 합성법을 확장하여 기타 전이금속 인화물 합성에 적용하고, 전자적 및 계산 화학적 분석을 통해 응용 가능성을 더욱 심화할 예정이다.

참고문헌(References) 1) H. J. Han, S. Kumar, G. Jin, X. Ji, J. L. Hart, D. J. Hynek, Q. P. Sam, V. Hasse, C. Felser, D. G. Cahill, R. Sundararaman, J. J. Cha, Adv. Mater. 35, 2208965 (2023). 2) O. O. Dada, S. Karimzadeh, P. E. Imoisili, T.-C. Jen, International Journal of Hydrogen Energy. 48, 34634 (2023). 3) X. Wang, P. Sun, J. Qin, J. Wang, Y. Xiao, M. Cao, Nanoscale. 8, 10330 (2016). 4) G. Cao, J. Liang, Z. Guo, K. Yang, G. Wang, H. Wang, X. Wan, Z. Li, Y. Bai, Y. Zhang, Nature. 619, 73 (2023). 5) Y. Gong, D. Luo, M. Choe, Y. Kim, B. Ram, M. Zafari, W. K. Seong, P. Bakharev, M. Wang, I. K. Park, Nature. 1 (2024). 6) S. Wang, W. Li, J. Xue, J. Ge, J. He, J. Hou, Y. Xie, Y. Li, H. Zhang, Z. Sofer, Nature Communications. 15, 6388 (2024).

[SS5-4 | 11:19]

Fe-N 질화공정을 위한 Phase-field model의 개발 및 검증: 김예림 (국민대학교), 김근우 (고려대학교 첨단소재부품개발연구소), 아리짓 로이 (미시간대학교), 차필령* (국민대학교)

Keywords: Phase-field model, 질화 공정, Fe-N

질화 공정은 금속 재료의 표면층에 질소를 주입하여 경도와 내마모성을 향상시키는 표면 경화 공정이다.[1] 이 공정은 산업적으로 널리 활용되고 있음에도 불구하고, 기존 수치해석 모델들은 질화 과정에서 발생하는 복잡한 미세조직 변화를 정확하게 포착하는 데 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 우리는 질화 공정을 위한 Phase-field model을 개발했다. Phase-field model은 시간에 따른 미세구조 변화를 예측하는 데 강력한 수치해석 도구로 널리 알려져 있다. 본 연구에서는 대표적인 질화 조건인 843K하에서[2] 질화층의 형성과 성장 메커니즘을 분석하는 데 중점을 두었다. 본 모델은 질소 확산과 함께 ε, γ', α와 같은 다양한 상의 다결정 미세조직 형성을 시뮬레이션한다. 모델의 정확성은 시뮬레이션 결과를 실험 데이터와 비교함으로써 검증되었으며, 이를 통해 처리 조건이 질화층 두께에 미치는 영향을 상세히 분석할 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 질화 공정을 위한 Phase-field model을 활용해 다양한 질화 공정 조건에서 질화층 형성과 미세조직 예측과 공정변수 최적화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 질화 공정은 금속 재료의 표면에 질소를 주입하여 표면 경도와 내마모성을 향상시키는 대표적인 표면 경화 처리 공정으로, 주로 강철 및 기타 합금에 적용된다.[1] 이 공정은 금속 표면에 질소를 확산시켜 미세조직 변화를 유도함으로써 기계 부품의 성능을 최적화하는 데 중요한 역할을 한다. 질화 공정은 자동차, 항공우주, 공구 제조 등 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용된다. 이 공정은 제품의 신뢰성을 보장하고 수명을 연장하며, 자원의 효율적 사용을 가능하게 한다. 또한, 고성능 부품의 개발을 통해 첨단 기술 산업의 발전을 지원하며, 경제 전반에 긍정적인 영향을 미친다. 질화 공정은 주로 질소를 금속 표면에 확산시켜 질화 층(nitrided layer)을 형성하는 공정이다. 이 공정은 일반적으로 500~600°C의 온도에서 암모니아(NH_3)와 같은 질화제를 사용하여 수행되며, 질소가 금속 표면에 침투하여 다양한 상 변태를 유도한다.[2] 페라이트계 철강 질화 공정의 초기 단계에서는 표면에 ε 상이 형성되며, 시간이 지남에 따라 γ′ 상이 생성된다. 공정 조건과 질화 포텐셜에 따라 질화 층의 두께, 미세구조가 달라지며, 결과적으로 높은 경도와 내마모성이 부여된다. 질소가 금속 표면으로 침투하면서 ε 상과 γ′ 상이 형성된다. ε 상은 초기 질소 확산 단계에서 형성되어 경도와 내마모성을 제공하며, γ′ 상은 중간 층에서 경화 효과를 제공하고, α 상은 최종적으로 잔류 스트레스와 인성을 조절한다. 기존의 질화 공정 수치해석 모델은 질화 공정의 모든 물리적 법칙을 완벽하게 반영하지 못하고 있으며, 특히 공정 최적화와 미세조직 예측 측면에서 추가적인 연구가 필요하다. 기존의 실험적 방법은 질화 공정의 복잡한 메커니즘을 완전히 규명하는 데 한계가 있으며, 다양한 공정 변수(온도, 질소 농도, 질화공정 시간 등)가 미치는 영향을 체계적으로 분석하는 데 시간과 비용이 많이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수치 시뮬레이션 기법 중 하나인 Phase-field model이 주목받고 있다. Phase-field model은 상변태를 동반한 미세조직의 형성 과정을 정확히 예측할 수 있는 강력한 수치해석 도구로, 질화 공정 과정에서의 질소 확산, 상 변태 등을 정량적으로 분석할 수 있다. 특히, Phase-field model은 복잡한 경계 조건과 다상, 다결정 시스템을 효과적으로 다룰 수 있어 질화 공정 공정의 세부 메커니즘을 보다 정밀하게 모사할 수 있다. 현재 미세구조를 예측하는 계산 방법에는 여러 가지가 있으며, 그중 하나로 셀룰러 오토마타(Cellular Automata)가 있다. 셀룰러 오토마타는 격자 형태로 배열된 셀들이 단순한 규칙에 따라 상호작용하며 상태를 변화시키는 방식으로, 미세구조의 형성과 변화를 예측하는 데 사용된다. 이 방법은 계산이 단순하고 빠르다는 장점이 있지만, 이산적 상태 변화를 다루기 때문에 연속적인 계면 거동이나 복잡한 상 변태를 정밀하게 모사하는 데 한계가 있다. 이에 비해, Phase-field model은 연속적인 계면 함수를 도입하여 보다 정밀하게 미세구조 변화를 모사할 수 있다. 현재 Phase-field model은 전기화학, 응고, 결정립 성장 등 다양한 분야에서 활발하게 사용되고 있다. 하지만 아직 질화 공정에 대한 Phase-field model은 충분히 개발되지 않아 미세구조를 예측하는 데 어려움이 있다. 본 연구의 목적은 이러한 한계를 극복하고 질화 공정 공정을 정밀하게 모사할 수 있는 새로운 Phase-field model을 구현하는 것이다. 구현된 모델은 그림1과 같이 실험 결과와의 비교를 통해 검증되었으며, 온도와 농도와 같은 매개변수를 변수로 설정하여 공정 조건에 따른 미세구조 변화를 분석하였다. 이를 통해 질화 공정 공정에서 미세구조 변화에 대한 이해를 높이고, 다양한 공정 조건에 대한 적용 가능성을 탐색하고자 하였다.

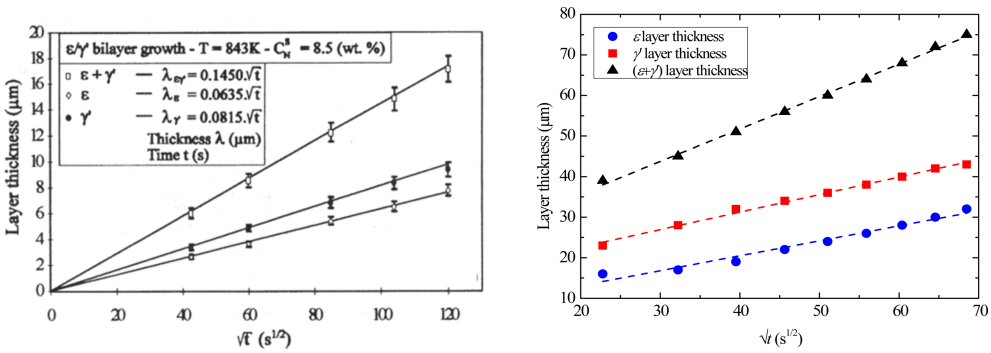


Fig. 1. Fe-N system에서 질화 시간에 따른 주요 질화층 두께 변화 거동. (a) 실험결과[3] 및 (b) 본 연구에서의 phase-field 시뮬레이션 결과.

참고문헌(References) 1) M. Somers and E. Mittemeijer Metall. Mater. Trans. A (1995) 74. 2) H. Du, M. Somers, and J. A°gren, Metall. Mater. Trans. A 31A (2000) 195. 3) L. Torchane, P. Bilger, J. Dulcy, and M. Gantois, Metall. Mater. Trans. A 27A (1996) 1823.

[SS5-5 | 11:32]

Ni기 초내열합금 설계를 위한 Re-Nb, Re-Mo 이원계 시스템의 열역학 모델링: 서정민, 정인호* (서울대학교)

Keywords: Ni-based superalloy, Rhenium, Re-Nb, Re-Mo, Thermodynamic modeling

1. 서론

Ni기 초내열합금 (Nickel-based superalloy)은 항공우주 산업에서 고온 환경을 견딜 수 있는 핵심 재료로 사용된다. 가스터빈 엔진의 부품들은 극한의 온도에서, 강한 응력을, 오랫동안 받기 때문에 고온에서 크리프 특성(creep property)이 중요하다. 초내열합금의 성능을 향상하기 위해 다양한 원소가 첨가되어 왔으며, 3세대 초합금부터는 레늄(Re)이 핵심적인 역할을 하는 원소로 첨가되기 시작하였다. Ni기 초내열합금에 Re을 첨가하면 원자의 확산 속도가 느려져 γ' 상의 조대화(coarsening)가 지연되고 이런 효과로 인해 합금의 고온에서 크리프 특성이 향상되게 된다[1]. 하지만 Re을 과도하게 첨가할 경우 TCP 상이 형성되어 합금의 기계적 성질이 저하될 우려가 있으며, Re은 가격이 비싸고 공급이 불안정한 금속이기 때문에 Ni기 초내열합금의 최적 Re 조성을 찾기 위한 연구가 지속되고 있다[2]. 본 연구팀은 현재 Ni기 초내열합금 개발을 위한 열역학 데이터베이스를 구축 중이다. 본 연구에서는 Ni기 초내열합금에 첨가되는 Al, Ta, W, Mo, Nb 등 여러 합금원소 중 Re-Mo, Re-Nb 이원계 열역학 시스템 모델링을 수행하여 Ni기 초내열합금 데이터베이스를 확장 구축하고자 한다. 현재 FactSage 데이터베이스에 있는 Re 이원계 시스템 데이터의 신뢰도가 낮으며, 기존의 Re-Mo 및 Re-Nb 시스템 열역학 모델링 연구에서는 상태도를 잘 구현하였지만, 열역학 Gibbs energy를 정확히 구현하지 못하였다. 이로 인해 기존 모델링 결과를 삼원계 혹은 그 이상으로 확장하는 데에 있어 문제가 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 열역학 모델링의 문제점을 해결하면서 Re-Mo와 Re-Nb 시스템의 정확한 열역학 모델링을 다시 시행하는 것을 목적으로 하였다.

2. 열역학 모델

1) Pure Elements

본 연구에서는 Re, Mo, Nb의 Gibbs energy를 FactSage 8.3 소프트웨어의 SGTE (2022) 데이터베이스에서 차용하였다[3]. Re은 solid state에서 HCP 구조를, Mo와 Nb는 BCC 구조를 안정상으로 가진다.

2) Solution Phases

Re-Mo, Re-Nb 이원계 시스템에는 Liquid, HCP, BCC 상과 더불어 (Chi)와 (Sigma)라는 두 개의 추가적인 solid solution이 존재한다. 그중 Liquid solution은 Modified Quasi-chemical Model (MQM)을 사용하여 기술하였다[4].

$$(\mathrm{Re}-\mathrm{Re})+(\mathrm{i}-\mathrm{i})=2(\mathrm{Re}-\mathrm{i});\ \Delta g_{\mathrm{Re,i}} \tag{1}$$

$$G_{\mathrm{T}}^{\mathrm{liq}}=n_{\mathrm{Re}}{}^{\mathrm{o}}G_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{liq}}+n_{\mathrm{i}}{}^{\mathrm{o}}G_{\mathrm{i}}^{\mathrm{liq}}-T\Delta S^{\mathrm{config}}+\frac{1}{2}n_{\mathrm{Re,i}}\Delta g_{\mathrm{Re,i}} \tag{2}$$

$$\Delta g_{\mathrm{Re,i}}=\Delta{}^{\mathrm{o}}g_{\mathrm{Re,i}}+\sum_{\mathrm{j,k}\geq 1} g_{\mathrm{Re,i}}^{\mathrm{jk}}X_{\mathrm{Re,Re}}^{\mathrm{j}}X_{\mathrm{ii}}^{\mathrm{k}} \tag{3}$$

$\Delta S^{\mathrm{config}}$는 (Re-Re), (i-i), (Re-i) 쌍의 random distribution으로 주어진 configurational entropy of mixing을 의미하고, $n_{\mathrm{Re,i}}$은 (Re-i) 쌍의 mole 수를 의미한다. $\Delta g_{\mathrm{Re,i}}$는 pair fraction($X_{\mathrm{Re,Re}}, X_{\mathrm{i,i}}$)에 대한 polynomial로 나타내며, ${}^{\mathrm{o}}\Delta g_{\mathrm{Re,i}}$와 $g_{\mathrm{Re,i}}^{\mathrm{jk}}$가 모델링을 통해 결정되는 파라미터이다. Solid solution은 모두 Compound Energy Formalism (CEF)를 이용하여 Gibbs energy를 기술하였다[5]. Solid solution 중, BCC와 HCP solution의 경우에는 Re와 Mo(Nb)가 solid lattice에서 서로 치환되며 solution을 만들므로, 그 구조를 간단히 $(\mathrm{Re,i})$로 표현할 수 있다. 이러한 solid solution의 Gibbs energy는 CEF를 통해 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$G_{\mathrm{T}}^{\varphi}=\chi_{\mathrm{Re}}{}^{\mathrm{o}}G_{\mathrm{Re}}^{\varphi}+\chi_{\mathrm{i}}{}^{\mathrm{o}}G_{\mathrm{i}}^{\varphi}+RT(\chi_{\mathrm{Re}}\ln\chi_{\mathrm{Re}}+\chi_{\mathrm{i}}\ln\chi_{\mathrm{i}})+{}^{\mathrm{ex}}G^{\varphi} \tag{4}$$

$${}^{\mathrm{ex}}G^{\varphi}=\sum_{\mathrm{v}=0}^{\mathrm{n}}{}^{\mathrm{v}}L_{\mathrm{Re,i}}\chi_{\mathrm{Re}}\chi_{\mathrm{i}}(\chi_{\mathrm{Re}}-\chi_{\mathrm{i}})^{\mathrm{v}} \tag{5}$$

φ는 상의 종류(BCC, HCP)를 의미하고 χ_{i}는 i (=Nb,Mo)의 mole fraction을 의미한다. 또한 ${}^{\mathrm{v}}L_{Re,i}$는 모델링을 통해서 결정되는 파라미터이다. χ와 σ라는 두 개의 상은 각각 $(\mathrm{Re,i})_{10}(\mathrm{Re,i})_{24}\mathrm{Re}_{24}$와 $\mathrm{Re}_8\mathrm{i}_4(\mathrm{Re,i})_{18}$ (i = Nb, Mo) 형태의 결정구조를 가지는 것으로 표현되었으며[17], 이를 CEF를 활용해서 모델링하였다[5]. 가령 χ 상의 Gibbs energy는

$$\begin{aligned}G_{\mathrm{T}}^{\chi}=&\,y_{\mathrm{Re}}'y_{\mathrm{Re}}''G_{\mathrm{Re:Re:Re}}^{\chi}+y_{\mathrm{i}}'y_{\mathrm{Re}}''G_{\mathrm{i:Re:Re}}^{\chi}+y_{\mathrm{Re}}'y_{\mathrm{i}}''G_{\mathrm{Re:i:Re}}^{\chi}+y_{\mathrm{i}}'y_{\mathrm{i}}''G_{\mathrm{i:i:Re}}^{\chi}\\&+RT[10(y_{\mathrm{Re}}'\ln y_{\mathrm{Re}}'+y_{\mathrm{i}}'\ln y_{\mathrm{i}}')+24(y_{\mathrm{Re}}''\ln y_{\mathrm{Re}}''+y_{\mathrm{i}}''\ln y_{\mathrm{i}}'')]\\&+y_{\mathrm{Re}}'y_{\mathrm{i}}'L_{\mathrm{Re,i:*:Re}}+y_{\mathrm{Re}}''y_{\mathrm{i}}''L_{\mathrm{*:Re,i:Re}}\end{aligned} \tag{6}$$

로 표현된다. 본 solution의 Gibbs energy는 가상의 end-member$((\mathrm{i})_{10}(\mathrm{j})_{24}\mathrm{Re})$의 Gibbs energy인 $G_{\mathrm{i:j:Re}}^{\chi}$, lattice 내에서 원소들의 interaction 파라미터인 $L_{\mathrm{Re,M_0:*:Re}}$와 $L_{\mathrm{*:Re,M_0:Re}}$가 주요한 모델링 파라미터이다. 이러한 solution 모델의 파라미터들은 실험적으로 알려진 상태도 및 열역학 데이터에 기반하여 최적화된다.

3. 모델링 결과 및 고찰

1) Re-Nb System

Re-Nb 이원계 시스템의 상태도 실험 데이터는 Gissen et al.[6], Knapton[7], Savitskii et al.[8], Levesque et al.[9]이 vacuum furnace에서 annealing한 이후 water quenching한 샘플을 XRD 분석하는 방식으로 실험을 수행하였고, 고온에서 발생할 수 있는 실험의 error를 고려한다면 대부분의 상태도 실험 데이터는 모두 일치하고 있다. Re-Nb 이원계 시스템의 phase diagram을 모델링한 결과를 실험 데이터와 비교해서 Fig. 1에 도시하였다. 고상 상 경계 데이터와 액상 선 등의 실험 데이터 대부분이 실험 오차 범위인 ± 1.0 at.%, ±25 K 내에서 잘 모사되고 있다.

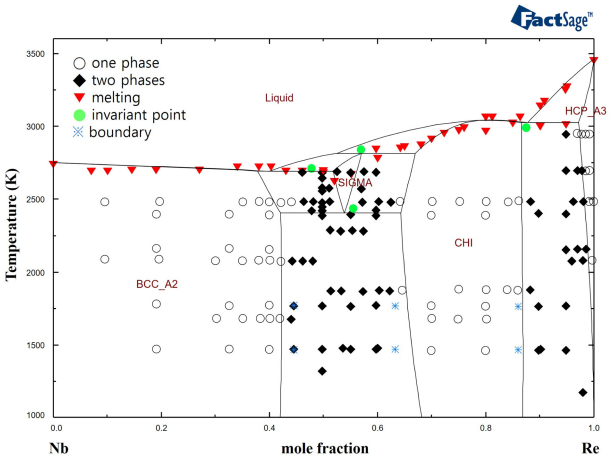


Fig. 1. 본 연구에서 계산된 Re-Nb 상태도와 기존 상태도 실험 결과[6,7].

기존에 Liu et al.[10]이 수행한 열역학 모델링에서도 본 연구의 결과와 비슷한 수준의 상태도를 모사하였다. 하지만 선행 연구에서는 χ 상의 열역학 값을 제대로 구현하지 못하였다. 직접적으로 χ 상의 Gibbs energy를 측정한 데이터는 없지만, Re-Nb-C 시스템의 상태도 연구 결과에 따르면, '12 at.% Nb - 74 at.% Re - 14 at.% C'의 혼합물을 2070 K에서 평형 실험을 하였을시 'χ + C'가 아닌 'NbC + Re'의 혼합물로 바뀌는 것을 확인하였다[11]. NbC의 열역학 값은 잘 알려져 있으므로 이러한 상태도 데이터를 응용하면 대략적인 χ 상의 열역학 Gibbs energy를 유추할 수 있다. 이러한 방법을 이용해서 Brewer and Wengert[12]는 χ 상의 Formation Gibbs energy가 대략 –13.3 kJ/mol 이상이어야 한다고 제시하였다. Fig.2에 본 열역학 모델링의 결과로 계산된 χ 상의 Formation Gibbs energy와 선행 연구에서 나온 결과를 비교하여 도시하였다. 그림에서 확인되듯이 본 연구의 결과는 Brewer and Wengert[12]의 결과를 잘 모사하지만, 선행 연구의 결과는 도출된 Gibbs energy보다 훨씬 negative 함을 알 수 있다. 선행 연구에서는 Re-Nb 상태도를 잘 모사했지만, 전체적으로 열역학 Gibbs energy가 훨씬 negative하게 설정되어 Re-Nb-C 삼원계에서 위에 언급한 'NbC + Re'의 상평형을 계산하지 못하게 된다. 즉, Re-Nb를 포함하는 삼원계 및 다원계에서 χ 상의 안정도를 과대평가 (overestimate)하는 문제가 있다. 이에 비해, 본 연구에서는 Re-Nb 시스템 각 상의 열역학적 안정성을 더 정확하게 구현하고 있다.

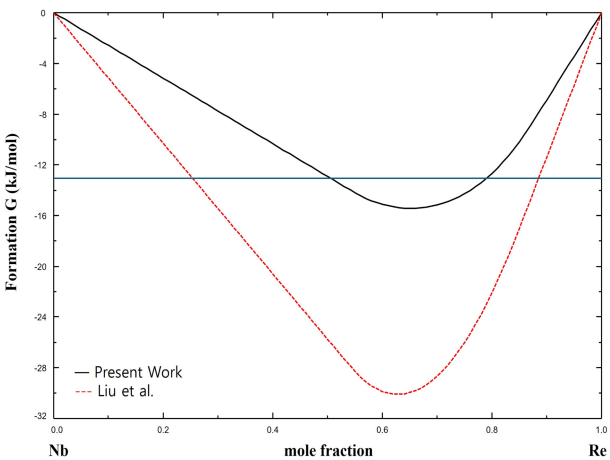


Fig. 2. 본 연구와 선행 연구의 열역학 모델로부터 계산된 χ 상의 Formation Gibbs energy ($xRe_{(HCP)}+yNb_{(BCC)} \rightarrow Re_XNb_{y(\chi)}$ at 2070 K) 및 상태도 실험에서 도출된 값의 비교[10,12].

2) Re-Mo System

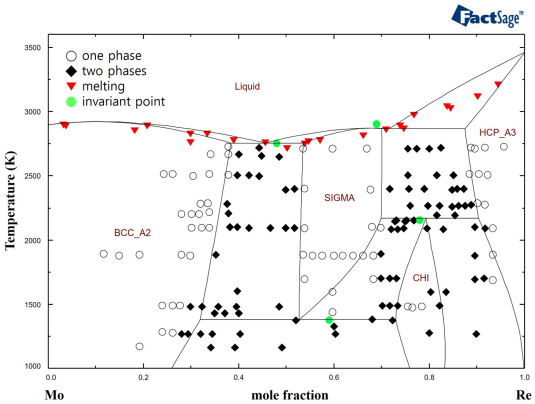


Fig. 3. 본 연구에서 계산된 Re-Nb 상태도와 기존 상태도 실험 결과 [13].

Re-Mo 이원계 시스템의 상태도 실험 데이터는 Knapton[13], Savitskii et al.[14], Dickinson and Richardson[15], Farzadfar et al.[16]이 vacuum furnace에서 annealing한 이후 water quenching한 샘플을 XRD 분석하는 방식으로 실험을 수행하였고, 고온에서 발생할 수 있는 실험의 error를 고려한다면 대부분의 상태도 실험 데이터는 모두 일치하고 있다. Re-Mo 이원계 시스템의 phase diagram을 모델링한 결과를 실험 데이터와 비교해서 Fig.3에 도시하였다. 고상 상 경계 데이터와 액상 선 등의 실험 데이터 대부분이 실험 오차 범위인 ± 1.0 at.%, ±25 K 내에서 잘 모사되고 있다. 기존에 Farzadfar et al.[16]과 Mao et al.[17]이 수행한 열역학 모델링에서도 본 연구의 결과와 비슷한 수준의 상태도를 모사하였다. 하지만 선행 연구에서는 시스템의 Enthalpy 값을 제대로 구현하지 못하였다. Conway et al.[18]은 실험을 통해 Re와 Mo의 Enthalpy를 측정하였고 이를 통해 두 원소가 같은 질량비로 혼합 되어있는 금속의 Enthalpy를 계산하였다. Fig.4에 Conway et al.[18]에서 제시한 Enthalpy 데이터와 본 연구의 모델링 결과로 계산된 Enthalpy, 그리고 선행 연구에서 나온 결과를 비교하여 도시하였다. 그림에서 확인되듯이 본 연구의 결과는 잘 모사하지만, 두 선행 연구의 결과는 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 기존의 연구들이 Re-Mo 상태도를 알맞게 모사하였지만 각각의 모델링과 실제 시스템 사이에는 차이가 존재한다. 이에 비해, 본 연구에서 모델링한 Re-Mo 시스템의 Enthalpy 더 정확하게 구현하고 있다.

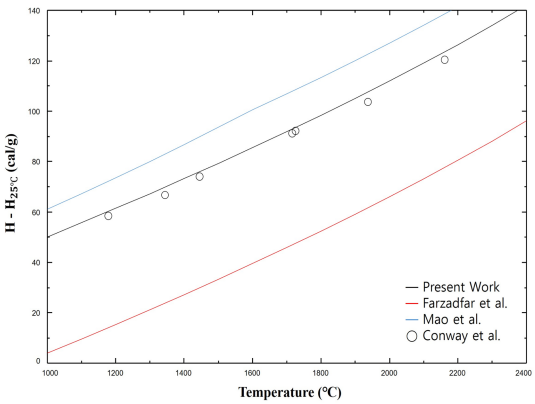


Fig. 4. 본 연구와 선행 연구의 열역학 모델로부터 계산된 Mo-50 wt.% Re의 Enthalpy 및 열역학 실험에서 도출된 값의 비교[16-18].

4. 결론

본 연구에서는 Re-Nb와 Re-Mo 이원계 시스템에 대해 열역학 모델링 수행하였다. 기존에 보고된 열역학 모델링 연구의 문제점을 보완하여 보다 향상된 모델링 결과를 얻었다. 본 연구팀에서는 Re-X (X=Al, Co, Cr, Fe, Ta, Ti, W, Mo, Ni, Nb) 이원계 시스템에 대한 모델을 완성하여 Ni-Re-X 혹은 Re-X-Y의 삼원계 시스템의 모델링을 진행하고 있다. 이를 통해서 향후 Re을 포함한 Ni기 초합금의 열역학 데이터베이스를 개발하는 것을 목표로 한 연구가 진행될 예정이다.

참고문헌(References) 1) A. Giamei and D. Anton, Metall. Mater. Trans. 16A (1985). 2) M. Huang and J. Zhu, Rare Met. 35(2) (2016) 127–139. 3) C.W. Bale, E. B´elisle, P. Chartrand, S.A. Decterov, G. Eriksson, A.E. Gheribi, K. Hack, I.-H. Jung, Y.-B. Kang, J. Melançon, A.D. Pelton, S. Petersen, C. Robelin, J. Sangster, P. Spencer, M.-A. Van Ende, CALPHAD 54 (2016) 35–53. 4) A.D. Pelton, S.A. Degterov, G. Eriksson, C. Robelin, and Y. Dessureault, Metall. Mater. Trans. 31B (2000) 651–59. 5) M. Hillert, J. Alloys Compounds 320 (2001) 161–76. 6) B.C. Giessen, R. Nordheim, N.J. Grant, Trans. Met. Soc. AIME 221 (1961) 1009–1013.

7) A.G. Knapton, J. Less Common Met. 1 (1959) 480–486. 8) E.M. Savitskii, M.A. Tylkina, K.B. Povarova, Sov. J. At. Energy 7 (1961) 937–940. 9) P. Levesque, W.R. Bekebrede and H.A. Brown, Trans. Am. Soc. Metall. 53 (1961) 215-226. 10) X.L. Liu, C.Z. Hargather, Z.-K. Liu, CALPHAD 41 (2013) 119-127. 11) L.V. Gorshkova, T.F. Fedorov, and Y.B. Kuz'ma, Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics 6(4) (1967) 287-290. 12) L. Brewer and P.R. Wengert, Metall. Trans. 4 (1973) 83–104. 13) A.G. Knapton, J. Inst. Metals 87 (1958–1959) 62–64. 14) E.M. Savitskii, M.A. Tylkina, K.B. Povarova, Russ. J. Inorg. Chem. 4 (1959) 190–195. 15) J.M. Dickinson, L.S. Richardson, Trans. ASM 51 (1959) 1055–1066. 16) S.A. Farzadfar, M. Levesque, M. Phejar, J.-M. Joubert, CALPHAD 33(3) (2009) 502-510. 17) P. Mao, K. Han and Y. Xin, J. Alloys Compounds 464 (2008) 190–196. 18) J.B. Conway, R.A. Hein, R.M. Fincel, Jr., and A.C. Losekamp, General Electric Co. GE-TM64-2-8 (1965).

[SS5-6 | 11:45]

금속-폴리머 이종소재 접합을 위한 레이저 표면 텍스처링 공정 최적화 및 접합 메커니즘 분석: 김유신, 박창규* (서울과학기술대학교)

Keywords: 금속-폴리머 접합, Laser surface texturing, Galvannealed steel, Polyamide 6

최근 전세계적으로 온실가스 배출 규제가 강화됨에 따라 자동차 산업에서는 연비 향상을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 연비 개선을 위한 대표적인 방법 중 하나는 소재 경량화이다. 폴리머나 알루미늄 합금 등의 경량 소재를 기존의 자동차용 고강도 강과 결합하는 이종소재 접합 기술은 높은 경량 효과를 달성할 수 있다.1 그러나, 금속과 폴리머 간 큰 물성 차이 (녹는점, 열변형계수 등) 로 인해 접합이 매우 어려운 문제가 존재한다. 이를 해결하기 위해 레이저 표면 텍스처링(Laser Surface Texturing, LST) 기술이 주목받고 있다. LST는 금속 등의 표면에 고출력 레이저 빔을 조사하여 미세 패턴을 형성하는 기술로, 빠르고 정확도가 높은 등 다양한 장점을 지니고 있다.2 본 연구에서는 나노초 파이버 레이저와 플라스틱 사출 성형 기술을 이용하여 자동차 산업에서 대표적으로 사용되는 소재인 합금화용융아연도금 초고강도강(Galvannealed Advanced High-Strength Steel, 이하 AHSS)과 폴리아미드 6(Polyamide 6, PA 6)을 접합하였다. AHSS의 표면에 인장 방향에 수직인 방향으로 LST를 실시한 후, 레이저 표면 처리된 부위에 PA 6를 사출하여 Figure 3과 같이 인장-전단 시험편을 제작하였다. 이 때의 공정 조건 및 변수는 Table 1에 제시하였다. 제작된 시험편의 인장-전단 강도는 만능재료시험기를 이용해 측정하였으며, 이종접합의 메커니즘 규명을 위해 광학 현미경, 나노 인덴테이션, 그리고 Electron Backscatter Diffraction(EBSD) 등의 분석 기법을 활용하였다.

Table 1. 레이저 표면 텍스처링 조건과 사출 성형 조건 .

Power (W)	Pulse width (ns)	Frequency (kHz)	Beam size (μm)	Laser fluence (J/cm2)	Scan speed (m/s)	Groove depth (μm)	Scan hatch (μm)
300	20	1500	38	17.64	5	50, 100, 160, 220	200

Injection temperature (°C)	Injection pressure (MPa)	Injection speed (mm/s)	Holding pressure (MPa)	Mold temperature (°C)
270	175	35	120	150

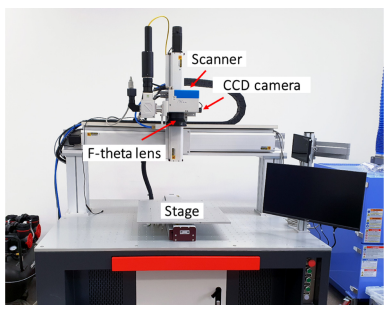


Fig. 1. 나노초 파이버 레이저 및 레이저 구성.

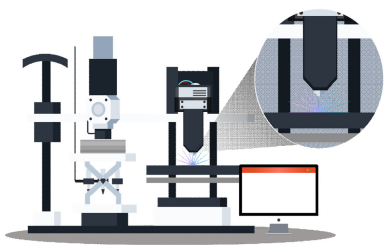


Fig. 2. LST 실험 설정 과정 모식도.

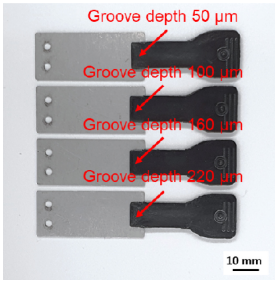


Fig. 3. 금속-폴리머 접합 시험편.

Figure 4에서 인장-전단 강도 측정 결과, LST로 형성된 그루브 깊이가 깊을수록 접합 강도가 증가하였으며, 최대 접합 강도는 그루브 깊이 220 μm에서 72.3 MPa로 나타났다. 기존 자동차 산업의 구조용 접착제의 접합 강도가 25 MPa 수준인 것을 고려할 때, 본 연구에서는 기존 대비 뛰어난 접합력을 확보할 수 있었다. Figure 5에서는 LST으로 인해 형성한 그루브와, AHSS 표면의 용융 및 재응고로 생성된 recast를 확인할 수 있다. 그루브 내부 및 recast와 recast 사이 PA 6 충진을 통해 기계적 체결력이 발생하여 접합 강도가 향상된다. 그러나, 그루브 깊이가 깊어질수록 그루브의 형상 품질이 저하되어 불완전한 충진이 일어나기 때문에, 일정 깊이 이상에서는 접합 강도가 더 이상 증가하지 않는다.

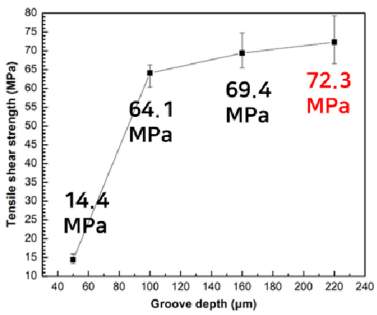


Fig. 4. 그루브 깊이 변화에 따른 인장-전단 강도 결과.

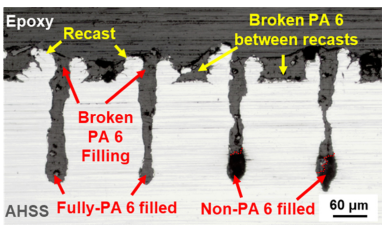


Fig. 5. 인장-전단 시험 후 그루브 깊이 220 μm AHSS-PA 6 파괴 단면 Optical Microscopy 이미지.

나노 인덴테이션 및 EBSD 분석을 통해 recast가 접합력에 기여하는 영향을 최초로 확인하였다. Figure 6에서는 recast의 경도가 모재보다 높다는 것을, Figure 7에서는 recast의 결정립 크기가 bulk보다 작은 것을 EBSD 분석을 통해 확인하였다. 이를 바탕으로, 홀-페치 공식에 따라 recast의 강도가 bulk보다 높아진 것을 알 수 있다. 이러한 recast는 그루브와 함께 AHSS와 PA 6 간 기계적 체결력 향상에 기여하여 뛰어난 접합 강도를 확보할 수 있었으며, 본 기술을 활용할 경우 자동차 경량화에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

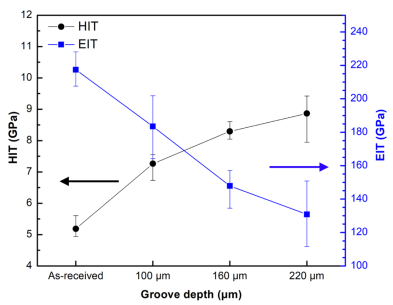


Fig. 6. 그루브 깊이 별 recast 나노 인덴테이션 분석 결과.

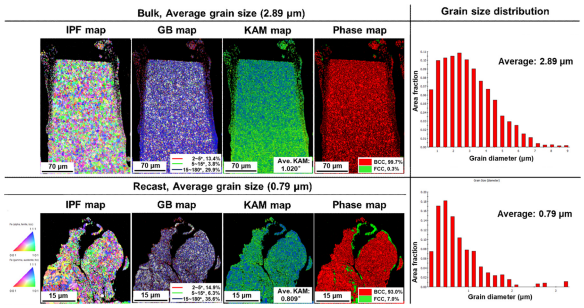


Fig. 7. 레이저 텍스처링 후 벌크 및 recast의 EBSD 결과.

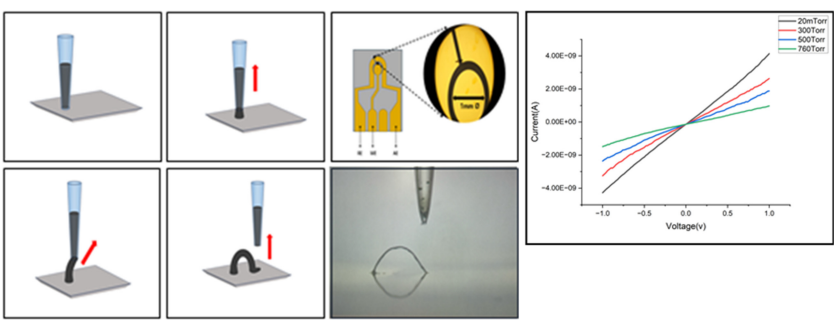
참고문헌(References) 1) S.T. Amancio-Filho, J.F. dos Santos, Joining of Polymers and Polymer–Metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends, Polym. Eng. Sci. 49 (2009). 2) M. Vishnoi, P. Kumar, Q. Murtaza, Surface Texturing Techniques to Enhance Tribological Performance: A review, Surf. Interfaces 27 (2021)

[SS6-1 | 14:00] Canceled

3차원 나노 프린팅 기반 CNT 전극 제작 및 센서 응용: 이예원, 김동욱, 김재민, 이슬이, 김태희, 박재훈* (한림대학교 나노융합스쿨)

Keywords: Carbon Nanotube(CNT), 3D Printing, Electrode, Sensor

현재 반도체 산업은 현대 산업의 중심부로 자리매김하고 있으며, 그 중요성은 다양한 분야의 발전과 더불어 급속히 증가하고 있다. 하지만 이러한 발전이 진행되고 있음에도 불구하고 기존의 반도체 전극 제조 공정은 기판 위에 리소그래피 공정을 통해 반도체 전극의 미세 패턴을 형성하고 패턴이 형성된 기판 위에 금속을 증착, 마스킹 및 절연층 형성 등의 다양한 공정을 거침으로 인해 공정 비용이 비싸고 복잡하다는 문제점이 있다. 이와 비교적으로 자기정렬이 가능한 3차원 프린팅 기술은 높은 자유도를 가짐과 동시에 정밀하여 복잡한 기하학적 형태[2, 15] 와 다중 조합 요소로 구성된 나노 구조물을 출력할 수 있으며 공정의 단순화 및 비용을 절감시킨다는 이점이 있다. 3차원 프린팅 기술을 활용하여 제작한 전극 센서는 기존의 평면적인 2차원 전극과는 달리 높이, 너비, 길이를 모두 가진 공간적인 구조를 갖는다. 이를 응용하여 제작된 나노 복합 전극은 전기 전도성을 띄는 나노 물질과 결합하여 구성되므로 기존의 전극보다 더 높은 전기 전도도와 유연성 그리고 특수한 물리적, 화학적 특성을 제공한다. 마찬가지로 탄소나노튜브(CNT)는 현대 재료 과학의 주요 주제 중 하나이다. CNT는 우수한 열 및 전기적 특성, 기계적 강도, 화학적 안정성과 저비용으로 생산할 수 있는 잠재력을 지니고 있다[1, 3, 8, 10, 11]. CNT를 이용한 가스센서는 화학 물질의 감지와 감도가 뛰어나며[9], 탄소나노 튜브 기반 센서는 실온에서 가스 분자의 ppm 또는 sub-ppm 수준을 감지할 수 있어 실온에서 작동하는 센서 장치를 개발할 가능성을 열어준다[6, 7, 8, 11, 12, 14]. 또한 잉크 형태로 제형화하여 소자 구조에서 전도층 등으로 인쇄할 수 있기에 매력적인 나노 소재이다. 선행연구를 통해 CNT의 전기 전도도가 CO2, O2, NO2, NH3 가스에 노출되면 극적으로 변할 수 있음이 입증되었다[1, 4, 6, 7, 8, 9, 14]. 나노 튜브는 매우 작은 굴곡이 있는 탄소나 이산화규소 등의 물질로 만들어진 구조물로, 매우 작은 굴곡을 통해 전류가 흐를 때 저항이 발생하는데 화학물질이 나노 튜브에 흡수되거나 표면에 흡착되는 화학적 변화를 통해 나노 튜브의 전기적 특성을 변화시킨다[8, 9, 10]. 이러한 메커니즘을 통해 전기적 신호를 읽고 해석하는 장치로서 동작한다. 순수 CNT 기반 가스 센서의 경우 감지할 수 있는 분석물의 종류에 대해 제한적이라는 단점이 존재한다[1]. 본 연구에서는 사용하는 3D 프린팅은 메니스커스 현상을 이용한 3차원 나노 프린팅 기법으로, 기판과 유리 파이펫의 토출구를 접촉을 통해 메니스커스를 생성한다. 용액 내의 입자들은 메니스커스를 통해 기판의 표면으로 이동하며 유리 파이펫이 수직 방향으로 풀링되는 동안 용매의 증발이 이루어지면서 입자들이 3차원 구조물로 적층된다. 이를 활용한 CNT 전극 기반 가스센서 제작을 통해 나노 단위의 복잡한 구조물을 생산하므로[2, 5], 앞서 말한 높은 유연성과 전기 전도성을 이끌어낸다. 뿐만 아니라 잉크의 제작이 용이하다는 이점을 통해 다양한 물질에 대해 출력이 가능하며 본 연구에서는 SWCNT-PVP(Polyvinylpyrrolidone) 나노복합용액을 사용하여 대기 오염 물질인 CO2 등의 가스 검출에 매우 민감한 저전력 가스 센서를 구축하고자 한다[1, 4, 5]. 필요에 따라 전도성 및 분산도를 높이고 구조물의 안정성을 더해줄 PVP[3, 13] 등의 물질을 혼합한 나노복합용액을 사용하여 감지 가능한 분석물의 종류 늘리고 호환성을 높일 수 있다[1]. 구조물의 전도성에 영향을 미치는 PVP는 구조물 제작 이후 RTA 처리를 통해 제거한다. 제작된 CNT 전극 센서는 가스 챔버 내에서 다양한 압력 조건 및 ppm 단위의 가스에 대해서 저항을 측정 및 비교한다.



참고문헌(References) 1) F. Lapointe, et al., "Carbon Nanotube Transistors as Gas Sensors: Response Differentiation Using Polymer Gate Dielectrics," ACS Ap pl. Polym. Mater 1, 3269-3248 (2019). 2) M. Chen, et al., "Meniscus-on-Demand Parallel 3DNanoprinting" ACS Nano 12, 4172-4177 (2018). 3) J.-H. Kim, et al., "Three-Dimensional Printing of Highly Conductive Carbon Nanotube Microarchitectures with Fluid Ink" ACS Nano 10, 8879-8887 (2016). 4) S.-Y. Guo, et al., "Gas Sensors Based on Single-Wall Carbon Nanotubes" Molecules 27(17), 5381 (2022). 5) S. Ghoshal., "Polymer/Carbon Nanotubes (CNT) Nanocomposites Processing Using Additive Manufacturing (Three-Dimensional Printing) Technique: An Overview" Fibers 5(4), 40 (2017). 6) M. Lucci, et al., "Optimization of a NOx gas sensor based on single walled carbon nanotubes" Sensors and Actuators B 118, 226-231 (2006). 7) L. Sacco, et al., "Ultra-sensitive NO2 gas sensors based on single-wall carbon nanotube field effect transistors: Monitoring from ppm to ppb level" Carbon 157, 631-639 (2020). 8) K. Chikkadi, et al., "Advances in NO2 sensing with individual single-walled carbon nanotube transistors" Beilstein J. Nanotechnol 5, 2179–2191 (2014). 9) I. Dube, et al., "Understanding the electrical response and sensing mechanism of carbon-nanotube-based gas sensors" Carbon 87, 330-337 (2015). 10) Y. Battie, et al., "Thickness dependent sensing mechanism in sorted semi-conducting single walled nanotube based sensors" Analyst 137, 2151-2157 (2012). 11) P. Bondavalli, et al., "Carbon nanotubes based transistors as gas sensors: State of the art and critical review" Sensors and Actuators B : Chemical 140, 304-318 (2009). 12) J. Kong, et al., "Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors" Science 287, 622-625 (2000). 13) C. Biswas, et al., "Strategy for High Concentration Nanodispersion of Single-Walled Carbon Nanotubes with Diameter Selectivity" ACS J. Phys. Chem C 113, 10044-10051 (2009). 14) T. Tian, et al., "Gas sensing performance and charge-transfer mechanism of semiconducting single-walled carbon nanotubes" Applied Surface Science 609, 155357 (2023). 15) J.-I. Jung, et al., "Three-dimensional nanoprinting via charged aerosol jets" Nature 592, 54-59 (2021).

[SS6-2 | 14:13]

워터 디벨롭 용액 공정을 이용한 IZO 박막 트랜지스터(TFT) 패터닝: 이슬이, 김동욱, 김태희, 이예원, 윤영준, 박재훈* (한림대학교 반도체 디스플레이 스쿨)

Keywords: oxide TFT, 용액 공정, patterning

최근 반도체 및 디스플레이 산업에서는 저비용, 단순 공정, 친환경적인 제조 기술에 대한 수요가 크게 증가하고 있습니다. 특히, 박막 트랜지스터(TFT) 기술은 디스플레이, 반도체, 센서 등 다양한 분야에서 핵심적인 역할을 합니다. 전통적으로 TFT는 실리콘(Si) 기반의 물질을 사용하여 제조되었으나, 최근에는 유리 기판이나 플렉시블 기판에서 사용할 수 있는 산화물 반도체를 활용한 TFT 기술이 주목받고 있습니다. 특히, 인듐-아연-산화물(IZO) 기반의 산화물 TFT는 고속 동작 특성, 우수한 전기적 특성 및 안정성 덕분에 다양한 응용 분야에서 활발히 연구되고 있습니다. 그러나, 기존 산화물 TFT 제조 공정에서는 복잡한 포토리소그래피 및 고온 공정이 필수적이어서, 공정의 단순화와 비용 절감이 중요한 문제로 대두되고 있습니다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 워터 디벨롭(Water-Develop) 용액 공정을 이용하여 간단하면서도 효율적인 패터닝을 구현하고자 하였습니다. 본 연구에서 제안하는 방법은 용액 공정을 기반으로 하며, 기존의 포토리소그래피 공정을 대체할 수 있는 가능성을 제시합니다. 특히, 패터닝 과정에서 UV Ozone, Pulse UV, O_2 Plasma 세 가지 장비를 이용한 표면 처리를 적용한 후, DI water를 이용하여 선택적으로 IZO 박막을 제거하는 방식을 사용하였습니다. 이를 통해 포토레지스트나 별도의 식각 공정 없이 간단한 공정으로 패터닝을 구현할 수 있음을 확인하였습니다. 본 연구에서는 인듐-아연-산화물(IZO) 용액을 스핀코팅(spin-coating)하여 균일한 박막을 형성한 후, 선택적 패터닝을 수행하였습니다. 이를 위해 먼저 IZO 박막을 형성한 후 UV Ozone, Pulse UV, O_2 Plasma를 이용하여 표면 처리를 진행한 후, DI water에 1분 동안 담가 워터 디벨롭 공정을 진행하였습니다. 이 과정에서 포토레지스트를 사용하지 않고도 특정 영역만 선택적으로 제거할 수 있음을 확인하였으며, 추가적인 식각 공정 없이 간단한 용액 공정으로 TFT 소자의 패터닝을 구현할 수 있음을 확인하였습니다. 패터닝된 IZO 박막은 600도에서 1시간 동안 어닐링을 진행한 후, 알루미늄 열 증착을 통해 TFT 소자를 제작하였고, 이를 이용하여 TFT 소자로서의 동작 가능성도 확인하였습니다. 이 실험을 통해 IZO 기반의 TFT 소자가 실제로 동작할 수 있음을 확인하였으며, 이는 본 연구에서 제시한 공정이 실질적인 소자 제조에 성공적으로 적용될 수 있음을 시사합니다. 또한, UV Ozone, Pulse UV, O_{22} Plasma 각각의 처리 후 워터 디벨롭 된 IZO 박막의 표면 변화를 분석하였으며, DI water 현상에서의 패턴 형성을 통해 선택적 패터닝이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있었습니다. 본 연구에서 제안한 워터 디벨롭 용액 공정을 이용한 IZO 박막 패터닝 방법은 기존 포토리소그래피 공정을 대체할 수 있는 중요한 가능성을 보여주고 있습니다. 특히, 추가적인 식각 공정이나 포토레지스트 처리 없이도 효율적으로 패터닝을 할 수 있다는 점에서, 기존 공정에 비해 비용 절감과 공정 단순화의 장점이 있습니다. 또한, 본 공정은 유연 소자(flexible electronics), 저온 공정(low-temperature process), 차세대 디스플레이 제조 공정 등 다양한 분야에 적용될 수 있는 가능성이 큽니다. 향후 연구에서는 본 패터닝 방법을 TFT의 다른 층에도 적용하여, 전체 소자를 용액 공정을 기반으로 제작하는 방안을 검토할 예정입니다. 이를 통해 차세대 전자 소자 및 디스플레이 기술 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대됩니다. 뿐만 아니라, 본 연구는 환경 친화적인 반도체 공정 신기술 개발에 중요한 기여를 할 수 있는 잠재적인 가치가 매우 뛰어납니다. 기존의 고온 공정이나 화학 약품을 대체할 수 있는 이 공정은 보다 지속 가능한 반도체 제조를 위한 중요한 기초가 될 수 있을 것입니다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법은 향후 반도체 산업의 발전과 함께 친환경적인 제조 기술 개발에 크게 기여할 것으로 예상됩니다.

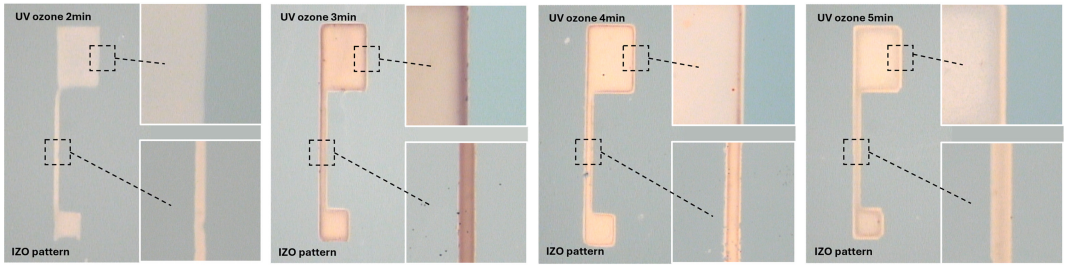


Fig. 1. 패터닝된 IZO 박막

참고문헌(References) 1) D.-K. Kim et al., “Viable strategy to minimize trap states of patterned oxide thin films for both exceptional electrical performance and uniformity in sol–gel processed transistors” Chemical Engineering Journal 441, 135833 (2022).

[SS6-3 | 14:26]

Impact of Powder Size Distribution on the Flowability of Gas-Atomized Inconel 625 Powder for Directed Energy Deposition:

Hyun Joong Kim, Sourabh Kumar Soni, Sung-Jae Jo, Jae Hong Kim, Ji-Woon Lee, Soon-Jik Hong* (Kongju National University)

Keywords: Inconel 625, Additive manufacturing, Gas atomization, Flowability, Powder Feed

Directed Energy Deposition (DED) 공정은 분말과 열원을 동시에 조사하여 적층하는 방식으로, 기존 제조 방식에 비해 재료의 손실이 적고 제조 공정을 최소화하여 비용 및 시간 절감 측면에서 다양한 이점을 가지는 공정이다 [1]. 이러한 Directed Energy Deposition 공정은 다양한 공정 변수에 의하여 완성된 부품의 품질을 일정하게 유지하는 것은 어려우며 공정 변수 중 분말 유동성은 적층 제조 공정에서 치수 정밀도 및 최종 제품의 품질에 있어서 큰 영향을 미쳐, 분말 유동성을 이해하고 제어하는 것은 필수적이다 [2]. 입도 분포, 입자 형상, 조성 등의 분말 특성은 분말 유동성에 영향을 미치며 분말 특성과 유동성 간의 관계를 분석하는 연구가 필요하다 [3,4]. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 입도 분포를 가진 Inconel 625 분말의 유동성을 평가하고 분말 유동성이 Directed Energy Deposition 공정에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 분말의 형상, 입도 분포, 유동성 등의 분말 특성을 분석하고 Directed Energy Deposition 공정의 분말 공급 시스템에 적용하였다. 가스 아토마이징으로 제조된 50-150μm의 Inconel 625 분말은 sieving 과정을 거쳐 입도 분포에 따라 50-100μm, 100-150μm, 50-150μm의 분말로 분류되었다. 각 분말의 입도 분포는 분말 입도 분석기(PSA)를 이용하여 분석하였으며, 분말 형상 및 조성은 주사전자현미경/에너지 분산형 X-선 검출 분광기 (SEM/EDS)를 사용하여 분석하였다. 분말 유동성은 Hall Flowmeter 및 Dynamic Avalanche Test 방식을 이용하여 분석하였다. 분말 유동성 분석 결과를 Directed Energy Deposition 공정의 분말 공급 거동과 연관시키기 위하여, MX-400 및 MX-lab (Insstek, Korea)를 사용하여 분말 공급 실험을 수행하였으며, 두 장비의 분말 공급 모식도는 Fig.1에 나타내었다. MX-400의 분말 공급 시스템은 홈이 있는 샤프트의 회전을 통해 분말을 공급하며, MX-lab의 분말 공급 시스템은 Powder Feed Block의 진동을 이용하여 분말이 공급된다. 분말 입도 분석 결과는 Fig 50-100μm, 100-150μm, 50-150μm로 분급된 분말의 Dv(50)은 각각 86.1μm, 129μm, 103μm를 가졌으며 Span은 각각 0.51, 0.41, 0.73을 나타내었다. 위와 같은 입도를 가지는 Inconel 625 분말의 유동성 평가에서 Hall Flowmeter 및 Carr Index(CI) 결과에서 각 입도에 따라 유동성의 차이는 미미하였으며 세 분말 모두 우수한 유동성을 나타낸다. Dynamic Avalanche Test는 0.3RPM에서 60RPM까지 분석하였으며 그 결과는 Fig.2에 나타내었다. 100-150μm 분말의 유동성이 가장 우수하였고 50-150μm 분말과 50-100μm 분말 순으로 유동성이 우수하였다. RPM의 증가에 따라 분말은 강한 외력에 의해 응집된 분말이 분산되고, 이러한 분산은 입자간 전단력 (Cohesion-T)를 감소시켜 Avalanche Energy가 감소한다. 서로 다른 입도를 가진 Inconel 분말의 MX-400 및 MX-lab 분말 공급 시스템을 이용한 분말 공급 실험 결과는 Fig.3에 나타내었다. 두 시스템 모두 노즐 막힘 없이 분말이 원활하게 공급되었으나, 100-150μm 분말이 가장 높은 공급을 보였으며, 다음으로 50-150μm 및 50-100μm 입도 분포를 가지는 분말 순으로 높은 공급을 보여 Inconel 625 분말의 입도에 따른 분말 공급의 차이점이 있음을 확인하였으며, MX-400 및 MX-lab 장비의 분말 공급 방식에 적용하기 적합함을 확인하였다. 본 연구에서 사용된 서로 다른 입도를 가진 Inconel 625 분말의 Avalanche Energy를 적층 제조에 일반적으로 사용되는 초합금 및 Stainless steal 등과 비교한 결과 Inconel 625 분말의 유동성이 우수하며 Directed Energy Deposition 공정에 적용하기 적합함을 확인하였다.

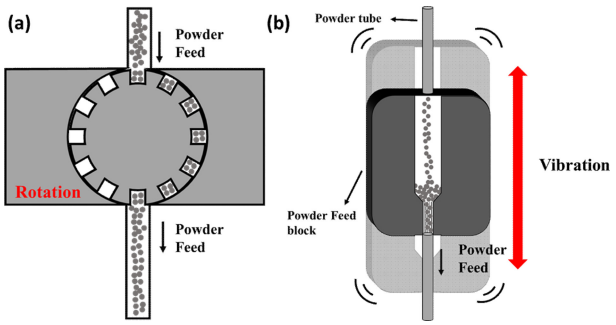


Fig. 1. Directed Energy Deposition 장비의 분말 공급 모식도 (a) MX-400, (b) MX-lab

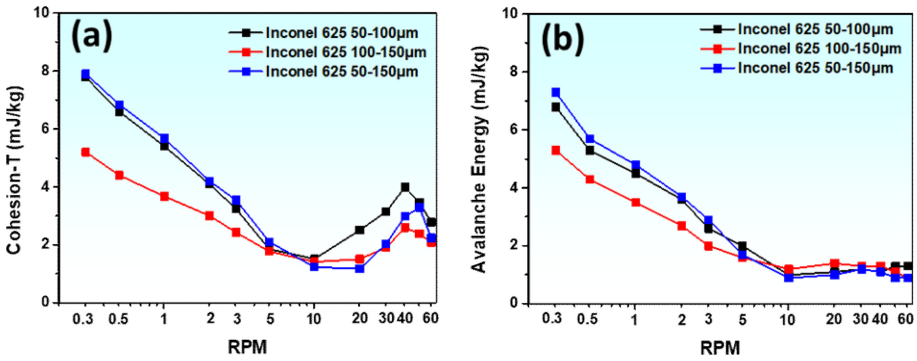


Fig. 2. 서로 다른 입도 분포를 가진 Inconel 625 분말의 0.3-60 RPM Dynamic Avalanche Test 결과 (a) Cohesion-T, (b) Avalanche Energy

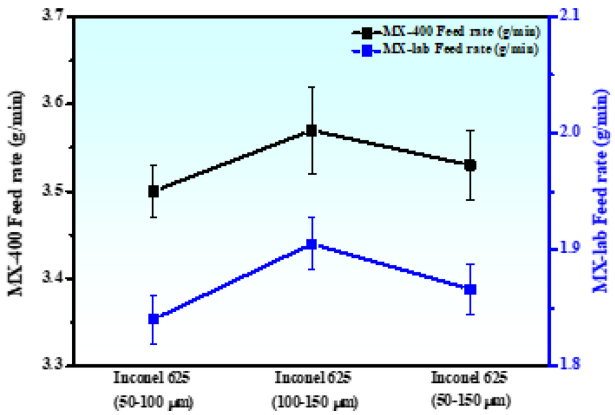


Fig. 3. 서로 다른 입도를 가진 Inconel 625 분말의 MX-400, MX-lab 분말 공급 실험 결과

참고문헌(References) 1) A. Mostafaei, R. Ghiaasiaan, I.-T. Ho, S. Strayer, K.-C. Chang, N. Shamsaei, S. Shao, S. Paul, A.-C. Yeh, S. Tin, A.C. To, Prog Mater Sci (2023). 2) A. Simchi, Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science 35 (2004). 3) A.D. Iams, M.Z. Gao, A. Shetty, T.A. Palmer, Powder Technol 396 (2022). 4) M. Mehrabi, J. Gardy, F.A. Talebi, A. Farshchi, A. Hassanpour, A.E. Bayly, Powder Technol 413 (2023).

[SS6-4 | 14:39]

젖음 투명성에 의해 유도된 전이금속 칼코겐화합물의 수분 안정성 향상(Enhanced Moisture Stability of Transition-Metal Dichalcogenides Induced by Wetting Transparency): 최선연, 김현호* (국립금오공과대학교)

Keywords: Transition Metal Dichalcogenides, Wetting Transparency, Moisture Stability, Field-Effect Transistors

1. 연구의 목적과 의의

이차원(2D) 소재 중 전이금속 칼코겐 화합물(transition metal dichalcogenides, TMDCs)은 원자층 물질로 차세대 반도체 소재로서 높은 잠재력을 지니고 있다. 그러나 이들은 높은 표면적 대 부피 비율로 인해 주위 환경의 영향을 크게 받으며, 특히 수분에 의한 구조적 및 전기적 불안정성이 주요 문제로 발생한다[1]. 본 연구에서는 기판의 표면 에너지를 조절함으로써 단층 전이금속 칼코겐 화합물의 젖음 투명성을 유도하여 별도의 패시베이션 층 없이 수분 안정성을 향상시키는 방법을 제시하고자 한다. 더 나아가 이를 바탕으로 전계효과 트랜지스터(field effect transistor, FET) 응용을 통해 장기적으로 안정적인 소자 구동을 목표로 한다. 본 연구는 다양한 이차원 TMDCs 기반 전자 소자의 수분 안정성 향상을 위한 실용적이고 효과적인 공정 개발에 기여할 것이라 기대된다.

2. 연구 방법론 개요

본 연구에서는 서로 다른 표면에너지를 가진 기판 위에 존재하는 전이금속 칼코겐 화합물(MoSe2, MoS2)의 수분 안정성 분석을 위해 SiO2/Si 기판과 octadecyltrichlorosilane (ODTS) 처리된 SiO2/Si 기판을 준비하였다. ODTS 처리를 위해 SiO2/Si 기판을 실온에서 0.1 mL의 ODTS가 포함된 150 mL 헥세인 용액에 10분 동안 처리하였다. 또한, 단층 MoSe2 및 MoS2 합성을 위해 대기압 화학기상증착법을 이용하였으며, 전구체로는 MoO3 및 Se 또는 S 파우더를 사용하여 Si/SiO2 기판 위에 성장시켰다. 합성 과정은 챔버 내의 압력을 50 mTorr까지 진공상태로 만든 후 Ar/H2(672/28 sccm) 혼합가스를 이용해 챔버 내의 압력을 상압 및 680 ºC에서 합성을 시도하였다. 이를 분석하기 위해 광학현미경(Olympus BX51M), 마이크로라만/PL 시스템(유니나노텍, UniRAM)을 이용하였다. 최종적으로 소자 제작을 위해 그래핀 및 MoSe2 또는 MoS2를 PC/PMDS(PMMA/PDMS)를 이용한 픽업/전사방법

을 통해 순서대로 픽업한 후, SiO2/Si(ODTS 처리된 SiO2/Si 기판)에 미리 증착해 놓은 Au/Ti 전극 위에 전사를 진행하였다. 이후 PC 및 PMMA는 클로로폼 및 아세톤으로 각각 제거하였으며 제작된 소자의 전기적 특성 평가를 위해 direct current(DC) 소스미터(Keithley 245)를 사용하였다.

3. 주요 연구 결과 및 결론

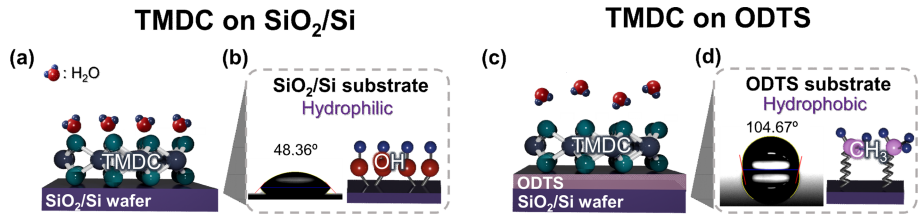


Fig. 1. 서로 다른 기판위에 존재하는 단층 TMDC의 수분 흡착 거동

ODTS substrate 104.67° 48.36° TMDC TMDC CH3 OH Hydrophilic Hydrophobic SiO2/Si substrate (f) crack RH >90% at 500K RH >90% at 500K (b) (c) (d) crack : H2O SiO2/Si wafer ODTS As-grown 30 min 6 h As-grown 30 min 6 h 10 μm 10 μm etching SiO2/Si wafer (a) (e) TMDC on ODTS TMDC on SiO2/Si 그림 1a와 c는 SiO2/Si 기판에 ODTS의 존재 유무에 따른 단층 TMDC 표면의 수분 흡착 거동을 보여준다. SiO2/Si wafer에서는 H2O 분자가 1L-TMDC 표면에 쉽게 흡착되는 반면, ODTS 처리 후에는 H2O 분자의 흡착이 억제된다. 이는 기판의 표면에너지가 TMDC 표면의 수분 흡착 거동에 영향을 미친다는 점을 시사하는데, 실제로 ODTS가 처리되지 않은 SiO2/Si 기판은 DI water와의 접촉각이 48.36°로 친수성 특성을 보였으며(그림 1b 좌측) ODTS가 코팅된 기판의 접촉각은 104.67°로 소수성 특성을 띈다(그림 1d 좌측). ODTS의 긴 사슬형 분자 구조(그림 1d 우측)는 SiO2/Si 기판과의 거리가 늘어나 스크리닝 효과로 인해 소수성을 향상시킬 수 있다. 반면, SiO2/Si의 표면에는 극성 -OH기가 존재하여(그림 1b 우측) 극성 H2O 분자가 쉽게 흡착되기 때문에 친수성 특성을 보인다.

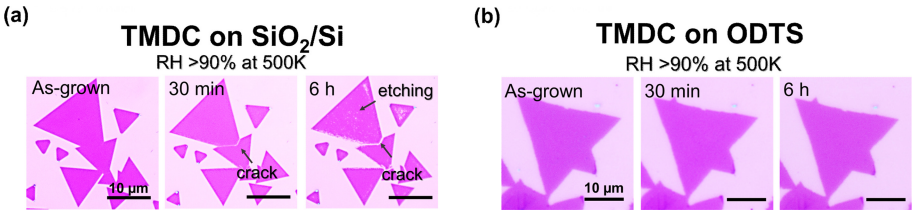


Fig. 2. 단층 MoSe2의 수분 노출 시간에 따른 광학현미경 이미지

기판의 표면에너지에 따른 단층 MoSe2의 수분 흡착 거동을 면밀히 분석하기 위해, 서로 다른 기판(SiO2/Si, ODTS) 위에 전사하여 상대습도 90% 이상 및 227°C의 환경에서 수분 노출 시간에 따른 변화를 광학현미경을 통해 분석하였다(그림 2a, b). 실험 결과, SiO2/Si 기판 위의 경우 30분 이상 노출시 균열이 관측되었지만, ODTS 처리된 기판 위의 경우 표면에 균열이 관찰되지 않았다. 이는 TMDC의 젖음 투명성에 의해 기판의 표면 에너지가 TMDC의 표면에 유도되어 기판의 표면에너지와 유사하게 변함을 시사한다.

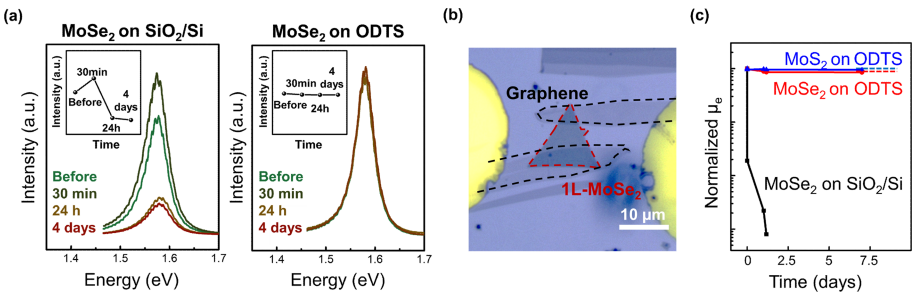


Fig. 3. 수분 노출 시간에 따른 단층 TMDC의 광발광 특성 및 전계효과 트랜지스터 특성

그림 3a의 광발광 특성 분석 결과, SiO2/Si 위에 존재하는 MoSe2는 수분 노출 시간이 증가함에 따라 광발광 강도가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 수분과의 화학적 반응을 통해 산화가 진행되기 때문으로 해석된다[2]. 그러나 ODTS 처리된 기판 위의 MoSe2의 경우 수분 노출 후에도 광발광 특성이 유지됨 볼 수 있다. 더 나아가, MoSe2 및 MoS2 기반의 전계효과 트랜지스터 제작(그림 3b) 및 평가(그림 3c) 결과, ODTS 처리된 기판의 소자의 경우 장기간에 걸쳐 이동도가 유지됨을 보이지만, SiO2/Si 기판

의 경우 이동도가 단시간에 급격히 저하됨을 관찰하였다. 이는 기판의 표면에너지가 단층 TMDC의 젖음 투명성에 의해 TMDC의 안정성에 영향을 미치며 이는 전자 소자의 안정성 확보에 중요한 역할을 함을 시사한다.

참고문헌(References) 1) J. Gao, B. Li, J. Tan, P. Chow, T.-M. Lu, and N. Koratkar, ACS nano, 10, 2, 2628-2635 (2016). 2) R. Addou, L. Colombo, and R. M. Wallace, ACS Appl. Mater. Interfaces, 7, 22, 11921-11929 (2015).

[SS6-5 | 14:52]

DMF기반 전해질의 온도에 따른 빛 차단 효율 최적화: 조민서, 문천우* (순천향대학교())

Keywords: Reversible Metal Electrodeposition (RME), Smart Windows,Low-Temperature Operation, DMF-based Electrolyte, Plasmonics

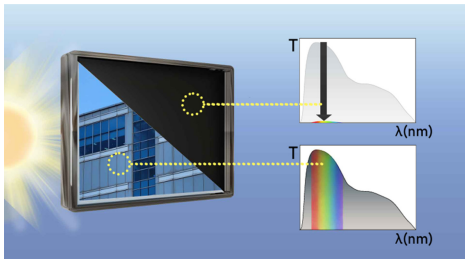


Fig. 1. Schematic representation of the transmittance of a window due to electrochromism.

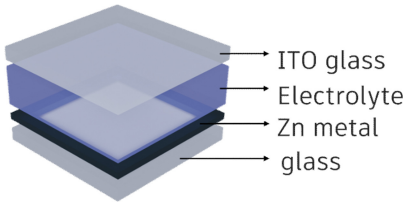
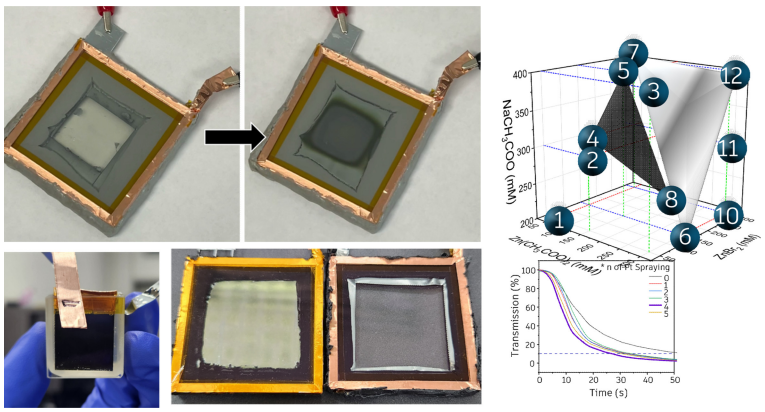


Fig. 2. Overall device layout of the RME smart window.

가역 금속 전착(Reversible Metal Electrodeposition, RME) 스마트 윈도우는 투명 전도성 전극 위에 금속층을 증착 및 탈착하여 빛의 투과도를 제어하는 기술이다. 이를 통하여 실내 환경을 쾌적하게 유지하고 에너지 효율을 증대할 수 있다. 또한 건물의 실외 조명을 조절하여 시각적으로 편안한 실내 환경을 조성할 수 있다. 하지만, 이때 외부가 온난하지 않다면 이온전도도 및 전착 효율 감소로 인해 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 -30°C 정도의 극한의 추운 환경에서 RT와 유사하게 거동하는 스마트 윈도우 시스템을 개발하였다. 이는 다양한 환경에서 신뢰성 높은 거동을 보이기에 범용성이 높아 여러 나라에서 사용될 수 있다.



RME 스마트 윈도우의 저온 구동을 실현하기 위하여 N,N-다이메틸폼아마이드(DMF)를 용매로 하여 브로민화 아연($ZnBr_2$) 및 아세트산 아연($Zn(CH_3COO)_2$)를 포함한 다양한 전해질 조성을 제조하였다. 또한 이온 이동성 향상과 색 변화 특성을 최적화하기 위하여 아세트산 나트륨($NaCH_3COO$)을 첨가하여 실험을 진행하였다. 다양한 온도에서 조건별 투과도 변화를 관찰하기 위하여 Oceanview와 Lviumsoft 프로그램을 사용하였다. 또한 전기화학적 특성 분석을 위하여 순환전압전류법(CV)과 크로노암페로메트리(CA)데이터를 얻어 전착 속도와 가역성 특성을 평가하였다. DMSO로 만들던 전해질의 조성을 따라가되 용매를 DMF로 바꾸니 상온 전기 증착 시 얻을 수 있던 5%의 투과도는 35퍼센트 부근에서 더 이상 떨어지지 않았다. 분광학적 전기화학적 분석결과를 통해 전해질 조성, 인가전압, PT 도포 횟수 등이 생성되는 금속층의 핵생성과 성장에 영향을 미쳐 자라나는 결정의 형태와 크기가 결정되는 것을 확인하였다. 이러한 변화는 투과도뿐만 아니라 색상 변화를 야기하였으며, 실험 결과 검은색과 은색의 전착 패턴이 나타났다. AFM 및 SEM 분석을 통해 이러한 구조적 차이를 검증하였으며, 전해질 조성을 최적화한 결과 -30°C에서도 투과도 변화가 3% 미만으로 유지되어 실온과 거의 동일한 광학적 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 저온에서도 RME스마트 윈도우가 안정적으로 작동할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 검은색과 은색의 전착 패턴을 파악하여 광학적 특성 변화를 제어하였다. 그러나 -30°C에서는 여전히 일부 성능저하가 관찰되어 이를 개선하기 위하여 최적화 및 대체 시스템 탐색이 필요하다.

참고문헌(References) 1) Bhoumik, N. C., Madu, D. C., Moon, C. W., Arvisu, L. S., McGehee, M. D., & Barile, C. J. (2024). Nonaqueous electrolytes for reversible zinc electrodeposition for dynamic windows with excellent optical contrast and durability. Joule, 8(4), 1036-1049. 2) Bhoumik, N. C., Potts, C. R., Hernandez, T. S., & Barile, C. J. (2024). Enhancing the dark-state bistability and thermal stability of zinc dynamic windows with nitrile electrolytes. Device.

[SS6-6 | 15:05]

할라이드 페로브스카이트 성능 향상을 위한 첨가제 설계 및 열증발 진공증착법 기반 LED 소자 구현: 김수영*, 김인향 (고려대학교)

Keywords: Halide perovskite, Thermal evaporation, Additive, Light emitting diode(LED)

1. 연구의 목적 및 의의

할라이드 페로브스카이트(Halide perovskite)는 높은 광발광 양자 효율(Photoluminesence quantum yield, PLQY), 조절 가능한 밴드갭, 낮은 제조 비용 등의 이점을 갖추어 차세대 디스플레이 및 광전자 소자에 활용될 발광 소재로 주목받고 있다. 특히 LED 응용을 위해서 고품질의 균일한 박막을 형성하는 것이 필수적이며, 기존의 용액 기반 스핀코팅 공정은 대면적 제조 및 OLED 산업 공정과의 호환성에서 한계를 보인다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 열증발 기반 진공증착법(Thermal evaporation, TE) 을 활용하여 고품질 페로브스카이트 박막을 제조하고, 안정성과 발광 특성이 향상된 LED 소자를 개발하고자 한다. 특히, 무기 페로브스카이트(CsPbX3, X = Br, I)에는 도입되지 않았던 5-Aminovaleric Acid(5-AVA)를 첨가제로 활용하여 박막의 결정성과 발광 효율을 개선하는 방안을 제시한다. 본 연구는 TE 기반 공정과 첨가제 설계를 결합하여 페로브스카이트 박막의 구조적, 광학적 특성을 최적화하고, 이를 통해 LED 응용 가능성을 검토하는 데 의의가 있다.

2. 연구 방법론 개요

본 연구에서는 TE 기반 단일소스(Single-source) 증착 방식으로 페로브스카이트 박막을 제조하고, 5-AVA의 첨가 여부 및 농도에 따른 박막 특성 변화를 분석하였다.

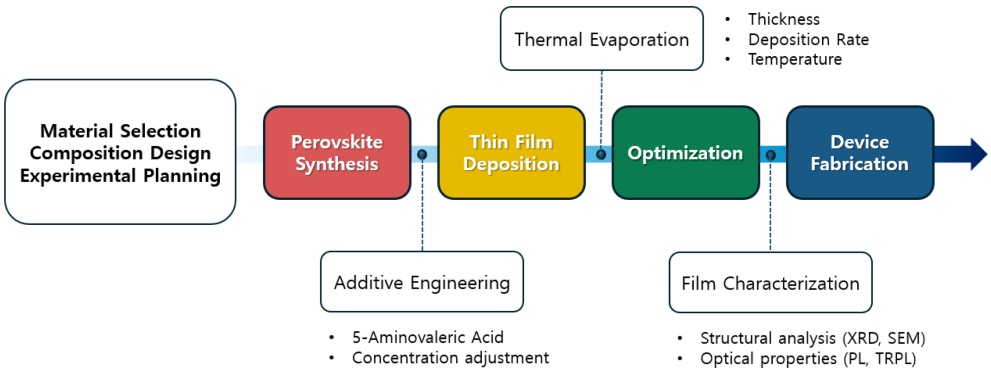


Fig. 1. 페로브스카이트 박막 제작을 위한 소재 설계, 증착 공정 및 최적화 연구 흐름도

$CsPb(Br/I)_3$ 조성을 갖는 페로브스카이트를 합성하고, 5-AVA 첨가제 농도를 조절하여 특성 변화를 비교하였다. 합성된 페로브스카이트는 열증발(TE) 방식으로 진공 증착하여 균일한 박막을 형성하였으며, 두께 및 균일성을 제어하여 LED 소자 제작에 적합한 조건을 탐색하였다. 박막의 광학적, 결정 구조 및 형태학적 특성을 UV-Vis 흡광 분광법, PL, XRD, SEM을 통해 분석하였으며, 전도성 및 소자 성능을 평가하여 최적화된 LED 소자를 제작했다.

3. 주요 연구 결과

5-AVA를 첨가한 페로브스카이트 박막의 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 주요 결과를 확인할 수 있었다.

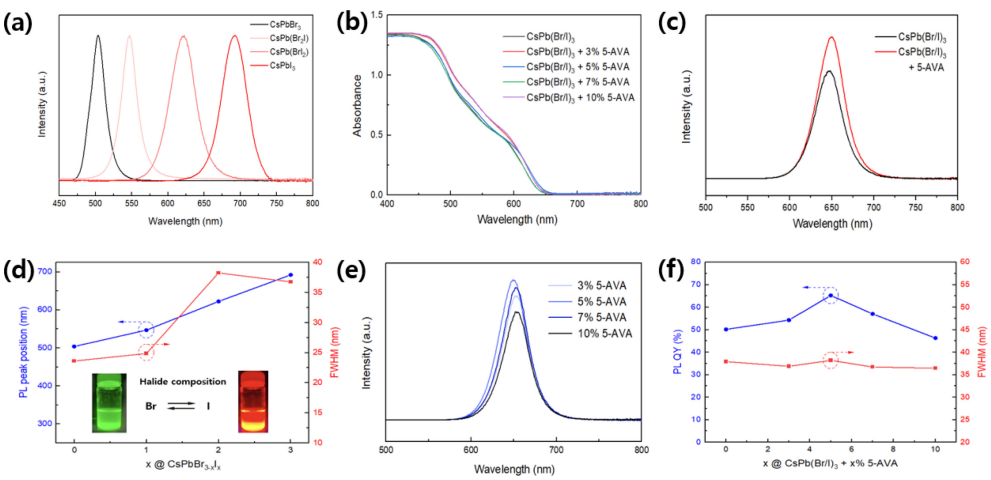


Fig. 2. $CsPb(Br/I)_3$의 할라이드 조성 및 5-AVA 첨가에 따른 광학적 특성 변화 분석

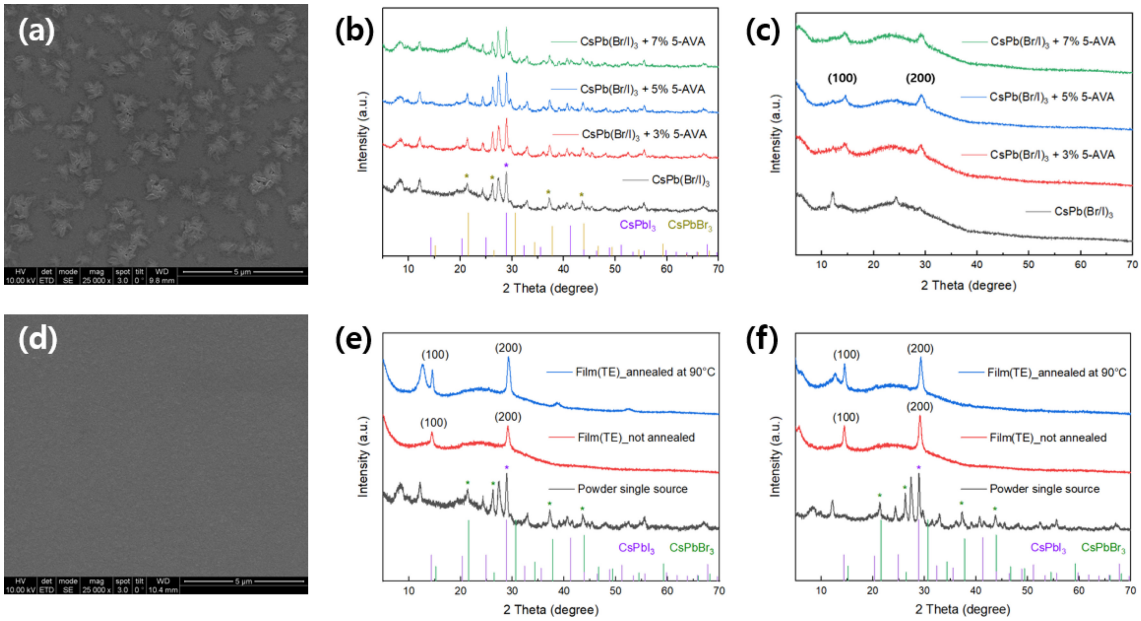


Fig. 3. TE 공정을 통한 박막 제작 및 후처리에 따른 구조적 특성 변화 분석

[그림 2]의 경우, PL 분석을 통해 5-AVA 첨가 시 비방사성 재결합이 억제되면서 PL 강도가 증가하고, PLQY가 향상되는 경향을 확인하였다. 또한, 할라이드 조성 변화(Br/I 비율 조절)에 따라 발광 피크가 가시광선 영역 내에서 조절 가능하며, 5 mol% 농도의 5-AVA 도입 시 최적의 발광 특성을 구현할 수 있었다. 이러한 결과는 5-AVA가 페로브스카이트 박막 내 결함을 효과적으로 패시베이션하여 광학적 성능을 개선했음을 시사한다. [그림 3]에서 증착 전 single-source 페로브스카이트와 증착된 박막의 XRD 패턴을 비교한 결과, 열증발 공정을 통해 페로브스카이트 상이 성공적으로 형성됨을 확인하였다. 특히, 증착된 박막에서는 특정 결정면의 우선 배향이 강화되며, 균일한 결정 구조가 형성되는 경향을 보였다. 또한, 증착 후 박막을 추가로 열처리하여 SEM 분석을 수행한 결과, 후처리된 박막에서 입자 크기가 더욱 균일해지고, 표면 거칠기가 감소하여 고품질 필름이 형성됨을 확인하였다. 이러한 결과는 열처리 공정이 필름 내 결함을 줄이고 결정 성장을 촉진하여, 안정적인 박막 구조를 구현했음을 시사한다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구를 통해 열증발 기반 페로브스카이트 박막 제조가 산업적으로 유망한 공정임을 입증하며, 5-AVA 첨가제 및 박막 후처리 과정이 무기 페로브스카이트 박막의 결정성과 발광 특성을 효과적으로 개선할 수 있음을 확인한다. 향후 연구에서는 박막 두께 조절, LED 소자의 장기 안정성 평가 등을 추가적으로 진행할 예정이다. 이를 통해 페로브스카이트 기반 차세대 LED 소자의 상용화 가능성을 높이고, 대면적 공정 적용 가능성을 검토하는 방향으로 연구를 확장할 계획이다.

참고문헌(References) 1) Peipei et al. “Thermal Evaporation for Halide Perovskite Optoelectronics: Fundamentals, Progress, and Outlook.” Adv. Optical Mater. 10 (2022): 2101770. 2) Saikat et al. “Vacuum-Processed Metal Halide Perovskite Light-Emitting Diodes: Prospects and Challenges.” ChemPlusChem 86 (2021): 558-573. 3) Kebin et al. “Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 percent.” Nature 562 (2018): 245-248. 4) Loredana et al. “Low-Cost Synthesis of Highly Luminescent Colloidal Lead Halide Perovskite Nanocrystals by Wet Ball Milling”ACS Appl. Nano Mater. 1, 3 (2018): 1300-1308. 5) Lei et al. “CsPbBr3 nanocrystals prepared by high energy ball milling in one-step and structural transformation from CsPbBr3 to CsPb2Br5”Appl. Surf. Sci. 543 (2021): 148782. 6) Javad et al. “Metal Halide Perovskite Nanocrystals: Synthesis, Post-Synthesis Modifications, and Their Optical Properties”Chem. Rev. 119, 5 (2019): 3296-3348. 7) S.-R. Bae, D.Y. Heo, and S.Y. Kim. “Recent progress of perovskite devices fabricated using thermal evaporation method: Perspective and outlook”Mater. Today Adv. 14 (2022): 100232. 8) Nakyung et al. “Highly Efficient Vacuum-Evaporated CsPbBr3 Perovskite Light-Emitting Diodes with an Electrical Conductivity Enhanced Polymer-Assisted Passivation Layer”ACS Appl. Mater. Interfaces 13, 31 (2021): 37323–37330. 9) Daqin et al. “Grinding Synthesis of APbX3 (A = MA, FA, Cs; X = Cl, Br, I) Perovskite Nanocrystals”ACS Appl. Mater. Interfaces 11, 10 (2019): 10059-10067. 10) Wei et al. “Luminescence, stability, and applications of CsPbBr3 quantum dot/polymethyl methacrylate composites prepared by a solvent- and ligand-free ball milling method”Opt. Mater. 136 (2022): 113398.

타이타늄 전략소재 심포지엄
Room 301, 4월 24일

[전략1-1 | 09:00] 초청강연

전략산업용 타이타늄합금 개발 및 적용 기술: 홍재근*, 김재혁, 이상원, 양준하, 박찬희, 염종택 (한국재료연구원)

Keywords: 타이타늄, 전략소재, 공급망

타이타늄합금은 우수한 고비강도, 고내식 특성으로 항공우주, 첨단바이오, 수소 등 전략산업에 적용되고 있다. 그러나 각 전략산업에서 요구되는 타이타늄합금의 물성은 해당 산업의 환경에 부응하는 특성이 발현되어야 하고 소재 공급망 안정화 이슈가 있다. 최근 항공우주용 타이타늄합금개발 관련해서 미국 및 유럽을 중심으로 콜드 드웰 피로(cold dwell fatigue) 파단에 영향을 미치는 마이크로텍스처 영역(MTRs : Microtextured regions) 제어를 위한 기술개발과 이를 위한 규정을 제정하고 있다. 따라서 국내에서도 항공용 회전체 부품에 사용되는 타이타늄합금은 프리미엄 품질(PQ ; Premium Quality) 타이타늄 제조 요건(AC 33.15-1)에 충족되는 용해기술 확보가 필요하다. 또한, 지속적으로 제기되어온 타이타늄 원소재 공급망 이슈해결 및 선순환이 가능한 생태계 조성을 위해서는 친환경 스크랩 전처리기술, 분류 시스템개발 및 PAM/EBM 용해기술 활용을 통한 저비용 고청정 재자원화 기술개발이 필요하다. 본 발표에서는 최근 타이타늄합금 업사이클링 기술, 항공용 타이타늄 합금개발, 적층제조기술등 전략산업에 적용되는 타이타늄합금에 대한 정보를 소개하고 관련 연구 결과를 공유하고자 한다.

[전략1-2 | 09:25] 초청강연

마그네슘 열환원법을 이용한 이산화타이타늄으로부터 Grade 2급 Ti 금속 직접 제조기술: 강정신* (서울대학교 에너지자원공학과, 서울대학교 에너지자원신기술연구소), 박성훈 (서울대학교 에너지자원신기술연구소), 송영주 (서울대학교 에너지자원공학과, 서울대학교 에너지자원신기술연구소), 오준오 (서울대학교 에너지자원신기술연구소)

Keywords: 타이타늄, 이산화타이타늄, 마그네슘 열환원, 탈산

타이타늄 (Ti) 금속의 상용 제련공정인 Kroll법은 산소 함유량이 약 500 ppm인 Grade 1급의 저산소 Ti 금속을 제조한다. 그러나 Kroll법은 에너지 소비가 크고 생산성이 낮으며 회분식 조업의 단점이 있다. 이와 같은 전통적 제련법의 단점을 극복하고자 비교적 저렴한 마그네슘 (Mg) 금속을 환원제로 사용하여 이산화타이타늄 (TiO_2)으로부터 직접적으로 Ti 금속을 제조하는 연구가 이루어지고 있다. Mg 금속을 환원제로 사용할 경우 일반적으로는 2 mass%의 산소가 Ti에 잔류하지만 반응계 내 수소 화학포텐셜이 높은 경우 Ti 내 산소 농도를 수백 ppm까지 낮출 수 있다. 본 연구에서는 973 K에서 Mg 열환원법을 이용하여 TiO_2로부터 산소농도 0.209 mass%를 함유한 Ti 직접제조 연구결과를 소개하고 향후 보다 저산소 Ti를 제조할 수 있는 방안에 대해서 논의한다.

[전략1-3 | 09:50] 초청강연

off-grade Ti 스크랩의 고순도화 및 이를 활용한 스퍼터링 타겟 소재 제조: 김정한*, 김우혁 (국립한밭대학교 신소공학과), 고의준, 박경태 (한국생산기술연구원), 원종우 (한국재료연구원)

Keywords: 타이타늄, 탈산, off-grade, 극저온 압연, 타겟

본 연구에서는 타이타늄 소재를 고도화하기 위한 전략으로서 off-grade 타이타늄 스크랩을 고순도화한 뒤, 이를 스퍼터링 타겟 소재로 활용하기 위한 방안을 제시하였다. 먼저, 용융 염 기반 전기화학적 탈산 공정을 적용하여 스크랩 내 산소 함량을 효율적으로 저감하였으며, 이 과정에서 체심입방(β) 상으로의 상변화와 MgO 활성도를 고려함으로써 탈산 성능 및 산소 확산 거동을 정량적으로 평가하였다. 이후, 전자빔 용해(EBM) 공정을 통해 고진공 상태에서 산소 농도가 대폭 저감된 4N5(99.995% 이상) 초고순도 타이타늄 잉곳을 제조하였다. 이어서 잉곳의 결정 미세화와 결정방향성 제어를 위해 극저온 압연과 열처리를 병행하였고, 그 결과 30 μm 이하의 미세 결정립 및 (0001) 방향의 강한 집합조직 형성이 가능함을 확인하였다. 이를 바탕으로 제작된 스퍼터링 타겟은 상온 압연으로 제조된 타겟에 비해 더욱 우수한 스퍼터링 효율을 나타내었다. 본 연구에서 제안된 공정은 off-grade 타이타늄 스크랩의 고부가가치화를 실현함과 동시에, 고성능 스퍼터링 타겟 제작에 효과적인 기술적 대안을 제공할 것으로 기대된다.

[전략2-1 | 10:25] 초청강연

티타늄 합금 품질 향상을 위한 첨단 용해 기술 : 공정 변수 제어 및 결함 발생 방지 사례: 최재영*, 나혜성 ((주)에이치브이엠)

Keywords: Titanium, E-beam, Plasma Cold Hearth Melting, VAR

항공우주, 의료, 에너지, 국방 등 첨단 산업 분야에서 티타늄 합금의 고성능 요구가 증대됨에 따라, 불순물 제어, 편석 억제, 균일한 미세 조직 구현 및 결함 방지를 위한 고도의 용해 기술이 필수적입니다. 기존 용해 방식의 한계를 극복하고자 E-beam, Plasma Cold Hearth Melting, VAR 등 첨단 용해 기술이 주목받고 있으며, 이는 급냉 응고, 고융점 합금 원소 용해, 진공 환경 제어 등 특징적인 공정 제어를 통해 소재 특성 향상을 높일 수 있습니다. 특히 합금 원소 편석 억제, 고용 증진, 안정상 형성을 통해 소재 특성을 획기적으로 향상시킬 수 있으며, 기존 용해 방식으로는 제조가 어려웠던 고품질 고강도 티타늄 합금 제조가 가능합니다. 본 발표에서는 이러한 첨단 용해 기술의 소개와 함께, 공정 변수 제어를 통한 결함 방지 사례를 소개하고자 합니다.

[전략2-2 | 10:50] 조청강연

α' 마르텐사이트 변태 유기 소성을 이용한 초고강도 타이타늄 합금 소개 : 이상원*, 심재원, 고성철, 남연우, 홍재근, 김재혁, 염종택 (한국재료연구원)

Keywords: 타이타늄, 변태유기소성, 고강도, 마르텐사이트

변태 유기 소성(TRIP, Transformation Induced Plasticity)은 외부 하중이 가해질 때 모상에서 마르텐사이트로 변태하면서 소성을 증가시키는 현상을 말한다. 마르텐사이트 변태가 일어나는 과정에서 소성 경화능과 강도가 증가하기 때문에, 구조재료 합금에서 고강도 및 고성형화를 달성할 수 있는 대표적인 방법 중 하나로 활용되어 왔다. 타이타늄 합금에서는 α'(Hexagonal 구조)와 α"(Orthorhombic 구조) 두 가지 마르텐사이트 변태가 나타날 수 있는데, 대부분의 TRIP 타이타늄 합금은 α" 변태를 활용하였다. 반면, α'는 높은 강도에도 불구하고 변태 조건이 제한적이어서 관련 연구가 매우 적은 실정이다. 본 발표에서는 α' 변태를 이용한 TRIP 타이타늄 합금을 소개하고, 변형 메커니즘을 살펴보며 그 가능성을 알아보고자 한다.

[전략2-3 | 11:15] 조청강연

첨단 산업 분야 적층 제조 티타늄 소재 적용 현황 및 재생 보수 기술 개발 동향: 박기덕* (주식회사갓테크)

Keywords: Titanium, Additive Manufacturing, Laser Powder Bed Fusion(L-PBF), Electron Beam Melting(EBM), Direct Energy Deposit(DED), Repair

티타늄 소재는 비중이 4.5 g/cm^{3}으로 철의 60% 정도이며 비강도가 높아 항공, 우주, 발전, 방산 등 고강도와 경량성을 요구하는 첨단 산업에 개발되어 적용되는 소재이며 생체 적합성이 매우 우수하여 생체 재료로도 활용되는 소재이다. 기술 고도화로 인해 티타늄 합금 소재 및 부품을 필요하는 고정밀, 고성능 부품의 수요나 적용이 증대됨에 따라 사용되는 환경에서 발생하는 파손, 마모, 손상 등으로 인해 폐기되는 티타늄 합금 산업 폐기물 역시 비례적으로 증가하는 실정이다. 현재의 티타늄 합금 소재의 자원 순환 기술은 가공 공정에서 발생하는 스크랩에 국한되어 사용되고 있으므로 발생한 티타늄 합금 소재 및 부품 스크랩을 고품위화 시켜 적층 제조용 분말로 재활용하여 부품을 새롭게 제작하거나 재생 보수에 적용하여 재사용 할 수 있다면 부가가치를 극대화 시킬 수 있을 뿐만 아니라 수입 대체 효과도 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 해당 기술을 티타늄 합금 소재 및 부품의 사용 비율이 매우 높은 항공, 우주, 발전, 방산 등의 분야의 다양한 부품에 확대 적용한다면 기술 개발의 파급력 및 적용성은 매우 높을 것으로 판단된다. 따라서, 본 발표에서는 첨단 산업에서 티타늄 소재 및 부품이 적용되는 동향과 적층 제조 기술을 접목한 첨단 부품 제작 현황 그리고 마모, 손상, 파손 등이 발생한 부품에 대한 재생 보수 기술 동향에 대해 공유하고자 한다.

[전략3-1 | 14:00] 조청강연

초록없음

항공엔진 타이타늄 소재 국산화 현황 및 전략: 손인수* (한화에어로스페이스)

Keywords: 항공엔진, 가스터빈, 타이타늄, 국산화, 개발

항공엔진 타이타늄 소재 국산화 현황 및 전략

[전략3-2 | 14:25] 조청강연

Development of Low-Cost Ti-6Al-4V Filler Wire for Wire Arc Additive Manufacturing: JONG TAEK YEOM*, A.K. Maurya, Jae H. Kim, Junha Yang, Jae Ho Kim, and Jae Keun Hong (Korea Institute of Materials Science)

Keywords: Ti-6Al-4V, filler wire, wire arc additive manufacturing, hot deformation behavior, dynamic recrystallization (DRX)

Recently, wire arc additive manufacturing technology has been gaining attention as a manufacturing process for large components made of difficult-to-form materials such as titanium alloys, Superalloys and so on. Compared to conventional powder-based additive manufacturing, wire-based additive manufacturing enables significantly faster metal part production, minimizes material loss, and reduces costs. However, like powder-based additive manufacturing, the high cost of input materials such as powders and wires remains a challenge for commercialization. In this study, we aimed to develop a low-cost Ti-6Al-4V alloy wire for wire arc additive manufacturing. Specifically, we investigated whether a sound Ti-6Al-4V alloy wire could be fabricated using a direct rolling process, eliminating the ingot breakdown forging process. The hot deformation characteristics of the as-melted ingot, β-forged billet, and α+β forged billet of Ti-6Al-4V were investigated using a Gleeble-3800 thermo-mechanical simulator. The process conditions for obtaining an equiaxed alpha structure were optimized based on the deformation processing map derived from the analysis of flow stress curves and the microstructure analysis results of the initial structure. The hot rolled bar in the (α+β) region produces fine recrystallized equiaxed α grains, which enhance the ductility in the wire and facilitate room temperature wire drawing and producing a filler wire with a final diameter of 1.7 mm. Similarly, filler wire was also developed from both the β and α+β regions. Finally, the microstructure and mechanical properties of the produced filler wires were characterized

[전략3-3 | 14:50] 조청강연

Cold dwell fatigue of titanium alloys in aero-engine industry: Tea-Sung Jun* (Incheon National University)

Keywords: Dwell fatigue, Titanium alloy, Aero engine, Strain rate sensitivity, Creep

Cold dwell fatigue has long been a critical issue in aero-engine industry, because it significantly affects fatigue life typically in near-alpha titanium alloys at temperatures in the range of -40 to 200^{oo}C. The term 'dwell fatigue' describes the decrease in a component's

fatigue life time when exposed to continuous high mean stress while cruising, between the load ramping up at take-off and the load ramping down upon landing. Among the multiple factors affecting dwell fatigue, time-sensitive and rate-dependent deformation have been considered as critical factors in cold dwell fatigue. In this talk, I will be presenting the overview of dwell fatigue and the on-going experimental works on strain rate sensitivity and creep of Ti-6Al-2Sn-4r-2Mo and Ti-6Al-4V alloys. The presented approaches will show you new exciting mechanistic insight into important deformation mechanisms, as well as opening up further studies of new alloy design.

[전략3-4 | 15:15] 초청강연

Hydrogen absorption kinetics and microstructural features of $TiFe_{0.8}Mn_{0.2}$ alloy: Ryun-Ho Kwak (Korea Institute of Industrial Technology), Seok Su Sohn* (Korea University), Hyung-Ki Park*, and Taejun Ha* (Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Hydrogen storage, Titanium alloy, Activated hydrogenation kinetics, SEM-EBSD, Grain size

This study investigated the microstructural features and the hydrogen absorption properties of as-cast, 10 h annealed, and 20 h annealed $TiFe_{0.8}Mn_{0.2}$ alloy samples. TiFe with the Body-Centered Cubic (BCC) B2 structure and Fe_2Ti with the C14 Laves hexagonal structure were observed in the alloy samples, and the amount of precipitated second phase Fe_2Ti within the TiFe matrix phase was significantly reduced in both 10 h and 20 h annealed samples. During the annealing treatment, $TiFe_{0.8}Mn_{0.2}$ alloy changes in terms of the equilibrium phase fraction and chemical composition were predicted through Thermo-Calc software calculation. When the samples were hydrogenated under 40 bar of hydrogen at 20 ºC, the 20 h annealed sample absorbed 1.6 wt% H_2 within the longest time among the three samples. The maximum hydrogen absorption capacities of the three samples were found to be the same, exhibiting a value of 1.81 wt% H_2. Furthermore, the Scanning Electron Microscope – Electron Backscatter Diffraction (SEM-EBSD) results showed that the annealing treatment increased the grain size of the B2 matrix by decreasing the grain boundary length. The long length of the B2 grain boundary due to the small B2 grain size appeared to assist the hydrogenation of the alloy by acting as pathways for supplying hydrogen to the inside of the alloy.

[전략3-5 | 15:40] 초청강연

금속 3D 프린팅을 응용한 형상기억합금의 제조 및 특성: 김도형 (영남대학교 신소재공학부), 박민수, 이욱진* (부산대학교 재료공학부)

Keywords: 형상기억합금, 적층제조, 3D 프린팅

형상기억합금(SMA, Shape Memory Alloy)은 상변태에 의해 외부 변형 후 특정 온도에서 원래 형상으로 복원되는 특성을 가지며, 항공우주, 의료, 스마트 소재 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 최근 레이저를 응용한 Direct Energy Deposition(DED) 및 Powder Bed Fusion(PBF) 금속 3D 프린팅 공정기술이 발전함에 따라, 형상기억합금의 기능성을 더욱 잘 활용할 수 있는 복잡한 형상 구현 및 맞춤형 제조에 대한 관심이 커지고 있다. 한 편, 높은 형상기억 특성을 보여서 기존 용해주조 및 소성가공공정으로 제작해 널리 사용되어 온 Ni-Ti SMA 합금계는 레이저를 통한 DED 혹은 PBF로 제작할 시 결함이 다량 발생하기 쉽고 조성제어가 어려운 문제점을 가지고 있으며 Cu 기반 SMA (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al 등) 는 구리의 높은 레이저 반사율 때문에 레이저 3D 프린팅 공정을 적용하기에 많은 제약이 따른다. 본 발표에서는 DED 및 PBF 공정으로 결함 없이 제작 가능한 Fe 기반 및 고엔트로피 기반 SMA의 레이저 3D 프린팅 기법 적용 사례를 소개하고 3D 프린팅을 통해 제작한 SMA의 미세조직적 특징 및 형상기억 특성에 대한 연구결과를 소개할 예정이다.

[전략3-6 | 16:05] 초청강연

타이타늄 합금의 적층제조 후 후처리 조건에 따른 기계적 특성 변화: 김정기* (경상국립대학교)

Keywords: 타이타늄, 적층제조, 열처리, 인장시험, 변형기구

고강도 Ti-6Al-4V 합금은 발사체와 무인기구조체 등 우주항공 분야에 널리 활용되나, 상대적으로 떨어지는 절삭성으로 인해 복잡 형상을 갖는 부품 제조에 한계점을 보이고 있다. 레이저 기반 적층제조는 상기 문제를 해결함에 있어 적절한 공정으로 각광받고 있으나, 반복적인 용융-응고 사이클에 형성되는 준안정 미세조직은 기존 Ti-6Al-4V 합금 단련재 대비 높은 강도를 달성할 수 있지만 연신율 및 피로특성의 감소를 유발할 수 있다. 따라서, Ti-6Al-4V 합금 조형 부품의 신뢰성 향상을 위해서는 후열처리의 추가가 필수적이며 이에 따른 연구는 2010년 후반부터 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 Ti-6Al-4V 합금의 후열처리는 Mill Annealing과 Beta Annealing으로 나뉘며, 각각의 열처리에 따라 적층제조된 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 특성 및 피로균열 특성의 제어가 가능하다고 보고되어 있다. 상기와 같이 후처리가 기계적 특성 변화에 영향을 미친다는 보고들이 있었음에도 불구하고 아직까지 각 열처리 조건이 소재의 변형기구에 미치는 영향은 아직까지 명확히 밝혀지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 레이저 용융 증착 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금을 각각 Mill Annealing과 Beta Annealing 하여 상온-고온에서 인장시험을 했을 때 기계적 특성과 변형기구 변화를 분석하였다.

[전략3-7 | 16:30] 초청강연

미소스케일 시뮬레이션을 활용한 Ti-X계 형상기억합금 개발: 고원석* (인하대학교)

Keywords: Shape-memory alloys, Phase transformation, Thermal expansion, Atomsitic simulations, Molecular dynamics

형상기억합금(shape-memory alloys)은 형상기억효과(shape-memory effect) 와 초탄성효과(superelasticity)를 바탕으로 항공기, 의료용 재료 등 다양한 분야에 지속적으로 응용되어 왔다. 이중 nitinol을 비롯한 Ti-X계 형상기억합금은 우수한 기계적특성, 내식성, 생

체친화성 등을 바탕으로 활용되는 대표적인 성분계이다. 최근에는 형상기억합금의 고전적인 활용에서 벗어나, 탄성 제어, 열팽창 제어, 복합재 구성 등을 통해 기존 재료에서 도달하지 못했던 물성 영역에 도달하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 미소스케일에서의 상변태 거동과 재료의 물성 발현과의 상관관계를 규명하려는 노력 역시 진행되고 있다. 이번 연구에서는 원자단위 전산모사(atomistic simulation) 기법들을 활용한 Ti-X계 형상기억합금 상변태 분석을 기반으로 열팽창 제어가 가능한 소재 개발의 가능성을 살펴보았다. 특히 응력유기 마르텐사이트 상변태에 의해 유발되는 형상기억합금 마르텐사이트 구조의 이방성 조절을 통해 재료의 열팽창을 맞춤형으로 쉽게 제어할 수 있는 방법을 찾고자 하였다. 기존 시행착오 접근법에서 벗어나, 상변태의 세부과정뿐만 아니라 미세조직 발현 및 그에 따르는 열팽창특성을 실시간으로 관찰할 수 있는 원자단위 전산모사를 통한 메커니즘 규명을 통해 새로운 열팽창 제어 합금 설계의 가능성을 살펴보고, 공동 실험 분석과 이론계산을 통해 이를 검증해보았다.

[전략3-8 | 16:55] 초청강연

Manipulation of the Elastocaloric Effect via Cu Supersaturation in TiCuNi-Based Shape Memory Alloys: 류욱하 (국립금오공과대학교), 박은수* (서울대학교)

Keywords: Shape memory alloy, Elastocaloric effect, Solid solubility, Cast alloys, Coefficient of performance

The Elastocaloric effect refers to the change in enthalpy as the applied external stress field changes. In most cases, the enthalpy changes originate from the martensitic phase transformation in shape memory alloys. Cooling system to make use of elastocaloric effect has been recognized as a promising alternative to the vapour compression cooling system, owing to the high coefficients of performance (COP). For realizing high COP in elastocaloric effect, narrow hysteresis and large amount of latent heat of martensitic phase transformation should be obtained. Although the largest latent heat of martensitic transformation was reported in NiTi SMAs, COP of the alloy system is not good as other SMA systems. Temperature change measurements in shape memory alloy systems of Ni-Ti(~17K), Co-Ni-Al(~3 K), Cu-Al-Zn(~6 K), Cu-Al-Ni(~14 K) and Ni-Fe-Ga-Co(~10 K) have been reported. Among them, Cu-Al-Zn alloy system has been demonstrated to have excellent COP as a result of its significantly low hysteresis, but the temperature change is not promising for real cooling system. In the present study, we developed novel TiCu-based multicomponent super-elastic alloys extremely supersaturated with Cu, and investigated the temperature change and mechanical hysteresis for elastocaloric cooling system. We suggested the compositional dependence of mechanical hysteresis and temperature change of martensitic transformation and the methodology for optimizing the performance of elastocaloric cooling. It is expected the methodology can be used as a useful guideline for optimizing the characteristics through tailoring the composition of the shape memory alloy in various alloy systems in the future. In addition, this study can be applied to the design of high efficient heat exchange system for home appliances and other products such as refrigerators.

제12회 첨단 융복합 분석기술 심포지엄
Room 303, 4월 24일

[융복합1-1 | 09:00] 초청강연

Microstructural Characterization of Materials by TEM (II): Defect Analysis: Yoon-Uk Heo* (POSTECH)

Keywords: Transmission electron microscopy, Defect analysis, Dislocation, Stacking fault, Twin

Recent progress in technical development brings the importance of defect analysis in the nanometer or sub-nanometer range. Transmission electron microscopy (TEM) shows an ability of atomic or angstrom level analysis among the various analytical methods. Moreover, TEM has diverse characterization abilities on a fine scale, including chemical and crystallographic analyses. This presentation introduces the fundamentals of defect analysis in TEM. The principle of image and diffraction pattern formations in crystalline defects, such as dislocation, stacking fault, and twin, will be explained. Practical examples in TEM characterization of crystalline defects will help the understanding of the defect characterization in TEM.

[융복합1-2 | 10:00] 초청강연

EBSD를 이용한 메조스케일 미세구조 분석: 강주희* (웨이브센스)

Keywords: EBSD, SEM, 미세구조, 집합조직, 정밀분석

EBSD 분석은 금속, 세라믹 및 기능 소재의 미세구조와 집합조직 해석을 위해 널리 사용된다. 2010년대 후반부터 주사전자현미경 분해능 향상 및 전류밀도 향상, CCD 검출기 한계를 넘어선 CMOS EBSD 검출기 개발로 이전에는 EBSD 분석이 어려웠던 전자빔에 취약한 소재나 수백nm 크기의 미세구조도 비교적 용이하게 분석할 수 있게 되었다. 또한 EBSD 분석으로 TEM 분석 대비 비교적 넓은 영역에서 미세조직 데이터를 획득할 수 있고 초당 수천 픽셀 이상 분석 속도를 얻을 수 있어 수mm 이상 대면적 분석도 가능하게 되어, 통계적인 미세구조 및 집합조직 해석 방법으로서 활용된다. 이와 같이 EBSD는 다양한 결정상 미세구조의 정량적으로 분석하는데 필수적이다. 본 연구에서는 EBSD 기본원리부터 시편전처리 및 활용 예시에 대해 소개하고자 한다. 대부분 금속 및 세라믹 소재에는 기계연마나 전해연마를 적용하지만, 배터리 및 도금 소재와 같이 부식과 산화에 취약한 소재는 건식방법인 이온밀링이나 FIB법으로 시편전처리를 한다. 또한 대칭성이 좋지 않아 패턴 인덱싱이 부정확하거나 변형이 심해 Kikuchi 패턴이 선명하지 않은 소재에는 indexing rate를 향상시킬 수 있는 pattern matching indexing법을 추가적인 후처리방법으로 사용하며, 결정구조가 비슷한 다상을 구분하는 데는 EDS-EBSD 동시분석을 이용하기도 한다. 이러한 다양한 소재의 여러 EBSD 분석 사례를 알아보도록 한다.

[융복합1-3 | 11:00] 초청강연

중성자회절법을 이용한 금속재료의 응력, 변형, 미세구조 분석: 우완측* (한국원자력연구원)

Keywords: 중성자회절, 잔류응력, 변형거동, 미세구조, 적층결함

중성자 회절 현상을 이용하여 금속재료의 기계적 물성 (응력, 변형) 및 미세구조 특성 (적층결함, 전위밀도)을 분석하는 원리와 측정 연구 예를 소개하고자 한다. 다결정 금속재료에 중성자빔을 조사하면 브레그 법칙에 따라 회절현상이 발생되고 측정되는 회절파로부터 다음의 정보를 얻을 수 있다. 1) 회절파의 위치변화로 결정 격자 면간 거리 결정하여 하여 잔류응력 분석, 2) 인장/압축시 면간 거리 변형량을 결정하여 상 또는 결정면 간의 변형거동 분석 및 회절파 크기 변화로 상변화나 우선방위 분포 분석, 3) 금속소재 결함에 의한 회절파의 모양 변화로 적층결함확률/에너지 및 전위밀도 정량 분석. 국내외 대형연구 시설에 구축된 중성자 회절장치를 이용한 몇 가지 측정 예, 3D 프린팅 소재 잔류응력, 자동차용 고장력강의 인장시 변형거동, 중엔트로피 강에서의 적층결함 에너지 및 전위밀도 분석 결과를 보여주고자 한다.

[융복합2-1 | 14:00]

A combined STEM and APT observation of twinning-induced pipe diffusion from disordered to ordered : Jae Bok Seol* (Kookmin University)

Keywords: STEM

The dynamic interplay between solutes and planar faults has determined the high-temperature properties of superalloys. However, quantification of twin boundaries formed during creep tests of L12 particle-hardened superalloys, with their impact on the materials, has not been proven experimentally. We conduct scanning transmission electron microscopy and atom probe tomography to provide direct evidence of physio-chemical features responsible for the high-temperature twin boundaries, including Cottrell atmosphere and Suzuki segregation-associated phase transformation inside L12 particle, for a Ni base superalloy upon creep loading at 930 ºC. Further, we will show that twin boundary initiates the pipe diffusion along energetically dissociated dislocations within L12-ordered structure.

[융복합2-2 | 15:00] 초청강연

나노인덴테이션을 이용한 금속재료의 기계적 물성 측정: 김주영* (울산과학기술원)

Keywords: 나노인덴테이션, 나노역학, 압입크기효과, 금속재료

나노스케일에서 강도, 연성 등의 기계적 물성은 재료의 크기에 의존하는 특성을 보이기도 한다. 나노스케일에서 크기에 의존하는

재료의 기계적 특성을 정확하게 이해하기 위해서는 나노역학에 기반한 측정이 우선되어야 하며, 나노인장, 나노압축, 나노압입시험법 등이 활용된다. 나노역학 측정에 기반하여, 나노스케일 구성 재료를 포함하는 기계적 성능이 향상된 재료 개발 연구가 가능하다. 본 발표에서는 미세 영역에서 기계적 물성을 측정하는데에 널리 활용되는 나노인덴테이션 시험법의 원리 및 응용 연구에 대해 소개한다. 나노인덴테이션 시험을 구조용 금속재료에 활용하는 경우에 중요시 되는 시험편 준비과정, 압입크기효과 해석 등의 기술에 대해 소개한다.

[융복합2-3 | 15:30] 조청강연

Scale-bridging analysis of defects in fcc-based steel: 이태호*, 하헌영, 김성훈 (한국재료연구원), 손광석 (동아대학교), 신은주, 우완측 (한국원자력연구원), 정재석 (두산에너빌리티)

Keywords: 변형기구, 전위, 적층결함에너지, neutron diffraction, TEM

철강재료의 고기능 고성능화 구현을 위한 노력은 경제성을 담보하면서 동시에 소성변형 시 재료의 물성을 극대화할 수 있는 방향으로 연구 개발이 진행되어 왔다. 본 발표에서는 면심입방 결정구조를 갖는 오스테나이트계 TRIP(TRansfomation-Induced Plasticity) 및 TWIP (TWinning-Induced Plasticity) 강의 소성변형 시 생성되는 변형기구 해석을 위해 전위 구조를 중심으로 한 다차원 분석법 (Scale-bridging analysis)을 이용한 사례를 소개하고자 한다. 먼저 기존에 제시된 면심입방 결정구조의 변형 기구에 지배적 인자라고 알려진 적층결함에너지 측정을 위해 중성자 회절 분석을 이용한 연구결과와 이에 대한 이슈 사항(문제점 및 한계)들을 분석하였다. 또한 이를 극복할 수 있는 새로운 개념의 변형기구 모델 제안을 위해, 소성 변형 시 완전전위가 어떤 형태의 부분전위로 분해되는지가 변형기구를 이해하는 주요한 인자임을 제안하고자 한다. 변형유기 마르텐사이트 변태와 변형쌍정 형성을 야기시키는 부분전위의 역할에 대한 TEM 분석결과를 토대로 변형쌍정의 경우 Shockley partial dislocation만으로 형성이 가능한 three-layer twin model이 주된 형성기구였고, 변형유기 마르텐사이트 변태의 경우 기존에 알려진 fcc-bcc direction phase transformation 이 아닌 fcc-hcp-bcc 순차적인 상변태에 기반한 전위모델을 제안하고자 한다.

[융복합3-1 | 16:00] 조청강연

전자현미경-나노인덴터 활용 원자력 구조소재 조사손상 분석: 진형하*, 임상엽, 김성우 (한국원자력연구원)

Keywords: 원자력 구조재료, 조사손상, 전자현미경, 나노인덴테이션, 가속기 조사

원자력 구조재료는 중성자 조사 환경에 노출됨에 따라 미세조직이 변화하고 기계적 특성이 저하되는 문제를 겪는다. 이러한 조사손상은 원자로의 장기적인 안전성과 신뢰성에 큰 영향을 미치므로, 이를 정밀하게 분석하고 평가하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히, 다양한 첨단 소재 분석 기법이 적용되면서 조사손상의 메커니즘을 보다 정밀하게 이해할 수 있는 기반이 마련되었다. 대표적인 분석 기법으로는 고해상도 전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM / Scanning Electron Microscope, SEM)이 있다. 조사된 시편에서 결함 구조(조사결함, 기지상의 변화, 석출물 형성 등)를 파악할 수 있으며, 입계 특성과 미세조직 변화를 체계적으로 분석하여 조사 취화와 같은 기계적 특성 저하의 원인을 규명할 수 있다. 중성자 조사손상을 보다 단기간 내에 모사하기 위해 가속기 기반의 이온(H, He, Fe, Kr 등) 조사 기법이 활용되고 있다. 이온 조사는 다양한 조사 변수(조사량, 온도 등)에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 비교 분석할 수 있는 장점이 있으며, 실제 중성자 조사와의 손상 메커니즘을 비교함으로써 그 유효성이 검증되었다. 가속기 조사재는 주로 마이크로 스케일에서 표면 손상층을 유도하는데, 이에 대한 기계적 물성 변화를 평가하기 위해 나노인덴터(Nano indenter)를 활용한 마이크로 역학 물성 평가 기법이 적용되고 있다. 이를 통해 조사손상이 기계적 거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있으며, 조사량(fluence) 증가에 따른 경도 변화 및 변형 거동의 상관관계를 도출할 수 있다. 또한 전자현미경을 통한 미세조직 분석과 연계하여 조사손상이 원자력 구조재료의 기계적 거동에 미치는 영향을 보다 체계적으로 연구하고 있다. 국내에서도 오스테나이트 스테인리스강, 저탄소강, 니켈 합금 등 상용 원자로 구조재료들을 대상으로 가속기 조사 후 전자현미경 분석 및 마이크로 역학 물성 평가 연구가 활발히 진행되어 조사손상에 따른 미세조직 변화와 기계적 물성 변화 간의 상관관계를 규명하는 데 중요한 성과를 거두었다. 최근에는 Focused Ion Beam (FIB) 기술을 활용하여 마이크로 시험편을 제작하고, SEM 내에서 실시간 나노 인덴테이션 실험을 수행하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 한국원자력연구원은 조사된 마이크로 영역에서의 변형 거동을 직접 관찰하고, 나노스케일에서 발생하는 변형 거동 등을 실시간으로 분석할 수 있는 연구 인프라를 구축하고 기존 벌크 스케일 실험에서 얻기 어려운 미세구조와 기계적 특성 간의 상관관계를 보다 정밀하게 분석하는 역량을 지속적으로 확보하고 있다.

[융복합3-2 | 16:30] 조청강연

초내열 소재의 소개 및 연구 동향: 숑기안*, 박강현, 이강진 (공주대학교)

Keywords: 초내열 소재, 미세조직, 합금 설계, 고온 물성

초내열 소재는 극한 환경에서도 우수한 기계적 강도와 내산화성을 유지하는 핵심 재료로, 발전·항공·우주 산업에서 필수적이다. 본 발표에서는 대표적인 초내열 소재군(철계 내열강, Ni기 초합금, 내화합금, 고엔트로피 합금)의 미세조직적 특징과 고온 물성 개선을 위한 합금 설계 방식을 소개한다. 또한, 최근 연구 동향을 정리하고, 소재 성능 향상을 위한 주요 기술적 이슈를 바탕으로, 초내열 소재 기술 개발 방향을 다루고자 한다.

[융복합3-3 | 16:55] 조청강연

스테인리스강의 초극저온 불연속 변형 메커니즘 및 수소 취성 규명: 김유섭, 강태욱 (한국원자력연구원), 홍순구, 이수열* (충남대학교)

Keywords: 초극저온, 극저온 불연속 변형, 수소 취성, 스테인리스강

탄소 중립 실현을 위한 친환경 수소 에너지의 중요성이 전 세계적으로 확대됨에 따라, 첨단 수소 응용 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히, 액체 수소는 청정 에너지 시스템 중에서 가장 높은 에너지 밀도를 제공하여, 지속 가능한 미래 에너지의 해결책으로 더욱 주목받고 있다. 초극저온 환경에서의 소재 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서 극저온 불연속 변형에 대한 연구는 필수적이며, 액체 수소 활용을 위한 초극저온 환경에서의 수소 취성에 대한 연구도 함께 수행되어져야 한다. 극저온 불연속 변형의 원인으로는 초극저온 환경에서 제한된 전위의 열 진동 에너지가 고려되었으며, 갑작스러운 전위의 움직임으로 인해 발생하는 국부적인 소성 변형 및 열에너지에 따라서 다양한 형태의 극저온 불연속 변형이 발달한 것을 확인했다. 또한 초극저온 환경에서도 수소취성이 발생한 것을 확인했으며, 수소 취성에 따른 변형, 파괴 및 불연속 변형 메커니즘에 대해 조사하였다. 본 연구는 극저온 불연속 변형 메커니즘 및 초극저온 수소취성에 대한 근본적인 이해를 심화시키며, 액체 수소 저장 및 우주 탐사 기술을 포함한 극저온 응용 분야에서 첨단 소재 설계의 기반을 마련하는 데 기여할 것으로 기대된다.

제101회 철강기술 심포지엄: 스테인리스 산업의 새로운 도약을 위한 미래 전략

Room 한라A, 4월 24일

[기술1-1 | 10:10] 초청강연

저탄소 철강 원료·공정·제품 관련 KEIT 사업 및 과제 기획현황: 이광석* (한국산업기술기획평가원)

Keywords: 철강산업, 공정전환, 녹색철강, 발전전략, 한국산업기술기획평가원

철강산업은 전후방 연관산업에 미치는 파급 효과가 매우 큰 국가 주력 제조업 밸류체인의 여전한 출발점이다. 산업혁명 이후 전통적으로 이어오고 있는 대량생산 기반 제철 기술은 기본적으로 1. 석탄을 열원 및 환원제로 사용하여 2. 철광석으로부터 철을 생산하는 탄소 집약적인 특징으로 인해 제조업 이산화탄소 배출의 주범으로 인식되고 있다. 이의 극복을 위해 주요 선도국들은 탄소배출을 자국 제조업 보호를 위한 새로운 무역장벽으로 활용하는 추세인 반면, 우리나라는 에너지 소비가 많은 제조산업 중심의 경제구조임에도 불구하고 재생에너지의 생산이 상대적으로 불리한 지리적 환경 등 탄소중립 활동의 이행 여건이 어려운 상황이다. 더불어 철강산업의 대표적 수요산업군인 자동차, 에너지, 가전 등의 최종 고객사들은 향후 저탄소제품에 대한 수요증가에 대비하며 공급사들에 저탄소 강재 공급 요구사항을 점점 구체화하고 있으며, 이에 대한 대비책 부재는 결국 국내 철강산업의 시장경쟁력 악화로 이어질 우려가 상존한다. 사실 국내 고로-전로 공정의 연원료 효율이 이미 세계 최고 수준에 근접하여 추가적인 기술개발을 통한 이산화탄소 배출량의 '근원적인' 저감은 어려운 상황으로, 탄소배출량 저감을 위해서는 철광석/코크스/석회석을 원료로 활용하는 고로 공정 비율은 점진적으로 저감될 것으로 예상된다. 이는 단·중기적으로는 철스크랩 활용 전기로의 성장을, 장기적으로는 직접환원철을 전기로로 가공하여 탄소배출량을 대폭 감소시키는 수소환원제철과 같은 기술혁신 기반의 제철산업 공정 전환을 야기할 것을 의미하며, 궁극적으로는 수요산업 및 물류와 연계해 스크랩 및 직접환원철의 생산·가공·거래를 위한 녹색철강 허브를 형성할 것으로 전망된다[1]. 국내 저탄소 철강 원료·공정·제품 기술개발을 지원하는 미션을 담은 '저탄소 철강생산 전환을 위한 철강산업 발전전략'을 산업통상자원부에서는 2023년 2월에 발표한 바 있고, 이의 이행을 위해 다양한 사업 및 과제를 기획 및 지원 중이며. 본 발표에서는 철강산업 발전전략의 차질없는 수행을 위해 한국산업기술기획평가원이 수행 중인 전략, 사업 및 과제기획 현황을 소개하고자 한다.

[1] 이광석, 글로벌 수소 환원 제철 기술 정책 지원 동향 및 시사점, 재료마당 2025년 1월호

[기술1-2 | 10:45] 초청강연

글로벌 스테인리스 산업의 동향 및 주요 이슈: 이진우* (포스코경영연구원)

글로벌 철강 수요는 성장을 주도했던 중국 시장의 침체, 러시아-우크라이나 전쟁과 같은 지정학적 리스크의 장기화 등 영향으로 부진이 지속되고 있다. 경제성장률 대비 철강수요가 부진한 구조적 현상이 고착화 되고 있다는 점도 우려스럽다. 한국의 철강 시장은 이미 긴 低성장의 터널에 진입한 것으로 보이며, 연간 6천만톤에 육박했던 국내 철강수요가 5천만톤 이하 수준으로 줄어드는 수축의 시대에 대비해야 하는 상황이다. 글로벌 스테인리스업계의 여건도 녹록하지 않다. 중국과 인도네시아 지역의 공급 과잉에 따라, 역내 스테인리스 관련 업체들의 수익성 부진은 심각하다. 중국의 스테인리스 수요가 부진함에도 불구하고, 중국 스테인리스 메이커들을 생산을 줄이지 않고 있으며, 저가 스테인리스 제품의 역내 수출을 확대하고 있다. 이에 따라 글로벌 스테인리스 업체간의 가격 경쟁이 심화되는 현상은 당분간 지속될 것으로 보인다. NPI 기반의 중국계 스테인리스 업체 대비 원가 경쟁력이 열위한 유럽, 일본, 한국 등 선진국 스테인리스 메이커들은 사업 구조조정에 돌입했다. 생산 설비의 축소 최적화, 고부가가치제품 비중 확대를 통한 차별화, 가격 정책의 변화, 자국 시장 보호 정책 등 다양한 수단을 구사하며 돌파구를 모색하고 있다. 특히, 일본 스테인리스 업계의 변화가 흥미롭다. 일본제철그룹은 하시모토 CEO 주도로 국내 스테인리스 업계의 재편, 설비 최적화 작업, 고가 판매 정책 구사 등 개혁을 진행해 왔으며, 수익력 개선 측면에서 성과를 보여주고 있다. 최근에는 스테인리스 자회사를 일본제철 본사에 통합하는 작업을 진행 중이다. 통합을 통해 탈탄소 요구 및 미래 시장의 니즈에 대응하기 위한 연구개발 능력을 제고하고, 고객 대응력도 강화하려는 의도이다. 수요 증가가 기대되는 전기차 배터리용 스테인리스 수요, 수소 및 암모니아 등 신에너지 분야 스테인리스 수요에 대응하기 위한 제품 개발 및 솔루션 제공 능력을 높이고자 한다. 유럽 스테인리스 업체들의 경우, 고합금강 사업을 확대하기 위한 M&A를 추진하는 등 생존을 모색하고 있다. 글로벌 스테인리스 업체들의 당면한 경영 여건, 생존을 위한 전략, 미래 대응 방향을 점검해 보고, 국내 스테인리스 업계의 연구개발 방향성에 대한 시사점을 살펴보고자 한다.

[기술1-3 | 11:20] 초청강연

미래를 개척하는 스테인리스강 개발 동향: 김성준* (포항공과대학교)

Keywords: 철강, 스테인리스, 용도 개발, 기술 개발

철강은 현대 산업의 근간을 이루는 핵심 소재이며, 특히 스테인리스강은 우수한 내식성과 다양한 특성으로 인해 광범위한 분야에서 활용되고 있으며 해마다 5~6% 정도의 성장을 보이고 있는 중요한 소재이다. 한국 스테인리스강 산업은 세계적인 경쟁력을 갖추고 있으나, 최근 글로벌 경기 침체, 중국의 저가 공세, 탄소중립 요구 등 새로운 도전에 직면하고 있다. 본 심포지엄에서는 한국 스테인리스강 산업이 직면한 문제점을 분석하고, 이를 해결하기 위한 기술적 방향을 제시하며, 미래 시장을 선도할 새로운 용도 개발 및 탄소중립 실현 방안을 모색하고자 한다. 특히 전기자동차를 비롯한 모빌리티 및 수소 경제 구현을 위한 핵심 인프라 소재로서의 스테인리스강, 프리미엄 가전시장 공략을 위한 노력, 재생 에너지와 친환경 건축 자재 등 새로운 용도 개발과 제품과 공정에서의 신기술 개발을 위한 철강 선진국들의 노력 등을 소개할 예정이다.

[기술2-1 | 14:00] 초청강연

차세대 SMR 기술 및 적용 소재 전망: 김동진*, 김민철, 황성식, 강석훈, 김대종, 진형하 (한국원자력연구원)

Keywords: 소형모듈원전(SMR), 차세대 SMR, 저합금강, 스테인리스강, 혁신제조기술

가동중인 원자력발전소는 1000MW 이상의 대형원전인 반면, 300 MW 이하의 소형모듈원전(SMR, small modular reactor)이 많이 회자된다. 바닷가 부근의 제한된 공간에 건설되는 대형원전에 비해 작은 크기의 소형원자로는 공간의 제약이 적어 최신기술의 전력 집중화 요구로 인해 필요성은 점차 증대될 것으로 추측된다. SMR 은 냉각재 종류에 따라 여러가지로 분류할 수 있다. 최근 혁신형 SMR 이라고 명명되는 i-SMR 은 물을 냉각재로 사용하는 SMR 이다. 반면 물이 아닌 용융염을 냉각재로 사용하는 용융염로(MSR, molten salt reactor), 헬륨가스를 냉각재로 사용하는 고온가스로 (HTGR, high temperature gas reactor)는 혁신형 SMR 보다는 현실화 시기가 늦어 차세대 SMR 에 해당된다. 물을 사용하는 혁신형 SMR 은 대형원전의 축적된 기술을 활용할 수 있어 상용화를 위해 필요한 시간이 가장 짧다. SMR 은 건설기간이 짧고 이동이 용이해야 하므로 기존에 사용되는 소재와는 다른 경량소재, 기존의 제조기술과는 다른 혁신제조공정을 고려하고 있다. 대형원전에서 사용되는 SA508 grade 3, class 1에 비해 강도가 높은 class 2를 고려하고 있다. 또한 대표적인 제조기술이 전자빔 용접기술과 레이저클래딩 기술이다. 그러나 원자력발전소 적용을 위해서는 중성자 조사취화에 대한 마진이 확보되어 있음을 입증해야 하므로 제조 및 평가를 통한 재료특성 검증이 필수적이다. 또한 조사취화에서 비교적 자유로운 오스테나이트 계열의 스테인리스강을 원자로 용기로 적용하려는 시도가 있다. 전열관은 가동원전에서 성능이 검증된 Alloy 690이 채택될 확률이 매우 크다. 그러나 좁은 공간에 밀집도를 높이기 위해 U 벤드 형태가 아닌 아직 적용된 사례가 없는 헬리컬 형태의 전열관을 고려하고 있다. 한편 차세대 SMR 중, MSR 의 원자로를 SS316H를 우선적으로 고려하고 있다. ASME section III division 5에 등재된 소재를 이용해 설계를 할 때 고온성능이 우수하면서 부식성능이 비교적 양호한 재료이기 때문이다. 또한 HTGR 는 우선적으로 저합금강을 원자로용 소재로 고려하고 있으며, 출구온도에 따라 다른 소재가 후보가 될 수 있다. 차세대 SMR 은 가동온도, 응력 상태를 고려해 코드에 등재되어 있는 재료를 이용해 설계한다. 그러나 선택된 재료의 SMR 가동환경 (중성자, 냉각재 영향 등) 에서의 장기간 재료열화, 혁신제조기술 적용시 해당 부품의 건전성, 소재의 가공성은 설계된 SMR의 실물구현을 위해 매우 중요한 기준이 된다.

[기술2-2 | 14:20] 초청강연

CCS 산업동향과 LCO2 수송/주입 유동라인 구축: 김영준*, 우남섭, 한상목, 이왕도, 조해진, 송영수, 박범철 (한국지질자원연구원)

Keywords: CCS, 탄소중립, 포집-수송-주입, 해양 LCO2

본 연구에서는 한국지질자원연구원 자원개발플랜트연구실에서 수행하고 있는 해양 CO2 수송, 주입과 관련한 연구 소개 및 해양 LCO2 수송/주입 모사 실험을 수행할 수 있는 테스트베드에 대해 소개하고자 한다. 대규모 CO2 포집-수송-주입 복합기능선박 설계 프로젝트의 경우 CO2 포집-수송-주입이 가능한 복합기능선박을 설계하고, 부유식 CO2 해양 주입시설에 대한 기술개발 및 실증을 수행하는 것이 목표이다. 한국지질자원연구원은 부유식 CO2 임시저장시설 모사 설비 실험을 통해 해상 실증을 지원하는 연구를 수행하고 있다. 해양 CO2 주입시스템 핵심기술 자립화 프로젝트의 경우 해저에 CO2를 주입할 수 있는 시스템 및 공정을 설계하는 것이 목표이다. 한국지질자원연구원은 해저 주입시스템을 모사한 수직 CO2 유동라인을 구축하여 LCO2의 유동거동, 상변화 등의 연구를 진행하고 있다. 이러한 연구를 통해 CCS 핵심 기술인 해저주입 기술 확보가 가능하며, CO2 수송, 주입 효율 향상과 비용 절감에 필요한 기술 정보를 제공해줄 것으로 기대된다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20226A10100020) 및 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술원의 지원(RS-2022-00143644)을 받아 수행한 연구입니다.

[기술2-3 | 14:40] 초청강연

액화수소 저장탱크의 시장 및 기술동향: 주종홍* (하이리움산업)

Keywords: 액화수소, 충전소, 초저온, MLI 단열, 안전

수소의 대량 사용을 위해서는 운반과 저장의 효율성이 높아야 하나, 수소는 부피당 에너지 밀도가 낮아서 그동안 압축수소를 주로 사용해 왔다. 압축수소는 압력이 증가할수록 동일 부피에서의 수소 저장 중량이 증가하나, 압력에 의한 위험도도 증가하며, 보다 많은 수소를 운반 저장하기에는 한계가 분명하다. 따라서 압축비가 800배에 달하는 액화수소가 그 대안이며, 본 강연에서는 액화수소를 저장 운송하는 탱크의 제작기술에 대한 개요를 알려드리려 한다. 20 K의 액화수소를 저장하는 소재의 요구조건과 낮은 잠열등으로 인한 기화량을 억제하는 단열 기술 및 배관 구조등에 대하여 알려드리려 한다. 또한 수소로 인한 안전사고 유형을 분석하고, 그 대책도 알려드리려 한다.

[기술2-4 | 15:0] 초청강연

그린수소 생산 국내외 수전해 기술개발 현황: 조현석* (서강대학교)

Keywords: 그린수소, 수전해, 가격, 응답성, 내구성

본 발표에서는 탄소중립 달성을 위해 친환경 에너지캐리어로써 주목받고 있는 그린수소(H2) 생산 기술개발 동향에 대해 논의하고자 한다. 그린수소의 가격경쟁력 확보를 위해서는 장치에 적용되는 고가 소재의 저가화와 단위면적 당 생산할 수 있는 수소생산량을 극대화하는 생산밀도 향상, 및 가동률 극대화를 위한 내구향상 전략이 요구된다. 특히 변동성이 있는 전력원과의 수전해 시스템의 연계시 발생하는 저부하 영역 운전시 가스섞임에 의한 불안전성과 고전류 영역 운전에서의 낮은 효율 및 내구저하 이슈를 극복하고자 전극, 분리막, 확산체 등의 핵심 소재의 고도화, 및 수전해 스택 및 시스템 제어까지 다각도로 최신 연구내용을 소개하고자 한다.

[기술2-5 | 15:20] 초청강연

발전용 연료전지 및 고온 수전해용 스테인리스 개발: 김종희*, 공정현, 손성강, 조기훈 (포스코), 안진수 (포스코홀딩스)

Keywords: .

발전·선박용 고체산화물 연료전지(SOFC) 및 고체산화물 수전해(SOEC) 기술은 탄소를 배출하지 않는 미래 에너지원 으로 주목받고 있는 수소의 활용 및 수소의 생산기술로 주목받고 있습니다. SOFC 및 SOEC는 작동환경이 800ºC 내외의 고온산화 환경에서 작동하며, 분리판은 셀의 전기적연결, 가스분리, 기계적 강성유지 등 핵심기능을 수행하므로 이에 사용되는 스테인리스강 소재는 고온 내산화성, 고온 계면 전기전도성, 낮은 열팽창계수, 내Cr휘발성, 기계적 특성이 필요합니다. 현재까지 상용화된 분리판용 스테인리스강 소재는 내산화성을 고려한 고가의 희토류원소를 첨가한 소재가 개발초기 단계부터 사용되었습니다. 포스코는 다년간 노력을 통하여 대량 상업 생산이 가능하고 고온 SOFC 및 SOEC 작동환경내에서도 우수한 요구물성을 확보할 수 있는 희토류원소를 첨가하지 않은 고유 스테인리스강 (POSCO460FC)을 개발하고, 다년간 실증평가를 통하여 본격 양산화를 실현하였습니다. 본 발표에서는 국내 유관 산업발전을 위해서 본 개발 스테인리스강을 공유하여 관계기관간의 협력방안을 모색하고자 합니다.

[기술3-1 | 16:00] 초청강연

자동차 차체용 스테인리스강 기술 개발 동향: 정재균* (현대자동차 기초소재연구센터 차체재료개발팀)

Keywords: 스테인리스강, 차체 부품, 충돌 성능, 부품 일체화, 자원 순환

차체 경량화 및 충돌 강화 성능 대응을 위해 초고장력 강판 및 이를 이용한 부품화 성형 기술은 글로벌 자동차 산업계에서 활발하게 진행되고 있다. 본 발표에서는 최근 스테인리스강판을 차체 외판에 최초 양산한 타사 사례 벤치마킹 내용을 공유하고 기존 스틸 강판 소재와는 차별화된 물성을 보유한 스테인리스 강판을 활용한 차체 바디 부품의 신규 접목 가능성을 고찰하고자 한다. 차체 측면 충돌 변형 거동 관점에서 통상적인 센터 필러 부품 설계 시 충돌 이후 침입량 저감을 통한 승객 보호 목적으로 해당 부품 상단부는 초고강도강 적용이 일반적이며 하단부는 국부 파단 방지 및 충돌 에너지 흡수 역할을 위해 상단부 대비 연성 재질을 채택한 설계 반영이 최근 추세이며 이를 부품화 하기 위한 주요 성형 공법으로는 차등 강도 TWB 소재를 활용한 프레스 공법이 주로 적용된다. 강도 대비 우수한 연성 특성을 가진 스테인리스강이 기존 센터 필러 하단부에 적용되는 강도급의 스틸 소재 대체 재질로 적용될 경우 향상된 성능 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상되며 양산화를 위해서는 상단부 스틸 재질과 도금 종류에 따른 이종 용접성 및 전착성 등 추가적인 요소 기술 검증과 더불어 스테인리스 소재 물성 최적화 연구가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다. 또한, 차체 플로어 및 대쉬 판넬 등 깊은 드로잉 성형이 요구되는 스틸 대물 부품의 경우 소재 고강도화를 통한 경량 설계에는 제약이 있어 다 피스 성형 부품과 소물 보강재 부품 등의 용접 공정을 통해 대물 완제품을 확보하는 경우가 대부분이나, 스테인리스강판 고려 시 고강도화를 통한 두께 박육화와 부품수 축소로 일체화가 가능하며 그에 따른 금형 투자비 절감, 생산 공정 사이클 타임 단축 등의 부가적인 이점을 고려하면 원소재 가격 상승 열세 요인이 부분적으로 상쇄될 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 자원 순환 생태계 구축 관련 재활용성이 용이한 스테인리스 소재 활용 프레임 타입의 차체 구조도 주목해 볼 필요가 있다. 전통적으로 스틸 프레임 도장 바디 구조인 버스 차체를 포함하여 신 구조 설계 필요성이 존재하는 PBV 목적 기반 차량 대상으로 프레임 종수 표준화 및 무도장 차체 구현 등을 통한 스마트 제조 생산과 사용 이후 폐기 단계 양질의 재생 원료로 회수되어 사용될 시 탄소 저감 활동 방향에도 도움이 될 것으로 예상된다. 끝으로, 우수한 내열 특성을 활용하여 전동화 차량의 열 폭주 현상 저감을 위한 방안으로 배터리 시스템 내의 구조 및 기능 부품 제조 시 후보군 소재로도 검토해볼 수 있을 것 같다.

[기술3-2 | 16:20]

전기차 배터리셀 케이스용 스테인리스강 개발적용: 김영호*, 정양진, 정한용 (포스코), 엄지용 (자동차부품연구원)

Keywords: .

국내외 전기차 시장은 '22년 800만대를 초과하여 생산되며 연평균 10%의 빠른 속도로 성장하고 있고 203년에는 40%이상의 성장율을 예측하고 있고, 따라서 이들 전기차에 사용되는 배터리의 수요 또한 급증하는 추세이다. 배터리는 에너지를 보관하는 셀과 이를 감싸는 모듈 및 팩케이스로 구성되는데, 현재 전기차에 널리 사용되는 셀은 원통형, 각형 및 파우치 형의 3가지로 분류된다. 최근 LiB 배터리의 열폭주로 인한 전기차화재에 대한 우려로 이들 셀케이스용 소재로 내열성이 우수한 스테인리스강을 적용하는 시도가 있다. 대표적인 셀케이스 소재는 파우치셀과 각형셀의 알루미늄이 있으며, 원통셀은 니켈도금강판이 있다. 스테인리스강은 이들 소재들에 대비하여, 고온에서의 파단저항성이 우수하므로, 배터리의 내화재성을 개선시킬 수 있다. 하지만, 스테인리스강의 적용을 위해서는 다양한 전해질환경에서의 내화학안정성, 드로잉등 심가공시의 성형성등의 이용기술에 대한 사전 검토가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 다양한 스테인리스강의 전해질내 LiB배터리 작동전위범위내 전기화학특성을 고찰하고, 원통형과 각형등 심가공성이 요구되는 부품제작을 위한 최적성형조건, 그리고, 과충전시 파단시간등 고온안정성등을 기존재료와 비교하였고, 이를 통해서 배터리셀케이스용 적절한 스테인리스강 소재를 제시하고자 한다.

[기술3-3 | 16:40]

황화물계 전고체 배터리용 초극박 집전체 개발 현황 및 전망: 김기수* ((주)프렘투, POSTECH), 유신 ((주)프렘투), 이종람 ((주)프렘투, 서울대학교)

Keywords: 집전체, 황화물계 전고체 배터리, 동박, 스테인리스, 니켈 포일

리튬이온배터리(LIB)는 전기차(EV), 에너지저장장치(ESS)에 적용되면서 시장이 폭발적으로 성장하고 있다. 특히, 전기차의 경우에는 2019년 2.6%에 불과했던 전동화율이 2023년도에는 16.7%로 증가했으며, 2035년까지 전기차 판매량은 연평균 15%의 높은 성장률을 가질 것으로 예상된다. 그러나 안정성, 성능, 가격 측면에서 추가적인 개선이 필요하다. 리튬이온배터리 내부에 인화성 액체 전해질을 포함하고 있어서, 배터리 제조 불량, 차량 사고 시 열폭주(Thermal Runaway)로 인한 폭발이나 화재 위험성이 높다. 높은

가격 및 에너지 밀도의 한계 때문에 주행 거리의 제한이 있으며 긴 충전 시간과 저온에서 배터리 출력 저하로 인해 전기차는 기존 내연기관 자동차에 비해 경쟁력이 낮은 문제 또한 크다. 이러한 문제를 해결하기 위해 차세대 배터리로서 고분자계, 산화물계, 황화물계 전고체 배터리가 개발되고 평가되어 왔다. 이 중에서 황화물계 전고체 배터리는 리튬이온배터리의 액체 전해질 수준의 높은 이온 전도도, 낮은 계면 저항, 폭발 위험이 없는 높은 안정성, 리튬 음극 적용으로 높은 에너지 밀도, 고속 충·방전 등의 장점을 갖고 있어서 글로벌 자동차 OEM 및 배터리 제조사에서는 2027~2030년에 황화물계 전고체 배터리를 양산하는 것을 목표로 기술 개발을 하고 있다. 황화물계 전고체 배터리가 전기차용으로 가장 유망하나 상용화를 위해서는 반드시 해결되어야하는 여러 가지 기술적 난제가 있다. 금속 소재 측면에서는 기존 리튬이온배터리에 사용되고 있는 동박 집전체(Cu Current Collector)가 황화물계 전고체 배터리에는 적용할 수 없어 신규 집전체 개발이 필요하다. 황화물계 전고체 배터리의 황화물계 전해질(Sulfide Electrolyte)은 황(Sulfur) 성분을 포함하고 있으며, 수분과 반응하여 황화수소 가스(H2S)를 발생시키는데 기존에 사용하는 동박 집전체는 동박과 반응하여 황화구리(Cu2S)를 형성하며, 부식되어 배터리 성능이 급격히 저하되는 문제가 있다. 또한, 황화물계 전고체 배터리 제조 공정 중에 고체 전해질과 활물질의 밀착력은 높이는 고온 고압 환경을 견딜 수 있는 높은 강도와 연신율이 필요하나 동박의 기계적 물성으로는 요구 특성을 만족시키지 못하고 있다. 본 발표에서는 이러한 동박의 단점을 해결하고 황화물계 전고체 배터리에 적용될 수 있는 차세대 집전체에 관한 개발 현황 및 전망을 다룰 예정이다. 초극박 금속 포일이 가능한 압연 스테인리스, 전해도금 니켈 포일, 니켈도금 동박, 철-니켈 합금박 등을 중심으로 집전체 시장 전망, 집전체의 역할 및 필요 물성, 집전체 기술 개발 현황 및 이슈(집전체 종류, 제조 방법, 장단점 등 기술 비교) 등 황화물계 전고체 배터리용 차세대 집전체 기술의 발전 방향을 살펴보고, 상용화를 위한 기술적 과제와 해결 방안을 논의하고자 한다.

[기술3-4 | 17:00]

항공소재 국산화의 필요성 및 Ti64합금 개발: 최미선*, 이현석 (포항산업과학연구원)

Keywords: 타이타늄, 타이타늄합금, 압연, 항공소재

타이타늄은 우수한 비강도, 내열, 내식 특성으로 항공기 구조물 및 엔진 부품 등에 필수적으로 사용되고 있으나, 국내 원소재(스폰지, 잉곳)와 전신재(판재, 봉재, 선재)의 수급은 대부분 미국, 러시아, 일본 등 해외 선진국에 의존하고 있어 소재 공급망 기반이 취약한 수준이다. 주요 선진국들은 타이타늄에 대해 전략 물자로 지정하여 완제품이 아닌 경우 수출을 제한하고 있으며, 특히 COVID-19 팬더믹과 러시아-우크라이나 전쟁으로 인해 항공, 방산, 의료기기 등 많은 산업분야에서 타이타늄합금 소재의 납기 지연이 장기화되고 있으며 비용이 상승하고 있는 실정이다. 또한, 대량 유입되고 있는 저가 중국재는 국내 시장을 잠식하고 있으며, 장기적 국내 타이타늄 산업의 경쟁력 약화, 품질 및 안전성 문제 유발, 기술발전과 산업 성장을 저해할 우려가 있다. 따라서 국내 타이타늄 항공산업의 자립을 이루고 글로벌 시장에서의 경쟁력을 확보하기 위해서는 항공소재의 국산화를 통해 안정적이고 비용 효율적인 공급체계를 구축하는 것이 요구된다. 현재 타이타늄 항공소재의 국산화는 초기 단계에 머물러 있다. 국내 일부 기업과 연구기관이 타이타늄 소재 개발 및 생산에 착수했으나, 여전히 기술적 난이도와 대규모 투자 부족으로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 철강제조용 후판 압연 설비를 이용하여 국산화 개발중인 두께 4인치 Ti-6Al-4V합금의 제조에 대해서 논의하고자 한다. 압연 하중은 약 2,000톤 이상으로 압연 하중과 두께 감소량은 양의 상관관계를 나타내었다. 압연 온도는 압연 패스 수가 감소함에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 소재 두께가 얇을수록 온도 감소가 급격 하였다. 후열처리 공정을 통해 항공소재 요구 물성을 만족하였으며 소재 국산화 가능성을 확인하였다.

New-Horizon : 유기, 무기 및 페로브스카이트 광전자소자 심포지엄

Room 한라B, 4월 24일

[광전자1-1 | 09:10] 초청강연

Pathways to High-Performance Perovskite Nanocrystals for Optoelectronic Applications: Bo Ram Lee* (Sungkyunkwan University)

Keywords: Perovskite Nanocrystals, Defect Passivation, Optoelectronic Devices, Core-Shell Engineering, Scalable Fabrication

Metal halide perovskite nanocrystals (PNCs) have revolutionized the field of optoelectronics, offering exceptional tunability, high photoluminescence quantum yield (PLQY), and efficient charge transport. Despite these advantages, their widespread implementation in high-performance devices is still hindered by inherent challenges such as surface and bulk defects, structural instability, and limited processability. Addressing these challenges requires a multi-faceted approach that integrates innovative materials design, defect passivation strategies, and scalable fabrication techniques. In this presentation, we outline key pathways toward achieving high-performance perovskite nanocrystals for applications in light-emitting diodes (LEDs), photovoltaics, and other optoelectronic devices. We explore defect mitigation strategies, including halide-rich surface treatments and core-shell architectures, which significantly enhance the stability and efficiency of perovskite quantum dots. Hybrid-ligand passivation is introduced as a method to suppress reduced-dimensional perovskite formation and improve charge injection. Additionally, we discuss the development of universal perovskite nanocrystal inks that enable scalable, solution-processed device fabrication with superior optoelectronic properties. By integrating these approaches, we demonstrate substantial improvements in external quantum efficiency (EQE), operational stability, and environmental robustness of perovskite-based optoelectronic devices. This comprehensive roadmap provides insights into overcoming current limitations and accelerating the commercialization of perovskite nanocrystals in next-generation displays, lighting, and energy applications.

[광전자1-2 | 09:40] 초청강연

Tailoring metal oxide nanoparticles for efficient quantum dot electroluminescent devices: 임재훈* (성균관대학교)

Keywords: 콜로이드 양자점, 양자점 전계발광소자, 전무기, NiO

Colloidal quantum dot-based light-emitting diodes (QD-LEDs) have shown significant advancements in peak efficiency and brightness, positioning them as promising candidates for next-generation displays, particularly in augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applications. AR/VR displays require ultra-high brightness, often exceeding 10,000s nits, to overcome optical losses in the system. While QD-LEDs have demonstrated potential for high-brightness devices, their operational stability is limited by organic hole transport layers (HTLs) that degrade at elevated brightness levels. To address this limitation, researchers have proposed all-inorganic QD-LEDs with inorganic HTLs, such as NiO or WO_3, to reduce Joule heating and improve thermal stability. However, achieving comparable performance with organic HTL-based QD-LEDs remains challenging. This presentation demonstrates the development of NiMgO nanocrystal (NC)-based HTLs and engineering strategies for efficient, stable all-inorganic QD-LEDs. Our prior studies showed that defect states in device constituents alter the energy landscape of QD-LEDs and affect device characteristics. Here, MgO-alloyed NiMgO NCs were selected as an alternative to organic HTLs for their wide band gap and suitable hole mobility. We found that nickel vacancies (V_{Ni}) in and on NCs regulate hole concentration and mobility but can cause QD charging through hole extraction. In addition, surface-bound nickel oxide hydroxide (NiOOH) introduces mid-gap states that accumulate excess holes at the QD–HTL interface. To mitigate these issues, we modified the surface chemistry of NiMgO NCs, passivating V_{Ni} and removing NiOOH. V_{Ni} passivation with $Mg(OH)_2$ enabled us to minimize exciton quenching and finely tune hole mobility to align with the electron transport layer. Additional acid treatment effectively eliminated surface NiOOH, reducing undesired hole accumulation at the interface. Through comprehensive defect management in NiMgO NCs, we achieved a peak external quantum efficiency of 16.3% and stable diode characteristics previously unattainable in all-inorganic QD-LEDs. We believe that our approach to all-inorganic QD-LEDs will contribute to realizing next-generation AR/VR display technologies.

[광전자1-3 | 10:10] 초청강연

OLED meets AI: Redefining Material and Device Design: Jae-Min Kim* (Chung-Ang University)

Keywords: Display, OLED, AI

Organic light-emitting diodes (OLEDs) have been a mainstream of display beyond mobile application. Still, the design of material and device architecture needs trial-and-error approaches. In this talk, it is discussed that how artificial intelligence (AI) technology could change the paradigm of OLED design protocol based on our research works. I introduce novel approaches to extract materials properties from device behavior using AI. Based on the physical modeling and deep learning algorithm, the charge carrier mobility, recombination coefficient, and triplet harvesting ratio were successfully extracted from device measurement data. Besides introducing case studies, an insight into the AI-assisted materials and device design approaches is discussed.

[광전자2-1 | 11:00] 초청강연

Controlling Anisotropic Optical Properties from Single to Ensemble Semiconductor Nanocrystals: Dahin Kim* (University of Seoul)

Keywords: nanoplatelets, nanorods, liquid crystals, anisotropy, assembly

Reconfigurable arrays of anisotropic nanomaterials are essential for the realization of switchable and intelligent material systems. Using liquid crystals (LCs) as a medium represents a promising approach, in principle, to enable such control. In practice, however, this approach is hampered by the difficulty of achieving stable dispersions of nanomaterials. In this talk, I will present an approach for good dispersions of pristine CdSe nanoplatelets (NPLs) in LCs, and reversible, rapid control of their alignment and associated anisotropic photoluminescence, using a magnetic field. Such dynamic alignment of optically-active 2D nanomaterials may enable the development of programmable materials for photonic applications. Furthermore, introduction of LCs with high crosslinking reactivity leads to robust and flexible NPL/polymer films by solidifying the highly ordered state of NPLs. Directed emission can be obtained in polymer films over macroscopic length scale. Face-up NPL/polymer composite films exhibit strong directed emission in the normal direction of the films, while edge-up NPL/polymer composite films have most of light directs to the film edges. Light paths can be programmed in a more sophisticated manner by patterning the microdomain alignments. The material system is expected to overcome the current limits of performance by manipulating light propagation direction in macroscale luminescent devices such as displays and solar concentrators.

[광전자2-2 | 11:30] 초청강연

Progress on Halide Perovskite Thin Film Based Lasing Emission: Kwangdong Roh* (Ewha Womans University)

Keywords: Halide Perovskites, Lasers, LEDs, Feedback Structures

Halide perovskites have emerged as promising candidates for next-generation optoelectronic devices due to their high photoluminescence quantum yields, tunable bandgaps, and facile fabrication. In particular, external quantum efficiencies (EQEs) exceeding 25% have recently been reported for perovskite-based light-emitting diodes (LEDs). Alongside these high-performance LEDs, there is growing interest in realizing coherent light sources using halide perovskites. Achieving efficient optical gain and a low lasing threshold is crucial for perovskite lasers, especially when targeting electrically driven operation. Recent studies indicate that modifying the dimensionality of perovskites (e.g., two-dimensional or quasi-two-dimensional) can effectively enhance both optical gain and environmental stability. The reduced dimensionality not only facilitates population inversion under lower excitation fluences but also mitigates degradation due to moisture and oxygen. Moreover, the choice of spacer cations can lead to the formation of Ruddlesden–Popper (RP) or Dion–Jacobson (DJ) phases, each exhibiting distinct optical characteristics. Combinations of these phases have been shown to further tune and optimize emission properties and device performance. This presentation will review the latest advances in halide perovskite materials and devices aimed at reducing the lasing threshold and improving operational robustness. Emphasis will be placed on the design of low-dimensional perovskite architectures, including strategies to stabilize phase formation and suppress non-radiative losses. We will also discuss integration approaches involving resonant cavities and diode configurations that enable efficient current injection. Finally, we will address key challenges—including device lifetime, environmental sensitivity, and scale-up—while highlighting opportunities for future research in electrically driven perovskite lasers for applications in integrated photonics, displays, and optical communications.

[광전자3-1 | 14:00]

Advancements in OLED Microdisplay Technology for Improved Luminance and Color gamut: Hyunsu Cho*, Sukyung Choi, Chan-mo Kang, Jin-Wook Shin, Kukjoo Kim, Dae Hyun Ahn, Chul Woong Joo, Byoung-Hwa Kwon, Nam Sung Cho, Chun-Won Byun, Gi Heon Kim, and and Chi-Sun Hwang (Electronics and Telecommunications Research Institute)

Keywords: OLED, microdisplay, high luminance, wide color gamut

With the increasing demand for organic light-emitting diode (OLED) microdisplays in virtual reality (VR) and extended reality (XR) devices, significant research efforts have been directed toward enhancing their performance. Currently, OLED microdisplays primarily utilize white OLEDs combined with color filters (CFs) to achieve full-color emission. Although fine metal masks (FMMs) can be employed to fabricate RGB OLEDs, this approach is less favorable for achieving high resolution compared to the white OLED with CF structure. To improve color gamut and luminance, microcavity structures have been introduced, enhancing color purity by optimizing optical resonance. By precisely controlling the optical cavity length and electrode reflectivity, the spectral characteristics of the emitted light can be tailored to achieve a narrower full width at half maximum (FWHM), leading to improved color saturation. Furthermore, by fine-tuning the characteristics of the CFs in conjunction with microcavity structures, additional performance improvements can be achieved. From a device perspective, not only the efficiency of individual RGB subpixels but also the overall color balance in white light generation through RGB combination has been optimized by tuning the device structure. Various strategies have also been explored to enhance luminance and device lifetime, including the implementation of tandem OLED structures and the integration of microlens arrays. Novel emissive materials such as quantum dots (QDs) and perovskites present new opportunities for further advancing OLED microdisplay technology. These developments collectively pave the way for high-performance OLED microdisplays suitable for next-generation VR and XR applications. Acknowledgement This work was supported by Institute of Information & communications

Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No 2022-0-00026, Near-eye light field device technology development for hyper-realistic metaverse service), and the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00408286).

[광전자3-2 | 14:30] 조청강연

Towards Next-generation OLED: Hyperfluorescence and Doublet Fluorescence: Hwan-Hee Cho* (Yonsei University)

Keywords: Hyperfluorescence, Doublet fluorescence, Organic radical, TADF, OLED

Hyperfluorescence, a cutting-edge emission concept, has emerged as a promising contemporary solution for next-generation organic light-emitting diodes (OLEDs). It offers the potential to simultaneously achieve high efficiency, stability, brightness, and color purity in OLED displays. In general, hyperfluorescence is a three-component system consisting of a host matrix, thermally activated delayed fluorescence (TADF) donor, and fluorescent acceptor. Fundamentally, the primary role of the host matrix is to suppress concentration quenching and aggregation of the TADF donors as well as Dexter transfer of triplets from the donor to the acceptor – two phenomena that can lead to substantial reductions in EQE. However, it should be taken into account that a wide-gap host matrix can reduce power efficiency, resulting from a considerable increase in driving voltage. A three-component EML also increases the complexity and cost of device fabrication. In my recent study, near 100% internal quantum efficiency was achieved from a two-component matrix-free hyperfluorescence with deep and pure blue emission for the first time by combining efficient nondoped TADF materials and ultranarrow deep blue emitters with covalent encapsulation for suppressing Dexter transfer. This result is a significant step towards substantially improved blue OLED performance, potentially resolving or minimizing burn-in in OLED displays. The development of luminescent organic radicals has led to excellent spin and optical properties for efficient near-infrared (NIR) emission. Luminescent organic radicals can have high photoluminescence quantum yield (PLQY) in the NIR range, where immunity from normal ‘energy gap law’ considerations is enabled by suppressing the nonradiative losses through decoupling high-frequency vibrational modes. In this talk, the recent research results on high-performing doublet fluorescent NIR OLEDs exploiting charge control and energy transfer design of nonradical host:radical guest systems will be presented. First, two-component mixed host and thermally activated delayed fluorescence (TADF) host systems supporting both electron and hole transport are explored with investigations of emission mechanism and energy transfer based on the studies of photophysics and device physics. Second, highly efficient NIR emission beyond 800 nm based on doublet fluorescence is demonstrated by reversible triplet-doublet energy transfer achieved by energy resonant of host triplets and radical doublets. As the doublet energy level of a tris(2,4,6-trichlorophenyl)methyl (TTM)-based radical emitter is energy-matched to the triplet state of an anthracene-based nonradical host, host triplet excitons are efficiently harvested by reversible triplet-doublet energy transfer. Transient and magneto electroluminescence measurements for devices and transient spectroscopic studies demonstrate intersystem triplet-doublet energy transfer. The new energy transfer design boosts performance in radical-based OLEDs and has broad implications for reducing nonradiative losses in devices beyond light-emitting applications with NIR light.

[광전자3-3 | 15:00] 조청강연

풀컬러 디스플레이를 위한 양자점발광다이오드: 곽정훈* (서울대학교)

Keywords: 양자점, 퀀텀닷, QLED, 패터닝

양자점발광다이오드(quantum dot light-emitting diode, QLED)는 반도체 나노결정인 퀀텀닷(quantum dot, QD)을 발광층으로 활용하는 차세대 디스플레이 기술로서, 높은 발광 효율과 뛰어난 색 순도, 용액 공정의 가능성 등 다양한 장점을 지니고 있다. 특히 QD는 스펙트럼 튜닝이 쉽고 안정적 발광 특성을 보여, Rec.2020과 같은 넓은 색역(wide color gamut)의 구현에 탁월하다. 이에 따라 풀컬러 QLED 디스플레이 개발에 대한 관심이 크게 확대되고 있으며, 실제 상용화 단계에서는 고해상도로 균질한 발광특성을 확보하기 위한 정밀한 QD 패터닝 기술이 핵심 과제로 부각되고 있다. QD 발광층을 고해상도로 형성하기 위해서는 잉크젯 프린팅, 트랜스퍼 프린팅, 포토리소그래피 등 다양한 공정 기술이 연구되고 있다. 잉크젯 프린팅은 용액 공정 기반이라 생산성이 높고 대면적에 유리하지만, 잉크의 점도와 젯팅 안정도, 해상도 확보가 기술적 과제이다. 트랜스퍼 프린팅은 우수한 해상도와 다양한 재료 적용이 가능하나, 공정이 다소 복잡하고 반복성 등 대량생산성 측면에서 개선이 필요하다. 포토리소그래피는 이미 산업적 인프라가 갖춰져 있어 정교한 패턴 구현이 가능하지만, 공정 단계가 복잡하고 QD의 화학적 안정성을 보장해야 하는 한계가 있다. 최근에는 QD의 ligand를 광경화제를 이용하여 묶음으로써 photoresist 없이 패터닝하는 direct lithography가 활발하게 연구되고 있다. 본 발표에서는 다양한 QD 패터닝 공정을 바탕으로 한 QLED 소자 연구 결과를 소개하고자 한다. 이러한 기술이 향후 풀컬러 QLED 디스플레이가 상용화 되는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

[광전자4-1 | 15:50] 조청강연

Boron based materials for blue organic light-emitting diodes: Jun Yeob Lee* (Sungkyunkwan University)

Keywords: organic light-emitting diode, boron compound, host, blue device

Boron derived materials are attractive as emitters for red, green and blue organic light-emitting diodes due to high efficiency and narrow emission spectrum. They are also promising as the host materials of phosphorescence emitters. In this work, novel boron derivatives which can show good performances as the thermally activated delayed fluorescence emitters and hosts for blue phosphors are introduced for blue organic light-emitting diodes. The boron derivatives were designed to have high triplet energy through main

skeleton possessing boron and oxygen bridged multi-resonance structure. It was demonstrated that the boron-oxygen bridged multi-resonance based materials show high external quantum efficiency as the blue emitters and as the hosts of blue phosphors. Both high efficiency and long device lifetime could be achieved using the new boron derivatives in the blue organic light-emitting diodes.

[광전자4-2 | 16:20] 조청강연

Design Strategies for phosphor–sensitized thermally activated delayed fluorescence OLEDs (PSF OLED): Yun-Hi Kim* (Gyeongsang National University)

Keywords: PSF OLED

1st generation OLED materials is fluorescence, 2nd generation OLED materials is phosphorescent using heavy metal complexes, and 3rd generation OLED materials is TADF using RISC. Recently, new another approach to reducing the triplet exciton lifetime is the use of phosphor–sensitized thermally activated delayed fluorescence OLEDs (PS TADF OLEDs). In PS TADF OLEDs, phosphorescent materials are utilized as sensitizers to facilitate energy transfer to terminal emitter (TADF based materials) within the host matrix. This process effectively decreases the concentration of triplet excitons, thereby enhancing both efficiency and lifetime. In the presentation, I will report the design strategy of phosphorescence materials and MR fluorescence dopant for PSF OLED.

[광전자4-3 | 16:50] 조청강연

High-Performance Display Applications Using Aerosol-Deposited Perovskite Quantum Dot/Metal Oxide Composites and Novel Blue OLEDs: Jongwook Park* (Integrated Engineering, Department of Chemical Engineering, Kyung Hee University)

Keywords: Perovskite quantum dots, Aerosol deposition, Color conversion, MR-TADF, Blue-emitting host materials

We report the development of a novel, smart process for producing thin luminescent films that completely convert colors and enhance light intensity. Highly dense films are prepared by the co-deposition of perovskite quantum dots and metal oxide particles as color conversion layers and scattering agents, respectively. These layers can be directly deposited on blue organic light-emitting diodes using ultrasonic-assisted aerosol deposition (UAD). This method can allow displays using a down-conversion system to streamline the process due to absence of color filters. Using this method, films can be a minimum of 3 μm thick for complete conversion of blue light, a quarter that of inkjetprinted films. We demonstrate 7,353 cd m-2 in green and 411 cd m-2 in red converted emissions with no blue light leakage. Furthermore, we report highly efficient blue-emitting host materials that utilize MR-TADF, incorporating DOBNA and tetraphenylsilyl groups. Among the devices fabricated with six synthesized compounds, the device using TDBA-Si exhibited high external quantum efficiency (EQE) values of 36.2%, 35.0%, and 31.3% at maximum luminance, 500 cd/m^2, and 1,000 cd/m^2, respectively.

알루미늄
Room 400, 4월 24일

[알루미늄1-1 | 09:00]
Effect of Cooling Rate on Zr Interactions in Al-10Si-0.35Mg Casting Alloys: saif Haider Kayani, Sang-Ik Lee, Yoon-Hoo Lee, Jung-Moo Lee, Kwangjun Euh, and Young-Hee Cho* (Lightweight Materials Research Division, Korea Institute of Materials Science)
Keywords: Al–Si–Mg casting alloy, Zr microalloying, Cooling rate, Precipitation

In Al-Si-Mg alloys, Zr microalloying plays a critical role in modifying the microstructure and enhancing the alloy's properties. Zr interacts with Si and Mg, leading to the formation of stable intermetallic phases and solid solutions. Notably, Zr can form fine Al_3Zr dispersoids that contribute to grain refinement. Additionally, Zr tends to segregate at phase boundaries, particularly at the interface of β-type precipitates, where it stabilizes the precipitate structure and mitigates coarsening during aging. This study investigates the influence of cooling rate on the interactions of Zr in Al-10Si-0.35Mg alloys solidified at different cooling rates using a step mold casting technique. The alloy components, with cavity thicknesses ranging from 4 to 40 mm, were subjected to cooling rates varying from 2 K/s to 50 K/s, corresponding to the thickest and thinnest sections, respectively. Microstructural analysis reveals the formation of Zr-rich intermetallic compounds (IMCs) in the eutectic region. Slow cooling rates allow more time for Zr diffusion, resulting in the segregation of Zr and the formation of coarse Zr-rich IMCs. In contrast, faster cooling rates limit Zr segregation during solidification, leading to a more uniform distribution of Zr atoms and the formation of fine Zr-rich IMCs in the matrix. Notably, in the fast-cooled sections, Zr segregates at the interphase boundaries of β¢ precipitates. This segregation is attributed to the high binding energy between Zr and Si, and the thermodynamically favorable conditions at the phase boundaries, characterized by lower atomic density and higher interfacial free energy. The observed Zr segregation enhances the stability of β¢ precipitates by reducing the interfacial energy between the matrix and the precipitates. This microstructural understanding highlights the effects of Zr on precipitate morphology and stability in Al-Si-Mg casting alloys.

[알루미늄1-2 | 09:15]
Synergistic microstructure refinement and enhanced mechanical properties in hypoeutectic Al–Si based alloys via high-entropy microstructure refiner: Jae Kwon Kim (Seoul National University), Yagnesh Shadangi (Indian Institute of Technology Bhilai), Do Hyang Kim (Yonsei University), and Eun Soo Park* (Seoul National University)
Keywords: Hypoeutectic Al-Si alloy, High-entropy microstructure refiner, Streamlined process, Synergistic refinement, Mechanical property.

As the demand for lightweight and energy efficiency in Al–Si-based alloys continues to grow, the T5 heat treatment is increasingly preferred instead of T6, owing to its streamlined processing and reduced susceptibility to product distortion. Nevertheless, T5 treatment presents challenges in managing coarse α–Al dendritic structures and eutectic Si phases. While commercial refiners, such as Al–Ti–B and Sr, are employed to enhance microstructural refinement, there remains a critical need for the development of more effective refiners for multi-phase manipulation. Herein, we report a novel high-entropy microstructure refiner (HMR) that enables synergistic microstructure refinement under T5 heat treatment for hypoeutectic Al-Si alloys. In particular, the $(TiZrNb)_2(CrFeNi)$ HMR, which combines Group A elements (Ti, Zr, Nb) to decrease ΔT_N (nucleation undercooling) by forming heterogeneous nucleation sites and Group B elements (Cr, Fe, Ni) to induce ΔT_C (constitutional undercooling) through segregation at the liquid/solid interface, achieves synergistic multi-phase microstructure refinement. This refinement simultaneously reduces the size of α–Al dendrites (to about one-tenth), secondary dendrite arm spacing (by about half), and eutectic Si spacing (by about half) while maintaining low intermetallic compound precipitation, compared to hypoeutectic Al-Si base alloy. This synergistic microstructure refinement simultaneously increases both yield strength (and ultimate tensile strength) and elongation, thus overcoming the typical trade-off among these properties. We believe that the results of this study provide an effective guideline for the development of cast (or T5-treated) aluminum alloys based on the application of novel HMRs, resulting in a cost-effective, streamlined process.

[알루미늄1-3 | 09:30]
냉각 속도에 따른 Al-6Mg-xCu 합금의 미세조직 및 기계적 특성 변화: 장재철 (한국생산기술연구원, 서울대학교), 이강래, 송람, 최경환, 김봉환 (한국생산기술연구원), 정인호* (서울대학교)
Keywords: 알루미늄, 냉각속도, 항복강도, 5천계, 기계적 특성

최근 국제적인 기후변화 대응 정책의 성격이 탄소국경조정제도(CBAM)와 같이 강제성을 띄기 시작함에 따라, 제조 단위에서의 탄소 배출량 저감을 위한 노력이 요구되고 있다. 알루미늄은 CBAM의 6대 주요 규제 품목 중 하나로, 제품의 생산 과정에서 많은 탄소가 배출되기 때문에 이를 줄이기 위한 연구가 필수적이다. 쌍롤주조법(Twin-roll Casting)은 주조 단계에서 용탕을 수 밀리미터 두께의 판재로 제조하는 방법으로, 기존의 두꺼운 슬라브 제조 후 요구되는 반복 압연 공정을 생략하여 약 30%의 공정 에너지를

절감할 수 있다. 또한, 약 1000K/s 의 빠른 냉각 속도에 의해 미세한 결정립이 생성되므로 우수한 기계적 특성을 갖는다. 그러나 공정 특성 상 편석과 역편석의 발생이 쉽기 때문에 그동안 1xxx계와 6xxx계 일부와 같은 저합금계만 사용되어 왔다. 본 연구에서는 열역학 전산모사를 통해 설계한 편석 저감형 고 Mg 5천계 합금의 냉각 속도에 따른 기계적 특성 변화를 분석하여, 쌍롤주조법과 같은 빠른 냉각 속도 조건의 장점을 평가하고자 한다. 주조 조직은 용체화 처리와 같은 고온 열처리 이후의 미세조직에도 큰 영향을 미쳤으며, 초기 주조 조직이 미세할 수록 높은 항복강도를 얻을 수 있었다

[알루미늄1-4 | 09:45]

Thermodynamic Assessment of the Al-Fe-Si and Al-Mn-Si System: Chan Jeong and In-Ho Jung* (Seoul National University)

Keywords: Calphad, Aluminium alloy, Thermodynamic assessment

Recently, aluminium industry focuses on recycling aluminium scrap to mitigate CO2 emissions. As aluminium scrap contains impurity elements like Fe, Mn, Cu, Si, etc., it is crucial to investigate how the impurities affect mechanical properties of the conventional alloys, and design new alloys considering a certain range of such impurities. For this purpose, accurate thermodynamic database which predicts the phase evolutions depending on temperature and composition is very necessary. The current Al alloy thermodynamic database can accurately predict the phase diagrams of the Al-rich region of the Al alloy systems. However, the accuracy of the predictions in high impurity concentration have not been well evaluated. In the present study, we tested the accuracy of the current FTlite database in FactSage for Al-Fe-Si and Al-Mn-Si systems and re-optimized the thermodynamic models to improve the accuracy of the database in a wide range of Al alloys. By refining these assessments, the database will better accommodate aluminium alloys with higher impurity levels, ensuring more precise predictions of phase stability and aiding in the optimization of alloy composition and new alloy design using high amount of Al scraps.

[알루미늄2-1 | 10:10]

초대형 다이캐스팅 적용 가능한 국부 연화 열처리 공정 기술 개발: 임재선*, 강동하, 임태성 (현대자동차 남양연구소)

Keywords: 알루미늄, 일체형 다이캐스팅, 국부연화, 레이저, 열처리

최근 자동차의 환경 규제 및 전기차 개발이 활발히 진행됨에 따라 전비 향상에 대한 요구는 계속해서 증대되고 있다. 이에 따라 전비 향상에 핵심 인자라고 할 수 있는 차체 경량화에 관련된 기술이 계속해서 개발되고 있다. 그 중에서도 부품 최소화 및 조립비 절감을 위한 차체의 일체화 기술개발이 전 세계적으로 진행되고 있다. 이에 따라, 부품 단위의 열처리 공정을 삭제한 비열처리 합금을 적용하여 차체부품의 경량화 및 안정성을 소재단위에서부터 확보하고 있으나, 주조 시의 금속 용탕이 이동하는 마지막 부분인 말탕부 및 상대물과의 접합이 이루어지는 플랜지 부에서는 소재의 기계적 물성, 특히 연신율 확보가 어려운 과제로 떠오르고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 열처리 공정을 삭제한 비열처리 합금을 적용한 초대형 다이캐스팅에 적용 가능한 국부적인 부위에 연화 열처리 (T4)를 적용함으로써, 차체 주조품의 물성을 확보하는 기술을 연구하였다. 대상 부위로는 차체 주조품 내의 플랜지 부이며, 열처리 후의 변형을 최소화 하기 위해 열처리 방안 및 시간은 레이저 열처리를 5~10s 이내로 적용하여 초대형 차체 주조품의 생산성을 극대화 시키는 방안으로 개발 진행하였다. 국부적인 레이저 열처리 공정 기술 개발의 핵심 변수는 국부적인 부위의 열처리 온도 조절 방식에 있다고 할 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 열처리 조사 시간, 세기, 조사 면적 등을 변수로 설정하여 해당 부위의 온도를 실시간 열 화상 카메라를 적용하여 측정하였다. 알루미늄의 연화 열처리를 위한 목표 온도인 450~550 ºC 를 설정하였으며, 열처리 진행 후 기계적 인장물성 평가 및 조사 부위의 비커스 경도 측정 및 조직 분석을 통해 열처리 연화 효과를 확인하였다. 또한, 주조품 플랜지 부의 일반적인 두께인 3~3.5t 두께 방향으로의 열 전달 효과를 확인 하기 위한 분석도 진행하였다. 비열처리 합금의 플랜지부는 충돌성능을 위한 강도 뿐 아니라 SPR 공정의 다이, 리벳 최적화 등을 위해 소재 물성의 균일성 확보가 중요하므로, 열처리 후의 SPR 품질까지 확인하여 본 연구의 효과를 증명하였다.

[알루미늄2-2 | 10:25]

핫스탬핑 적용 Al-9.5Si 도금강의 부식 특성 연구: 안경빈, 장희진* (조선대학교)

Keywords: Hot stamping, Al-Si coating, Corrosion, Chloride ion

핫 스탬핑 공정은 냉간 압연 강판을 900 ~ 950 ºC에서 수 분간 열처리하여 오스테나이트 상 안정화를 시키고, 다이 퀜칭(die-quenching)과 동시에 급속 냉각하여 강도가 높은 마르텐사이트 상을 형성하는 공법이다. 이 공정은 소재의 기계적 강도와 내구성을 극대화하고 단 시간 동안의 부품 생산에 매우 용이한 기법으로 적용되고 있다. 하지만 핫 스탬핑 공정 시, 고온에서 성형이 이루어지는 과정 중 소재 표면은 산화되거나 탈탄될 수 있으며, 이로 인해 소재의 내구성을 저하시킬 수 있다. 이를 방지하기 위해 일반적으로 금속 표면에 도금이 적용되어진다. 아연 기반의 도금을 적용한 강판은 성형 공정 중 아연 용융에 의한 액체금속취성 및 도금 층 손상 발생의 이슈가 있어, 최근에는 융점이 높고 고온에서 산화 저항성이 우수한 Al-9.5Si 도금 강판의 적용이 확대되고 있는 추세이다. 현재까지 Al-9.5Si 도금 강판의 부식 거동에 관한 연구는 주로 염소 이온(Cl^-)을 포함한 환경에서 수행하였는데, 시험 환경이 더 가혹한 낮은 pH 분위기에 Cl^-을 첨가한 환경에서 내식성에 관한 연구는 미비한 실정이다. 또한, Cl^-의 농도 또는 pH 농도 지수 중 핫 스탬핑 적용 강판의 부식을 가속화하는 요인이 어느 것이 더 지배적인지에 대한 보고는 명확하지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 핫 스탬핑 적용 Al-9.5Si 도금강의 내식성에 미치는 영향을 조사하기 위해 Cl^-의 농도와 pH 농도를 변수로 동전위 분극시험을 진행하였고, 분극시험이 종료된 시료의 표면 및 단면을 관찰하였다. (이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2023R1A2C1004270))

[알루미늄2-3 | 10:40]

디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation, DIC)을 활용한 알루미늄 합금의 극저온 인장 시험 환경(298K~77K)변화 따른 변형 및 파괴 거동 변화: 이종원, 허성준 (영남대학교), 김효민 ((주)머티리얼솔루션파크), 배문기, 권혁민, 김예름 (현대차), 박노근* (영남대학교, (주)머티리얼솔루션파크)

Keywords: Digital Image Correlation(DIC), 5000 Series Aluminum Alloys, Cryogenic Atmosphere, Plastic Deformation Behavior

수소 에너지 사회로의 전환에 따라 수소 저장용 합금에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 안정성이 높고 상온에서 보관이 가능한 액체 수소 저장 방식은 약 20 K의 극저온에서 운용되므로, 이에 사용되는 합금은 초저온 환경에 노출된다. 이 외에도 다양한 극저온 환경에서 사용될 소재에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이러한 환경에서는 기계적 성질의 변화가 발생할 수 있다. 따라서 초저온 환경에서 소재의 안정성을 확보하기 위해서는 변형 및 파괴 거동을 면밀히 이해하는 것이 필수적이며, 이를 분석할 수 있는 정밀한 기술의 개발이 뒷받침되어야 한다. 알루미늄(Al) 5000계열 합금은 상온에서 변형 시 Portevin–Le Chatelier (PLC) 효과로 인해 유동 불안정성이 발생하여 연신율에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 반면, 액체 질소 온도(77 K)에서는 이러한 serration 현상이 현저히 감소하며, 강도와 연성이 증가하는 경향을 보인다. 이는 20K 환경에서 알루미늄 5000계열 합금의 적용 가능성을 뒷받침하는 근거가 될 수 있다. 한편, 디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation, DIC)은 시편 표면에 도포된 점들의 위치 변화를 추적 및 계산하여 시각화함으로써 변형 거동을 정밀하고 직관적으로 분석할 수 있는 기술이다. 극저온 환경에서는 단열 가열(adiabatic heating)로 인한 기포 발생 등의 문제로 인해 점들의 위치 추적이 어려워, DIC의 활용에 기술적 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 극저온 환경에서도 DIC 분석이 가능한 실험 챔버를 설계하였으며, 액체 수소 온도 환경의 기반이 될 수 있는 액체 질소(77K) 조건에서 DIC를 활용한 변형 거동 분석을 수행하였다. 또한 Al 5182 합금을 대상으로 상온에서부터 극저온까지의 변형 및 파괴 거동 변화를 비교·분석하여, 극저온 환경에서의 변형 특성을 규명하고자 하였다. 아울러 미세조직 관찰을 통해 이러한 기계적 특성 변화의 원인을 분석하였다. 본 연구를 통해 극한의 저온 환경에서 소재의 변형 및 파괴 거동에 대한 이해를 증진시키고, 초저온용 구조 소재 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[알루미늄2-4 | 10:55]

RRA 열처리에 의한 Al-Zn-Mg-Cu계 합금의 미세조직 변화와 부식 및 기계적 특성의 상관관계 해석: 황효진 (한국재료연구원, 부산대학교), 김원경, 세프 카야니 (한국재료연구원), 김세호 (고려대학교), 이제인 (부산대학교), 조용희* (한국재료연구원)

Keywords: Al-Zn-Mg-Cu 합금, Retrogression and Re-ageing(RRA), 기계적 특성

7000계 (Al-Zn-Mg-Cu) 합금은 기존의 2xxx계와 6xxx계 같은 열처리형 합금과 비교하여 상대적으로 높은 강도와 열처리의 용이성을 가져 로봇 및 항공기 부품에 많이 활용되고 있다. 하지만 Al-Zn-Mg-Cu계 합금은 주로 peak aging 조건인 T6열처리를 통해 최대 강도를 보이지만 부식 저항성이 낮다는 단점이 있다. Al-Zn-Mg-Cu계 합금의 시효 후 강도에 주로 기여하는 석출 상은 η'–Mg(Zn, Cu, Al)2가 있다. 이러한 시효 석출 상들은 시효 시간과 온도에 따라 크기 및 부피 분율이 달라질 수 있고, 이는 기계적 물성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 알루미늄 합금에서 시효 열처리에 따른 부식특성을 개선할 수 있는 다양한 열처리 기술 개발에 관한 연구들이 많이 진행되어왔다. 그중 T7X의 이단 시효 열처리는 과시효 열처리로 결정립계에 불연속적인 조대한 η상을 석출시키고 결정립계에 넓은 Precipitate Free Zone (PFZ)를 형성시킨다. 이러한 변화에 따라 부식특성을 개선할 수는 있지만 석출물의 조대화로 인해 강도가 크게 하락한다. 이를 개선하기위해 고안된 열처리 방법이 Retrogression and Re-ageing(RRA)이다. 이는 삼단 시효 열처리를 통해 알루미늄 기지 내의 η'-Mg(Zn, Cu, Al)2상 분율을 높여 T6의 높은 강도를 유지하면서 T7X의 부식특성을 나타낼 수 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 Al-Zn-Mg-Cu계 합금에 T6의 강도를 유지하는 RRA 열처리 기술을 구축하고, 시효 열처리 온도와 시간에 따라 형성되는 석출거동을 Transmission Electron Microscopy (TEM), Atom probe Tomography (APT) 등으로 분석하고자 한다. 또한 이러한 미세조직 변화가 부식저항성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

[알루미늄2-5 | 11:10]

Cu, Mg 첨가가 Al-Zn 합금의 마모 특성에 미치는 영향: 신지용* (한국재료연구원, 부산대학교), 정현우, 정일석, 최은애 (한국재료연구원), 권세훈 (부산대학교), 한승전* (한국재료연구원)

Keywords: Al-Zn alloy, Al-Zn-Cu-Mg alloy, precipitation hardening, wear behavior

Al 합금의 내마모성은 연질의 2차 상 혹은 경도와 관련이 있다. Al-Sn, Al-Zn 합금은 연질의 2차 상을 가져 내마모성이 우수하다. Al-Zn 합금은 Al-Sn 합금과 달리 2차 상이 석출되어 상대적으로 낮은 밀도와 높은 경도를 가져 경량화에 유리하다. 이전 연구에서 Al-Zn 합금에 미량의 Cu, Mg 첨가는 합금의 강도와 경도를 효과적으로 향상시켰다. 본 연구에서는 Al-Zn 합금에 Cu, Mg 첨가가 합금의 미세조직과 마모 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 마찰 계수와 마모율 측정 결과 Al-Zn-Cu-Mg 합금의 마찰 계수와 마모율이 가장 낮을 것을 확인하였다. 미량의 Cu, Mg 첨가에 의해 미세하고 균일하게 석출된 Zn 상에 의한 강화는 내마모성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 마모면 관찰 결과 Al-Sn 및 Al-Zn 합금에서는 균열이 발생하였지만, Al-Zn-Cu-Mg 합금에서는 균열이 나타나지 않았다.

[알루미늄3-1 | 14:00]

In-Situ Synchrotron X-Ray Observation of Intermetallic Compound Formation at the Interface of Al–Sn Alloy and Carbon Steel: Ahmad Zamanian Khorasgani*, Nam Hoon Goo, Dae Geun Hong (Pohang University of Science and Technology), Ho Jae Kwak (Pohang Accelerator Laboratory), and Chang Hee Yim (Pohang University of Science and Technology)

Keywords: Synchrotron Radiation X-ray, Interfacial bonding, Solidification, Al–Sn alloys, intermetallic compounds

Al–Sn alloys are widely used as sliding bearing materials in combustion engines due to their excellent tribological and mechanical

properties. While casting offers advantages over conventional rolling technology—such as process simplicity—it faces commercialization challenges, particularly in achieving strong bonding between the clad material and the steel substrate. In this study, real-time synchrotron X-ray in-situ observations were conducted to investigate the formation and evolution of intermetallic compounds (IMCs) at the interface between liquid Al–Sn alloy and solid carbon steel. Pure Al and Al–20 wt.% Sn alloys were joined with JIS S45C steel, heated to 850 ºC, held isothermally for 30 minutes, and subsequently cooled to observe the morphology, formation mechanisms, and growth behavior of IMCs at the interface. The experimental results revealed the initial formation of a tongue-like η-phase (Fe_2Al_5) layer at the interface during the early stages of melting, which progressively grew into the steel substrate during the holding period. Upon cooling, prior to the onset of solidification, a dotted θ-phase (Fe_4Al_{13}) formed near the interface, with needle-like θ-phase structures occasionally extending into the Al–Sn alloy. Ex-situ analyses showed that the θ-phase was larger in the Al–Sn alloy compared to pure Al, attributed to the presence of a Sn-enriched layer at the interface between the IMC and the Al–Sn matrix. Additionally, Sn was distributed within the θ-phase in fine-scale structures, contrasting with the near-network Sn phase observed along the grain boundaries of the Al matrix. These findings provide critical insights into the interfacial reactions and IMC evolution during the casting of Al–Sn clad materials on steel substrates, contributing to the development of improved bonding strategies for commercial applications

[알루미늄3-2 | 14:15 Canceled]

[알루미늄3-3 | 14:30]

Ni 첨가에 따른 고강성 Al-18Si-xNi 주조 합금의 미세조직 변화와 물리적 특성의 상관관계: 이윤호 (한국재료연구원, 한양대학교), 이정무, 세프 카야니, 이상익 (한국재료연구원), 장재일 (한양대학교), 조영희* (한국재료연구원)

Keywords: Al-Si casting alloy, High elastic modulus, Physical properties, Microstructure, Ni addition

본 연구에서는 Ni 첨가량에 따른 과공정 Al-Si 합금의 응고 거동, 미세조직 변화 및 물리적 특성 간의 관계를 체계적으로 조사하였다. Al-18Si 합금에 Ni을 20 wt.%까지 첨가함에 따라 따라 초정 Si의 핵생성 온도가 상승하여 접종 효과가 억제되었으며, 이로 인해 초정 Si상이 조대화 되었다. 또한, Ni 첨가량 20 wt.% 이상에서는 Al_3Ni와 함께 (Al_6Ni_3Si + Al_3Ni)의 2상 혼합구조가, 24 wt.% 이상에서는 (Al_3Ni_2 + Al_6Ni_3Si + Al_3Ni)의 3상 혼합구조를 나타내는 금속간 화합물이 형성되었다. 각 혼합구조는 응고 초기 형성된 상이 핵형성 위치로 적용되거나, 자유에너지 차이에 따른 준안정상에서 안정상으로의 확산 변태로 분석되었다. 이러한 미세조직 변화는 탄성계수, 열팽창계수, 전기전도도와 같은 합금의 물리적 성질에 영향을 미치는 것으로 측정되었다. Ni 첨가량이 20 wt.% 및 24 wt.% 일 때의 미세조직 변화를 기준으로, 탄성계수 증가량은 1.64 GPa/wt. %에서 2.19 GPa/wt.%로 증가하였으며, 이후 3상 혼합구조가 나타남에 따라 1.23 GPa/wt.% 로 감소하였다. 또한, 열팽창계수와 전기전도도의 감소량은 각각의 혼합구조를 갖는 미세조직이 형성되는 조성을 기준으로 각각 0.24 - 0.15 - 0.08 (10^{-6}/K * 1/wt.%) 과 0.48 - 0.37 - 0.11 ($M\Omega^{-1}$/m * 1/wt.%)로 감소하는 경향이 나타났다. Ni 첨가량에 따른 미세조직 변화가 각 합금의 물리적 성질에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해, 나노 인덴테이션과 전산모사를 통해 각 금속간 화합물의 물리적 특성을 평가하였다. 또한, 전산 모사와 XRD 분석을 통한 각 합금의 금속간 화합물의 부피분율을 예측 및 측정하고, 이를 통해 이론적 모델과 실측 값을 비교 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로, Ni 첨가량 조절을 통해 미세조직 변화를 제어하여 높은 물리적 특성을 갖는 100 GPa 이상의 고강성 알루미늄 주조용 합금을 제안하고자 하였다.

[알루미늄3-4 | 14:45]

Al-Mg-Si 합금에서 Cu 첨가와 인공 시효 조건이 기계적·전기화학적·석출 특성에 미치는 영향: 홍현빈, Raj Narayan Hajra (국립한밭대학교), 신은주 (한국원자력연구원), 김재국, 이종숙 (전남대학교), 김정한 (국립한밭대학교), 김재황 (한국생산기술연구원), 조훈휘* (국립한밭대학교)

Keywords: Al alloys, Cu addition, artificial aging, electrochemical behavior, precipitation behavior

세계적으로 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력이 지속되고 있으며, 이로 인해 연비 규제가 강화되고 경량 소재에 대한 수요가 증가하는 추세이다. 그 중, 6xxx계 Al 합금은 철강 대비 높은 비강도와 가공성, 내식성으로 차량 및 항공기의 경량 소재로 널리 사용되고 있다. 차량 및 항공기 이용의 안전성을 위해 Cu를 첨가하여 강도 특성을 향상시키는 연구가 진행되었으나 내식성의 저하 문제가 대두되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 강도와 내식성의 최적화를 위해 다양한 열처리 조건 및 Cu 첨가 조건에 따른 6xxx계 Al 합금의 미세조직 및 전기화학적 거동을 분석한다. Cu의 첨가 여부에 따른 Al 합금을 제작하고, 인공 시효 조건을 다양하게 설정하였다. 전기화학 계측기 (Potentiostat)를 사용하여 전기화학적 거동을 측정하였으며, 인공 시효 시간이 증가할수록 높은 부식 속도를 보였으나 Cu가 첨가된 경우 반대의 양상을 보였다. 광학 현미경(Optical Microscope, OM)으로 부식된 시편의 단면을 관찰하여 표면에서의 부식 형태와 깊이를 확인하였다. 시차 주사 열량계(Differential Scanning Calorimetry, DSC)와 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope, TEM), 소각 중성자 산란 장치(Small Angle Neutron Scattering, SANS)를 이용하여 각 조건별 석출물에 따른 미세조직 거동 차이를 비교하고 분석하였다.

[알루미늄3-5 | 15:00]

Al-Mg-Si 합금에서 3DAP 및 TEM을 활용한 β" 석출상의 조성 및 구조분석: 이미영 (한국생산기술연구원, 전북대학교, 한국과학기술연구원), 박지욱 (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), Dieter Isheim, David N. Seidman (Northwestern University), Calin D. Marioara (SINTEF Industry), Randi Holmestad (Norwegian University of Science and Technology), 이석재 (전북대학교), 최

두영 (한국생산기술연구원, 한국과학기술연구원), 김재황* (한국생산기술연구원, 한국과학기술연구원, 과학기술연합대학원대학교)
Keywords: Al-Mg-Si 합금, TEM, 3DAP, β″, 미세구조

Al-Mg-Si 합금에서 시효경화 중 석출되는 β″은 합금의 주요 강화상으로 알려져 있다. 그러나 정확한 조성과 원자배열에 대해서는 여전히 논쟁이 있다. 기존 연구자들은 β″이 Mg5Si6 조성을 가진다고 보고했지만, 최근 3DAP(3D Atom Probe Tomography)를 이용한 연구들에서 β″ 내 상당량의 Al이 확인되었다. 이에 따라 β″의 정확한 화학조성에 대한 정밀분석이 필요하다. 본 연구에서는 3DAP를 통해 β″의 정확한 화학조성을 분석하고, TEM(Transmission Electron Microscope)을 활용하여 상호보완적 분석을 수행하고자 한다.

[알루미늄4-1 | 15:25]

비열처리형 Al-5Mg-2Si-Mn 주조용 합금의 개량화 기구 연구: 강청아 (한국재료연구원, 부산대학교), 정수진 (포항산업과학연구원), 이윤호 (한국재료연구원), 이제인 (부산대학교), 조영희* (한국재료연구원)
Keywords: Al-Mg-Si (Magsimal-59) casting alloy, Eutectic Mg_2Si, Modification, Rare Earth Elements (REE), Solidification

최근 이산화탄소 배출량과 관련한 환경 규제로 인하여 수송기기의 전장화에 대한 수요가 증가하고 있으며, 연비 향상을 위하여 차체 및 전장부품의 경량화는 필수적이다. 이를 위해, 최근 수송기기 산업에서는 부품의 대형화 및 일체화에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 그러나, 경량소재인 알루미늄 합금은 산업에 적용하기 위한 물성에 도달하기 위하여 T6 열처리가 요구되며, 이는 용체화 처리 이후 냉각 중 비틀림을 유발하게 된다. 또한, 대형화/일체화 부품은 각 위치, 형상 및 크기에 따른 냉각 거동 차이에 의해서 열처리성 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 이러한 결함의 영향을 배제하며, 우수한 기계적 특성을 갖는 비열처리형 알루미늄 주조용 합금에 대한 개발이 요구되고 있다. Al-5Mg-2Si-Mn계 주조용 합금인 Magsimal-59는 Mg의 높은 기지 고용도와 함께 응고 중에 생성되는 공정 Mg_2Si에 의해 as-cast 상태에서 우수한 기계적 특성을 가지며 내식성이 우수하다. 그러나, 공정 Mg_2Si상은 주로 Magsimal-59 합금 주조 시, 망상 형태로 존재하여 불균일한 응력 집중이 작용하여 물성 저하의 요인이 되는 문제가 발생한다. 이처럼 Mg_2Si의 모양과 크기 및 분포는 합금의 기계적 성질에 주요한 영향을 미친다. 따라서, 비열처리 합금에서의 공정 Mg_2Si상을 개량화 하는 것은 기계적 성질 향상을 위해 중요한 과제이다. 이에, 본 연구에서는 Magsimal-59합금의 공정 Mg2Si를 개량화를 위해 희토류계 원소 미량 첨가에 의한 개량화 기구에 초점을 맞추어 연구하였다. 각각 미량원소의 종류 및 첨가량에 차이를 두어 형성된 미세조직을 조사하여 개량화가 우수한 조건을 선정하였으며, 개량화 기구를 규명하였다. 이러한 결과는 미량원소 참가로 인한 미세조직 개량화는 Magsimal-59 합금이 비열처리형 합금으로써 대형화/일체화 부품에 적용 가능한 합금임을 제안할 수 있다.

[알루미늄4-2 | 15:40]

상용 7075 알루미늄 합금의 2단시효 열처리에 따른 기계적 특성 분석: 솜세라 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 박지욱 (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이미영 (한국생산기술연구원, 한국과학기술연구원, 전북대학교), 김재황* (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원)
Keywords: AA7075, 알루미늄 합금, 기계적 특성, 이단시효

AA 7075 합금은 Al-Zn-Mg-Cu계 합금으로 높은 강도를 가지며, 항공 및 자동차 산업에서 널리 사용된다. 이 합금의 기계적 특성은 석출 거동 및 열처리 조건에 크게 영향을 받는다. 특히 GP zones(GPI, GPII)과 η′($MgZn_2$)상의 형성 및 변태 과정이 중요한 역할을 한다. 기존 연구에 따르면 GPI은 자연시효 초기에 형성되며, 시간이 지나면서 GPII로 변태된다. GPII는 인공시효 시 η′상의 석출을 돕거나, 반대로 석출을 지연시켜 밀도가 낮아질 가능성이 보고되었다. AA7075 합금에서 자연시효 후 인공시효 온도에 따른 석출 거동과 기계적 특성의 변화를 체계적으로 분석한 연구는 부족하다. 본 연구에서는 자연시효 시간에 따른 GP zones 형성 및 η′상의 핵생성 과정을 분석하며, 인공시효 온도에 따른 η′상의 성장 거동을 비교하고자 한다.

[알루미늄4-3 | 15:55 Canceled]

[알루미늄4-4 | 16:10]

Effect of alloy series and welding technology on cryogenic properties and hydrogen embrittlement of aluminum weld joints: 남지민 (부산대학교), 이승건 (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교)
Keywords: aluminum alloy, weld joint, hydrogen embrittlement, cryogenic temperatur

기후변화 및 환경오염의 심각화에 따라 수소에너지는 가장 주목받는 에너지이다. 수소에너지를 활용하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 액체수소를 저장하는 기술 및 저장 소재에 관한 연구 역시 그중 하나이다. FCC 금속은 액체수소의 저장을 위해 가장 적합한 소재로 예상되고 있다. 알루미늄은 내부식성 및 극저온 특성이 우수하며, 경량소재이기 때문에 드론과 같은 모빌리티의 액체수소 저장탱크에 사용하기에 유리하다. 액체수소 저장탱크의 재료들은 극저온 물성 및 내수소취성에 대한 신뢰성 확보가 요구된다. 용착금속과 열영향부를 포함하는 용접부는 모재(BM)에 비해 열위한 기계적 성질을 가지는 경우가 많고 아직 연구 결과가 매우 부족하다. 알루미늄은 합금계 및 용접방법에 따라 용접부 특성이 달라지기 때문에 이에 대한 경향성을 파악하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 용접 이음부의 극저온 물성과 수소 취화 민감도를 평가하기 위해 Al5083과 Al6061을 사용하여 가스 금속 아크 용접(GMAW)과 마찰교반 용접(FSW)을 수행하였다. 시편에 수소를 충전한 후 상온(RT), -100ºC, -196ºC에서 Slow Strain Rate Test (SSRT)를 실시하여 온도에 따른 기계적 물성과 수소 취화 민감도를 평가하였다. 온도 및 수소 충전에 따른 변형 거동을 비교하였으며, 타 FCC계 금속 용접부들과 비교하여 합금계 및 용접방법에 따른 알루미늄 용접부의 내수소취화 특성에 대해 고찰하였다

[알루미늄4-5 | 16:25]

Atom probe tomography의 검출효율이 Al 합금 클러스터 분석 결과에 미치는 영향: 박지욱 (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이미영 (한국생산기술연구원, 한국과학기술연구원, 전북대학교), 송세라 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 김재황* (한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원)

Keywords: Atom probe tomography, 알루미늄 합금, 검출효율, 클러스터 분석, 미세구조 분석

Atom probe tomography(APT)는 원자 분포를 3차원으로 분석할 수 있는 분석 기법으로, 합금 내 석출물의 크기, 형상, 조성을 원자 수준에서 정량적으로 분석할 수 있는 강력한 도구이지만, 검출효율의 한계로 인해 실제 미세구조 분석 시 주의가 필요하다. APT의 원자 검출 오류의 원인은 팁의 모양, 전계 증발 영향, 실험 환경 요인, 장비적 한계 등 다양하며 검출 효율 및 APT 결과에 복합적인 영향을 미친다. APT 장비는 지속적으로 발전해왔으며, 검출효율도 향상되어왔다. 서로 다른 세대의 장비들로 수행된 연구 결과들을 상호 비교하고 종합적으로 이해하기 위해서는 검출효율의 차이가 분석 결과에 미치는 영향을 정량적으로 파악해야 할 필요성이 있다. 본 연구에서는 Al합금의 APT 데이터에 대해 검출 효율이 클러스터 분석 결과에 미치는 영향을 조사하였다. LEAP5000과 IVAS를 이용하여 얻어진 Al-Mg-Si 합금의 Reconstruction 결과를 사용하였으며, 클러스터 분석에는 Maximum separation method를 적용하였다. 검출효율에 따른 가상의 결과를 얻어내었으며, 이를 바탕으로 클러스터 분석 시 어떤 영향이 존재하는지를 확인하였다.

상변태
Room 401A, 4월 24일

[상변태1-1 | 09:00]

Elastic modulus and inverse Hall-Petch relationship in pure metals: Nam Heo* (I LINK)

Keywords: Elastic modulus, grain size, slip, twinning, inverse Hall-Petch relationship

For several decades, the yield strength (σ_y) has been empirically expressed in a form of $\sigma_y = \sigma_{yo} + kd^{-1/2}$ where d is the effective grain size. Recently, the micro-yield strength has been theoretically derived in pure iron by Heo. Meanwhile, the inverse Hall-Petch relationship is observed in metals of nano grain size, and it has been explained in the viewpoint of room temperature Coble creep or grain boundary sliding. It is shown in this presentation that the elastic modulus of a metal decreases with decreasing grain size and it is expressed in a form of $\exp^{-c/d}$ where c is constant and depends on material, and d is grain size. This concept is applied to the elastic modulus in the Hall-Petch relationship constant (k) and twinning stress (σ_t) obtained from the pole mechanism. The numerical solutions for σ_y and σ_t of BCC and FCC metals show that both of them increase to a maximum with decreasing grain size and then decrease gradually with further decreasing grain size. Such a behavior produces, therefore, the inverse Hall-Petch relationship which arises from the dependence of elastic modulus on grain size. As a result, the deformation mode of metals is determined through the competition between σ_y and σ_t. In coarse grain size regions, the deformation mode is governed by dislocation slip, due to the high stacking fault energy in twinning. In the region of nano grain sizes smaller than a critical grain size, the deformation mode is changed from dislocation slip to twinning to accommodate the external stress, due to σ_t lower than σ_y. The numerical solutions for σ_y and σ_t of Cu are finally compared with experimental results.

[상변태1-2 | 09:15]

Frank-Reed source and fatigue life in metals: Nam Heo* (I LINK)

Keywords: Frank-Reed source, grain size, temperature, dislocation velocity, fatigue limit

The Frank-Reed operation stress($\sigma_{F\text{-}R}$) is the minimum applied stress for multiplication of dislocations, and it governs the plastic deformation in metals. During fatigue test, fatigue cracking begins at the instance that the tensile stress induced from a surface notch tip made by slip bands exceeds the theoretical cleavage fracture strength(σ_{thcl}). Meanwhile, the fatigue limit($\sigma_{f.l.}$) is the applied stress, below which fatigue cracking does not occur during fatigue test. The fatigue limit($\sigma_{f.l.}$) increases with decreasing grain size(d) and temperature and with increasing precipitation hardening and dislocation density. This is simply due to the increase of Frank-Reed operation stress($\sigma_{F\text{-}R}$) expressed as $\sigma_{F\text{-}R}=2\tau_{crss}+4Gb/l$. Here, τ_{crss} is the minimum shear stress required for moving an edge dislocation, G is the shear modulus, l is the edge dislocation segment acting as Frank-Reed source, and it is inversely proportional to grain size(i.e, $l=(1/3\sim1/2)\cdot d$). Therefore, the Frank-Reed source minimum operation stress is lower in large grain size than small grain size. During fatigue test, the notch size approaches more quickly a critical value in the large grain size, which causes the shorter fatigue life(N). This is due to the shorter critical time() which is the total time that it takes purely to form the critical surface notch size. In a time within the total time, the applied stress is higher than $\sigma_{F\text{-}R}$ and slip bands continues to move to the surface to form the notch. The influence of the other factors on fatigue life can be understood from the viewpoint. Under stress conditions higher than the fatigue limit($\sigma_{f.l.}$), the relationship of linear scale(S)-log scale(N) diagram is generally linear and its slope shows a negative sign. Assuming that the fatigue life is inversely proportional to the dislocation velocity($\nu_{disl.}$), it is attributed to the positively linear relationship between the applied stress and the log scale($\nu_{disl.}$) that the time that it takes to form the critical surface notch size becomes shorter with increasing applied stress.With decreasing grain size and temperature and with increasing precipitation hardening and dislocation density, the linear relationship between linear scale(S)-log scale(N) diagram shifts parallely into a right upward direction without any change of the slope. The transition point between the negative slope and the fatigue limit moves in the right upward direction rather than the upward direction with decreasing grain size. This arises from the less number of slip bands in the smaller grain size which causes the longer fatigue life(N). The fatigue slope in the linear scale(S)-log scale(N) diagram of a binary alloy lies downward with increasing low melting point solute content. First, the melting point of the binary alloy is lowered with increasing solute content, resulting in the decrease of $\sigma_{F\text{-}R}$. Second, the dislocation velocity increases more rapidly in the binary alloy than the pure metal. As a result, the time it takes to form the critical notch size becomes much shorter in the binary alloy with increasing applied stress. In a pure metal or alloy systems, the slope of the linear scale(S)-log scale(N) diagram is nearly similar, irrespective of grain size, temperature, degree of precipitation hardening, and dislocation density. Such a fatigue behavior means that the slope in the log((ν_{disl})-log(shear stress) diagram of a system is not largely influenced by the factors. It is finally emphasized that in a metal of infinite grain size $\sigma_{f.l.}$ is equal to σ_{yo} of Hall-Petch relationship($\sigma_y=\sigma_{yo}+k\cdot d^{-1/2}$), its magnitude is $2\tau_{crss}$, but $\sigma_{f.l.}$ in a commercial metal is generally larger than σ_{yo}.

[상변태1-3 | 09:30]

Yield drop and Lüders strain magnitude in steels: Nam Heo* (I LINK)

Keywords: Yield drop magnitude, grain size, strain rate, temperature, Lüders strain

A stress-strain curve is composed of micro yield strength (σ_y), upper yield point (σ_{ulp}), lower yield point (σ_{lyp}), Lüders strain caused by Lüders bands, ultimate tensile strength (σ_{uts}), and fracture strength (σ_f). Until now, the physical meaning for the stresses and yield drop phenomenon (dropping of stress from σ_{uyp} to σ_{lyp}) have not clearly been explained. Micro-yielding, which is caused by the propagation of the pile-up dislocations from the specific grain G1 into the grain G2, occurs at the instance that the shear stress in the slip direction exceeds the theoretical shear strength (τ_{thsh}) in the slip direction. The micro yield stress (σ_y) means the stress at the instance of micro-yielding. As the front continues to propagate into other grains, the region around the front is highly deformed, due to the extremely high stress concentration at the front of pile-up dislocation. The size of deformed region is expressed as about 10 d (here, d is grain size). When the front of pile-up dislocations goes out from specimen interior to surface, one Lüders band begins to appear on the surface, and at the same time the tensile stress drops from σ_{ulp} to σ_{lyp}. After Lüders bands spreads out on the specimen surface, the specimen starts to be strain-hardened. After the ultimate tensile strength (σ_{uts}) showing the maximum dislocation density, the stress on the stress-strain curve begins to decrease. This is because the plastic strain rate becomes higher than elastic strain rate after σ_{uts}. In this presentation, effects of grain size, temperature, and strain rate on yield drop magnitude are understood using Hall-Petch concept and a universal equation governing the stress-strain curve. The dependence of Lüders strain on temperature is additionally explained using the universal equation.

상변태2-1 | 10:00]

Thermodynamic and kinetic behaviors in gradient rejuvenated amorphous microwires: Shuang Su (Harbin Institute of Technology, Seoul National University), Myeong Jun Lee (Seoul National University), Zhiliang Ning*, Yongjiang Huang (Harbin Institute of Technology), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

Keywords: Rejuvenation, Free volume content, Ion irradiation, Amorphous microwires

Rejuvenation treatments have emerged as an effective strategy to enhance the energy state of metallic glasses (MGs), significantly improving their ductility at room temperature. These rejuvenated MGs exhibit a high free volume content, and ion irradiation has proven to be a particularly effective method for introducing substantial excess free volume to the surface of MGs, thereby elevating their energy states. In this study, we utilized a combination of conventional differential scanning calorimetry (DSC) and flash DSC to quantitatively assess the impact of free volume content on the thermal behaviors of CuZr-based amorphous microwires (AMs) subjected to ion irradiation under continuous heating conditions. Our experimental work established the correlation between transformation phenomena and the time/temperature scales of these AMs across a broad temperature range, from the glass transition temperature to the melting point. By analyzing characteristic temperatures and transformation enthalpy at various positions along the microwires, we were able to determine the energy state and effective cooling rate of the ion-irradiated AMs. This research provides critical insights into the thermal behavior of rejuvenated AMs and offers valuable guidance for the future design of AMs with enhanced free volume content.

[상변태2-2 | 10:15]

Zr계 비정질 합금의 구조에 따른 헬륨 이온 조사 반응 연구: 이명준, 유근희 (서울대학교), 윤국노, Medhi Balooch, Peter Hosemann (University of California Berkeley), 박은수* (서울대학교)

Keywords: 비정질 합금, 헬륨 이온 조사, 나노인덴테이션, AFM

원자력 발전은 다량의 에너지를 안정적으로 공급할 수 있어, 보다 집적되고 고도화된 현대 산업에 가장 적합한 발전 방식이다. 원자력 발전의 안정성을 높이기 위해서는 발전기가 안전하고 안정적으로 가동되기에 적합한 구조 재료를 개발하는 것이 매우 중요하다. 원자력 발전 중에는 핵분열 과정에서 재료가 지속적으로 중성자에 노출되며 핵변환이 일어나거나 핵융합 과정에서 중수소와 삼중수소의 핵융합이 일어나는 중에 헬륨이 생성되며 원자로를 구성하는 구조 재료 내에 조사된다. 이로 인해, 헬륨 이온 조사 저항성이 높은 구조 재료를 연구하는 일은 곧 원자로의 안정성과도 직결되는 문제이다. 비정질 합금의 경우 그 특유의 무질서한 원자 구조로 인해 헬륨 이온 trap site로 작용할 결정학적 결함이 부재하여 헬륨 이온 조사 저항성이 높을 것으로 예상되는 재료로, 그러한 특징을 바탕으로 원자력 재료로 사용하기 위한 연구들이 진행된 바가 있다. 비정질 합금의 경우 그 물성이 비정질의 구조에 따라 달라지는 것으로 알려져 있기에, 우리는 Zr계 벌크 비정질 합금 형성 조성을 대상으로 하여 비정질이 형성될 때의 냉각 속도를 조절하여 비정질 합금의 구조를 달리하고, 그렇게 구조에 따라 헬륨 이온 조사에 대한 반응이 어떻게 달라지는지를 확인하고자 한다. 본 연구에서는 헬륨 이온 현미경을 통해 구조가 서로 다른 Zr계 비정질 합금에 헬륨 이온을 조사한 뒤, 원자힘 현미경으로 swelling height을 분석하여 헬륨 이온 조사에 대한 반응의 변화를 알아보았다. 이러한 연구 결과가 추후 원자력 구조 재료로 비정질 합금을 활용하는 것에 대한 insight를 제공할 것으로 기대한다.

[상변태2-3 | 10:30]

Formation Behavior of Initial Medium-Range Order (MRO) in Amorphous Matrix with Multiple Immiscible Elements: Subin Ahn, Hyungi Min, and Eun Soo Park* (Seoul National University)

Keywords: Medium-Range Order, Soft Magnetic Materials, Immiscible Elements, Nanocluster

Nanocrystalline soft magnetic materials have attracted significant attention as next-generation magnetic materials due to their excellent

permeability and low coercivity. Since nanocrystal growth proceeds when clusters reach a critical size to act as heterogeneous nucleation sites, understanding the formation behavior of initial cluster medium-range order (MRO) is crucial. Particularly, high-performance nanocrystalline materials with high ferromagnetic element content, as currently demanded by industry, face challenges in achieving fine nanocrystalline structures, making the control of growth behavior through diverse combinations of immiscible elements an important research focus. This study investigates the effects of multiple immiscible elements addition on the initial MRO formation behavior in the amorphous matrix. In Fe-Si-B-based amorphous alloys, analysis of individual element additions revealed that Ag forms clusters at lower temperatures compared to Cu, while Sn, which typically forms compounds with Fe when added alone, promotes Cu cluster growth when co-added with Cu. The initial crystallization behavior was examined through DSC analysis, and the initial cluster formation behavior was observed using in situ WAXS analysis. Additionally, SAXS analysis was employed to quantitatively evaluate the nanocrystal size distribution according to compositional variations. This study suggests that MRO control through multiple immiscible element additions can serve as an effective design strategy for enhancing nanocrystalline soft magnetic material properties, providing a foundation for optimal composition design of next-generation nanocrystalline materials containing high ferromagnetic element content.

[상변태2-4 | 10:45]

Martensitic Transformation in Metastable Austenitic Stainless Steel during Electrochemical Process: 채준영, 이귀형 (서울대학교), 조영근 (포항공과대학교), 정다믈, 권영균 (경희대학교), 정인호 (서울대학교), 김성준 (포항공과대학교), 한흥남* (서울대학교)

Keywords: 준안정 오스테나이트계 스테인리스강, 전기화학 반응, 마르텐사이트 변태, 극표면

준안정 오스테나이트계 스테인리스강에서 양극 전기화학 연마(AEP) 및 음극 수소 차징(CHC) 과정 중 마르텐사이트 변태가 발생하는 것을 확인하였다. AEP의 경우, EBSD, XRD 및 페라이트스코프 분석을 통해 마르텐사이트 변태가 시편 표면에 국한됨을 확인하였다. 마르텐사이트 변태가 유발되는 원인을 규명하기 위해, COMSOL Multiphysics 소프트웨어를 이용하여 다양한 전압 조건에서 시편 표면의 전하 분포를 계산하였다. 또한, 표면 형상을 정확히 반영하기 위해 주사탐침현미경(AFM)으로 표면 거칠기의 3차원 분포를 측정하고, 이를 COMSOL Multiphysics 시뮬레이션의 초기 조건으로 적용하였다. 최종적으로, 얻어진 전하 분포를 반영한 제 1원리 계산 결과, 축적된 전하에 의해 유발된 응력이 마르텐사이트 변태를 발생시킬 수 있음을 확인하였다. CHC의 경우, 임계 전류 밀도와 임계 시간을 초과하는 조건에서 마르텐사이트 변태가 발생함을 EBSD 분석을 통해 확인하였다. 한편, 수소의 전하 효과를 검증하기 위해 외부 자기장을 인가하여 다양한 방향으로 로렌츠 힘을 발생시켰으며, 경도 시험 및 미세조직 분석을 통해 마르텐사이트 분율의 분포가 로렌츠 힘의 방향을 따라 변화함을 관찰하였다. 또한, 로렌츠 힘을 시편의 깊이 방향으로 인가했을 때, 수소 장입 깊이가 증가함을 파면 분석을 통해 확인하였다. 이를 통해, CHC 과정에서 발생하는 마르텐사이트 변태가 표면 부근의 수소 전하 축적으로 인해 영향을 받을 수 있음을 밝혀냈다.

[상변태2-5 | 11:00]

적층결함 에너지 (Stacking Fault Energy) 조절을 통한 작은 결정립의 Fe-Mn-Si계 형상기억합금 조성설계 : 윤제인, 박은수*, 김지영 (서울대학교)

Keywords: Fe-Mn-Si계 형상기억합금, 작은 결정립, 적층결함에너지

형상기억합금(Shape Memory Alloys, SMA)은 외부 변형 후 가열하거나 응력을 제거하면 원래 형태로 복원될 수 있는 금속 소재로, 로봇, 의료, 군사 분야를 비롯한 다양한 산업에서 널리 활용되고 있다. 이 중 Fe-Mn-Si계 형상기억합금은 저렴한 제조 비용과 우수한 기계적 특성으로 주목받고 있으나, 복원 응력(recovery stress), 복원 변형률(recovery strain), 그리고 형상기억특성이 Ni-Ti 합금에 비해 부족하다는 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 기존 연구에서는 결정립 계면 밀도 증가를 통한 회복 변형률과 복원력 향상을 시도하였다. 그러나 결정립 크기 감소 과정에서 어닐링 쌍정 계면(Annealing Twin Boundary, ATB) 밀도가 함께 증가하면서 오히려 형상기억특성이 저하되는 문제가 발생하였고, 이를 해결하기 위해 열기계 처리(Thermo-Mechanical Treatment, TMT) 공법을 통해 ATB를 제거함으로써 복원력을 향상시키는 연구가 진행된 바 있다. 본 연구는 조성제어를 통해 SFE(Stacking Fault Energy)를 조절함으로써 결함밀도를 최적화하고, 이를 통해 Fe-Mn-Si계 형상기억합금(SMA)의 성능을 향상시키는 것을 목표로 한다. 적층결함은 마르텐사이트 핵 형성의 근원지로 작용하여 정방향 마르텐사이트 변태를 촉진하지만, SFE가 지나치게 낮을 경우 어닐링 쌍정 계면(ATB) 밀도가 증가하여 오히려 형상기억 특성이 저하될 수 있다. 따라서 작은 결정립을 갖는 SMA에서 SFE의 적절한 조절은 핵심적인 요소로 작용한다. 본 연구에서는 Cu, Co, V, C 등의 첨가 원소를 활용하여 설계된 합금 조성의 최적 SFE 구간을 Thermo-Calc 소프트웨어를 활용해 계산하였다. 이 계산 결과를 바탕으로 합금을 제작하고, 회복 변형률, 복원력, 형상기억 특성을 평가하여 최적의 SFE 범위와 합금 조성을 도출하였다. 본 연구는 Fe-Mn-Si계 형상기억합금에서 최적의 SFE를 갖는 합금 조성을 설계함으로써, 작은 결정립 조건에서도 우수한 형상기억특성을 유지할 수 있도록 한 점에서 의의를 가진다. 이를 통해 비열탄성 마르텐사이트 변태를 활용한 형상기억합금의 미세조직 설계에 대한 새로운 방향을 제시하며, 향후 다양한 첨가 원소를 활용한 형상기억합금 개발 및 실용화에 중요한 가이드라인을 제공할 것으로 기대된다.

[상변태2-6 | 11:15]

분말야금 VC기반 공구강의 상 형성 거동에 미치는 탄소 함량의 영향: 박성민 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 정소진 (한국생산기술연구원), 정야호 (코나솔), 박광석 (한국생산기술연구원), 고원석 (인하대학교), 서보성 (한국생산기술연구원), 김대하 (포항금속소재산업진흥원), 김동회* (고려대학교), 박형기* (한국생산기술연구원)

Keywords: VC-based tool steel, CPM-9V, vanadium carbide, carbon content, phase transformation

고속도공구강(high speed tool steel)은 일반적으로 고탄소강에 WC, VC, NbC, CrC, TiC등과 같은 탄화물을 통해 기계적 물성을 향상시킨다. 특히 바나듐계 고속도공구강은 경도가 높은 VC를 석출시켜 우수한 경도와 내모마성을 갖고 있으며, 철강 등의 고강도 금속 소재를 성형하는 압연롤로 사용된다. 최근 비강도가 높은 소재에 대한 이슈가 증가하여 고강도 Al, GIGA steel에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 이러한 소재의 가공은 공구 및 금형을 더욱 극한의 환경에서 사용하게 된다. 따라서 마모와 국부적인 파손으로 인해 제품생산에 있어 악영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 VC 기반 공구강의 상 형성 및 기계적 물성에 대한 탄소함량의 영향을 조사하였다. Crucible Powder metallurgy (CPM)-9V조성을 기반으로 바나듐 함량을 유지하며 탄소함량을 제어하여 4가지 금속분말을 제작하였다. 분말 제조 후, Hot isostatic pressing을 통해 벌크 시료를 제작하고 quenching-tempering (QT) 열처리를 진행하였다. 제작된 벌크 시료의 상 형성 거동에 미치는 탄소함량의 영향을 분석하기 위해 Thermo-calc software를 이용한 열역학적 계산과 고온 in-situ XRD 분석을 진행하였다. 또한, thermo-calc의 steel mobility database를 이용해 TTT diagram을 도출하였다. 이후, 경도 및 충격시험을 통해 벌크 시료의 탄소 함량에 따른 변화를 분석하였다.

[상변태2-7 | 11:30]

Influence of intercritial annealing on the microstructure and tensile properties of extremely low-carbon dual-phase steels: Wonhui Jo (Kookmin Univ.), Cho Hyeon Lee (Kookmin Univ.), Seonghyeon Yang (Kookmin Univ.), Taehyeong Kim (Pukyong National Univ.), Junseok Lee (Pukyong National Univ.), Seong-Tak Oh (Hyundai-steel), Yong-Min Hyun (Hyundai-steel), Jae Wung Bae (Pukyong National Univ.), and Jae Bok Seol* (Kookmin Univ.)

Keywords: Dual phase steel, Martnesite, Ferrite, heat treatment, phase transformation

Dual Phase (DP) steel, characterized by a mixed microstructure of soft ferrite and hard martensite, achieves high strength while maintaining ductility. By controlling the phase ratio of martensite and ferrite, tensile strength and hardness can be enhanced. It is generally known that increasing the martensite fraction in DP steel leads to higher strength but reduces ductility. However, achieving high strength while maintaining ductility despite an increased martensite fraction would significantly contribute to the development of high-performance steels. This study analyzes the relationship between the microstructure and tensile behavior of DP steel. During intercritical annealing, ε-carbides with an HCP (Hexagonal Close Packed) structure within martensite and Mn-segregated regions along grain boundaries undergo a phase transformation through an HCP-FCC (Face Centered Cubic)-BCC (Body Centered Cubic) process, leading to the formation of fresh α'-martensite. Specifically, this study aims to elucidate the tensile deformation behavior by analyzing the microstructural characteristics of fresh α'-martensite and ferrite in the matrix.

[상변태3-1 | 14:00] 조청강연

Control of Precipitates in 7xxx Aluminum Alloys through Optimized Heat Treatment: Hyunjoo Choi*, Dae-Young Kim, Cho Hyun Lee, and Jaebok Seol* (Kookmin University)

Keywords: Aluminum, Precipitates, Mechanical Properties, 7xxx

In this study, we present an alloy design strategy focusing on the precipitation control of 7xxx series aluminum alloys through tailored heat treatment conditions, aiming for enhanced mechanical performance. By reducing the copper content and applying low-temperature artificial aging, precipitation metastability is induced, characterized by a minimized density of stable precipitates at grain boundaries and an increased presence of shearable metastable Mg1–xZnx(Cu)-η' precipitates within the grains. This precise control over the precipitation sequence mitigates interfacial stress concentrations and improves fatigue resistance, corrosion resistance, and tensile strength simultaneously. The findings emphasize the critical role of heat treatment in manipulating precipitate morphology and distribution, providing valuable insights into the development of high-strength, fatigue-resistant aluminum alloys for advanced aerospace applications. This work contributes to the phase transformation field by demonstrating how thermodynamic and kinetic control during aging can optimize the mechanical properties of aluminum alloys.

[상변태3-2 | 14:25]

Analysis of the gamma prime size effect on the cP4 to hP24 Phase Transformation behavior of a Co-based superalloy system: 민현기 (서울대학교), W.Streit Cunningham (University of California, Santa Barbara), 윤국노 (University of California, Berkeley), 김민석 (서울대학교), 고원석 (인하대학교), Daniel S Gianola* (University of California, Santa Barbara), 박은수* (서울대학교)

Keywords: Superalloy, Defect Engineering, High temperature materials, Martensite

고효율 발전 등을 위한 가스 터빈 및 우주 산업 등의 발전에 있어, 고온용 구조 소재 개발이 필수적이다. 이와 같은 목적을 위하여 독특한 미세구조를 가져 고온 물성이 우수한 초합금(superalloy)이 개발되어 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이러한 초합금은 내부에 석출되는 cP4 gamma prime 상과 fcc 기지가 서로 coherent한 interface를 가지기 때문에 고온에서 우수한 물성을 보인다. 한편, fcc 상 안정성이 낮아 면 결함이 발생하기 쉬운 코발트기 초합금의 경우, 면 결함의 분포, 밀도 등을 변화시킴으로서 물성을 다방면에서 제어할 수 있음이 알려져 있다. 특히, 최근 적층 결함, 쌍정 등을 통한 부분적 육방 밀집 구조로의 상변태가 부분적인 강화 효과를 일으켜 전체적인 합금의 강도 및 연성을 획기적으로 개선시킬 수 있음이 보고된 바 있다. 이에 본 연구에서는 Co-Cr-Ti 3원계 초합금계의 적층결함에너지를 제어하여 gamma prime 석출상의 면 결함을 제어하고자 하였다. 이에 더 나아가 면 결함의 superlattice 형성을 통한 부분적 hP24 상으로의 상변태 거동을 관찰하였으며, 해당 상변태 거동이 (111) 면의 구성 변화 없이 적층 순서의 변화만으로 이루어지는 Martensitic Transformation임을 확인하였다. 더불어, 해당 변태 거동에 gamma prime 상의 크기가

끼치는 영향을 TEM, APT 등의 나노 스케일 분석과, DFT를 통한 시뮬레이션을 병행하여 분석하였다. 그 결과, 해당 상변태 거동이 음의 적층결함에너지를 가지는 gamma prime 조성 때문임을 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 이러한 변태 거동이 fcc 기지와의 coherent한 interface 때문에 억제됨을 발견하였다. 이후 해당 변태를 일어나게 하는 critical한 size를 분석하였으며, 크기에 따라 해당 martensitic tranformation의 거동이 어떻게 변화하는지 해석하였다. 또한, hP24로 변태의 초기 과정을 분석함으로서, 위 변태 거동의 메커니즘을 이해하고자 하였다. 위와 같은 연구 결과는 코발트기 초합금의 상변태 메커니즘에 대한 심도깊은 이해를 제공함과 동시에, 향후 코발트기 초합금 뿐 아니라 상변태를 통한 재료의 고온 변형 거동 제어를 위한 초기 단계 연구로써, 다양한 합금군에 적용 가능하다는 점에서 큰 의의가 있다.

[상변태3-3 | 14:40]

Atomistic Insights into the Additive Manufacturing of NiAl Shape-Memory Alloys via Molecular Dynamics: Jong-Hoon Park and Won-Seok Ko* (Inha University)

Keywords: Atomistic simulation, Shape-memory alloy, Martensitic phase transformation, Additive manufacturing, Ni–Al

Reversible martensitic phase transformation is a hallmark of shape-memory alloys (SMAs), enabling their use in aerospace, robotics, automotive, and microelectromechanical systems. Among various SMAs, Ni–Al-based systems have attracted significant attention for high-temperature applications due to their inherently high transformation temperatures, excellent oxidation resistance at elevated temperatures, and superior mechanical strength. However, the intrinsic brittleness at room temperature severely limits their workability, confining their practical use to relatively simple components. To overcome these challenges, additive manufacturing (AM) techniques have recently been explored to fabricate complex Ni–Al SMA components. Despite promising advances, the influence of processing parameters—such as laser scanning speed and power—on defect formation, phase transformation behavior, and the resultant performance remains insufficiently understood. In this study, we employ molecular dynamics simulations to elucidate the correlation between atomic-scale defects induced during the AM process and the phase transformation characteristics of Ni–Al SMAs. Specifically, we investigate how variations in laser scanning speed and power affect the development of microstructural features, including defect fraction and order parameter, and their subsequent impact on the martensitic transformation behavior. The insights gained are expected to provide a basis for optimizing processing parameters to enhance the phase transformation properties and overall performance of additively manufactured Ni–Al SMAs.

[상변태3-4 | 14:55]

Ga 및 Si 첨가에 따른 Cu 기반 컬러 합금의 광학적·기계적 특성 제어: 조가은, 김기범*, 홍성환, 박혜진, 강결찬 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 장성문 (세종대학교)

Keywords: 컬러 합금, CIE Lab* 색 공간, 적층결함에너지(SFE), 고용강화

Cu 기반 컬러 합금은 특정 용질 원소의 첨가를 통해 전자 구조를 변화시켜 특정 파장의 빛을 선택적으로 흡수·반사함으로써 색상을 조절할 수 있으며, 동시에 기계적 물성에도 영향을 미친다. 이러한 특성을 활용하여 색상과 물성을 동시에 조절할 수 있는 합금을 설계하기 위해, 기존 연구에서는 첨가 원소로 Ga을 선택하였다. Ga은 Cu의 적층 결함 에너지(Stacking Fault Energy, SFE)를 감소시켜 쌍정 변형(Twinning Deformation)을 촉진하고, 이에 따라 연성이 증가하여 기계적 물성이 향상될 수 있다. 또한, Ga의 높은 고용한도는 단상 영역을 확장하여 보다 정밀한 색상 조절을 가능하게 한다. 그러나 선행 연구에서는 Ga 함량이 5at.% 이하로 제한됨에 따라 색상 구현 범위와 기계적 물성 향상이 제한적이었다. 따라서 본 연구에서는 더 높은 Ga 함량이 색상 변화 및 기계적 물성 개선에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 한편, Cu에 Ga을 첨가하는 것만으로는 충분한 기계적 물성을 확보하기 어려우므로, 이를 보완하기 위해 Si을 첨가하여 강도 증가를 유도하였다. 이에 따라 본 연구에서는 Cu-Ga-Si 삼원계 합금 설계를 위한 기초 자료 확보를 목적으로 Cu-Si 이원계 합금 연구를 병행하여 진행하였다. Si은 Cu(원자 반지름 ≈ 1.28 Å)보다 작은 원자 반지름(≈ 1.17 Å)을 가지므로 격자 왜곡(strain field)을 증가시켜 전위 이동을 효과적으로 억제할 수 있다. 또한, Si의 낮은 확산 속도는 균일한 고용 강화와 특정 상의 형성을 촉진하여 강도 증가 효과를 더욱 극대화할 수 있을 것으로 예상하였다. 본 연구에서는 유도가열 주조법(Induction melting)을 이용하여 as-cast 상태의 Cu-Ga 및 Cu-Si 합금을 설계 및 제조하였다. 미세구조 및 상 분석을 위해 X-선 회절 분석(XRD)과 주사전자현미경(SEM)을 사용하였고, 기계적 물성은 비커스 경도 시험을 통해 평가하였다. 또한, 분광 측색계를 이용하여 CIE Lab* 색 공간에서의 색상 변화를 분석하였다. 연구 결과, Cu-Ga 합금은 높은 Ga 함량에서 더욱 넓은 색상 조절 범위를 가지며, SFE 감소에 따른 연성 증가로 인해 기계적 물성 또한 향상됨을 확인하였다. Cu-Si 합금은 강도와 경도가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 Si의 격자 왜곡 효과 및 낮은 확산 속도에 기인할 수 있음을 시사한다. 이러한 결과는 두 합금이 각기 다른 산업적 응용 가능성을 가지며, 특정 요구 특성에 따라 선택적으로 활용될 수 있음을 시사한다.

[상변태3-5 | 15:10]

적층 결함 에너지 제어 기반 미세조직 변형 제어를 이용한 Cu-5Al-5Zn-1Sn 합금의 기계적 및 광학적 특성 거동 연구: 강결찬, 조가은, 정의감, 조창희, Yusupov Dilshodbek, 박혜진, 홍성환 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범* (세종대학교)

Keywords: 적층 결함 에너지, 소성변형, Deformation Twin, Annealing Twin, 재결정화

Cu-Al-Zn-Sn 합금은 원소 비율 제어에 따라 합금 자체적으로 금색을 갖는 컬러 합금이며, 현재 상용 합금으로서 유로화에 적용되

어 있다. 하지만 합금의 기계적 특성은 화폐를 제외한 다른 분야에 적용되기에는 한계점이 존재하며, Cu- 계 합금의 기계적 특성을 개선하기 위한 연구는 활발히 진행되어 왔다. 또한, 조성적 한계로 인한 광학적 특성 제어의 한계를 극복하기 위해 연구가 진행중이며, 합금에 소성변형을 통해 전이에너지를 제어함에 따라 합금의 색도 변화를 유도할 수 있을 것으로 사료된다. 합금의 기계적 특성과 광학적 특성 제어를 위해 선행연구 조사를 실시하였으며, Cu- 계 합금은 첨가 원소(X=Al,Zn,Sn,Ni,…) 설계를 통해 적층 결함 에너지(SFE)를 효과적으로 제어할 수 있다고 보고된 바 있다. SFE가 낮은 합금의 경우 미세조직의 주요 변형 매커니즘이 Deformation Twin으로 변화하게 된다. 이는 SFE가 낮을수록 부분 전위 간의 간격이 넓을 때 합금이 가장 안정적인 에너지를 갖게 되어 Cross Slip을 억제하게 됨에 따라 소성 변형 시, Deformation Twin 생성이 촉진되기 때문이다. 이러한 합금은 소성변형후 열처리시 재결정화를 통해 Annealing Twin을 생성하고 합금의 기계적 특성을 제어할 수 있다. 다양한 grain boundary 구조 및 결함 유도를 통해 합금의 전기적구조, density of state를 제어할 수 있다는 연구결과가 보고된 바 있다. 이러한 이론을 바탕으로 본 연구에서는 Cu-계 합금의 적층결함 에너지 제어를 기반으로 소성변형 및 열처리를 통한 미세조직 및 기계적 특성 제어 연구를 실시했다. 본 연구에서는 단상을 갖는 컬러 합금이자 상용 Cu-5Al-5Zn-1Sn (노르딕골드)합금의 냉간 압연을 실시하고, 열처리 공정의 조건 제어를 통하여 결정립계 특성을 제어하였다. 합금의 미세조직과 상분석을 위해 XRD (Pananalytical Empyrean) 분석과 SEM (JEOL JSM-6390), TEM(Tecnai F20 G2) 분석을 진행하였다. 합금의 결정립 방위 및 합금 내 결함 분석을 위해 EBSD (TSL Hikari) 분석을 실시하였다. 합금의 광학적 특성은 Photon-Spectrometer(SCINCO, Colormate)장비를 이용하여 합금의 반사도를 측정하였고 CIE L*a*b* 색 공간으로 변환하였다. 합금의 기계적 특성 평가를 위해 Micro indenter(SHIMADZU HMV-G21DT)를 이용하여 비커스 경도를 측정하였다.

[상변태3-6 | 15:25]

Effects of Precipitation Composition on Mechanical Properties in Lead-Free Brass Alloys: 이지은, 박은수* (서울대학교), 이시연 (원진금속(주))

Keywords: Lead-Free Brass, Precipitate, Microstructure, Mechanical property, Machinability

연성, 내부식성, 경도 및 내마모성이 우수한 소재인 황동합금은 복잡한 형상으로의 가공이 필요한 수도 및 가스 배관, 장식품 등으로 널리 활용되어 우수한 절삭 특성이 필수적으로 요구된다. 황동합금은 구리 및 아연 외 다른 원소를 첨가함에 따라 특성이 달라지게 되는데, 납을 첨가한 유연 황동은 절삭성이 우수한 특성을 가지나 인체 유해성으로 인하여 국제적으로 납의 사용 규제가 이루어지고 있기 때문에 이를 대체하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 납을 대체하기 위한 노력으로, 특히 많은 연구가 이루어졌던 비스무스 첨가 황동 합금의 경우, 비스무스의 낮은 계면 에너지로 인해 황동 소재의 입계를 따라 필름 형태의 석출이 상당향 발생하여, 절삭 가공 시에 급격한 파단을 일으켜 절삭성을 저해시키는 문제가 있다. 본 연구에서는 구리와 양의 혼합열을 가져 황동에 고용되지 않고 제 2 석출상을 형성하여 윤활 역할을 할 수 있도록 하는 합금 원소인 Fe, Cr, Ni 조성의 합금을 황동 기지에 석출시키고 후처리(냉간압연, 열처리) 공정을 통해 고강도, 고내식성, 고가공성 및 우수한 절삭성 등의 다기능을 확보하고자 하였다. 또한 해당 원소들의 경우 가격이 상대적으로 저렴하고 시중에서 스크랩 형태로 쉽게 구할 수 있어 재활용률이 높은 장점을 가진다. 석출물의 조성에 따라 형성되는 미세구조와 이에 따른 기계적 특성 및 절삭성 간의 상관관계를 파악하고자 무연황동합금(Cu-Zn), 유연황동합금(Cu-Zn-Pb), Stainless steel 첨가 황동합금을 induction melteing 주조 후, 후처리 공정에서의 열처리 온도 및 시간 조건을 달리하여 SEM, XRD를 통한 미세구조 및 상분석과 기계적 특성(경도, 강도), 절삭성을 측정해 분석하였다. 본 연구는 친환경성을 만족하면서도 절삭성과 기계적 특성의 Trade-off를 극복할 수 있는 합금 설계를 위한 새로운 무연황동합금 소재 개발에 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

[상변태4-1 | 15:50]

CrMnFeCoNi계 고엔트로피합금의 FCC/HCP 마르텐사이트 변태 및 형상기억특성 제어를 위한 조성비 영향 분석: 임진수랑, 이제인* (부산대학교)

Keywords: High-entropy alloy, Shape memory alloy, Martensitic transformation

고엔트로피합금 (High-entropy alloys) 또는 Compositionally complex alloys 등의 다성분계 합금의 등장은 합금 설계 영역을 기존보다 더 넓고, 고차원의 조성 영역으로 확장시켜 주었으며, 공정 제어 변수까지 합쳐져 무수히 다양한 특성의 신합금 개발을 가능케 했다. 현재까지 구성원소를 치환하여 고용강화, 석출강화를 유도하거나 소성 변형 메커니즘을 제어해 고강도-고연신의 신합금 개발이 다수 보고되었다. 그 중, 준안정상의 상변태를 활용한 신합금 개발이 많은 주목을 받고 있으며, 이를 활용한 변태유기소성 합금, 형상기억합금이 다수 개발되었다. CrMnFeCoNi계 합금에서도 Co/Ni 비 조절을 통해 FCC/HCP 상변태에 의한 형상기억특성이 나타나며, 상용 FeMnSi계 형상기억합금과 유사한 성능을 보여주어 차세대 형상기억합금계로 주목받고 있다. 다만, 본 CrMnFeCoNi계 내 무수히 많은 조성적 변수로 인해 구성원소가 형상기억특성에 미치는 효과에 대한 이해가 부족하고, 조성비 제어를 통해 고성능의 형상기억 신합금 개발이 더딘 실정이다. 이를 효율적으로 극복하기 위해선 고속대량 기법 기반의 형상기억합금 스크리닝 및 구성 원소비 영향 분석이 필수적이다. 따라서, 본 연구에선 CALPHAD에 기반한 고속대량 FCC/HCP 상안정성 계산을 통해 다량의 CrMnFeCoNi계 형상기억 신합금을 빠르게 개발했고, 개발 합금의 미세조직, FCC/HCP 상변태 및 압축 회복 거동을 일괄적으로 평가하였다. 이후, 본 결과를 토대로 FCC/HCP 상안정성, 결정학적 가역성, FCC 모상의 항복 강도의 측면에서 구성 원소가 각 요인에 미치는 영향을 분석하고, 이를 활용하여 형상기억특성을 향상시키기 위한 조성비 제어 방법을 수립했다. 본 연구를 통해, 특성이 향상된 CrMnFeCoNi계 형상기억 신합금과 조성비 제어 방법을 제시함과 동시에 후속 연구 방향에 대해 제시하고자 한다.

[상변태4-2 | 16:05]

미세조직 제어를 통한 CrMnFeCoNi계 고엔트로피 합금의 형상기억 특성 향상: 정회윤, 임진수랑, 이제인* (부산대학교)

Keywords: Shape memory alloys, High-entropy alloys, Martensitic transformation, Grain size

다수의 구성원소가 동등하거나 이에 유사한 분율로 혼합된 고엔트로피 합금 개발 연구는 기존의 상용합금과는 다른 독특한 특성을 갖는 사례가 다수 보고됨에 따라, 많은 연구자들에게 큰 주목을 받고 있다. 그 중에서 fcc 및 hcp 상간의 자유에너지차이 계산을 통해 CrMnFeCoNi계 고엔트로피 합금에서 약 2 % 회복 연신율을 가짐이 보고되었다. 이는 상용화된 Fe-Mn-Si 형상기억합금의 회복 연신율과 비슷한 수치로써 큰 주목을 받게 되었다. 이러한 FCC와 HCP 간의 가역적인 상변태를 보이는 형상기억합금의 결정립 크기가 클수록 회복 연신율이 향상되는 연구결과가 있지만, 가공 후 열처리를 통해 결정립 크기를 키우는 것은 약 300 μm로 한정되어 있다. 최근 Fe-Mn-Si 합금에서 주조재를 활용하여 회복 연신율이 7.6 %까지 향상시킨 연구가 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 결정립 크기를 가지는 주조재 및 가공재의 회복특성을 확인하였다. 구체적으로 1 ~ 14 % 인장 변형 후 회복 열처리를 통해 회복특성이 평가되었으며, 결정립 크기가 725 μm로 가장 큰 열처리된 주조재가가 10 % 초기 변형률에서 가장 높은 회복 연신율 4.7 %를 보였다. 변형 후 미세조직을 EBSD로 관찰한 결과 결정립 크기가 커질수록 응력 유기 마르텐사이트 상분율이 4.8 %에서 36.8 %로 증가하였다. KAM map을 확인했을 때, 총 경계밀도가 낮아질수록 결정립계 주위 및 결정립 내부에 국부적인 방위차가 줄어듦을 확인하였다. 또한, Hollomon 식을 활용한 log scale의 진응력-변형률 곡선 분석 결과 결정립 크기가 커질수록 슬립 변형의 임계 변형률은 증가하였다. 따라서 결정립 크기가 커질수록 비가역적인 슬립 변형이 지연되고, 응력 유기 마르텐사이트 형성을 촉진시켜 CrMnFeCoNi계 고엔트로피 합금의 회복특성을 향상시켰고, 결정립 크기에 따른 회복특성과 변형 후 합금의 미세조직 그리고 임계 변형률 사이의 상관관계를 규명하였다.

[상변태4-3 | 16:20]

CoCrNi계 중엔트로피 합금의 시효 열처리에 따른 석출 거동 및 강화 메커니즘 정량적 분석: 한상윤, 류채우* (홍익대학교)

Keywords: 정합 석출, $L1_2$-Ni_3(Al, Ti) 석출물, 기계적 물성

합금의 강화 기구는 필연적으로 연신율 감소를 초래하는 Strength-ductility trade-off 현상을 동반하며, 이를 극복하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그중 시효 열처리를 통해 FCC 단상 미세구조에 $L1_2$-Ni_3(Al, Ti) 정합 석출물을 형성하여 연성 저하를 최소화하고 높은 강도를 유지하는 석출 강화형 고엔트로피 합금이 차세대 구조재료로서 각광받고 있다. 본 연구에서는 CoCrNi 합금계 내 $L1_2$ 석출 강화 효과를 나타내는 조성을 대상으로 시효 열처리 시간을 정밀하게 제어하여, $L1_2$-Ni_3(Al, Ti) 석출물의 석출 거동을 분석하고, 석출물의 조대화가 기계적 물성에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위해 주조한 합금을 균질화 처리한 후 압연 및 재결정 공정을 진행하였으며, 특정 온도에서 다양한 열처리 시간을 설정하여 석출물의 크기 및 분포를 조절하였다. $L1_2$-Ni_3(Al, Ti) 석출 양상은 Synchrotron X-ray diffraction과 이미지 분석을 통해 정량화하였으며, 인장 시험을 통해 기계적 물성을 평가하였다. 본 연구를 통해 석출물의 조대화가 CoCrNi 기반 중엔트로피 합금의 기계적 물성에 미치는 영향을 체계적으로 이해하고, 최적의 열처리 조건을 도출함으로써 고엔트로피 및 중엔트로피 합금의 상용화를 위한 초석을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

[상변태4-4 | 16:35]

MoNbTaTiV 고엔트로피 합금의 Si pack cementation 코팅에 대한 Al의 영향: 박지니, 오정석, 김선진, 박준식* (국립한밭대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, pack cementation 코팅, 확산 코팅, 내산화성, 미세구조

초고온, 고압 및 산화 분위기와 같은 극한의 환경에 노출되는 합금은 고온강도뿐만 아니라 내산화성 또한 필수적인 물성이다. 고엔트로피 합금은 상온 및 고온에서 우수한 기계적 특성으로 Ni 초내열합금을 잇는 극한 환경에 사용될 합금 중 하나로 주목받고 있다. 하지만 고엔트로피 합금은 대부분 내화 금속을 포함하여 고온 산화에 매우 취약한 특성을 가지기 때문에 내산화성을 강화하기 위한 코팅을 필요로 한다. 고엔트로피 합금 중 MoNbTaTiV 합금은 1200ºC에서 647 MPa의 우수한 압축강도를 지니고 있지만, 고온에서 MoO3 및 VO3의 승화로 인해 고온에서 형태를 유지하기가 어렵다. 여러 코팅 중 pack cementation 코팅은 복잡한 형상의 모재에도 코팅 가능하며, 코팅층과 모재 접합력이 우수하다. 본 연구에서는 MoNbTaTiV 고엔트로피 합금의 내산화성을 향상시키기 위해 Al/Si 과 Si 코팅을 pack cementation 방법으로 수행하여 고온에서 산화 저항성 특성을 미세구조적 관점에서 확인하고자 한다.

[상변태4-5 | 16:50]

Al-Ti 비율 조절에 따른 AlTiVCr 고엔트로피 합금의 미세구조 변화와 변형 메커니즘 분석: 홍동성, Yusupov Dilshodbek, 하준수, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, Kiran Shinde, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, 기계적 물성, AlTiVCr 합금 설계

고엔트로피 합금은 4-5개 이상의 금속 원소가 5~35 at.% 의 조성으로 구성되어 있는 합금이다. 높은 엔트로피로 인해 자유 에너지가 낮아짐으로써 금속간 화합물의 형성 없이 단일 고용체를 형성할 가능성이 높다. 특히, BCC 구조의 고엔트로피 합금은 높은 강도를 갖고 있어 항공우주 및 경량 자동차 부품과 같은 고성능 구조재로 주목받고 있다. 그러나 상대적으로 연성이 낮아 가공성이 제한되는 문제가 있어, 이를 개선하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 BCC 구조를 기반으로 초경량 원소를 활용한 합금을 설계하여, 강도와 변형 특성이 균형을 이루는 최적의 조성을 탐색하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 합금 조성 설계 시, 원소 간 상호 작용과 미세조직 변화를 고려하여 조성을 조정하였으며, 미세조직의 균일성을 확보하고 기계적 물성을 향상시키는 데 초점을 맞추었다. 특히, 원자 반경 차이를 최소화할 수 있는 Ti, V, Cr 합금 원소와 초경량 소재로 널리 사용되는 Al을 채택하여 취성을 완화할 수 있는 AlTiVCr 고엔트로피 합금을 개발하고자 하였다. 또한, Al과 Ti의 조성 비율 변화에 따른 금속간 화합물 형성 여부를 실험적으로 분석하고 이에 따른 기계적 물성을 평가하였다. 합금의 제조는 $Al_xTi_{80-x}V_{15}Cr_5$ (x= 35, 40, 45 at.%) 조성의

합금을 아크 용해법과 흡입 주조법을 통해 직경 3 mm, 길이 50 mm의 봉상형 시편을 주조하였다. 시편의 미세조직과 상 분석은 전자주사현미경(SEM: JEOL JSM-6390), X선 회절분석(XRD: Panalytial)을 이용하였으며, 화학적 조성은 TEM(JEM-ARM200F, Jeol의 EDS분석을 통하여 분석을 진행하였다. 기계적 물성 평가는 만능시험기(UTM, Universal Testing Machine)를 이용한 압축 시험을 상온 압축 시험을 진행하였다. 상온 압축 시험으로 얻어진 실험 데이터를 SEM으로 미세조직과 기계적 물성 간의 상관관계를 분석하였다.

[상변태4-6 | 17:05]

상 제어 기반 고엔트로피 합금 코팅의 미세조직 분석 및 다층구조 설계: 이유진, 서진오, 현명우, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

Keywords: 스퍼터링 공정, 고엔트로피 합금, 다층구조 코팅, 미세조직, 상 제어

최근 높은 경도와 우수한 내마모성 및 내산화성을 바탕으로 한 고엔트로피 합금 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 고엔트로피 합금의 우수한 특성은 금속 코팅에 대한 연구에도 활용되고 있다. 코팅 연구에 있어 구조적 설계는 물성 향상에 직결되는 중요한 요소 중 하나이므로 단층 코팅에 비해구조 설계의 특장점을 기반으로 우수한 기계적 물성 구현이 가능한 다층구조 코팅 연구가 대두되고 있다. 다층구조는 서로 다른 결정 구조를 조합함으로써 경도와 인성의 균형을 조절할 수 있으며, 이로 인해 고강도 및 내마모성 향상과 같은 다양한 기계적 특성을 최적화할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 다층구조의 장점을 단일 증착 공정 내에서 self-composite 형성을 통해 구현할 수 있음을 제안하고자 한다. 이를 위해 공정 변수를 조절하여 증착 중 국부적인 상 분리를 유도하고, 비정질 및 결정질 상이 공존하는 다층구조를 형성함으로써 추가적인 후처리 없이 최적화된 물성을 갖는 고엔트로피 합금 코팅을 제작하는 방법을 연구하였다. 우리는 선행연구를 통해 DC마그네트론 스퍼터링의 공정변수를 조절하여 단일공정 내에서 증착된 코팅층의 상을 제어를 통해 self-composite이 가능함을 확인하였다. Self-composite 형성이란, 추가적인 후처리 없이 단일 증착 공정에서 서로 다른 구조가 공존하도록 유도하는 방식으로, 공정 변수 조절을 통해 국부적인 상 분리 및 다층구조 형성을 가능하게 하며, 결과적으로 경도 및 인성 등의 물성을 조절하는 데 기여할 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 DC마그네트론 스퍼터링의 공정 변수를 조절하여 단일 공정 내에서 AlCrFeNi 조성의 타겟을 이용한 비정질과 BCC상의 self-composite 형성과 CoCrFeMnNi 조성의 타겟을 이용한 비정질과 나노결정질 FCC 상의 self-composite 형성을 유도하여 이중층 구조를 구현하고자 한다. 또한, 본 개념을 확장하여 다층구조 코팅을 설계하고자 하며, 미세구조의 정밀 분석을 통해 상 제어 기반의 다층구조 형성을 평가하고, 기계적 물성 측정을 통해 구조적 특성과의 상관관계를 규명하고자 한다. 더 나아가 최소한의 공정을 이용하여 코팅층의 구조적 특성을 최적화하는 방법을 제시하고자 한다.

순환1 : 자원순환형 알루미늄 합금 판재 심포지엄
Room 401B, 4월 24일

[순환1-1 | 09:00] 초청강연

알루미늄 스크랩 재활용 주요기술 현황과 발전: 김용신*, 김병규, 신승현 ((주)동신모텍)

Keywords: 알루미늄, 탄소국경조정세, 재활용, 생산자책임재활용제도, 순환경제

알루미늄은 19세기에 양산기술이 개발되기 이전 약 170만원/kg이었으나 전기분해 기술개발을 통해 26,000원으로 생산이 가능하게 되었으며, 1930년대 알코아에서 양산 능력을 확보함에 따라 650원/kg으로 다양한 산업에 활용되어왔다. 오늘날 알루미늄 가격은 3,716원/kg으로 조정되었으나 다가오는 2026년 탄소국경세에 따라 원자재값 대비 탄소발생분에 대한 세금이 최소 23%에서 최대 47%까지 부과될 수 있다. 알루미늄을 생산하는 글로벌 기업들은 탄소배출을 최소화하기위해 다양한 연구을 수행하였으며, 지난 5년간 생산설비의 성능개선으로 탄소배출량이 12% 감축되었다. 하지만 감축량을 적용하더라도 탄소세는 20% 이상 부과되기 때문에, 1차 지금(신괴) 알루미늄 1 kg 생산을 위해 발생하는 탄소배출량 14.8 kg 대비 탄소배출량 약 96.5%(0.52 kg) 저감할 수 있는 2차 지금(재생괴) 알루미늄이 부각되고 있다. 1차 알루미늄의 탄소배출량을 혁신적으로 절감하는 신기술 개발이 필요하지만, 현재의 기술 단계에서는 2차 알루미늄 활용하기 위한 연구가 우선적으로 사회에 적용되어야 한다. 본 연구는 다양한 산업에 소비되고 있는 알루미늄 중, 포장재로 소비되는 알루미늄 캔을 대상으로 재활용 프로세스(분류 및 선별, 전처리, 용해 및 재정련)를 소개하고, 프로세스별 장비개발 동향을 살펴보았다. 또한 알루미늄캔 재활용 관련 국내 운영중인 생산자책임재활용제도 EPR(Extended Producer Responsibility)시스템의 구조와 재활용의무이행 실적 현황을 통해 국내 EPR 제도의 문제점을 분석하였으며, 폐기물이 발생하지 않는 순환경제로 발전하기 위해서는 국내 EPR 제도가 개선이 필요하고 독일 EPR 시스템을 바탕으로 개선방향을 제시하였다.

[순환1-2 | 09:20] 초청강연

탄소 저감을 위한 재활용 알루미늄 잉곳 제조 기술 개발: 김병철*, 김대영 ((주)디에스리퀴드 기술연구소)

Keywords: 저탄소 알루미늄, 재활용, 2차지금, 정련, 플럭스

전세계적으로 평균기온의 상승과 관련된 환경이슈로 인하여 온실가스 배출을 억제하기 위해 범세계적 규제들이 엄격해지고 있는 추세이고, 이에 따라 산업에서는 친환경차(EV, HEV)의 개발과 함께 수송기기의 에너지 효율 향상을 위해 경량화 소재의 사용량을 증가시키기 위한 기술개발을 하고 있다. 특히, 경량 금속 소재인 알루미늄은 풍부한 매장량과 높은 비강도 및 내식성으로 인해 수송기기 부품의 소재로써 널리 쓰이고 있지만, 알루미늄 광석(보크사이트)으로부터 알루미늄 1차지금을 얻기까지의 제련 및 생산 과정에서 CO_2 가스가 약 16.6 tCO_2/t이 배출되므로 산업계에서는 국가적 탄소배출 규제를 대응하기 위한 대책으로 친환경 소재에 대한 요구가 급증하고 있다. 알루미늄 스크랩을 재활용하여 용해 및 정련을 통해 생산되는 2차지금은 제조 공정 중에 발생하는 CO_2 가스가 약 0.65 tCO_2/t으로 1차지금 생산 시의 탄소배출량에 비해 약 4% 수준이고, 이는 2차지금 제조 공정에서 사용되는 에너지 소모량이 1차지금 대비 95% 절감에 따른 결과이다. 따라서, 산업에서 원재료로 쓰이는 알루미늄 1차지금을 2차지금으로 대체한다면, 제품 생산 시의 탄소배출량을 급격히 저감한 친환경 제품 제조가 가능하므로 전세계적 환경 규제에 대응하여 시장 경쟁력을 높일 수 있을 것이다. 하지만, 2차지금은 스크랩을 재활용하여 제조되므로 1차지금에 비해 내재된 산화물 및 개재물 등의 불순물 측면에서 품질이 다소 떨어지는 문제가 발생할 수 있고, 이는 알루미늄 소재 제품의 성능 저하를 야기할 수 있으므로 용탕의 품질을 향상시킬 수 있는 정련 공정 기술개발이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 알루미늄 스크랩을 재활용한 2차지금 제조 시 용탕의 청정도를 확보하기 위해 양산급의 용해·정련 자동화 시스템을 구축하고, 알루미늄 용탕용 맞춤형 플럭스 제조 기술을 개발해 나가고 있다.

[순환1-3[09:40] 초청강연

재활용 알루미늄 잉곳 활용에 따른 슬라브 연속주조: 최성규*, 신종옥, 심현석 ((주)동산테크)

Keywords: 탄소중립, 재활용 알루미늄, 저탄소 알루미늄 판재, 슬라브, 연속주조

각 분야별로 탄소중립 이슈가 커지는 가운데 알루미늄은 정련 및 제련 과정에서 대량의 전기에너지를 소모하며 대부분이 화력발전을 통한 에너지 공급에 의존하고 있다. 현재 1차 알루미늄 대신 사용 후 알루미늄을 재활용하여 제품 생산 시 약 95% 수준의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있기 때문에 알루미늄 생산 업계를 포함 알루미늄을 활용하는 완성차 업계에서도 재활용 기술 개발을 위해 노력중이다. 본 기술개발은 범세계적인 환경규제에 따라 완성차 업계에 요구되고 있는 자동차용 저탄소 알루미늄 판재 국산화를 위하여 공정 내/외 스크랩 기반 재활용 잉곳 활용에 따른 슬라브 연속주조 기술로 재활용 잉곳 활용시 용탕 내에 산화피막, 비금속 개재물의 발생, 합금원소 함량 변화, 수소가스 함량 등과 슬라브 연속주조 공정시 1차 냉각, 2차 냉각으로 최종 응고가 완료되는 과정을 통해 슬라브 표면 결함, 내부 결함 등에 판재의 기계적 물성과 표면 품질 저하 요인을 고려 용탕 청정도 제어 및 연속주조시 공정 조건을 통해 고품질 슬라브 제조에 대해 논의하고자 한다.

[순환2-1 | 10:10] 초청강연

저탄소 알루미늄 스크랩 재활용 산업 및 기술현황: 김명균*, 하원 (포항산업과학연구원)

Keywords: 저탄소, 알루미늄, 리사이클링, 스크랩

알루미늄 생산 중 발생되는 탄소발생량은 22년 기준 산업생산 중 발생되는 양 2~3%를 차지할 만큼 대표적안 탄소배출산업이다. 탄소중입에 가장 큰 이슈이면서 활용도가 높은 이동수단인 전기자동차는 배터리 중량과 더불어 운행 중 발열로 인해 알루미늄의 채

용은 필수적이다. 알루미늄은 가볍고 강하며 우수한 전도성으로 그 사용량이 증가되고 있음에도 불구하고, 생산과정 중 많은 탄소배출되는 현재 관점에서 기술 및 산업적으로 고려해야 할 중요한 이슈이다. 아울러 26년 1월 시행예정인 유럽연합 탄소국경조정제도(CBAM)은 대표적인 관세장벽으로 인식되는 가운데, 전 세계 알루미늄 산업에 있어 많은 변화가 진행되고 있다. 알루미늄 생산과정 중 많은 탄소를 배출하는 알루미나 제련과정에 필요한 에너지전환, 즉, 기존 화력발전에서 수력, 태양열, 풍력 등 재생에너지로의 전환이 대표적이며, 이와 동시에 선진 메이저사에는 알루미늄 제련 중 필요한 탄소전극봉을 비활성 전극으로 대체하는 기술 등 많은 노력을 기울이고 있다. 아울러 가장 알루미늄 탄소배출량을 현저하게 저감할 수 있는 공정인 스크랩 재활용에 대한 국내외 기업의 관심 뿐만 아니라 비지니스적으로 이미 상업화수준에 이루는 등 많은 기술적 진보가 있는 게 사실이다. 본 발표에서는 알루미늄 잉곳 즉, 소재를 전량수입하는 공급망 구조를 고려할 경우, 현실적으로 탄소저감이 가능한 스크랩 재활용 기술에 대해 소개하고자 한다. 이를 위해 국내외 저탄소 알루미늄 스크랩 재활용 산업 및 기술현황에 대한 소개와 더불어 토의를 제안한다.

[순환2-2 | 10:30] 초청강연

자동차용 알루미늄 판재의 고정형 열처리 기술 개발: 강헌*, 손석원 (한국생산기술연구원)

Keywords: 알루미늄, 고정형 열처리, 자원순환형, 자동차용 판재, 시뮬레이션

자동차용 알루미늄 판재는 냉연 코일을 스트립 상태로 연속 열처리할 때 균일한 물성을 확보할 수 있지만, 국내에는 이러한 연속 열처리 설비가 부재로 코일 단위로 자동차용 알루미늄 판재를 생산 시 고정형 열처리를 사용해야 한다. 그러나 고정형 열처리 방식에서는 코일의 크기와 권취 밀도에 따라 열전달이 달라지고, 위치별 온도 분포 차이에 따른 물성 변화를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 고정형 열처리 조건에서 코일 내부의 열전달 거동을 예측하는 시뮬레이션을 수행하고, 위치별 미세구조 및 석출물 변화를 평가하였다. 소프트웨어를 활용하여 코일 내부의 온도 분포 및 열처리 균일성을 분석하였으며, 실험을 통해 미세조직 변화와 기계적 특성을 비교 검증하였다. 연구 결과, 코일 중심부와 표면부의 온도 차이가 특정 두께 이상에서 미세구조 및 석출물 형성에 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 이를 기반으로 최적의 고정형 열처리 조건을 도출하였다. 본 연구는 국내 자동차용 알루미늄 판재 제조 공정의 효율성을 향상시키는 데 기여할 것으로 기대된다. 본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원에서 지원하는 소재부품기술개발사업의 일환으로 “저탄소 알루미늄 판재 활용 20% 경량화 Under-Body 차체 부품 및 치수 정밀도 ±0.3 mm 급 배터리 모듈 프레임 부품화 기술 개발(RS-2024-00432959)” 과제를 통해 연구되었음을 알려드립니다.

[순환2-3 | 10:50] 초청강연

6xxx계 알루미늄 합금판재의 생성상 및 기계적 물성 변화에 대한 미소원소 함량 변화의 영향: 주경석, 정영길, 신재혁* (한국자동차연구원)

Keywords: Aluminum alloys, Alloy 6xxx, rolling, Mechanical properties, precipitate phases

Aluminum alloys are widely used in various industries, including automotive, aerospace, and construction, due to their excellent workability and lightweight properties. Among them, 6xxx-series aluminum alloys are particularly notable for their balanced strength and corrosion resistance. However, with increasing environmental regulations and growing interest in the circular economy, the recyclability of aluminum alloys has become a critical research topic. This study analyzes the effects of variations in the content of key alloying elements (Mg, Si, Fe, Mn, etc.) on the precipitation behavior and mechanical properties of 6xxx-series aluminum alloys. Additionally, the challenges associated with using recycled materials and potential solutions are explored. Through experiments, the influence of minor-alloying element variations on precipitation behavior, strength, and ductility was evaluated, with a particular focus on the formation of brittle phases and mechanical property degradation due to increased Fe and Mn content. This study provides fundamental data for the sustainable design of 6xxx-series aluminum alloys and proposes compositional design strategies to enhance the utilization of recycled materials, thereby contributing to the development of environmentally friendly recycled materials.

[순환3-1 | 11:20] 초청강연

탄소배출저감을 위한 알루미늄 판재 적용기술 연구개발동향: 정준영*, 권혁민, 김경보, 강성찬, 유창열, 정연일 (현대자동차 AVP본부)

Keywords: 알루미늄 판재, 자동차용 알루미늄, 탄소배출저감, 탄소중립

자동차 산업에서는 탄소배출 저감을 위해 경량화와 친환경 소재의 활용이 중요해지고 있으며, 특히 이 두 가지를 동시에 만족시킬 수 있는 재활용 알루미늄 합금 판재 적용 기술이 주목받고 있다. 재활용 소재(PIR/PCR) 적용 알루미늄은 원료 생산 시 에너지 소비와 탄소배출을 줄일 수 있어 지속가능한 소재로 평가된다. 본 발표에서는 재활용 알루미늄 합금 판재의 제조 공정, 기계적 특성, 성형 및 접합 기술, 표면 처리 기술 등의 최신 연구개발 동향을 분석하고, 자동차 산업에서의 적용 가능성과 향후 발전 방향을 논의하고자 한다.

[순환3-2 | 11:40] 초청강연

Advancing the Welding and Joining Technologies of Recycled Aluminum Sheets for Automotive Application: Jungyu Choi, Deepak Kumar (Incheon National University), Anupam Vivek (Applied Impulse Inc), and Taeseon Lee* (Incheon National University)

Keywords: aluminum recycling, weldability, resistance spot welding, welding of dissimilar metals, multi-material structure

The use of recycled aluminum sheets for automotive manufacturing requires robustness of the joining process as the the modification of composition and physical properties can greatly affect the weldability of materials. While resistance spot welding (RSW) is the most commonly used spot joining technique, appropriate Joule heating needs to be controlled by the dynamic resistivities of the materials and

the interfaces in between. In this talk, the process parameters and metrics that influence the heat balance are presented by both empirical and computational methods. The microscopical analysis and mechanical testing are provided to validate the simulations. Meanwhile, the introduction of solid-state welding processes is also provided as solutions to material combinations that are difficult to join by fusion-based welding processes. The benchmarking of conventional process provides insights to extending the applications of the recycled materials.

생체재료
Room 401B, 4월 24일

[생체1-1 | 14:00] 초청강연

첨단분석기법을 활용한 생체 재료의 나노 구조 분석: 정찬원* (부경대학교)

Keywords: 3차원 원자단층현미경, 투과전자현미경, 나노구조분석, 생체재료, 뼈

대표적인 생체 재료인 뼈는 높은 압축강도와 비강도를 가진 물질로, 하이드록시아파타이트(hydroxyapatite, $Ca_5(PO_4)_3(OH)$)와 콜라겐과 같은 유기 성분으로 이루어져 있다. 이러한 뼈의 특성을 정확히 이해하기 위해서는 나노스케일에서의 구조 분석뿐만 아니라, 유기 성분과 무기 성분 간의 계면 특성과 3차원 원자 분포를 규명하는 것이 필수적이다. 이를 위해 최근 3차원 원자단층현미경(atom probe tomography, APT)과 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM) 등의 첨단 분석 기법을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, APT는 나노미터 이하의 공간 해상도로 경원소(H, He, Li, Be, B, C 등)를 포함한 모든 원자의 3차원 분포를 분석할 수 있는 첨단 기술로, 기존에는 주로 금속 재료 분석에 활용되어 왔다. 그러나 레이저 펄스를 이용한 증발 모드 개발 이후, 산화물, 태양전지, 열전재료, 2차전지, 연료전지, 나노 물질뿐만 아니라 생체 재료 분야까지 적용 범위가 확장되고 있다. 본 발표에서는 이러한 첨단 구조 분석 기법을 활용한 생체 재료의 나노구조 분석 방법과 주요 연구 사례를 소개하고자 한다.

[생체1-2 | 14:20] 초청강연

High Throughput in-situ Spray Polymerization for Electronic Textiles: Taehoo Chang* (Incheon National University)

Keywords: E-textiles, Additive patterning, Conductive polymers, Dual-regime spray system

E-textiles, which integrate textiles with sensory capabilities, have gained significant attention for applications in healthcare, military, and wearable electronics. Various fabrication techniques, including dip coating, electrochemical deposition, and direct printing, have been explored to create conductive textiles. However, these methods often require heat, vacuum, or vaporization, making them unsuitable for intricate sensor designs on diverse fabrics. Additive techniques like screen and inkjet printing allow for patterning but face challenges such as clogging and scalability. Conductive polymers, particularly polypyrrole (PPy), are promising for e-textiles due to their mechanical flexibility, high conductivity, and compatibility with human skin. However, conventional polymerization processes struggle with uniform deposition with desired high resolution patterning. Reactive inkjet printing enables in-situ polymerization but lacks efficient chemical mixing for scalable fabrication. Aerosol-based approaches improve material mixing but face challenges due to viscosity changes during polymerization, affecting flow stability. Here, we introduce a dual-regime spray system (DRSS) for high-throughput, in-situ spray polymerization of conductive polymers onto textiles. DRSS enables precise, programmable, and mask-free patterning with sub-millimeter resolution over meter-scale areas while mitigating nozzle clogging and polymer agglomeration. The process allows tunable electrical conductivity and scalable fabrication of custom sensor arrays. Demonstrations include the direct spray fabrication of stretchable strain gauges with high gauge factor (GF) over 85 onto existing garments. The resulting e-textiles maintain wearability, breathability, and washability while providing real-time monitoring of human body movements from subtle breathing to large joint motions. This work presents a scalable and versatile approach for advancing next-generation e-textile technologies.

[생체1-3 | 14:40] 초청강연

인공지능 현장진단기술: 이정훈* (고려대학교)

Keywords: 인공지능, 현장진단, 감염병, 딥러닝, 센서

현장진단(Point-of-care testing, POCT)은 실험실 장비 없이 신속한 진단을 가능하게 하여 의료 혁신을 이끌고 있다. 현장진단에 있어서 측면유동검사(Lateral Flow Assay, LFA)는 간편한 사용법과 신속한 결과 도출로 인해 널리 활용되고 있지만, 기존의 LFA 기반 진단법은 정량적 분석이 어렵고, 환경 변화에 따라 정확도와 민감도가 저하될 수 있는 한계를 지닌다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 딥러닝을 활용한 스마트폰 기반 POCT 시스템을 제안하고자 하였으며, 첫째, 환경의 제약 및 스마트폰의 종류에 상관없이 스마트폰 카메라를 활용하여 사진을 찍고 전송하여 자동으로 분석하여 결과를 전달해주는 sample-to-answer기술에 대한 연구를 발표하고자 하며, 이러한 기술을 통해 감염병의 감염 여부를 98% 이상의 정확도로 판별할 수 있는 결과를 제시하고자 한다. 두 번째 제안 기술은 시계열 데이터를 활용한 기술이며, 기존의 xy평면 이미지로 활용으로부터 차원을 확장하여, 시계열 (f(t)) 데이터를 학습함으로써 빠른 현장진단이 가능하도록 설계하였다. 이를 통해 현존하는 가장 빠른 상용화 센서를 구현하였으며, 이러한 연구결과는 감염병 진단 뿐 만 아니라 심근경색(Troponin I) 및 임신(hCG)과 같은 응급 상황에서도 바이오마커 검출을 통해 신속한 진단을 지원할 수 있다. 본 발표에서의 인공지능이 결합된 현장진단 시스템은 기존 LFA 방식의 한계를 극복하고, 높은 정확도와 신속성을 갖춘 사용자 친화적 진단법을 제공한다. 이러한 기술은 의료 접근성을 확대하고, 감염병의 빠른 확산 방지 및 만성 질환 관리에 기여할 것으로 기대된다. 앞으로도 다양한 질병에 대한 응용 연구를 통해 POCT 기술이 더욱 발전할 수 있을 것으로 전망된다. REFERENCES [1] Lee, S., Kim, S., Yoon, D.S. et al. Sample-to-answer platform for the clinical evaluation of COVID-19 using a deep learning-assisted smartphone-based assay. Nat Commun 14, 2361 (2023) [2] Lee, S., Park, J.S., Woo, H. et al. Rapid deep learning-assisted predictive diagnostics for point-of-care testing. Nat Commun 15, 1695 (2024).

[생체1-4 | 15:00]

Mechanically Reinforced Cell Therapeutic Tool as a Multi-Scale Osteochondral Bioniche with Functional biominerals: Seongsoo Kim (KIST, Biomaterials Research Center), Myungchul Lee* (KIST, Medicinal Materials Research Center), and Hojeong Jeon* (KIST, Biomaterials Research Center)

Keywords: Osteochondral regeneration, Hyaline cartilage, Biomimetic hydrogel, Mechanical stimulation, Cell therapeutics

This study introduces a mineral-enriched hydrogel bioniche designed for bone-cartilage regeneration, leveraging the synergistic effects of magnesium and zinc-substituted apatite to simultaneously promote robust osteogenesis and the differentiation of chondrocytes into high-quality hyaline cartilage. The hydrogel maintains oxygen saturation levels comparable to ambient air, creating a physiological environment that supports cellular viability and functions. A stiffness, analyzed through compressive modulus measurements and nanoindentation methods, is confirmed to have tissue-friendly, multi-scale mechanical properties, closely mimicking native bone and cartilage in a range from 500kPa to 4MPa. Cell phenotypes after osteochondral differentation were further characterized by SOX9 and ACAN staining, while the extent of endochondral ossification was quantitatively assessed using a ratio with BMP-6, and collagen type 1 via PCR. By minimizing tumorigenicity and improving the differentiation stability of iPSC-based therapies, this hydrogel offers a safe and cell-friendly platform for osteochondral repair. The integration of ionic synergy, oxygen regulation, and mechanical optimization positions this hydrogel as a promising candidate for advancing clinical applications in regenerative medicine.

[생체1-5 | 15:15]

Mechanical Modulation of Mesenchymal Stem Cell Differentiation to Osteoblast Using a Pressing Agarose gel: Si-Eun Moon and Hojeong Jeon* (Korea University, Korea Institute of Science and Technology (KIST))

Keywords: Mesenchymal Stem Cells, Osteoblast Differentiation, Mechanotransduction, Bone Regeneration, Cell Therapy

Mesenchymal Stem Cells (MSCs) can be easily isolated from various tissues and possess multipotency, enabling differentiation into various cell types. The method to differentiate MSCs into osteoblasts is already well-established, with standard protocols (such as differentiation medium and duration) in place. These hMSCs are used as cell-based therapies for osteoarticular diseases. To achieve this, a large number of cells need to be extracted from the patient. However, due to the limited number of MSCs available from patients, large-scale differentiation requires considerable time and cost. Therefore, in this study, we investigated whether adding mechanical stimulation to existing differentiation methods could induce mechanotransduction and enhance the efficiency of osteoblast differentiation. We applied direct mechanical pressure to the cells using a pressing gel created by combining agarose gel, known for its structural stability and excellent biocompatibility, with Transwell inserts. The results showed that the osteoblast differentiation rate of the cells subjected to pressure via the pressing gel increased by approximately 20-25% compared to those cultured in the standard differentiation medium. The enhancement in differentiation efficiency through mechanical stimulation suggests the potential for reducing both time and cost in the large-scale production of MSC-based cell therapies. Therefore, this approach could provide valuable foundational data for future research in stem cell differentiation, bone differentiation, and regeneration, with the potential to expand further through additional studies.

[생체1-6 | 15:30]

Laser Direct Patterning of Cerium Oxide for Anti-Inflammatory Effect: Hojun Kim (Korea Institute of Science and Technology, Seoul National University), Johyun Yoon, Seung-Kyun Kang* (Seoul National University), Sangihn Han*, and Hojeong Jeon* (Korea Institute of Science and Technology)

Keywords: Ceria nanoparticles, Implants, Laser direct patterning

This presentation introduces laser direct patterning of cerium oxide(ceria) nanoparticles on titanium implants, addressing the imperative for bone fusion in the elderly population and challenges of existing treatments, including peri-implantitis. Known for its anti-inflammatory properties, ceria is explored to mitigate the inflammatory response during implantation. The synthesis details ceria nanoparticles (~3 nm) via a hydrolytic sol-gel reaction. A special ceria NP ink is optimized for laser direct patterning, ensuring anti-inflammatory effects and robust mechanical bonding. Unlike conventional methods, this method eliminates the risk of delamination and allows flexible ceria patterning via CAD parameters. The method and results highlight the successful synthesis of ceria NPs and experimental optimization of laser-induced coating. This presentation highlights the reliability of laser direct patterning in enhancing the anti-inflammatory effects of ceria on titanium implants, highlighting the increased Ce3+ ion ratio, demonstrating potential catalytic activity enhancement. This study provides insight into advancing dental implant technology for the elderly population.

[생체2-1 | 15:45] 초청강연

Ultrasound-driven Triboelectrification for Powering Electronics: Hong-Joon Yoon* (Gachon University)

Keywords: Ultrasound, Triboelectrification, Energy Harvesting, Noninvasiveness

Ultrasound-based mechanical energy harvesting materials and thereof devices emerge as a promising technology for powering implantable electronic devices within the human body. Although this approach takes advantage of ultrasound's noninvasive nature, the compact design inherent in frictional electricity-generating components, and the biocompatibility of materials engaged in friction, the

behavior of frictional materials under ultrasound necessitates a systematic and controllable design strategies. Here, we present the development of an ultrasound energy harvesting device engineered for long-term stability. Our results found that the incidence and reflection characteristics of ultrasound interestingly vary upon pairs of materials exhibiting disparate moduli in the ultrasound environment. We not only experimentally but also theoretically establish that a pronounced difference in modulus values between materials facilitates the generation of high-amplitude oscillations. Importantly, we validate that the manifestation of oscillations during ultrasound propagation is governed by the high and low modulus boundaries encountered by the material. This design strategy may benefit long-term performance of the ultrasound-based energy harvesting device. We, through this design strategy, experimentally validated that the ultrasound-based energy harvesting device that has the potential for long-term stability (>6 weeks) and continuous power generation.

[생체2-2 | 16:05] 초청강연

Biodegradable Multichannel Nerve Conduits for Peripheral Nerve Regeneration: Jahyun Koo* and Yerim Lee (Korea University)

Keywords: Nerve guidance conduits, Peripheral nerve injury, Nerve fascicles, 3D printing, Hydrogel

Addressing peripheral nerve injury (PNI) presents a common clinical obstacle. The disorganized spread of regenerating axons complicates the creation of nerve guidance conduits (NGCs) for PNI treatment. Multichannel NGCs, intended to replicate the fascicular arrangement of nerves, serve as a viable alternative to traditional single-lumen NGCs. Hydrogel-based NGCs featuring microscale multichannels that mimic real nerve fascicles are produced using digital light processing in 3D printing. The printing solution consists of biodegradable and photocurable materials like gelatin methacryloyl (GelMA) and polyethylene glycol diacrylate (PEGDA). Incorporating a food-grade dye into the printing solution helps prevent overcuring by modifying the light's optical path length and managing the polymerization speed. This research further shows that adding dyes facilitates high-resolution printing, allowing for the creation of fine multichannels with a diameter of 200 μm. In vivo studies on a rat sciatic nerve gap model reveal that GelMA/PEGDA-based multichannel NGCs significantly enhance peripheral nerve regeneration, evidenced by improved sensory recovery in the paw, better hindlimb gait function, and increased muscle fiber regeneration. Additionally, the hydrogel's mechanical properties, pore size, and biodegradation rate validate the practicality of hydrogel-based multichannel NGCs in promoting neurological recovery.

[생체2-3 | 16:25] 초청강연

Bioelectronics for Physiological Fluid Monitoring: Jihye Kim* (Ajou University)

Keywords: Bioelectronics, Physiological Fluid, Real-time, Monitoring

Physiological fluids, such as cerebrospinal fluid, breast milk, blood plasma, urine, and lymph, play a critical role in maintaining homeostasis and overall health. Continuous monitoring of these fluids is essential for disease management and post-surgical recovery. This work presents the development of bioelectronics for continuous physiological fluid monitoring, leveraging unconventional electronic materials and device architectures. First, we introduce a wearable bioelectronic platform based on impedance sensing for real-time monitoring of breast milk volume during lactation. This system was validated through multi-subject human clinical trials, demonstrating its potential for supporting infant nutrition and maternal health. Second, we present a fully implantable bladder monitoring system designed for long-term recovery tracking in bladder cancer patients undergoing partial cystectomy. This system integrates a stretchable strain gauge sensor and was validated in rodent and non-human primate models over a two-month period. These advancements in bio-integrated electronics highlight the potential of unconventional electronics in personalized healthcare, offering real-time, seamless, and patient-centric monitoring solutions.

[생체2-4 | 16:45]

Metabolic Fragmentation of Bioactive Peptides: Mechanism and Implications for Bio-functional Stent Development: Khandoker Asiqur Rahaman and Hyung-Seop Han* (Korea Institute of Science and Technology)

Keywords: Bioactive peptide, Metal stent, Wound healing

Originally derived from natural sources, advancements in medicinal chemistry have led to the development of synthetic peptide analogs with promising therapeutic effects. However, the biological effects of metabolites of bioactive peptides generated after insertion have never been investigated thoroughly. For the first time, we report that Ac-LX_5Q, a peptide known for cell proliferation and wound healing, acts as a prodrug. The peptide creates an Ac-LX peptide as a major metabolite after metabolism by biological systems, and this smaller fragment enters the cell to exert warranted effects. We found that Ac-LX_5Q and Ac-LX produce identical patterns of biological effects in HUVEC cells and in-vivo wound healing. We coated nitinol-based stent materials with Ac-LX_5Q to deliver Ac-LX after implantation. The results showed that coating of Ac-LX_5Q or Ac-LX nitinol-based implants produced increased viability of HUVECs. In conclusion, this study suggests that interest should be given to biological fragmentation research to better utilize peptides in bio-functional metal-based stent development.

[생체2-5 | 17:00]

High-Performance Biodegradable Fiber Electrodes for Sustainable Wearable and Implantable Electronics: Jinho Kim and

Jaehong Lee* (Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology)
Keywords: Biodegradable electronics, Fiber electronics, fiber electrodes, soft electronics

Fiber has been widely utilized in textile manufacturing, serving as an essential component of everyday life[1]. These materials exhibit exceptional softness and flexibility, allowing them to naturally conform to the body's complex and curved surfaces when fabricated into clothing, thereby enhancing wearability and comfort. Over the past few decades, the rapid advancement of electronic technologies has enabled the development of diverse wearable and implantable electronic devices capable of biosignal monitoring, energy harvesting, and other functionalities. More recently, extensive research has focused on fiber-based electronic devices due to their distinct fibrous structures, remarkable flexibility, lightweight design, effective workspace utilization, and structural adaptability[2]. Owing to these advantages, fiber-based electronics have gained attention in wearable and implantable device applications. Despite these advancements, a critical challenge remains. Conventional electronic devices generate substantial amounts of electronic waste each year, leading to significant environmental pollution[3]. To address this issue, biodegradable electronic devices that naturally degrade under environmental factors such as light, heat, and microorganisms have emerged as a promising solution[4,5]. These biodegradable materials offer a sustainable approach to mitigating environmental concerns. However, several limitations hinder their widespread adoption, including complex fabrication processes, a limited selection of suitable materials, and inherently low electrical conductivity, which pose significant challenges in developing high-performance fiber-based sensors. In this study, we developed a high-performance biodegradable fiber electrode designed to enable stable and efficient biodegradable fiber-based electronic devices. The fiber electrode is composed of zinc nanoparticles and polypropylene carbonate (PPC) and is fabricated using dip-coating and chemical sintering processes. The conductive fiber exhibits excellent electrical conductivity (~0.7 Ω/cm) and robust mechanical durability, maintaining stable performance under physical deformations such as bending and knotting. Furthermore, we systematically evaluated the biodegradability of the fiber electrode under various environmental conditions.

References 1. Peng, H. Fiber Electronics. Adv. Mater. 32, 1–2 (2020). 2. Kim, J. et al. Progresses and Perspectives of 1D Soft Sensing Devices for Healthcare Applications. Adv. Funct. Mater. 2406651, 1–23 (2024). 3. Recycle and recover. Nat. Electron. 7, 1 (2024). 4. Boutry, C. M. et al. A stretchable and biodegradable strain and pressure sensor for orthopaedic application. Nat. Electron. 1, 314–321 (2018). 5. Ouyang, H. et al. A Bioresorbable Dynamic Pressure Sensor for Cardiovascular Postoperative Care. Adv. Mater. 33, 1–9 (2021).

[생체2-6 | 17:15]

Fully Biodegradable Thermoelectric Device Based on Polycrystalline Mg_2Si Thin Film: Junseok Shim, Jiwoo Gu, and Seung-Kyun Kang* (Seoul National Univ.)

Keywords: Mg2Si, polycrystalline thin film, green electronics, energy harvester, thermoelectric generator

The miniaturization of electronic devices and the rapid growth of personalized components have exacerbated the issue of electronic waste (E-waste). Biodegradable electronic devices that decompose into environmentally benign byproducts after use can play a crucial role in mitigating E-waste. Furthermore, while wearable and implantable devices require continuous power, the limitations of batteries—such as size, weight, lifespan, and environmental impact—necessitate alternative energy solutions. Energy harvesters that convert ambient energy (e.g., body heat, motion, light) into electricity enable autonomous device operation. In this context, integrating energy harvesters with biodegradable materials emerges as a next-generation, sustainable technology for personalized devices that minimizes environmental pollution. In this study, we validate the performance of Mg_2Si as a semiconductor for biodegradable electronic devices and demonstrate its application in thermoelectric elements. Mg_2Si is deposited as an amorphous thin film and converted into a poly-nanocrystalline thin film solely through annealing at 350 ºC —without requiring high-temperature sintering (>1000 ºC)—thereby significantly enhancing its electrical properties. X-ray diffraction and transmission electron microscopy (SAED) analyses confirm partial crystallization after annealing, and the carrier concentration increases by nearly 10^5 times relative to the amorphous state, yielding electrical characteristics comparable to doped monocrystalline silicon. Moreover, in phosphate-buffered saline (PBS), the Mg_2Si thin film degrades rapidly via hydrolysis, generating environmentally benign byproducts. The thermoelectric performance of Mg_2Si is evaluated by measuring its Seebeck coefficient, thermal conductivity, and electrical conductivity using a Keithley source meter, laser flash analysis (LFA)/differential scanning calorimetry (DSC), and a four-probe method. Although the Seebeck coefficient of the annealed film is similar to that of conventional crystalline Mg_2Si films, its lower electrical conductivities result in a figure-of-merit lower than crystalline Mg_2Si film and comparable to nanostructured silicon-based devices. A fully biodegradable planar thermoelectric device is fabricated by using the poly-nanocrystalline Mg_2Si film as the n-type element, combined with boron-doped silicon and biodegradable Mo pads as the p-type elements. Under a 100 K temperature gradient, this device exhibits superior performance compared to polycrystalline silicon devices while completely degrading in PBS within a short time.

수소재료Ⅱ
Room 402A, 4월 24일

[수소3-1 | 09:00]

Thermodynamic modeling of Mn-Ti-X-H quaternary systems: 오상호 (포항공과대학교), 백민아 (한국생산기술연구원), 노승효, 강민우, 박지혜 ((주)현대자동차), 나태욱 (한국생산기술연구원), 이병주* (포항공과대학교)

Keywords: Hydrogen storage material, C14 AB2 alloy, Pressure-composition-isotherm, CALPHAD, computational thermodynamics

Hydrogen has been highlighted as a promising energy resource to replace fossil fuels, leading to increased interest and demand for hydrogen storage materials. C14-type Mn_2Ti-based alloys have gained attention due to their high hydrogen capacity and economic feasibility. However, binary Mn_2Ti alloys show a high plateau pressure for hydrogenation and dehydrogenation processes, making practical applications challenging. To address this, various alloying elements for C14 Mn_2Ti have been explored. The PCT (Pressure-Composition-Temperature) curve can be calculated using the CALPHAD method. Additionally, the addition of alloying elements can result in the formation of other phases that are not beneficial for hydrogen storage performance. This can also be predicted using the CALPHAD method. Namely, the CALPHAD method can be an effective and significant approach to optimize the composition of Mn_2Ti-based alloys by predicting PCT curves across various combinations of alloying elements and compositions. Nevertheless, such work has not been available since even the thermodynamic description of the H-containing Mn_2Ti phase with alloying elements has not been assessed. In the present work, a thermodynamic description for the Mn-Ti-H-X quaternary system with several common alloying elements was developed.

[수소3-2 | 09:15]

세차 전자 결정학을 활용한 Ti-Fe-O 합금 내 수소 결합위치 규명: 강재동, 크리슈나모한 테케파트 (한국과학기술연구원), 윤영철, 전초록 (한국과학기술연구원, 서울대학교), 이승철, 김진우* (한국과학기술연구원)

Keywords: 세차 전자 회절법, 수소저장 소재, TiFeO 합금, 수소 결합 위치

수소는 탄소를 배출하지 않는 청정 에너지원으로 기후 변화 대응의 핵심 대안으로 주목받고 있으나, 낮은 저장 밀도로 인해 효율적인 에너지 저장 및 운송에 어려움이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 수소저장 소재가 개발되어 왔으며, 해당 소재의 저장 용량과 가역성 등을 극대화하기 위해서는 소재 내 수소 결합 위치와 결합 방식을 정밀하게 파악하는 것이 필수적이다. 하지만 수소는 원자 크기가 작기 때문에 엑스선 회절법이나 전자 현미경 이미징으로 직접 관찰하기 쉽지 않다. 이에 대응하여, 전자 회절법에 단결정 엑스선 결정학 측정 방식과 세차 운동(precession)을 하는 전자 빔을 도입한 세차 전자 결정학이 최근 제안되었다. 전자는 엑스선에 비해 경원소에 대한 산란 효과가 크게 나타나므로 수소 원자를 관측하기에 용이하며, 나노미터 수준의 국소 영역 관찰로부터 원자단위 구조를 정밀하게 규명할 수 있다. 이러한 장점을 토대로 세차 전자 결정학은 기존 방법으로는 관찰하기 어려웠던 수소의 결합 위치와 방식을 확인하여 수소 저장 소재를 설계하고 최적화하는 데 핵심적인 정보를 제공한다. 본 연구에서는 금속수소화물계 수소저장 소재인 Ti-Fe-O 합금을 모델 시스템으로 삼아, 먼저 DFT계산을 활용해 소재 내 다양한 수소 결합 위치와 각 위치의 결합에너지를 예측했다. 세차 전자 결정학을 이용해 실제 소재의 결정구조를 분석함으로써, 이론적으로 도출된 수소 결합 위치와 방식을 실험적으로 확인하고자 한다. 그 결과로, 전자 결정학 기반의 측정법이 수소를 포함한 수소저장소재의 원자단위 구조를 규명하는 데 탁월한 가능성을 지니고 있음을 확인했으며, 새로운 금속수소화물계 수소저장 소재를 설계·최적화하는 데 필요한 중요 정보를 제공할 수 있음을 보여준다.

[수소3-3 | 09:30]

A unified finite element framework for hydrogen embrittlement: thermodynamic formulation and numerical verification: Geonjin Shin, Jinheung Park (Department of Materials Science and Engineering & RIAM, Seoul National University), Kijeong Kim, Seungchae Yoon, Hyejin Kim (Research & Development Division, Hyundai Steel Company), and Myoung-Gyu Lee* (Department of Materials Science and Engineering & RIAM, Seoul National University)

Keywords: Hydrogen embrittlement, Multi-physics modeling, Damage mechanics, Finite element modeling

This study proposes a thermodynamically consistent finite element (FE) modeling framework capable of simulating hydrogen-induced-fracture in both ductile and brittle regimes. Implemented in ABAQUS via a user-defined element (UEL) subroutine, the model integrates mechanical deformation, damage mechanics, and hydrogen diffusion into a unified multi-physics formulation. The key attributes of the proposed model can be outlined as follows. First, by employing distinct yield functions for plasticity and damage, the model provides independence to capture hydrogen-induced-fracture in both the elastic and plastic regimes, without strictly confining it to the onset of plasticity. This acknowledges that micro-cracks can initiate even at relatively low stress levels. Secondly, the model integrates mechanical deformation, damage mechanics, and hydrogen diffusion into a unified multi-physics framework derived from thermodynamic principles, ensuring consistent coupling among all these phenomena. By systematically deriving the constitutive equations from fundamental thermodynamic laws, the framework captures the coupled behavior of displacement, damage, and chemical potential as the primary degrees of freedom. Moreover, a gradient-extended damage formulation is employed to mitigate mesh

dependency in the coupled damage analysis, thereby enhancing the numerical stability and reliability of the simulation results. Finally, the accuracy of the developed model is confirmed by comparing the simulated hydrogen diffusion near a stressed crack tip with a benchmark problem. The framework successfully replicates the transition in fracture behavior as the hydrogen concentration increases, consistent with observations from compression-tension test.

[수소3-4 | 09:45]

Impact toughness and fracture behaviour of commercially pure titanium at cryogenic temperature: Min-Su Lee*, Jeong-Chan Lee (KITECH (Gangneung)), Sung-Hwan Kim (KITECH (Dongnam)), Dain Choi, Tea-Sung Jun (Incheon National University), and Chang-Soo Park (KITECH (Gangneung))

Keywords: Titanium, Impact toughness, Twinning, Crack, Cryogenic

Owing to the high strength-to-weight ratio, good corrosion resistance and excellent low temperature properties, titanium and its alloys are ideally suited for cryogenic applications such as rocket propellant engine and liquid hydrogen storage tank [1, 2]. In general, metallic materials exhibit a ductile-to-brittle transition at low temperature. It is thus necessary to the safety of structural components in cryogenic applications. Previous studies have reported that the fracture toughness of Ti alloys with low impurity increases with decreasing temperature [3]. The crystallographic texture has an impact on the deformation behaviour and mechanical properties of titanium due to its inherent anisotropy. Nevertheless, the investigation of anisotropy in fracture mechanism of α-Ti at cryogenic temperature is still insufficient. In the present study, the impact toughness of commercially pure titanium (CP-Ti) plate was assessed by Charpy impact testing in the temperature range from -253ºC to 20ºC. The impact samples were notched parallel (RD), transverse (TD) and normal (RD) to the rolling direction, so as to investigate the anisotropy in dynamic fracture behaviour. The crack propagation path and fracture mode were characterised by OM and SEM fractography. The twinning-induced grain refinement and locally stored strain energy were analysed by EBSD. The anisotropy in impact property is not found at 20ºC, whilst it becomes significant as the temperature decreases. The impact absorption energy dramatically increases with decreasing temperature to -196ºC, but it is worsened at -253ºC compared to that at 20ºC, showing the ductile-to-brittle transtion at extremely low temperature. The resultant impact toughness is associated with the plastic energy absorption and crack deflection along the twin boundaries. [1] G. Lütjering, and J.C. Williams. Springer Berlin Heidelberg: (2007). [2] C. Veiga, J. Davim, and A. Loureiro, Rev. Adv. Mater. Sci: 32, 133–148 (2012). [3] M.S. Lee, T. Kawasaki, T. Yamashita, S. Harjo, Y.T. Hyun, Y. Jeong, and T.S. Jun, Sci. Rep: 12(1), 3719 (2022).

[수소3-5 | 10:00]

Fabrication-Dependent Hydrogen Embrittlement and Deformation Behavior of Ti6Al4V Alloy at 15 K: Nguyen Tien Dung, Taeho Lee, Keun Hyung Lee, Dong-Hyung Lee, and Soo Yeol Lee* (Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republ)

Keywords: Ti6Al4V, Fabrication method, Ultra-cryogenic temperature, Hydrogen embrittlement

Ti6Al4V (Ti64) alloy is widely used in aerospace applications for its strength, toughness, and corrosion resistance. However, ultra-cryogenic temperatures and hydrogen (H)-rich environments present challenges for aerospace components. This study examines how fabrication methods affect hydrogen embrittlement and deformation behavior of Ti64 at 15 K. Specifically, Ti64 is fabricated by directed energy deposition, hot-rolling, and TIG welding, followed by electrochemical H-charging and mechanical testing. Prior to H-charging, the deformation behavior is characterized by mechanical twinning and slip. Upon H-charging, microstructural evolution shows the formation of hydride phases (TiH_2), with morphologies dependent on H concentration. The spatial distribution of TiH_2 and the presence of solute H result in distinct brittle fracture characteristics. H-assisted cracks significantly reduce the effective load-bearing cross-sectional area. Accordingly, even at stresses below ultimate tensile strength, localized stress concentrations accelerate crack propagation, severely degrading the mechanical performance of Ti64.

[수소3-6 | 10:15]

산소 함량에 따른 산소 안정화 금속간 화합물 Ti_2FeO_x의 수소화 기구: 윤영철 (한국과학기술연구원 수소에너지소재연구단, 서울대학교), 강재동 (한국과학기술연구원 수소에너지소재연구단), 크리쉬나모한 테케파트, 이승철 (한국과학기술연구원 한인도협력센터), 박은수* (서울대학교), 김진우* (한국과학기술연구원 수소에너지소재연구단)

Keywords: Hydrogen storage materials, TiFe alloy, Alloy design, Microstructure, Initial hydrogenation, Pressure-Composition-Temperature curve

고체 수소 저장 소재 중 TiFe계 수소저장합금은 상온 및 20기압 정도 조건에서 수소를 가역적으로 저장이 가능하다는 이점을 가지고 있으나 표면 산화층이 초기 수소화 과정을 방해하기 때문에 진공 열처리 공정을 거쳐야 하는 문제점이 존재한다. 이를 극복하기 위해 다양한 원소를 첨가하여 TiFe합금의 초기 수소화 거동을 개선하려는 연구가 이루어지고 있다. TiFe 합금에 비금속 원소인 산소를 첨가하는 경우 특정 화학조성에서 활성화 과정 없이 상온 저압 수소화가 가능한 산소 안정화 금속간 화합물인 $Ti_{100-x}Fe_xO_y$ 삼원상(타우상)을 형성하게 된다. $Ti_{100-x}Fe_xO_y$ 삼원상은 at.% 기준 약 25<x<40, 10<y<15 조성 범위에서 Fd3m1 구조를 나타내며 수소가 용해되어 안정화되는 interstitial site를 갖는 것으로 알려져 있으나, 타우상의 화학, 구조적 인자와 수소 저장 특성(초기 수소화 용량, 수소화 압력, 탈수소화 온도 등) 사이의 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 1000도 등온 Ti-Fe-O 상태도를

기반으로 산소 조성이 다른 타우 단상 합금을 제조하고 초기 수소화 기구에 끼치는 평형 화학 조성의 영향을 확인하였다. 타우상의 산소 조성이 약 6at.%인 경우 10-5 bar의 극저압 수소 환경에서도 초기 수소화 거동이 나타나며 그 흡수 용량이 1.75 wt.% 이상으로 나타났다. 이는 타우상의 산소 조성이 감소하여 형성되는 산소 공공이 H interstitial site로 작용한 것 뿐만 아니라 타우상 내부에 존재하는 여러 H interstitial site로 수소가 확산할 수 있는 통로로 작동했기 때문으로 판단된다. 이를 확인하기 위해 화학, 구조적 인자에 따라 달라지는 타우상의 결정구조를 DFT시뮬레이션 결과와 Cs-STEM 분석으로 확인하였으며, 타우상 내부 수소의 확산 거동을 이해하기 위해 DFT 계산된 결합 에너지와 TGA-MS로 분석된 탈수소화 에너지를 비교하였다. 이로부터 타우상의 초기 수소화 기구를 규명하고 우수한 수소 저장 소재 및 수소 분해 촉매로 사용가능한 Ti-Fe-O 합금 설계 전략을 제시하고자 한다.

[수소4-1 | 10:40]

그린수소 생산을 위한 Zn 전기도금 기반 Raney Ni 전극 제작 및 촉매 성능 분석: 신은경, 최윤일* (한국생산기술연구원)

Keywords: 그린수소(Green Hydrogen), 알칼라인 수전해(Alkaline Water Electrolysis), 전기도금법 (Electroplating), 레이니 니켈(Raney Ni), 산소 발생 반응(Oxygen Evolution Reaction)

그린수소(Green Hydrogen)는 탄소 배출 없이 생산 가능한 차세대 친환경 에너지원으로 알칼라인 수전해(Alkaline Water Electrolysis)가 대표적인 수소 생산 방식으로 주목받고 있다. 알칼라인 수전해의 전극 소재로 사용되는 Raney Ni 전극은 다공성 구조를 통해 넓은 비표면적과 높은 촉매 활성을 제공하지만, 기존 제조 공정인 Physical Vapor Deposition(PVD) 및 Vacuum Plasma Spraying(VPS)은 고온 및 진공 환경을 필요로 하며 장비 비용이 높아 대면적 전극 제작에 비효율적이라는 한계를 가진다. 본 연구에서는 전기도금법(Electroplating)을 이용하여 Raney Ni 전극을 제조하는 방안을 제시하였으며, 이를 통해 경제성을 확보하면서도 높은 촉매 성능을 유지할 수 있는 가능성을 평가하였다. 모재로는 40 mesh의 99.9% Ni을 사용하였으며, 이에 Zn을 전기도금한 후 600 ºC에서 열처리를 수행하였다. 이후, 10M KOH 수용액에서 리칭(Leaching) 공정을 거쳐 다공성 Ni 구조를 형성하였다. 제조된 전극의 미세구조 및 조성은 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 분석하였으며, 전기화학적 촉매 성능은 30 wt% KOH 수용액에서 선형주사전위법(LSV)을 통해 평가하였다. 리칭 후 형성된 다공성 Ni층을 분석한 결과 전극 표면에 수직 방향의 개방된 기공(Open Pore)이 형성되었으며, 약 1 μm 수준의 다각형 형태 입자들이 관찰되었다. 또한, 전기도금층의 평균 두께는 약 30 μm로 확인되었다. 산소 발생 반응(Oxygen Evolution Reaction, OER) 성능 평가 결과, OER 과전압은 0.1 A/cm^{2}에서 0.275 V, 0.8 A/cm^{2}에서 0.356 V로 측정되었으며, 이는 순수 Ni 전극 대비 각각 약 11%와 14% 향상된 값임을 확인하였다. 본 연구를 통해 전기도금법을 활용한 Raney Ni 전극 제조가 기존 PVD 및 VPS 공정을 대체할 수 있는 경제적이며 효과적인 대안이 될 가능성이 높으며, 향후 대면적 전극 제작 및 촉매 성능 최적화를 위한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

[수소4-2 | 10:55]

Ni 수전해 촉매의 산소 농도에 따른 알칼라인 수전해 성능 변화 연구: 박태윤, 박성민, 차은빈 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 서보성, 박형기*, 박광석* (한국생산기술연구원), 김동회* (고려대학교)

Keywords: Ni 촉매, 산소 농도, 산소 발생 반응

Ni 촉매는 높은 촉매 활성과 우수한 내구성으로 인해 알칼라인 수전해에서 널리 사용되고 있다. 그러나 Ni 촉매의 전기화학적 성능에 대한 산소 농도의 영향은 충분히 연구되지 않았다. 본 연구에서는 산소 농도의 변화가 Ni 촉매의 산소 발생 반응(Oxygen Evolution Reaction, OER) 성능에 미치는 영향을 규명하였다. 실험은 서로 다른 산소 농도 조건에서 진행되었으며 선형 주사 전위법(LSV), 임피던스 분석(EIS)을 이용하여 OER 성능을 평가하였다. 산소 농도가 감소함에 따라 전류밀도, 과전압, 전하 전달 저항의 변동을 확인하였고 이는 OER 성능에 직접적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 열역학 계산을 통해 Ni 촉매 내 산소 고용 거동과 산소 농도에 따른 산화물 석출량을 예측하였으며 환원 열처리 후 석출된 산화물이 제거됨에 따라 산소 농도가 감소하는 것을 확인하였다. 실제 TEM 분석을 통해 촉매 표면에서 산화물이 나노스케일에서 어떠한 형태로 존재하는지 관찰하고, 산화물의 크기, 분포, 구조적 특성을 분석하였다. 본 연구 결과는 Ni 기반 촉매의 OER 성능 최적화를 위한 산소 농도의 중요성을 강조하며 고효율 알칼라인 수전해 시스템 개발에 기여할 것으로 기대된다.

[수소4-3 | 11:10]

Capacitive-Nanogap Hybrid H2 Sensor: Tunable and Reliable Monitoring Using Sonication-Induced Pd Cracks: Sang-kil Lee*, Joonho Lee, Jiwwo Hong, Kyu Hyoung Lee*, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

Keywords: hydrogen sensor, capacitive, Pd nanogaps, sonication, phase transition

Pd nanogap hydrogen sensors rapidly and selectively detect H_2 through hydrogenation-induced volumetric expansion of the Pd lattice. However, this type of resistive sensor faces challenges in ensuring reliability due to the difficulty of precisely controlling nanogaps formed within the potential conduction paths. Herein, we propose a novel H_2 sensor that utilizes a capacitive mechanism to substantially improve both sensitivity and reliability. Simple ultrasonication is employed to create Pd seed cracks, which evolve into uniform nanogap networks following initial phase transitions (α-PdH → β-PdH). In the Pd/PDMS/Doped-Si system, capacitive response driven by the area change of the upper electrode accurately reflects real-time nanogap behavior in response to H_2, producing stable signals within a defined range of values. The initial crack density, adjustable by varying the sonication time, allows for customizable gap sizes and detection ranges, achieving sub-20 nm gaps and an ultra-low detection limit of 3 ppm. Repeatability tests using 300 ppm H_2 over 50 cycles demonstrate exceptional durability and signal stability at low concentrations, surpassing previous Pd nanogap sensors. This capacitive sensor provides a reliable and adaptable solution for H_2 detection, marking a significant advancement toward commercializing Pd nanogap sensors.

[수소4-4 | 11:25]

알칼라인 수전해용 Ni 촉매의 산화 온도 및 산화 시간에 따른 OER 거동: 차은빈 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 서보성, 마승현 (한국생산기술연구원), 김동회 (고려대학교), 박광석* (한국생산기술연구원)

Keywords: 알칼라인 수전해, Ni 촉매, Ni 산화물, 수소 발생 반응(OER), 전하 이동 저항

알칼라인 수전해 공정에서 산소 발생 반응(Oxygen Evolution Reaction, OER)은 수소 발생 반응(Hydrogen Evoultion Reaction, HER)에 비해 반응 메커니즘이 복잡하고 반응 속도가 느려 전체 수전해 반응의 성능을 떨어뜨리는 요인이 된다. 촉매 후보 재료 중 자원이 풍부하고 비교적 비용이 저렴한 전이금속 Ni, Fe 등을 촉매로 활용하는 방안이 연구되고 있는데, Ni의 경우, 표면에 산화층 형성 시 산화층의 oxygen vacancy가 OER 반응을 향상시킨다고 보고되고 있다. 본 연구에서는 Ni 촉매의 산화 온도와 산화 시간을 변화시켜 Ni 촉매 표면에 다양한 형태의 산화층을 형성시켜, 산화층 두께 및 산화층 내 oxygen vacancy 농도에 따라 OER 성능이 어떻게 영향을 미치는지 조사하였다. LSV(Linear Sweep Voltammetry) 분석 결과 순 Ni 보다는 표면에 산화층을 형성시켰을 때, OER 반응이 향상되었으며, 400°C 산화 온도에서 가장 높은 전류밀도와 함께 가장 낮은 과전압이 나타났다. 600°C 산화 온도와 같이 산화가 과하게 되면 OER 반응이 떨어졌다. 이후, oxygen vacancy를 제어하기 위해 산화 시간을 변화시켰고, XPS 및 Mott-Schottky 분석을 통해 oxygen vacancy 농도를 측정하였고, OER 성능과의 관계를 분석하였다.

이차전지용 니켈 원료소재 심포지엄
Room 402A, 4월 24일

[니켈1-1 | 14:00] 초청강연

이차전지용 니켈 산업 트렌드, 공급망 재편 및 시장 전망: 박재범* (포스코경영연구원)

Keywords: 니켈 수요 공급, 니켈 공급망, LFP, 삼원계, 재활용

산업의 성숙도가 진전됨에 따라 이차전지 밸류체인은 원료와 Application의 부가가치가 높은 Smile curve로 진화하고 있다. 특히 원료 부분은 밸류체인 중 가장 높은 수익성이 기대될 뿐만 아니라 원가에서 차지하는 비중, 친환경 규제에 대한 대응, 공급망 취약성의 강건화 관점에서 주요국의 관심을 받고 있으며 각국 대응 정책의 중심에 있다. 하지만 LFP 배터리의 확산과 중국 기업들의 배터리용 니켈 공급망 영향력 확대에 따라 국내 니켈 산업 밸류체인도 일시적인 어려움을 겪고 있는 상황이다. 배터리용 니켈은 수요증가 둔화와 공급과잉의 여파로 당분간 약세장이 불가피할 전망이나, 기존 삼원계 배터리에서 경쟁력을 보유한 기업들의 고전압 미드니켈 제품 확대 및 삼원계 배터리를 활용한 전고체배터리의 상용화 임박 등 배터리용 니켈 산업의 변곡점이 될 수 있는 긍정적인 전망 또한 예견되는 상황이다. 뿐만 아니라 최근 중국산 원료/소재를 채택한 전기차 배터리가 미국 IRA 보조금 대상 차종에서 제외되면서 탈중국 이차전지 공급망 구축도 여전히 주목을 받고 있다. 한편 주요 니켈 광종의 채굴-제련-정제 과정에서 현재의 니켈 자원과 공정을 보완할 수 있는 혁신 기술들이 연구 중이며, 상용화에 성공할 경우 기존 경쟁구도에 적잖은 영향을 미칠 전망이다. 아울러 재활용을 통한 니켈 공급 확대 가능성에 대해서도 많은 국가와 기업들이 관심을 갖고 있는데, Feed 확보와 공정 효율성 측면에서 다양한 개선과제를 안고 있다. 이처럼 글로벌 공급망 재편 과정에서 니켈의 중요성과 필요성은 여전히 주목 받고 있으며, 이와 관련해 국내에서도 제조 및 R&D 지원 정책들이 논의되는 상황이다. 본 발표에서는 니켈 채굴-제련-정제부터 양극재-배터리에 이르는 산업의 트렌드와 공급망 재편 전망을 통해 니켈 산업이 직면한 과제와 지속 성장 가능성, 향후 전망에 대해 살펴보고자 한다.

[니켈1-2 | 14:25] 초청강연

니켈 산화광 선광 기술 현황 및 향후과제: 한성수*, 이원재, 서주범 (한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터), 박태준 (한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원소재연구센)

Keywords: 이차전지, 니켈, 니켈산화광, 라테라이트, 선광

청정에너지 기술로의 전환이 가속화됨에 따라 이차전지 산업이 성장하고 있으며, 이에 따라 리튬 이차전지의 핵심 양극재 원료인 니켈의 수요가 급증하고 있다. 니켈은 NCM(Ni-Co-Mn), NCA(Ni-Co-Al) 등의 형태로 제조되어 이차전지 양극재로 활용된다. 게다가 니켈 함량이 높은 하이-니켈계 배터리가 고출력·고용량 배터리 성능을 발휘함에 따라, 니켈에 대한 수요는 지속적으로 확대될 것으로 전망된다. 니켈 원료의 주요 공급원인 니켈 광물은 크게 황화광과 산화광으로 나눌 수 있다. 자연계에서의 존재 비율은 약 3:7(황화광:산화광)이나, 전 세계 니켈 생산량의 60% 이상은 황화광에서 얻어진다. 황화광은 부유선광과 건식제련을 거쳐 매트를 제조한 뒤, 습식정련 과정을 통해 정제된다. 그러나 니켈 황화광의 고갈과 니켈 공급망 불안으로 인해 니켈 산화광으로부터 이차전지용 니켈 원료 제조 기술이 주목받고 있다. 기존에는 니켈 산화광의 높은 철 함량으로 인해 스테인리스강의 원료로만 사용되었으나, 이차전지용 니켈 원료에 대한 수요 급증으로 니켈 산화광을 활용한 양극재 원료 제조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 니켈 산화광은 주로 라테라이트(Laterite) 계열 광석으로서 지표 가까이에서는 철 함량이 높은 리모나이트 (Limonite) 광석, 심부에서는 철과 마그네슘의 함량이 유사한 사프로라이트(Saprolite) 광석이 분포하고 있다. 니켈 산화광으로부터 양극재 원료를 제조하기 위해서는 크게 선광, 건식 또는 습식 제련, 제련산물로부터 황산니켈 제조의 공정으로 구성된다. 따라서 본 연구에서는 니켈 산화광으로부터 양극재 원료를 제조하기 위한 첫 단계인 니켈 산화광 선광 기술에 대한 현황을 소개하고, 현재 선광 과정에서의 어려움과 향후 해결해야 할 과제들에 대해서도 논의하고자 한다. 이 논의를 통해 니켈 산화광 선광에 대한 중요한 고려사항과 통찰을 얻기를 기대한다.

[니켈1-3 | 14:50] 초청강연

니켈 산화광의 수소환원 거동에 대한 기초 연구 및 속도론적 해석: 서민석*, 박진균, 이병필, 우광선 (포항산업과학연구원)

Keywords: 수소환원, 탄소중립, 니켈 산화광, TGA, 속도론

온실가스 배출을 줄이기 위하여 모든 산업에 탄소 중립을 중요하게 생각하고 있으며, 제철 공정에서도 탄소 중립을 달성하기 위해 수소를 이용한 수소환원 기술이 개발되고 있다. 국내에서는 유동환원로를 활용한 HyREX가 개발 중에 있으며, 해외에서는 샤프트로를 활용한 DRI를 제조하는 기술을 개발하고 있다. 니켈 산화광은 기존 RK-EF 공정을 통해 제련이 되며, 이는 많은 양의 탄소를 배출하는 공정이다. 따라서 탄소 중립을 위해서 니켈 산화광 공정에서도 수소를 활용한 친환경 공정에 대한 연구가 필요하다. 따라서 해당 연구에서는 니켈 산화광에 대한 수소환원 거동에 해석을 통한 기초 연구를 진행하였다. 니켈 산화광에 대한 수소환원 거동을 해석하기 위해서 TGA (Thermogravimetric Analysis)를 활용하였으며, 무게 변화를 통해 각 환원 반응에 대한 구간을 확인하였다. 이를 바탕으로 속도론적 해석을 통해 율속을 분석하였으며, 니켈 산화광의 환원 최적 조건을 계산하였다.

[니켈2-1 | 15:30] 초청강연

효과적 니켈 회수를 위한 전처리 공정에 따른 니켈 선철의 미세조직 거동 변화: 서보성, 차은빈, 마승현, 박광석* (한국생산기술연구원)

Keywords: Ni pig iron, Ni recovery, pretreatments, Microstructure, Composition

이차전지 양극 (cathode) 핵심 원소인 Ni은 이차전지 성능 향상과 함께 그 수요가 점점 증가하고있다. 반면, 이차전지 양극재용

고순도 Ni 생산을 위해 주로 사용되었던 니켈 황화광 (nickel sulfide ore)은 점차 고갈되고 있어, 페로니켈(ferronickel) 생산에 주로 사용되고 있던 니켈 산화광인 라테라이트광 (nickeliferous laterite ore)으로부터 이차전지용 고순도 Ni을 제조할 필요성이 증대되고 있다. 라테라이트광은 철이 주성분이 리모나이트광(limonite)과 규산염광물인 사프로라이트광(saprolite)으로 나눌 수 있는데, 상대적으로 Ni 함량이 높은 사프로라이트광이 건식제련 원료로 많이 사용되고 있다. 대략 Ni 품위가 2% 수준인 사프로라이트를 이차전지용 고순도 Ni 제조에 사용하기 위해서는 보다 Ni 품위를 높일 필요가 있으며, 이를 위해 수소환원 기술을 통해 Ni 품위 10 % 이상의 니켈 선철 (nickel pig iron)을 제조하기 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 Ni 품위 13% 수준의 니켈 선철을 진공 유도 용해 (VIM) 공정을 통해 제조한 후, 니켈 선철로부터 Ni을 효과적으로 회수하기 위한 일반 대기 산화와 선택적 산화 같은 전처리 공정을 진행하였다. 이와 같은 전처리 공정의 조건에 따라, 니켈 선철의 산화 거동과 함께 산화에 따른 미세조직 변화를 관찰하여, 향후 습식 니켈 침출시 보다 효과적인 니켈 침출에 대한 정보를 제공하고자 한다.

[니켈2-2 | 15:55] 초청강연

니켈-철 합금으로부터 황산니켈 제조 연구: 김우진*, 김민철, 박상칠 (고려아연(주))

Keywords: 황산니켈, 니켈-철 합금, 습식제련, 건식제련

이차전지 산업의 급속한 성장과 함께 고순도 황산니켈(NiSO4·6H2O)의 안정적 공급이 중요한 과제로 부각되고 있다. 본 연구에서는 니켈-철(Ni-Fe) 합금을 원료로하여 황산니켈을 제조하는 공정을 개발하고, 이를 경제적, 기술적 측면에서 평가하였다. 이를 위해 습식제련과 건식제련 공정을 비교·분석하여 최적의 제조 방법을 모색하였다. 습식제련 공정에서는 니켈-철 합금을 황산(H2SO4) 용액에서 용해시켜 니켈과 철을 침출한 후, 철 제거 공정을 통해 정제된 황산니켈 용액을 확보하였다. 이후 추가적인 불순물 제거 방안을 도출한 후 결정화 공정으로의 공정을 개발하였다. 한편, 건식제련 공정에서는 용융(melting) 및 침출 연계 공정을 활용하여 니켈을 선택적으로 용출하고자 하였다. 두 공정의 효율성과 원가를 비교한 결과, 습식제련은 높은 니켈 회수율과 낮은 불순물 함량을 보였으며, 건식제련은 에너지 소비 절감 및 공정 단순화 측면에서 장점을 나타냈다. 본 연구는 니켈-철 합금을 활용한 황산니켈 제조 기술이 이차전지 소재 공급망의 안정화 및 자원 순환 측면에서 유용한 대안이 될 수 있음을 시사하며, 공정 선택 시 경제성 및 환경적 요인을 종합적으로 고려해야 함을 제안한다.

[니켈2-3 | 16:20] 초청강연

Development of EA-P and Solvent Extraction-Based Refining Technology for High-Purity Nickel Recovery from Nickel Pig Iron (NPI): 김명석 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 배성욱 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 박경태, 신재홍* (한국생산기술연구원)

Keywords: Electrochemically Assisted Powderization, Solvent extraction, Nicckel Pig Iron, Nickel sulfate, Battery materials

Nickel is a critical material in battery and advanced industrial applications, with the growing demand for high-purity nickel compounds driven by the rapid expansion of electric vehicle batteries and energy storage systems. This study presents an innovative refining process that integrates Electrochemically Assisted Powderization (EA-P) and Solvent Extraction techniques for the efficient recovery of high-purity nickel from Nickel Pig Iron (NPI). The EA-P process converts bulk NPI into nanopowder, dramatically increasing the surface area and enhancing the dissolution efficiency compared to conventional bulk forms. The nanopowder is subsequently dissolved in sulfuric acid, followed by a solvent extraction process to selectively remove impurities such as iron (Fe) and chromium (Cr). Optimal extractants and process conditions were determined to achieve the efficient production of high-purity nickel sulfate ($NiSO_4$), which is essential for battery manufacturing. Additionally, a pyrometallurgical refining process utilizing the carbonyl process was developed. The carbonylation reaction selectively separates nickel from iron by forming nickel tetracarbonyl gas, which is then purified and thermally decomposed to obtain high-purity nickel powder. Thermodynamic analysis identified the optimal temperature and pressure conditions to maximize reaction efficiency while minimizing energy consumption. The proposed EA-P and solvent extraction-based refining process offers significant advantages over conventional high-pressure acid leaching (HPAL) methods, including reduced energy consumption, lower environmental impact, and enhanced nickel recovery efficiency. Future research will focus on scaling up the process from the laboratory to a semi-pilot scale, paving the way for industrial application and contributing to the establishment of a stable and sustainable nickel supply chain

[니켈2-4 | 16:45] 초청강연

MLCC공정 슬러지로부터 니켈회수 및 양극재 원료용 고순도황산니켈 제조: 서장현*, 안덕규*, 김은혁* ((주)새빗켐)

Keywords: MLCC공정슬러지, 니켈회수, 황산니켈, 리튬이차전지 소재화

적층형세라믹콘덴서(Multi-Layer Ceramic Capacitor, MLCC)는 각종 전기·전자기기에 사용되며 콘덴서시장의 70% 이상을 차지하고 있다. 반도체 기술의 고도화, 5G 도입 등 전자 장비의 미세화로 인해 MLCC에 대한 수요가 점차 증가하고 있고, MLCC제조 산업의 성장과 더불어 발생되는 공정슬러지의 양도 꾸준히 증가하고 있다. 현재 MLCC 공정슬러지는 대부분 매립으로 처리되고 있으며, 리튬이차전지 시장의 성장과 니켈자원의 공급부족 심화현상으로 인해 MLCC 공정슬러지 내 니켈의 재자원화 기술 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 MLCC 제조공정에서 발생한 니켈 저함량 슬러지로부터 니켈을 효율적으로 회수하고 이를 리튬이차전지의 양극재 원료용 고순도 황산니켈로 재자원화하는 연구를 수행하였다. 국내외 MLCC제조공정에서 발생하는 니켈슬러지는 평균 Ni 25%, Sn 8.8% 등의 성상을 보이고 있으며, 이를 친환경적이며 경제적 공정인 습식 화학반응법으로 니켈 회수를 수행하였다. 또한 회수된 니켈을 고순도의 황산니켈 소재로 제조하기 위해 3단계의 화학적 정제공정을 거쳐 99.5% 이상의 고순도 황산니켈을 생산하는 공정기술을 개발하였다. MLCC제조 공정 슬러지의 발생원 별 성상이 다소 상이함에 따라 습식화학반응 공정 운영 효율을 향상

시키기 위해 원료 성상 균일화를 위한 2 step 파/분쇄 전처리를 수행하였고, 황산, 염산, 질산 등의 무기산을 사용하여 니켈을 경제적으로 회수하는 공정개발을 목표로 하였다. 정제공정은 리튬이차전지 양극재 원료에서 필요로 하는 황산니켈 순도 및 불순물 품질관리 기준을 만족하기 위한 목표로 참고하였으며, 회수된 니켈 및 불순물 함량은 ICP-OES로 정량분석하여 회수율 및 순도를 계산하였다. 니켈 회수를 위한 침출산으로는 황산이 가장 효율적이었으며, pH 적정을 통한 수산화반응으로 Fe, Al, Cu 등의 주요 불순물의 정제, 당량비의 불화화합물 투입을 통한 Ca, Mg 정제, 수산화니켈로 전환하여 수세하는 정제 등 3단계의 정제반응을 통해 99.5% 이상의 고순도 황산니켈 제조가 가능한 것을 확인하였다. 최종적으로 수득한 고순도 황산니켈의 주요 불순물은 Fe ≤ 5ppm, Mg ≤ 25ppm, Na ≤ 3,500 등으로 리튬이차전지 양극재 원료 적용 품질기준을 만족하는 수준으로 평가 되었다. 본 연구를 통해 MLCC제조 공정에서 발생하는 니켈슬러지로부터 니켈을 분리 회수하여 소재화하는 저비용의 친환경 공정기술을 개발하고 수입자원의 해외 의존도를 최소화하여 친환경 자원 선순환 기술을 확보할 것으로 기대된다. 사사 이 기술은 2024년 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT)연구비 지원을 받은 00438521 니켈 순환자원을 활용한 고순도 황산니켈 제조 및 공정 개발 과제를 통해 개발되었음.

적층제조 및 분말I
Room 402B, 4월 24일

[적층1-1 | 09:00]

Wire arc additive manufacturing(WAAM)으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 및 고온 압축 기계적 특성: 김수빈 (인하대학교), 감동혁 (한국생산기술연구원), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Wire arc additive manufacturing, Ti-6Al-4V alloy, Microstructure, Mechanical properties, Deformation mechanism

Ti-6Al-4V(Ti64) 합금은 우수한 비강도, 내식성, 내열성 및 생체적합성으로 항공우주 및 의료 분야의 핵심 소재로 사용되고 있다. Wire Arc Additive Manufacturing(WAAM) 공정은 기존 제조 방식 대비 높은 적층 효율과 빠른 제조 속도를 가지며, near-net-shape 제조가 가능한 차세대 적층 제조 기술이다. 특히, 고가의 Ti64 합금 제조에서 재료 낭비를 최소화하며, 생산 비용을 크게 절감할 수 있다. WAAM으로 제조된 Ti64 합금은 적층 공정 특성상 독특한 미세조직을 형성하며, 이는 고온 환경에서의 기계적 특성에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 WAAM Ti64 합금의 미세조직이 고온 변형 거동에 미치는 영향을 규명하기 위해, 전통적 공정으로 제조된 Ti64 합금과의 비교 연구를 수행하였다. 고온 압축 시험은 $0.001/s^{-1}$의 변형 속도로 상온에서 700ºC까지 수행되었다. WAAM으로 제조된 Ti64 합금은 적층 방향을 따라 성장하는 주상정 결정립과 내부의 복잡한 α-lath 구조를 나타냈으며, EBSD 분석 결과 α상이 99.8%로 지배적이고 80.8%의 높은 고각입계 분율을 보였다. 고온 압축 시험 결과, WAAM Ti64는 상온에서 1034.1 MPa의 압축 항복 강도를 보였으며, 온도가 증가함에 따라 679.1 MPa(300ºC), 646.2 MPa(500ºC), 318.1 MPa(700ºC)로 감소하였다. 반면, 전통적 제조 공정 Ti64는 상온에서 998.76 MPa을 시작으로 300ºC에서 619.86 MPa, 500ºC에서 530.66 MPa, 700ºC에서 224.6 MPa의 압축 항복 강도를 나타내어, WAAM Ti64가 모든 온도 구간에서 우수한 고온 기계적 특성을 보였다. 상기 결과들과 파단면 해석 등을 바탕으로 WAAM Ti64 합금의 고온 변형 거동을 규명하고, 항공 우주 분야 고온 구조용 소재로서의 적용 가능성을 함께 논의하고자 하였다.

[적층1-2 | 09:15]

Thermomechanical behaviour and microstructural evolution in nodes and sturts of face-cantered cubic lattice structures during laser powder bed fusion processing: Muhammad Raihan Hashmi, Soung Yeoul Ahn, Gitaek Lee (postech), Jae-il Jang, Zhe Gao (Hanyang university), Renhao Wu, and Hyoung Seop Kim* (postech)

Keywords: Laser powder bed fusion, Lattice structures, Finite element analysis, Microstructural heterogeneity

Superior mechanical and functional properties, such as strength, ductility, and energy absorption capabilities, have garnered significant research interest in lattice structures, driven by advancements in additive manufacturing technologies. However, existing limitations in understanding the local thermal histories at the nodes and struts of lattice structures remain a topic to be explored. This study investigates the local thermal histories in lattice structures, focusing on variations in local microstructures. Numerical simulations, combined with detailed microstructure characterizations, reveal that nodes play a crucial role in determining the thermal history of lattice structures. The nodes and struts exhibit difference in grain size, porosity fractions and distortion due to heat dissipation. Furthermore, nodes and struts experience distinct thermal histories due to thermal cycling effects, resulting in microstructure heterogeneity.

[적층1-3 | 09:30]

열처리된 적층제조 Ti-6Al-4V 합금이 3.5 wt. % NaCl 수용액에서 나타내는 부식 거동: 강창민, 장희진* (조선대학교)

Keywords: DED, Ti-6Al-4V, 열처리, 잔류응력, 부식 거동

타이타늄 합금은 높은 비강도와 뛰어난 내식성을 가진 소재로 항공우주산업 및 해양산업 등 다양한 산업 분야에 널리 사용된다. 하지만 높은 항복강도 및 낮은 열전도율로 인해 제련, 가공이 어렵다는 단점을 가진다. 그러나 최근, 적층가공 기술을 활용하여 타이타늄 합금을 소재로 하는 복잡한 형상의 부품 제작도 많아지고 있는 추세이다. 본 연구에 사용된 시료는 절삭가공 Ti-6Al-4V 합금과 적층제조 Ti-6Al-4V 합금이다. 적층제조 합금의 경우, DED(Directed Energy Deposition) 공정으로 제조되었다. 적층제조 합금은 분말이 레이저에 의해 빠르게 용융되고 공기중에서 급냉되어 소재에 잔류응력이 발생한다. 본 연구에서는 잔류응력을 제어하기 위해 650ºC에서 열처리를 진행하였다. 열처리된 소재의 잔류응력 변화는 XRD를 통해 분석하였다. 열처리가 소재에 미치는 영향을 파악하기 위해 미세조직 및 경도 변화를 관찰하였고 열처리에 따른 부식 거동을 확인하기 위해 전기화학시험을 진행하였다. 전기화학시험은 모두 3.5 wt. % NaCl 수용액에서 진행하였다. 동전위 분극시험을 통해 소재의 부식전위, 부식속도, 공식전위를 확인하였고 정전위 분극시험을 통해 시간에 따른 부동태 피막 전류변화를 확인하였다. 또한 소재의 재부동태 특성을 확인하기 위해 순환 동전위 분극시험을 진행하였다.
Acknowledgement 본 연구는 2023년도 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단 (RS-2023-00217415)의 지원을 받아 수행한 성과임

[적층1-4 | 09:45]

재사용 횟수에 따른 Ti 분말 특성 변화가 Directed Energy Deposition 공정으로 제조된 코팅재 다공성 구조에 미치는 영향: 김대현, 조성재 (국립공주대학교), 안승준, 고은하 ((주)인스텍), 홍순직* (국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터(CAMP^2))

Keywords: DED, 티타늄, 재활용, 적층제조, 분말특성평가

티타늄(Ti) 합금은 높은 비강도, 우수한 내식성 및 생체적합성으로 인해 의료, 항공 및 자동차 산업에서 널리 활용되고 있다.

Directed Energy Deposition(DED) 공정을 통해 Pure Ti 분말을 코팅 제조할 경우, 약 94%의 분말이 기판 주변으로 산란되어 상당한 재료 손실이 발생한다. 제조 비용 절감과 가격 경쟁력 확보를 위해 Ti 분말의 재사용 가능성에 대한 연구가 필수적이지만, 이에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 DED 공정을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금 기판에 Pure Ti 분말을 코팅하여 다공성 구조의 코팅재를 제조하고, 이 과정에서 재사용 Ti 분말의 특성 변화 및 코팅재의 미세조직 분석을 수행하였다. 분말 특성 분석 결과, 재사용 횟수가 증가함에 따라 평균 입도 크기(D50)와 위성형 분말 분율이 증가하였으며, XPS 분석에서 Ti 분말 표면의 TiO_2비율이 증가하였다. 3회 재사용된 분말까지 성분 및 분말 특성에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 높은 유동성을 유지하여 DED 공정에서 활용 가능한 것으로 분석되었다. 코팅재의 미세조직 및 다공성 평가 결과, 재사용 횟수가 증가할수록 기공률과 코팅 두께가 감소하고, 코팅층이 결합되는 현상이 관찰되었다. 특히, 2회 이상 재사용된 분말(R2, R3)로 제조된 코팅재는 열 영향부(HAZ)가 상대적으로 넓은 넓게 형성하였다. 3회 재사용된 분말(R3)로 제조된 코팅재는 낮은 기공률로 인해 적용이 어려우나, 레이저 출력 및 스캔 속도를 최적화하면 재사용이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구는 DED 공정에서 Ti 분말의 재사용 가능성을 체계적으로 분석하여 적층 제조 비용 절감 및 지속 가능성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

[적층1-5 | 10:00]

Thermal strain 해석을 통한 L-PBF 공정에서의 Non-contact supports 파라미터 연구: 김오섭, 김민수, 이창열, 김정호* (인하대학교)

Keywords: Additive Manufacturing, L-PBF, Non-contact supports, Build simulation, Thermal strain

금속 적층 제조(AM) 공정 중 가장 활발히 연구되고 있는 제조공법인 Laser Powder Bed Fusion(L-PBF)는 높은 정밀도를 가지는 장점이 있지만, 열처리 및 표면 가공 등의 후처리 공정이 필요하다. 특히, 서포트(Supports)가 지지된 부분은 서포트 접촉면의 흔적이 남을 뿐만 아니라 제거 과정에서 표면 결함을 유발할 수 있기에 효율적인 서포트 배치 전략 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 표면 조도 문제를 해결하기 위해 효율적인 서포트 배치 전략을 연구했으며, 이를 해결하기 위해, 부품(Parts)과 서포트(Supports) 사이에 작은 간극(Gap)을 두어 물리적인 지지가 아닌 열 방출을 통한 변형 억제 방식인 'Non-Contact Supports' 기법을 유한요소(FEM) 기반 빌드 시뮬레이션(Build Simulation)을 활용한 열-변형(Thermal-Strain) 해석을 통해 비교 연구하였다. 또한, 서포트 구조에 핀 타입 히트싱크(Heat Sink) 형상을 적용하여 열 방출을 용이하게 하는 방법을 도입하고 그 효과를 분석 및 비교하여 히트싱크의 간격 및 두께에 대한 Parameter study를 통해서 간격이 비교적 좁은 형상일수록 최적에 가까움을 확인했다.

[적층1-6 | 10:15]

L-PBF 공정의 세라믹 절연 기판 적용을 통한 잔류응력 및 소성변형 제어: 안성열* (포항공과대학교), 정상국 (Tohoku University), 이기택 (포항공과대학교), 채호병, 우완측 (한국원자력연구원), 김은성, Muhammad Raihan Hashmi, Levin Sebastian Cahyaputra (포항공과대학교), 홍순익 (충남대학교), 김형섭 (포항공과대학교)

Keywords: Laser-powder bed fusion, ceramic substrate, residual stress reduction, thermal-induced plastic deformation reduction, bridging experiment and finite element simulation

본 연구는 레이저 laser-powder bed fusion (L-PBF) 공정에서 세라믹 기판의 적용이 잔류응력 및 소성변형을 효과적으로 감소시키는 데 미치는 영향을 조사하였다. 스테인리스 316L 기판 아래에 배치된 세라믹 기판은 열 절연체로 작용하여 적층 과정 중 열 전달 및 열 구배를 크게 변화시켰다. 유한요소법(FEM) 시뮬레이션과 중성자 회절 및 미세조직 관찰을 포함한 실험적 측정을 통해 L-PBF 공정으로 제작된 부품의 온도 분포, 변형 및 미세조직의 변화를 분석하였다. 결과적으로, 세라믹 기판은 열 구배와 빌드 챔버로의 열 유속을 줄여 제작된 부품에서의 잔류응력과 소성변형을 완화하는 것으로 나타났다. 미세조직 분석에서는 세라믹 기판이 더 큰 결정립 크기와 낮은 전위밀도를 촉진하여 열로 유발된 소성변형을 감소시킴을 확인하였다. 인장 특성과 비커스 경도 결과 또한 세라믹 기판 사용 시 소성변형이 감소함을 추가적으로 입증하였다. FEM 시뮬레이션은 변형 경향을 정확히 예측하였으며, 실험 데이터는 세라믹 기판 조건에서 캔틸레버 빔 변형이 약 6% 감소함을 보여주었다. 본 연구는 적층제조 공정 과정에서 세라믹 기판의 사용을 통해 L-PBF 공정에서 잔류응력과 소성변형을 효과적으로 제어할 수 있는 잠재력을 제안한다.

[적층2-1 | 10:45]

최적 조성구배 Ni-Fe 경사기능재료의 설계 및 레이저 직접 적층 제조: 조해주, 정종욱, 이욱진* (부산대학교 공대 재료공학부)

Keywords: 경사기능재료, 레이저직접적층공정, Inconel 625, Stainless steel 316L

경사기능재료(Functionally graded materials, FGM)는 두 개 이상의 재료가 화학적 조성이나 기계적 물성이 점진적으로 변화하는 특성을 가지며, 이종소재의 신뢰성 있는 접합이 필요하거나 양 끝단의 상이한 특성을 동시에 요구하는 부품에 사용된다. 한 편, 레이저 직접 적층 공정(Laser directed energy deposition, L-DED)은 이종의 금속 분말을 서로 다른 분말 공급률로 동시에 분사하며 적층 할 수 있기 때문에 원하는 조성비를 연속적으로 구현해야 하는 FGM 제작에 적합하다. 본 연구에서는 굽힘 변형 저항성이 우수한 이종소재 구조 설계를 위해 경사적 기계적 물성을 가지는 Ni-Fe FGM 구조를 설계하고 L-DED를 이용하여 제작하였다. 고온 특성이 우수한 Inconel 625와 비용 효율성이 높은 AISI 316L의 분말을 사용하였으며, 해당 합금 분말을 동시 분사하여 7가지 혼합비로 시편을 제작하고, 각각의 기계적 물성과 미세구조를 분석하였다. 실험 데이터를 바탕으로 7가지 혼합비를 다양한 순열로 조합하여 중간층을 설계하고, 유한요소해석(finite element method, FEM)을 통해 굽힘 저항을 시뮬레이션 하였다. FEM 결과에 따라 최적의 조성구배 설계를 제시하고, 실제 실험 결과와 비교하기 위해 L-DED로 시편을 제작하여 굽힘 특성을 분석하였다. 또한, 기존 이종 접합 구조 설계 방식과 비교하기 위하여 점진적 화학 조성 변화 시편과 직접 접합 시편을 L-DED로 제작하고, 굽힘 시험을 실시하여 그 결과를 비교하였다. 마지막으로 해당 3종류 설계의 as-built와 굽힘 시험 후 시편의 미세조직 분석을 통해 각 설계의 미세구조가 굽힘 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

[적층2-2 | 11:00]

IN625 완충층 적용을 활용한 DED Hastelloy X / IN792 이종소재 접합 간 미세균열 방지 전략: 성예찬 (경상국립대학교), 김범준 (경상국립대학교, (주)갓테크), 박기덕 ((주)갓테크), 서성문, 이형수 (한국재료연구원), 김형섭 (포항공과대학교), 김정기* (경상국립대학교)

Keywords: Additive Manufacturing, Inconel alloy, Clad Metal, Mechanical Property, Microstructure

항공 및 발전 분야에 사용되고 있는 내열소재는 1000 ºC 이상의 고온환경, 잦은 기동 및 정지가 발생함에 따라 부품의 손상이 발생한다. 따라서, 기존에는 체계의 유지보수를 위해 신규 외산 부품을 들여와 교체하였으나, 최근 글로벌공급망의 불안정에 따라 신규부품 도입에 높은 비용 및 시간이 요구된다. 상기 문제점으로 인해 최근 내열소재/부품의 유지보수는 매우 중요한 이슈이기에 본 연구에서는 DED(Directed Energy Deposition)를 통해 손상된 IN792 일방향응고재에 Hastelloy X를 접합하여 유지보수의 가능성을 제시하고자 하였다. 다만, 기존에 진행된 연구 사례들을 고려해보았을 때, IN792에 Hastelloy X를 적층하는 과정에서 미량의 원소 변화로 인해 미세균열이 형성되는 현상이 발생할 것으로 예상된다. 따라서, 해당 실험에서는 IN792에 Hastelloy X를 적층한 시편과 IN792와 Hastelloy X 사이에 IN625를 완충영역으로 첨가해 원소 확산에 따른 균열 형성의 변화를 확인하였다. 그 결과, IN792 위에 HX를 바로 적층한 시편에서는 접합 계면에서 Si, W등의 원소의 확산에 의한 미세균열들이 관찰되었다. 반면, IN625 완충영역을 추가한 시편에서는 접합 계면에서 균열이 관찰되지 않았으며, 이는 IN625가 IN792와 Hastelloy X 사이의 원소 확산을 효과적으로 억제한 결과로 파악된다. 이로 인해 인장시험 시 IN625 완충영역을 추가한 시편에서는 기존 접합법에 비해 연신율이 크게 증가하는 결과를 나타냈다. 본 결과는 별도의 소재 개발 없이 유지보수 과정 중 계면부에서의 상용소재 조합에 따라 난용접 소재 간 이종접합 시 미세균열을 방지할 뿐만 아니라 복구된 부품의 기계적 특성을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

[적층2-3 | 11:15]

Laser Powder Bed Fusion 공정변수에 따른 Haynes 230 적층소재의 결함 형성 및 미세조직 변화: 김지수 (한국생산기술연구원, 경북대학교), 성지현 (한국생산기술연구원), 이해민, 김균섭 (휴니드테크놀러지스), 박성혁 (경북대학교), 김다혜* (한국생산기술연구원)

Keywords: 적층제조, 니켈계 합금, Laser Powder Bed Fusion, 공정 최적화, 결함

Ni계 초내열합금은 우수한 내산화성, 고온 강도 및 내크리프 특성으로 항공우주, 발전 및 국방 산업 등 고온 구조 부품에 널리 사용된다. 특히 Haynes 230은 장시간 고온 환경에서 뛰어난 내산화성, 내질식성 및 내크리프 강도를 위해 설계되었다. Cr, W, Mo, Co 등의 고융점 원소들을 첨가하여 고온에서도 미세조직의 안정성과 높은 기계적 강도를 확보하였다. 최근 복잡한 형상, 일체화 제조 및 경량화 요구에 따라 적층 제조 적용이 확대되고 있으나, Laser Powder Bed Fusion(L-PBF) 공정에서 Haynes 230 소재는 응고균열, 미세균열, 기공 및 과도한 카바이드 석출 등 다양한 결함이 발생하기 쉬워 합금 설계 또는 공정 변수 최적화를 통해 결함을 제어하는 것이 주요 기술적 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 L-PBF 적층 기법을 이용하여 Haynes 230을 적층 제조하고, 레이저 출력(Laser Power), 스캔 속도(Scan Speed), 층 두께(Layer thickness), 해칭 간격(Hatching distance) 등 주요 공정변수에 따른 미세조직 변화 및 결함 생성에 미치는 영향을 분석하였다. 적층 공정 중 발생한 미세 균열 및 기공 결함의 생성 원인을 고찰하고, 결함 특성과 기계적 물성 간의 상관성을 분석하였다. 후기: 이 논문은 산업통상자원부의 '소재부품기술개발사업'의 지원을 받아 연구되었음(No. 20017668)

[적층2-4 | 11:30]

DED 공정으로 제조된 Inconel 738LC 합금의 후열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화: 강호성, 김정기* (경상국립대학교)

Keywords: Inconel 738LC, Additive manufacturing, Response surface method, post-heat treatment, Microstructural evolution, Tensile properties

가스터빈의 유지보수, 수리 및 운영(MRO)은 체계의 장기적 활용에 필수적인 요소이므로 항공 및 발전 산업에 매우 중요하다. 그러나 종래 활용되는 수리 용접 공정은 Ni기 초합금의 일부에만 적용 가능하다는 한계가 존재하며, 이를 해결하기 위한 DED(Directed Energy Deposition) 공정 기반의 수리 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 반응 표면 분석법(RSM, Response Surface Methodology)을 활용하여 Inconel 738LC 합금의 DED 공정 최적화를 수행하였으며, 다양한 열처리 조건에서의 미세조직 변화 및 인장 특성을 조사하였다. 연구 결과, 레이저 출력(Laser Power), 스캔 속도(Scan Speed), 분말 공급 속도(Powder Feed Rate) 등의 핵심 공정 매개변수로부터 치수 정확도, 경도, 상대 밀도를 동시에 만족하는 최적의 공정 조건을 도출하였다. 또한, 최적 조건으로 조형된 시편의 미세조직과 인장 특성이 열처리 단계에 따라 뚜렷하게 변화하는 것을 확인하였다. 열처리 단계가 증가할수록 MC 탄화물이 $M_{23}C_6$ 탄화물로 분해되면서 크기와 분율이 감소하는 경향을 보였으며, γ′상의 크기와 입자 간 거리(interparticle spacing)는 점진적으로 증가하고, 부피 분율은 감소하였다. 특히, 1190ºC 4 h + 1120ºC 2 h + 845ºC 24 h(3-Step) 열처리를 적용한 경우, 동적 재결정(dynamic recrystallization)이 발생하였으며, 기지(matrix) 내 1차(Primary) γ′상과 2차(Secondary) γ′상이 공존하는 이중 분포(Bimodal Distribution) 구조가 형성됨을 확인하였다. 인장시험의 경우 25ºC, 650ºC, 850ºC에서 수행하였으며, 실험 결과를 바탕으로, γ′상의 크기 및 부피 분율, MC 및 $M_{23}C_6$ 탄화물의 용해도와 분율이 서로 다른 온도에서 기여하는 강화 메커니즘(strengthening mechanism)과 파괴 메커니즘(fracture mechanism)을 규명하였다.

[적층2-5 | 11:45]

레이저 분말 베드 용융법 내 공정매개변수 미세 조정을 통한 순구리의 전기전도도 개선: 김연우 (한국재료연구원 나노재료연구본부, 부산대학교), 안소라 (한국재료연구원 나노재료연구본부), 박하음 (한국재료연구원 나노재료연구본부, 고려대학교 미래융합소재학과), 박기철 (파트너스랩(주) 기업부설연구소), 김육진 (현대자동차 연구개발본부 전동화시작개발팀), 최윤석* (부산대학교), 박정민* (한국재료연구원 나노재료연구본부, 한국재료연구원 3D프린팅공정연구센터)

Keywords: pure copper, laser powder bed fusion, microstructure, electrical conductivity

최근 탄소중립 기조에 따른 환경 규제가 강화되면서 내연기관 차량의 비중이 감소하고 있으며, 이에 따라 전동모터 기반 e-Mobility 시장이 빠르게 성장하고 있다. 전동모터의 성능 향상을 위해서는 구동 효율과 열 관리 성능을 최적화하는 것이 중요하며, 이를 위해 구동모터 내 구리 코일의 점적률 증가가 필수적이다. 점적률을 극대화하기 위해서는 구리 코일 및 전류 경로의 형상을 최적화하는 설계가 요구된다. 그러나 기존의 소성가공 및 용접 기반 제조공정으로는 복잡한 형상의 순구리 부품을 구현하는 것이 어려워 모터 효율 향상에 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 순구리(Pure Copper)에 대해 대표적인 적층제조 기술인 레이저 분말 베드 용융법(Laser Powder Bed Fusion, LPBF)을 적용하여 복잡형상의 부품을 만드는 기술이 주목받고 있다. 그러나, 순구리는 높은 레이저 반사율과 열전도도로 인해 적층과정에서 에너지 흡수율이 낮고 내부에 결함이 과량 발생하는 난적층성의 특성을 나타냄에 따라 고밀도-고전도성의 조형체 제조를 위해선 고레이저 출력의 LPBF 장비와 정밀한 공정변수 제어가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 고밀도 순구리 조형체 제조가 가능한 LPBF 공정범위 내에서, 공정변수를 미세 조정하며 고전기전도도의 조형체를 제조할 수 있는 공정전략을 탐구하였다.

[적층3-1 | 14:00 Canceled]

[적층3-2 | 14:15]

차량 대형 부품 적용을 위한 L-PBF 공법 AlSi10Mg 합금의 GMAW 용접 조건별 미세조직 및 기계적 특성 연구: 주효문, 조영래, 장연하, 용왕현, 조영철, 김성진, 김한재* (현대자동차 기초소재연구센터), 조정호* (충북대학교 기계공학부)

Keywords: L-PBF, AlSi10Mg, Gas Metal Arc Welding, Microstructure, Mechanical Property

3D프린팅 소재로 주목받는 알루미늄 AlSi10Mg 합금은 적층 제조 공정의 제한적인 사이즈 문제로 인해 그 활용이 제한되어 왔다. 전세계적으로 L-PBF 공법의 대형화 관련 장비 개발이 활발하게 진행되고 있지만, L-PBF 대형 장비에서는 품질 문제, 비용 문제 등으로 상용화가 어려운 상태이다. 알루미늄 3D프린팅 소재는 낮은 아크 용접성 때문에, 미세조직이나 피로 및 강도 평가에 대한 검증 사례는 쉽게 찾아볼 수 없다. 하지만 압출재나 주조재를 3D 프린팅 소재와 용접하여 사용할 경우, 비용 절감과 대형화를 동시에 달성할 수 있다. 본 연구에서 3D프린팅 소재와 3D프린팅 소재, 3D프린팅 소재와 압출재 (A6061), 3D프린팅 소재와 주조재 (AC4B, A356, A365)의 조합에서 전압, 전류, 용접속도가 미세조직과 기계적 물성에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다. 3D프린팅의 장점으로 복잡한 형상을 제작할 수 있는데, 압출재와 3D프린팅 소재를 용접할 때, 3D프린팅 소재를 끼움구조 형상으로 제작하여 용접에 유리한 물성을 확보할 수 있었다. GMAW 용접 조건과 미세조직과 기계적 물성에 미치는 영향에 대해 연구를 통해 최적 조건을 확보할 수 있었고, 결론적으로 차량용 대형 샤시 부품에서 압출재와 3D프린팅 소재의 GMAW용접을 통해 부품을 제작하고, 내구 평가를 통해 적용 가능성을 검증하였다.

[적층3-3 | 14:30]

Peculiar microstructural characteristics and mechanical properties of γ-TiAl alloy fabricated by laser powder bed fusion: Sung-Hyun Park, Ozkan Gokcekaya, and Takayoshi Nakano* (Osaka University)

Keywords: Laser powder bed fusion, Titanium aluminide, Microstructure, Mechanical properties

γ-Titanium aluminide (γ-TiAl) alloys have emerged as a promising alternative to conventional superalloys in the aerospace industry due to their low density, excellent creep resistance, and outstanding high-temperature performance. Recently, metal-based additive manufacturing, particularly laser powder bed fusion (L-PBF), has gained significant interest in processing γ-TiAl alloys. Because this approach offers unique microstructural characteristics and competitive mechanical properties compared to traditional manufacturing methods. However, the inherent brittleness and high susceptibility to cracking in γ-TiAl alloys present significant challenges for the L-PBF process, and their microstructural evolution and mechanical behavior under this process remain insufficiently understood. In this study, we systematically examined the influence of L-PBF process parameters on the densification, microstructure, and mechanical properties of γ-TiAl alloys. Through process optimization, we successfully fabricated highly densified, crack-free γ-TiAl samples. Furthermore, our findings reveal that variations in energy density during manufacturing play a critical role in determining phase morphology, volume fraction, and crystallographic texture, all of which directly impact mechanical performance. Notably, the L-PBF processed γ-TiAl alloys demonstrated superior mechanical properties compared to conventionally manufactured counterparts. This work provides a comprehensive understanding of microstructural control strategies for optimizing γ-TiAl alloys using the L-PBF process. Our insights contribute to advancing the application of additive manufacturing for high-performance aerospace materials.

[적층3-4 | 14:45]

DED 공정을 통해 알루미늄 합금에 코팅된 Al6061-TiB_2 금속 기지 복합재의 내마모 특성 평가: 김형섭 (한국과학기술원 원자력및양자공학과), 김성진 (현대자동차 경량소재연구팀), 유승찬 (한국원자력연구원 핵연료안전연구부), 이태규, 김우혁 (국립한밭대학교 신소재공학과), 류호진* (한국과학기술원 원자력및양자공학과, 한국과학기술원 신소재공학과)

Keywords: 금속 기지 복합재(MMC), Surface modification and reinforcement transplantation (SMART), 직접 에너지 증착(DED), 브레이크 디스크, 내마모성

알루미늄은 높은 비강도로 인해 모빌리티 분야에서 유망한 금속 소재로 평가받고 있다. 그러나 알루미늄을 브레이크 디스크 소재로 활용할 경우, 기존의 주철 대비 내마모성이 낮아 실용화에 어려움이 있다. 이에 따라, 알루미늄을 세라믹 입자를 포함한 금속 기

지 복합재(MMC)로 제조하여 내마모성을 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다 본 연구에서는 Surface modification and reinforcement transplantation (SMART) 공법을 이용하여 Al6061-TiB_2 MMC 분말을 제조한 후, 직접 에너지 증착(DED, Directed Energy Deposition) 공정을 활용하여 알루미늄 브레이크 디스크 표면에 코팅을 적용하였다. 이후, 제작된 복합재 코팅층의 내마모 성능을 평가하기 위해 Pad-on-Disk 마찰 마모 시험을 수행하였다. 실험 결과, DED 공정을 통해 TiB_2가 분산된 복합재 코팅층을 적용한 경우, 코팅이 없는 경우에 비해 마모율이 감소하고 마찰 성능이 향상됨을 확인하였다. 이후, 복합재 코팅층의 미세구조 및 마모 메커니즘 분석을 위해 주사전자현미경(SEM), 에너지 분산형 X선 분광법(EDS), 전자 후방 산란 회절(EBSD) 분석을 수행하였다. 본 연구는 DED 공정을 활용한 알루미늄 브레이크 디스크의 내마모성 개선 가능성을 제시하며, 경량 고성능 자동차 부품 개발을 위한 기초 데이터를 제공할 것으로 기대된다.

[적층3-5 | 15:00]

분말 표면 제어 및 강화재 이식을 활용한 적층제조 기반 야금 공정의 개념 확장: 이태규* (한밭대학교)

Keywords: 적층제조, 금속 복합재, 분말 처리

금속 적층제조는 자유로운 형상 제조가 가능하다는 장점으로 인해 지난 10여 년간 급속한 발전을 이루어왔다. 적층제조 기술의 연구는 용접야금학을 기반으로 발전해 왔으며, 현재까지도 대부분의 연구가 용접야금학의 이론과 개념을 중심으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 금속 적층제조와 용접야금학 간의 공통점과 차이점을 체계적으로 분석하고, 이를 통해 적층제조 공정이 기존 용접야금학과 구별되는 독자적인 야금학적 특성을 갖는지를 고찰한다. 특히, 적층제조 공정에서만 구현할 수 있는 금속 복합재 제조 및 헤테로구조(heterostructure) 형성의 가능성을 논의하며, 이를 통해 적층제조 기반 야금학의 연구 영역 확장과 기술적 응용 가능성을 제시한다. 나아가, 적층제조 공정의 특성을 극대화하기 위한 전략으로 분말 원료의 전처리 기술인 분말 표면 제어 및 강화재 이식을 적용한 새로운 적층제조 개념을 제안하고, 이를 통해 적층제조 공정의 확장성과 고도화 가능성을 논의한다.

[적층3-6 | 15:15]

인프로세스 모니터링 시스템을 활용한 적층 제조 양산 품질 제어: 이우진* (이오에스지엠비에이치한국지사)

Keywords: 적층 제조, 인프로세스 모니터링, 양산화, 품질 제어, 품질 관리

적층 제조 공정은 복잡한 형상 및 고성능, 고효율 구현이 가능하며, 리드 타임을 줄일 수 있어서, 자동차, 반도체, 에너지, 의료, 우주항공 분야 등에서 프로토 타입을 넘어 양산화에 적용하고 있다. 그래서 양산을 위한 제품의 신뢰성 및 재현성 등 품질 평가 및 관리의 필요성이 점차 확대되고 있다. 기존 제조 방식 기반의 품질 보증 방법은 적층 제조에 적합하지 않은 경우가 발생하며, 산업별 표준화가 부족한 실정이다. 따라서 파괴, 비파괴 검사 등을 적용하고 있으나, 이는 제품 비용 및 시간, 노력이 증대되는 요인이 되고 있다. EOS GmbH에서는 인프로세스 모니터링 시스템 및 센서를 통해 적층 제조 중 공정 추적과 레이어 별로 장비 정보 및 공정 이력을 수집 가능하게 하여 품질 관리 및 제어의 또 다른 대안이 될 수 있음을 보여준다. 특히, 품질 인증이 중요한 우주항공 및 의료 산업의 주요 제품을 적층하여, 모니터링 시스템의 민감성 및 공정 변수를 평가할 수 있음을 보였으며, CT 결과와 비교하여 대량 생산을 위한 공정 안정성 및 품질 관리 방안을 제시하였다. 이를 통해 인프로세스 모니터링을 활용하여, 실시간 공정 파악이 가능하며 추가적인 분석 알고리즘을 소개하여 품질 관리 및 제어에 적용될 수 있음을 제시한다.

[적층3-7 | 15:30]

EIGA 공법을 활용한 Cu 분말 제조 공정 최적화 및 L-PBF 적층재 기계적 특성 평가: 노구원, 박은수*, 기성후, 김영겸, 전창우 ((주)이엠엘)

Keywords: Gas Atomization, Pure Cu, L-PBF

3D 프린팅 기술은 기존의 성형 및 가공 방법으로는 제조하기 어려운 복잡한 형상의 부품을 구현할 수 있어, 항공우주, 자동차, 전기전자 등 다양한 산업 분야에서 주목받고 있다. 특히, 구리(Cu)는 뛰어난 전기 및 열 전도성을 갖추고 있어, 전기 부품, 전자 장치, 열교환기 등 고성능이 요구되는 분야에서 필수적으로 사용된다. 그러나 Cu는 높은 반사율과 열전도율로 인해 레이저 기반 적층 제조 공정, 특히 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) 기술 적용에 어려움이 있다. 또한, Cu 분말의 형상, 입도, 유동성, 순도 등의 특성은 적층 제품의 물성에 직접적인 영향을 미치므로, 고품질 Cu 분말의 생산 기술 개발이 중요하다. 본 연구에서는 Electrode Inductive Gas Atomization (EIGA) 공법을 활용하여 Cu 분말 제조 공정을 최적화하고, 이를 L-PBF 공정에 적용하여 적층재의 특성을 분석하였다. EIGA 공법은 고순도 금속 분말을 생산하는 데 효과적이지만, Cu의 높은 열전도율로 인해 열에너지가 빠르게 흡수 및 방출되어 분말 제조가 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 고주파 조건을 최적화하고 예열 공정을 도입하여 균일한 입도 분포와 가스 압력, 가스 온도 조건을 통하여, 높은 회수율을 가진 Cu 분말을 제조하였다. 제조된 Cu 분말의 입자 크기 분포, 형태, 순도 및 산화 상태를 분석하였으며, 이를 두 종류의 L-PBF 장비(EOS社 M290 1kw, E-Plus社)를 사용하여 적층 시편을 제조하였다. 적층 시편의 전기전도도, 열전도도, 경도 및 인장강도를 측정하여 분말 특성이 적층재 물성에 미치는 영향을 평가하였다. 이 연구는 EIGA 공법을 통한 Cu 분말 제조 공정의 기술적 한계를 극복하고, L-PBF 공정에 최적화된 고품질 Cu 분말의 생산 가능성을 입증함으로써, 다양한 산업 분야에서의 적용 가능성을 제시한다. 이 연구는 2021년 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20017652, 2021년 소재부품기술개발사업)

[적층4-1 | 16:00]

Enhanced cryogenic tensile properties of additively manufactured STS316L via nano-oxide dispersion of reusable powder : Cho Hyeon Lee, Won Hui Jo (Kookmin University), Hyoung Seop Kim (Pohang University of Science and Technology), and Jae Bok Seol* (Kookmin University)

Keywords: nano-oxide dispersion, reusable powder, cryogenic, STS316L

Laser powder bed fusion (L-PBF) has attracted great interest in the aerospace sector because it can produce complex parts with high accuracy. In the L-PBF of metallic materials, costs, and material yields strongly depend on the ability to reuse powder efficiently. However, some of the powders are exposed to high temperatures during the manufacturing process resulting in an alteration of the feedstock properties if it reused. Therefore, to investigate the change of the powder during the process and the effect of the powder on the printed parts, we tried to investigate the effect of reused STS316L powders on the tensile properties of their printed products under liquid nitrogen temperature. The powders were used, collected, sieved, and reused up to 15 times with all steps from the original powder. This study aims to investigate the effect of nanoscale oxides formed through repeated layering on the enhanced yield strength in an extremely low-temperature environment.

[적층4-2 | 16:15]

Wire Arc Additive Manufacturing으로 제조된 316L 스테인리스강의 미세조직 및 기계적 특성의 이방성: 서예진, 황원구 (인하대학교), 김찬규, 송상우 (한국재료연구원), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Wire arc additive manufacturing, 316L stainless steel, Crystal direction, Anisotropy, Mechanical properties

적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 공정 중 하나인 와이어 아크 적층 제조(Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)는 별도의 챔버가 필요하지 않아 대형 부품 제조에 용이하며, 아크를 열원으로 활용하여 금속 와이어를 용융시키면서 적층하는 방식이므로 높은 생산성을 갖는 것이 특징이다. 그러나 분말(Powder) 기반 적층 제조 공정(Laser Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition)과 비교했을 때 냉각 속도가 상대적으로 느려, 층간 경계에서 결정립 크기 변화가 발생하며, 미세조직이 특정 방향으로 성장하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 직경 1.2 mm의 STS 316L 금속 와이어를 사용하여 WAAM 공정을 통해 316L 스테인리스강 적층 시험편을 제작하고, 미세조직과 기계적 특성의 방향 의존성을 조사하였다. 적층된 시험편의 내부 결함을 분석한 결과, 기공율이 0.003% 이하로 확인되어 내부 결함이 거의 없는 양호한 적층 상태를 보였다. 초기 미세조직을 전자 후방산란 회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 기법으로 분석한 결과, 오스테나이트(γ) 기지 내에 일부 페라이트(δ) 상이 존재하며, Building direction에 따라 미세조직이 주기적으로 변화하는 현상을 나타냈다. 페라이트(δ) 상의 분율은 6.7%, 평균 크기는 3.1 μm로 확인되었다. 또한, 오스테나이트(γ)는 <001> 방향을 따라 성장하는 경향을 보였으며, 오스테나이트(γ) 기지의 평균 결정립 크기는 115.7 μm로 측정되었다. 기계적 특성을 평가하기 위해 Building direction 및 Printing direction을 기준으로 인장 시편을 제작한 후, 변형률 속도 10^{-3} s^{-1} 조건에서 상온 인장 시험을 수행하였다. 실험 결과, 항복 강도는 Building direction: 405.62±6.48 MPa, Printing direction: 364.25±9.57 MPa로 나타났으며, 연신율은 각각 49.24±4.46% 및 57.58±4.15%로 측정되었다. 이러한 차이는 결정립 방향성과 페라이트(δ) 상의 크기 변화와 관련이 있는 것으로 사료된다. 상기 결과들을 바탕으로 WAAM 공정으로 제조한 316L 스테인리스강의 변형 기구 및 그 적용 가능성에 대해서도 고찰하였다.

[적층4-3 | 16:30]

미세조직 기반 열처리 최적화를 통한 적층 제조 및 단조 17-4PH 스테인리스 강 이종 용접부의 기계적 특성 개선: 주하연, 김종훈 (창원대학교소재융합시스템공학과), 이지원, 최용혁 (두산에너빌리티 AM 개발팀), 홍현욱* (창원대학교소재융합시스템공학과)

Keywords: 17-4PH stainless steel, Dissimilar Welded Joints, Additive manufacturing , Heat treatment optimization, Mechanical properties

17-4 PH (Precipitation Hardening) 스테인리스 강은 고강도, 우수한 내식성 및 경화 능력으로 인해 항공, 우주, 방산, 해양 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 해당 산업에서는 보다 더 복잡한 소재 요구가 증가하고 있으며, 일반적인 제조 방법으로는 구현하기 어려운 형상의 부품 생산이 필요한 상황이다. 최근 연구들은 이러한 문제를 해결하기 위해 적층 제조된 17-4 PH 스테인리스강의 미세구조 및 기계적 특성을 단조재와 비교하는데 중점을 두고 있다. 3D 프린팅 기술은 복잡한 형상을 정밀하게 구현할 수 있다는 장점이 있지만, 제작 가능한 부품 크기에는 한계가 존재한다. 이러한 문제점을 해결하고자, 본 연구에서는 L-PBF방식으로 제작된 17-4PH 스테인리스 강과 단조된 17-4 PH 스테인리스강 간의 이종 용접부 특성을 조사하고자 하였다. 본 연구에 사용된 AM재와 단조재 모재 모두 full-martensite 조직을 가지고 있으며, AM재에 비해 단조재의 결정립이 더 미세함을 확인하였다. 이러한 두 모재를 GTAW와 EBW 방식으로 용접한 후, 미세조직 및 기계적 특성 평가를 위해 SEM 분석 및 비커스 경도, 인장 평가 등을 실시하였다. 비커스 경도 측정 결과를 통해 단조재와 AM재의 열 영향부 석출 거동이 다름을 확인하였다. 이에 대한 결과로부터 변형 거동을 확인하기 위해 인장 시험을 시행하였다. 상온 인장 시험 결과 용접 열 영향부에 발생한 경도차에 의한 strain imcompatiability에 의해 가장 낮은 경도값을 나타내는 영역에서 파단이 발생함을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 AM 및 단조 17-4PH 스테인리스 강의 이종 용접 시의 석출 거동 평가와 이로 인한 strain imcompatiability를 제어하는 후열처리 방법을 제안하고자 한다.

[적층4-4 | 16:45]

316L 스테인리스 강-구리 복합재의 3차원 격자 구조 제조 및 열·기계적 특성 분석: 최동인, 조영환, 정경재, 김이재, 박민우, 이시환 (서울대학교), 최현주 (국민대학교), 최인석 (서울대학교), 강성규* (경상국립대학교), 한흥남* (서울대학교)

Keywords: 3D 격자 구조, 직접분사 적층, 복합재, 구리, 열 특성

다기능성 재료 구현을 위한 3차원 격자 구조가 주목받고 있는 가운데, 본 연구에서는 기계적 특성과 열 특성의 동시 향상을 목표로 316L 스테인리스 강-구리 복합재를 3차원 격자 구조로 제조하고자 하였다. 직접분사 적층(Directed Energy Deposition) 공법으로

단순 입방의 3차원 격자 구조를 제조하고, 구리의 치밀화와 계면 접합성 향상을 위해 통전 활성 소결 공법으로 후처리 하였다. 적층 제조 및 후처리 과정에서 계면의 원소들이 혼합되어 형성된 전이 영역은 주사 전자 현미경/에너지 분산 분광법과 투과 전자 현미경/전자탐침 미세분석을 통해 분석되었다. 열적 특성 평가를 위해 Laser Flash Apparatus(LFA)로 열 확산도를 측정하고, 전이 영역의 특성을 고려한 유한 요소 해석을 통해 열 접촉 전도도와 유효 열 전도도를 도출하였다. 또한 일축 압축 시험으로 압축 강도를 측정하고 유한 요소 해석을 수행하여 강철 원소의 복합재 계면 및 구리 격자로의 확산이 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

[적층4-5 | 17:00]

급속 냉각 열간 정수압 가압 처리(URQ-HIP)가 금속 재료 압출 적층제조(MEX)로 제조된 17-4PH 석출경화형 스테인리스강의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향: 조용훈 (인하대학교 공과대학 신소재공학부), 전주현 (Quintus Technologies Korea), 김주용 (리프로텍), 윤중열 (한국재료연구원), 이기안* (인하대학교 공과대학 신소재공학부)

Keywords: Metal material extrusion additive manufacturing, Hot isostatic pressing, microstructure, mechanical properties

금속 재료 압출 적층 제조(MEX, metal extrusion additive manufacturing) 공정은 금속 분말과 고분자 binder로 구성된 feedstock을 압출 적층하여 금속 분말 성형체를 제조하는 기술로 탈지와 소결 과정을 통해 금속 소결체를 제조할 수 있는 간접적인 방식의 금속 적층 제조 기술이다. 금속 MEX는 feedstock에 포함된 다량의 binder 때문에 pore 등의 결함이 형성될 수 있고 이 결함들이 물성 저하를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 급속 냉각을 적용할 수 있는 열간 정수압 가압 기술(Uniform rapid quenching hot isostatic pressing, URQ-HIP)을 이용해 금속 MEX 공정으로 제조된 17-4PH 소결체의 결함을 제거하였다. 또한 이 소재의 용체화 및 균질화 열처리 효과가 동시에 구현될 수 있도록 후처리 조건을 제어해 합금의 물성을 극대화하고자 시도하였다. URQ-HIP 처리 후, 소결체의 밀도는 약 2.5% 향상되었고, 소결체에 존재했던 δ-Fe와 nano scale Cu rich 석출물이 효과적으로 용해되어 용체화 처리 없이 석출 경화 열처리 (direct H900)만으로도 석출물의 미세조직을 제어할 수 있었다. URQ-HIP 처리된 MEX 17-4PH의 기계적 특성은 direct H900 열처리 이후 인장 강도: 1.48 GPa, 항복 강도: 1.25 GPa, 연신율: 14.6%로 얻어졌으며, URQ-HIP 처리 대신 용체화 처리 후 석출 경화 열처리를 수행하는 standard H900 비교재 시편(인장 강도: 1.35 GPa, 항복 강도: 1.11 GPa, 연신율 7.8%) 보다 강도와 연신율이 모두 향상된 것으로 나타났다. 상술한 결과들과 파단면 분석 결과들을 바탕으로 URQ-HIP 공정이 MEX 17-4PH 소결체의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향과 그 변형 거동에 대해 함께 고찰하였다.

[적층4-6 | 17:15]

Optimization of Heat Treatment Conditions for Mechanical Properties in Heterogeneous Structures: A Study on L-PBF Fabricated 17-4 PH Stainless Steel: 김영경 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 안소희 (한국생산기술연구원), 이승호 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 임하은 (한국생산기술연구원, 경희대학교), 윤종천 (한국생산기술연구원, 한양대학교), 최균석 (한밭대학교), 어두림* (한국생산기술연구원)

Keywords: 17-4PH stainless steel, Heterogeneous structure, Heat treatment

17-4 PH 스테인리스강은 마르텐사이트 기지에 Cu가 미세 석출되어 높은 강도를 가지며, Powder bed fusion (PBF) 공정으로 적층시 공정변수에 따라 마르텐사이트와 델타페라이트의 분율을 조절할 수 있다. 이는 PBF 공정의 특성상 매우 빠른 냉각속도로 인해 델타페라이트에서 오스테나이트로의 상변태가 충분히 마치지 못한 상태로 상온으로 냉각되어 버리기 때문이다. 따라서 입열량을 조절하면 최종 미세조직을 원하는 대로 위치별로 조절하여 위치별로 원하는 기계적 특성을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 Cr_{eq}/Ni_{eq} 당량비가 2.35가량 되는 17-4PH 분말을 활용하여 스캔 전략과 에너지 밀도를 조절하여 Ferrite/Martensite 비율을 제어한 Heterogeneous structure 2종 (Layered 구조체, Core-Shell 구조체) 을 적층하였다. 헤테로 구조 효과를 극대화 하기 위하여 Ferrite 및 Martensite matrix의 mechanical incompatibility를 제어하여야 하므로, 후열처리 (H900)를 진행하여 기계적 강도와 잔류응력 등 헤테로 구조 효과를 극대화 하기 위한 기초 연구를 진행하였다. 각 열처리 조건에 따른 인장시험 결과를 가지고 초기 미세조직에 따른 열처리후 변형거동에 대해 논의하고자 한다.

본 연구는 한국생산기술연구원의 기관주요사업(과제번호: EM220013)과 과학기술정보통신부(한국연구재단, 과제번호: 00561853)의 지원으로 수행된 연구임

고온재료
Room 201A, 4월 25일

[고온1-1 | 09:00]
열간 단조 공정 시 고품질 단조품 생산을 위한 항공엔진 소재의 내부 기공 압착 모델 개발: 김인서*, 박준희*, 김낙수* (서강대학교)
Keywords: 기공 압착 모델, RVE, 항공엔진부품 소재, 단조 공정

본 연구에서는 일반적인 열간 단조 공정에 적용 가능한 기공 압착 모델을 제안한다. 유한 요소 해석(FEA)에서 널리 사용되는 대표 체적 요소(RVE) 모델을 통해 다양한 응력 상태의 기공 폐쇄 거동을 분석했다. 재료마다의 유동응력과 온도에 따른 기공 폐쇄도를 비교하고 이러한 관계를 표현하기 위해 변형률 민감도 개념을 정의하였다. 기공의 부피 변화 거동을 나타내기 위해서 변형률 민감도, 유효 변형률, 유효 응력, 응력 삼축성 및 로드 매개변수의 함수로 정의된 진화적 방식의 기공 압착 모델을 제안한다. 제안된 모델의 적용 가능성을 확인하기 위해 직육면체 시편에 반구형 기공을 넣고 압축 시험을 수행했으며, 반지름 비율과 시뮬레이션 상의 반지름 비율을 비교하여 그 효과를 검증했다. RVE 모델 해석을 통해서 모델 계수를 설정한 후, 제안된 모델을 다수 기공 모델에 적용하여 비교했다. FEA와 제안된 모델로 계산한 기공 부피 거동은 유사하게 도출되었으며, 다양한 위치에 있는 기공의 부피를 정확하게 예측할 수 있음을 보인다. 마지막으로 기공 압착 모델을 기공이 없는 FEA 모델과 대입하여 기공이 닫히는데 필요한 압축비 또는 변형률을 도출할 수 있도록 하여 다양한 열간 단조 공정에서 활용할 수 있음을 보였다.

[고온1-2 | 09:15]
비대칭 단조품의 플래시 및 단조품 결함 저감을 위한 예비성형체 설계 방법: 박준희, 박동휘, 김낙수* (서강대학교)
Keywords: Hot forging, Convolutional neural network, dataset configuration, Preform design, Manufacturing process

본 연구는 단조 공정에서 미충전(Underfill) 및 겹침(Folding) 결함을 회피하고 단조 하중과 플래시(Flash)를 최소화하기 위해 합성 신경망(Convolutional neural network, CNN)을 활용한 3차원 비대칭 예비성형체(Preform) 설계 방법론을 제안한다. 초기 학습 데이터 세트는 Laplace 방정식에서 파생된 등가곡면을 voxel으로 변환하여 구성된다. CNN 학습과정 중 결정된 가중치는 지속적으로 업데이트되어 단조 엔지니어의 학습 단계를 모방한다. 예비성형체 품질을 정량적으로 평가하기 위한 새로운 지표로 forging volume efficiency index(FVEI)를 제안한다. 겹침 결함을 제거하기 위한 방법론은 다른 결함 유형을 방지할 수 있는 확장 가능성을 제시한다. 제안된 방법의 효과는 1/2평면 대칭 및 비대칭 단조품을 포함하는 세 가지 형상 사례를 통해 입증된다. 설계된 예비성형체는 단조 과정 중 플래시 형성 및 단조 하중을 줄이는 동시에 미충전 및 겹침 결함을 성공적으로 제거한다. 이러한 결과는 열간 단조 공정에서 CNN 기반 예비성형체 설계의 실용적 타당성과 산업적 적용성을 제시한다.

[고온1-3 | 09:30]
Effects of layer thickness and heat treatment conditions on creep elongation of L-PBF IN718: 심영래 (한국재료연구원 극한재료연구소, 동아대학교 금속공학과), 도정현, 이상원, 최백규, 김인수 (한국재료연구원 극한재료연구소), 전종배* (동아대학교 금속공학과), 정중은* (한국재료연구원 극한재료연구소)
Keywords: Inconel 718, L-PBF, heat treatment, microstructure, creep ductility

IN718은 석출경화형 Ni 기반 초내열합금으로 우수한 고온 기계적 특성, 용접성 및 내식성을 나타내어 우주항공, 방산, 원자력, 발전 등 다양한 산업에서 널리 사용되고 있다. IN718의 우수한 기계적 특성 및 용접성은 시효 열처리 과정에서 약 3 vol. %의 γ' 상 (Ni_3Al)과 약 20 vol. %의 γ″ 상 (Ni_3Nb)에 기인한다. 특히 γ″ 상의 석출속도가 상대적으로 느려 변형시효균열 (strain-age cracking)에 대한 저항성이 높아 석출경화형 초내열합금 중에서도 탁월한 용접성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 최근 내부 구조가 복잡한 부품 제조를 위해 적층 제조 기술을 적용하려는 연구가 증가하고 있으며, L-PBF 공정은 급속 응고와 미세한 조직 형성을 통해 우수한 기계적 특성을 나타낸다. 또한 공정의 단순화, 가공비 절감 및 제조 시간 단축과 같은 이점이 있어 고온 부품 산업에서 특히 주목받고 있다. 그러나 적층 제조 부품은 적층 조건 및 후처리 조건에 따라 최종 부품의 특성 편차가 커 부품 형상 및 요구되는 특성에 따른 조건 적용이 필수적으로 요구된다. 이와 관련된 금속학적 인자로는 적층 제조 중에 발생하는 소성변형 및 잔류응력이 있는데, 이는 열처리 이후 부품의 결정립 크기 및 형상, 결정립계 형상 및 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히, 최근 L-PBF로 제조된 IN718 소재에서 열처리에 따른 크리프 연성 저하가 보고되었는데, 이의 원인으로 열처리 중 불순물의 유입, 적층 조건에 따른 합금원소의 편석 거동, 재결정으로 인한 전위 셀 구조 (dislocation cell structure) 내 전위 네트워크 (dislocation network) 감소, 결정립계 강도 저하 등 다양한 인자들이 제시되고 있다. 이에 본 연구에서는 L-PBF 공정 및 열처리 조건에 따른 IN718 적층재의 크리프 연성을 비교하였으며 적층 및 열처리 조건에 따라 미세조직 변화, 크리프 거동 간의 상관관계에 대해 이해하고 향후 앞서 제시된 크리프 연성 감소 기구에 대한 고찰을 진행할 계획이다.

[고온1-4 | 09:45]
Additive Manufacturing of a High γ' Ni-Based Superalloy CW247 via EBM Process: Composition Optimization and its High Temperature Performance: Tae-Gyeong Kim (Changwon National University), Chan-Hee Lee (Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)), Hyun-Uk Hong* (Changwon National University), Byoung-Soo Lee, and Hae-Jin Lee (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH))

Keywords: Additive Manufacturing, Ni-based Superalloy, Alloy design, Microstructure, Creep

Achieving robust high-temperature properties in nickel-based superalloys for gas turbine blades remains challenging when using additive manufacturing (AM). Many high-grade superalloys, including CM247LC, suffer from severe cracking and microstructural defects during AM process, which limits their performance in critical components. In response, this study introduces a newly engineered nickel-based superalloy, designated here as CW247, developed with a carefully balanced composition to address these issues. The main objective was to design an alloy that combines exceptional high-temperature strength with improved processability in AM. This was achieved by reducing the use of costly refractory elements such as Hf and Ta while maintaining a competitive cost. Thermodynamic parameter screening guided the final composition, and the resulting gas-atomized powder showed excellent flow characteristics. Subsequent electron beam melting produced parts with significantly fewer solidification defects compared to the reference material, CM247LC. Microstructural evaluations revealed a high fraction of γ′ precipitates (>60 vol.%), conferring notable tensile and creep resistance above 800 ºC. Although as-built samples displayed some micropores and microcracks, hot isostatic pressing is expected to effectively mitigate these flaws. Overall, this work highlights a flexible design framework for developing innovative, high-performance superalloys through additive manufacturing while preserving cost-effectiveness and superior mechanical properties at elevated temperatures.

[고온2-1 | 10:10]

Inconel 718 합금의 석출경화 열처리에 따른 기계적 특성 연구: 손명숙*, 강희재*, 안두홍*, 안성철*, 손인수* (한화에어로스페이스)

Keywords: Superalloy, Inconel 718, Precipitation heat treatment

Inconel 718 합금은 석출경화형 Ni 기반 초내열합금의 대표적 합금으로 650ºC 정도의 고온에서 우수한 기계적성질을 나타내며, 부품 제작 단계에서 성형성, 용접성 등이 양호하여 단조품은 항공기 엔진용 터빈 블레이드, 디스크 등 구동부에 사용되며 주조품은 항공기 엔진용 케이스, 샤프트 등에 적용된다. 일반적으로 높은 강도, 피로특성, 크립 저항성을 위해서 δ Solvus 이하에서 용체화 열처리를 수행하고 2단계에 걸쳐 18시간의 시효 열처리를 하여 물성을 확보한다. 또한 Inconel 718 합금은 High strength 718, Direct aged 718 등으로 재질을 확장하여 더 높은 강도를 확보하기 위한 소재 조성, 열처리 방법에 대한 연구개발 실적이 있으며 적용 부품 요구사항을 고려한 최적 공정에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 Inconel 718 합금의 석출경화 열처리 조건에 따른 기계적 특성 평가를 수행하였고, 항공엔진 부품 특성 및 제조 원가 절감을 고려한 단축 석출경화 열처리 조건에도 표준 열처리와 동등한 물성을 가질 수 있는지 검토하였다.

[고온2-2 | 10:25]

열처리 조건에 따른 Inconel 718의 석출상 제어와 고온 성형성 향상에 관한 연구: 안지섭, 여승현, 조아라, 이나경 (한국생산기술연구원, 부산대학교), 정명식, 황선광* (한국생산기술연구원)

Keywords: Inconel 718, Precipitated phase, Microstructure, Crack, Plastic instability

Inconel 718은 Ni-Fe계 초내열합금으로 우수한 내산화성, 내식성 및 고온에서의 인장·피로 강도 등 기계적 물성을 유지하는 특성을 보유하고 있어, 가스터빈 엔진 등 극한 조건을 견뎌야 하는 부품에 널리 활용되고 있다. 이 합금은 열처리 온도와 시간에 따라 γ 매트릭스 내에서 γ', γ", δ 상이 석출되며, 이들 석출 상의 종류와 분율이 최종 기계적 특성에 큰 영향을 미치므로 석출물의 제어가 매우 중요하다. 본 연구에서는 빌렛 상태의 Inconel 718의 네 가지 열처리 조건인 homogenization (Ho), delta process (DP), pre-aging treatment(PAT), PAT-DP을 적용하여 석출 상 제어 및 고온 성형성을 평가하였다 열처리된 시편들의 변형 거동을 분석하기 위해 고온 압축 시험을 수행하였으며, Ziegler와 Prasad의 소성 불안정성 이론을 기반으로 유동응력 데이터를 활용한 변형공정지도를 작성하여 성형성을 정량적으로 평가하였다. 변형공정지도에서는 모든 열처리 조건에서 변형률 증가에 따라 소성 불안정 영역이 확대되는 경향이 관찰되었으나, Ho 처리 대비 PAT-DP 처리에서 소성 불안정 영역이 65%에서 30%로 크게 감소하여 고온 성형 안정성이 향상되었음을 확인하였다. 또한, Strain Induced Crack Opening (SICO) 시험과 유한요소해석을 통해 각 열처리 조건에서의 고온 변형 시 균열 발생 거동을 비교 분석한 결과, PAT-DP 조건에서 가장 우수한 균열 저항성을 나타내었다. 이를 통해 열처리에 따른 석출 상 제어가 고온 성형 및 균열 저항성 향상에 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

[고온2-3 | 10:40]

Meta-Model 기반 PQ IN718 소재 수침 위상배열초음파검사 적용을 위한 주요인자 최적화 연구: 윤일현 (서울과학기술대학교 기계공학과), 박민혁 (서울과학기술대학교 신소재공학과), 박익근 (서울과학기술대학교 NDT실증연구센터), 강동찬* (서울과학기술대학교 NDT실증연구센터)

Keywords: PQ IN718, 수침 위상배열초음파검사, 주요인자, 신뢰도, Meta-Model

항공 소재로 사용되는 PQ IN718 합금은 고온·고압 환경에서 내구성 검증을 위해 비파괴검사가 필수적이다. 항공 소재는 주로 수침 초음파검사를 수행하고 있으며 특히 PA 프로브를 사용하는 것이 결함 검출에 용이하다. 본 연구에서는 PQ IN718 소재의 수침 위상배열초음파검사 적용을 위해 Meta-Model을 활용하여 주요인자를 최적화하였다. PQ IN718 소재는 건전성 확보를 위하여 최종 가공품 단계 전의 Billet 및 형단조품에서 초음파검사를 적용하고 있다. 소재를 Billet, 형단조품 형태로 모델링하여 실제 측정한 데이터 기반 종파속도, 감쇠계수, 소재 단면의 미세조직, 탐촉자, 결함 등을 설정하고 수침 위상배열초음파검사 시뮬레이션을 수행하였다. 주요인자를 산출하기 위한 변수로 Water path, Focal depth, 주파수, 결함 특성(깊이, 크기, 유형) 등을 선정하였다. 선정한 변수에 대한 Meta-Model 해석은 Sensitivity analysis를 수행하여 가장 영향을 미치는 인자를 도출하였다. 이 접근 방식은 수많은 경

제적·시간적 비용을 요구하는 실험적 접근 방식의 한계를 극복하며, 주요인자 최적화를 통해 PQ IN718 소재의 건전성 확보에 효과적으로 기여할 것으로 예상된다.

[고온2-4 | 10:55]

인코넬 939 계열 니켈계 내열합금의 조성 제어에 따른 미세구조 및 기계적 특성 최적화 전략: 김동환, 김민석, 박은수* (서울대학교)

Keywords: 니켈계 내열합금, 석출 강화, 미세구조, 기계적 물성, 고온 특성

니켈계 내열합금은 대표적인 내열 소재 중 하나로, 항공우주 및 발전소 등 다양한 고온 환경에서 널리 사용되고 있다. 그 중에서도 인코넬 939는 크립 수명과 산화 저항성 등에서 특히 우수한 특성을 나타내는 소재이지만, 연신율이 비교적 떨어지며 용접 및 적층 제조 과정에서 발생하는 균열에 취약하다는 한계 또한 가지고 있다. 본 연구에서는 인코넬 939 계열 니켈계 내열합금의 상 구성 원소의 분율 제어를 통해 내열합금의 미세구조 및 기계적 물성의 최적화를 수행하고자 하였다. Cr, Ti, Al, Nb 등 γ 또는 γ'-상 구성 원소의 분율이 제어된 다수의 인코넬 939 기반 내열합금 시편이 제조되었으며, 4-step 균질화 및 열처리 과정을 거친 뒤 그 미세구조 및 기계적 물성을 평가하였다. 실험 결과 Cr과 Ti 분율이 높은 조성의 미세구조에서 독특한 바늘 모양의 η-상 석출 거동이 관찰되었으며, 이로 인해 강도 및 연신율이 큰 폭으로 하락하는 현상이 관찰되었다. 한편 Al 분율이 높은 조성에서는 상온 연신율이 대폭 향상되었으나, 격자 부정합의 하락과 β-상의 석출로 인해 고온 특성은 하락하는 현상이 관찰되기도 하였다. 이렇듯 구성 원소 분율의 제어에 따른 니켈계 초합금의 석출 거동 및 기계적 물성의 변화를 파악하였으며, 각 결과들을 종합하여 우수한 강도와 연신율을 모두 갖춘 초합금의 최적 조성을 제안할 수 있었다. 본 연구를 통해 인코넬 939뿐 아니라 다른 니켈계 초합금의 미세구조 및 기계적 물성을 제어하고, 향상된 물성을 가진 최적 조성을 선정하는 데 도움을 줄 수 있으리라고 기대한다. 이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIT-CT-23-042-03)

[고온2-5 | 11:10]

Y_2O_3 첨가가 니켈 초합금의 미세구조와 기계적 특성에 미치는 영향: 박성현, 최승혁, 이상화 (전북대학교), 이석재, 정재길* (전북대학교, 전북대학교 신소재개발연구센터)

Keywords: Ni alloys, Oxide dispersion strengthening, Microstructure, Transmission electron microscopy, Small-angle neutron scattering

산화물 분산 강화(Oxide dispersion strengthened, ODS) 기반 Ni 초합금은 우수한 고온 특성 및 크립 저항성으로 인해 가스터빈, 항공 우주, 원자력 및 에너지 산업과 같은 고온 환경에서 사용되는 구조재의 핵심 소재로 주목받고 있다. 기존의 Ni 기반 초합금은 높은 용융점과 우수한 내산화성을 가지지만, 극한 환경에서 장시간 사용되는 경우 결정립 성장 및 전위 이동으로 인해 기계적 특성이 저하되는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 나노 크기의 산화물 입자를 기지에 미세하게 분산시켜 고온에서도 강도 유지가 가능한 ODS 합금이 개발되었다. 이러한 산화물은 Ni 기지 내부에 안정적으로 분포하여 Orowan 강화, 재결정 억제 등을 통해 고온 안정성을 향상시킨다. Y_2O_3, Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2 등의 산화물이 첨가될 수 있으며, Y_2O_3는 금속 기지 내에서의 고온 안정성으로 인해 가장 선호되는 산화물이다. 그러나 많은 연구들은 Y_2O_3가 순수한 산화물로 존재하는 대신 기지 내의 다른 원소와 반응해 복잡한 산화물을 형성한다고 보고하였으며, 조대한 산화물은 기계적 특성의 저하를 야기할 수 있다. 산화물 첨가에 따라 달라지는 미세구조 및 기계적 특성간의 상관관계에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 ODS Ni 초합금의 미세구조 및 기계적 특성을 평가하기 위해 Y_2O_3를 첨가한 합금과 첨가하지 않은 합금을 각각 제조하였다. 고에너지 볼밀링을 통해 분말을 기계적 합금화시켰으며, 방전 플라즈마 소결법을 통해 소결체를 제조하였다. 제조된 합금의 미세구조 분석을 위해 X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD), 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM), 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM), 소각 중성자 산란 분석(Small-angle neutron scattering, SANS)을 수행하였으며, 미세경도 측정 및 압축 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다.

[고온3-1 | 11:35]

Waspaloy 안정화열처리가 고온인장특성에 미치는 영향: 강희재, 안두홍, 손명숙, 안성철, 손인수* (한화에어로스페이스)

Keywords: Superalloy, Waspaloy, Stabilization heat treatment

Waspaloy는 니켈 기반의 초내열합금으로 터빈 블레이드, 디스크 등 가스터빈엔진의 부품 소재로 많이 사용되며, 높은 온도에서의 우수한 강도와 내열성, 내부식성을 보유하고 있다. 일반적으로 800ºC 이상에서 고온강도가 유지되며, 900ºC 이상에서의 내산화 특성을 나타낸다. Inconel 718 대비 Ni, Al, Ti, Co 함량이 높아 고가의 합금이나, 우수한 내열성 및 크립저항성을 가진다. Waspaloy는 주로 용체화 열처리, 안정화 열처리, 석출경화 열처리와 같이 여러 단계의 열처리를 통해 고온 물성을 확보하며, 적용 부품에 따라 요구되는 열처리 방법이 다르게 설계되기도 한다. 터빈 디스크와 같이 고강도가 요구되는 경우 γ' solvus 아래에서 용체화 처리를 하고 짧은 안정화 열처리 시간을 갖지만, 터빈 블레이드와 같은 경우, γ' solvus 초과하는 온도범위에서 용체화 처리를 하며 장시간의 안정화 열처리로 크립 저항성을 향상시키기도 한다. 본 연구에서는 Waspaloy 적용 부품의 요구 특성에 따라 안정화 열처리 면제가 가능한지 검토하였다. 안정화 열처리의 유무에 따라 미세조직 변화를 관찰하였고 고온 인장시험으로 물성 평가를 수행하였다.

[고온3-2 | 11:50]

석탄 화력 발전소 보일러 튜브 감육법 및 검사 장비: 한수지*, 이한상*, 정진성 (한전전력연구원), 김정태 (한국중부발전), 이승욱 (한국서부발전), 정의민 (한국남부발전), 이길재 (한국동서발전)

Keywords: 석탄화력, 발전소, 보일러, 튜브, 감육

이 논문은 발전소 설비 주요 기기중 하나인 보일러 튜브의 감육의 정도를 정확하게 검사하기 위한 검사법과 검사장비 설계에 대해

논의한다. 발전소의 환경은 고온, 고압으로 운영되어 설비의 상태를 주기적으로 검사해야 하나, 보일러 내부 환경은 협소하고 연소로 인한 부산물이 많아 검사원과 검사장비 선정에 한계가 있다. 운영자는 보일러 튜브 감육에 대비하기 위해 현재는 내식성을 향상시킨 재질로 튜브를 교체하고, 초음파 두께 측정 방법으로 주기적으로 설비를 관찰하고 있다. 다만 초음파 검사 방법은 검사원의 기량에 따라 결과가 달라질 수 있다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 레이저를 활용한 검사법과 장비를 소개하고자 한다.

[고온3-3 | 12:05]

원전 사고조건에서 사고저항성 핵연료용 코팅피복관의 고온산화 거동 평가: 이성용*, 이충용, 임광영 (한전원자력연료)

Keywords: 사고저항성 핵연료, 냉각재 상실사고, 고온산화

사고저항성 핵연료(Accident Tolerant Fuel, ATF)는 기존 핵연료에 비해 원전의 비상 노심 냉각 기능이 상실된 상태에서도 사고 대응 시간을 크게 개선하고, 수소 발생을 효과적으로 억제하여 원전의 안전성을 향상시킬 수 있는 핵연료를 의미한다. 국내에서 ATF 개발은 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 본격적으로 추진되었으며, 한전원자력연료(KNF)는 ATF 상용화 프로젝트를 통해 크롬 코팅 피복관과 성능 개선 UO_2 소결체로 구성된 ESPERTM(Enhanced Safety Performance with Efficiency and Reliability) 연료의 상용 기술을 개발하고 있다. 본 연구에서는 원전 사고 조건을 모사한 환경에서 ESPERTM 크롬 코팅 피복관의 사고 안전성을 평가하기 위해 코팅층의 두께 및 온도 조건에 따른 코팅층 건전성을 분석하였다. 먼저, 설계 기준 사고 중 가장 가혹한 1200ºC 환경에서 코팅 두께가 코팅층 건전성에 미치는 영향을 평가한 결과, 일정 두께 이상의 크롬 층이 최대 1000초 동안 보호 효과를 제공하는 것으로 확인되었다. 또한, 1300ºC에서는 크롬 층이 지르코늄 표면과 비교하여 약 15배의 고온 산화 지연 효과를 나타냈으며, 최대 12분 동안 보호층을 유지하는 것으로 확인되었다. 그러나 공융 온도(eutectic temperature)를 초과하면 크롬의 산화 지연 효과가 감소하며, 산화 거동이 기저 금속인 지르코늄 합금과 유사해지는 경향을 보였다. 본 연구 결과를 통해 현재 원자력 발전소의 설계 기준 사고 조건에서 크롬 코팅층이 충분한 산화 지연 효과를 제공함을 확인하였으며, 더 가혹한 조건에서도 유효한 성능을 유지할 수 있음을 검증하였다. 본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다.(RS-2022-KP002856)

[고온3-4 | 12:20]

High-Temperature Fatigue Behavior Characteristics of ARAA Steel, Advanced Reduced Activation Alloy for Structural Materials in Fusion Reactors: Yun-Seung LEE*, Hyeong-Yeon LEE, Ki-Ean Nam (Korea Atomic Energy Research Institute), Hyoseong Gwon, Yi-Hyun Park, and Mu-Young Ahn (Korea Institute Fusion Energy)

Keywords: TBM(Test Blanket Module), RAFM(Reduced Activation Ferritic/Martensitic), Fatigue behavior, Cyclic softening

The breeding blanket in a fusion reactor is a critical component responsible for tritium breeding, cooling, and radiation shielding. As part of the ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) project, participating countries are independently developing TBM(Test Blanket Module) with distinct design approaches and structural materials. This study investigates the high-temperature fatigue behavior of ARAA (Advanced Reduced Activation Alloy) steel, a newly developed RAFM(Reduced Activation Ferritic/Martensitic) steel intended for use as a structural material in Korea's HCCR(Helium-Cooled Ceramic Reflector) TBM. The structural material of the HCCR TBM is designed to operate at temperatures below approximately 550ºC. However, prolonged exposure to such temperatures may lead to thermal stress-induced material degradation. To assess the high-temperature fatigue performance of ARAA steel under these conditions, LCF(Low-Cycle Fatigue) tests were conducted on three different heats at 300ºC, 550ºC, and 600ºC. The fatigue life of each heat was determined and analyzed. The experimental results indicate that cyclic softening behavior, characterized by a progressive reduction in load during fatigue cycling, was consistently observed across all heats, temperatures, and strain ranges. Furthermore, all heats satisfied the fatigue performance criteria required for application in high-temperature environments, demonstrating the material's suitability for TBM structural components.

Acknowledgement This work was supported by the R&D Program (KFE-CN2501, IN-2503) through the Korea Institute of Fusion Energy (KFE), funded by the Ministry of Science and ICT of the Republic of Korea, and by the National Research Foundation of Korea (NRF) (Grant Nos. 2021R1I1A2057941, 2021K1A3A1A78097845).

[고온3-5 | 12:35]

H급 가스터빈 고온부품용 소재 물성 데이터베이스: 윤희수, 박재영 (한국표준과학연구원), 윤대원, 유영수 (한국재료연구원), 정우상 (한국과학기술연구원), 송전영, 마영화 (두산에너빌리티), 김효진, 손진일 (테스코(주)), 남승훈 (한국표준과학연구원)

가스터빈은 연료의 연소 반응을 활용하여 열 효율을 극대화하는데, 이를 위해 터빈입구온도(turbine inlet temperature, TIT)의 상향을 추진하고 있다. H급 가스터빈의 경우, TIT 온도는 약 1600~1700 ºC에 달하며, 터빈의 블레이드와 베인은 열차폐 코팅(thermal barrier Coating, TBC) 및 냉각 기술을 통해 약 500~600 ºC 낮은 1100 ºC의 환경에서 운전된다. 이러한 고온 환경에서 가스터빈 부품들이 안전하게 작동하기 위해서는 내열성이 우수한 단결정 또는 일방향 응고 Ni기 초합금이 사용된다. 그러나 안전한 운용을 위해서는 해당 소재의 물성 데이터를 확보하는 것이 매우 중요하며, 이는 가스터빈 설계뿐만 아니라 수명 평가와 유지보수 계획 수립에도 필수적이다. 본 연구는 산업통상자원부의 에너지기술평가원 지원을 받아, Ni기 초내열 합금 6종을 선정하여 다양한 온도 조건에서 인장, 크리프, 저주기 피로, 고주기 피로, 열적-기계적 피로 등 여러 물성 데이터를 생산하였다. 이번에 개발된 데이터베이스 시스템은 국내 연구자들에게 해당 데이터를 오픈소스로 공개하여 활용할 수 있도록 하고 있다. 이 시스템은 하이라키 구조를 통해 데이터를 효율적으로 검색하고 활용할 수 있으며, 소재 정보, 시험 정보, 시험 결과 등의 상세 이력을 제공하고 있다. 또한, 고온 물성 평가 절차서도 제공되어, 생산된 물성 데이터의 세부 사항을 쉽게 확인할 수 있다.

타이타늄
Room 201B, 4월 25일

[타이타늄1-1 | 09:00]

Ti-2Al-9.2Mo-2Fe 합금의 석출상 제어에 따른 준정적 인장 및 동적 피로 특성 분석: 신수홍, 이동근* (순천대학교)

Keywords: beta titanium, phase transformation, ω phase, high cycle fatigue test

β 타이타늄 합금은 열처리 조건에 따라 미세조직과 기계적 특성을 정밀하게 조절할 수 있어 자동차, 항공우주, 선박 등 다양한 산업에서 구조적 부품의 이상적 소재로 평가받고 있다. Ti-2Al-9.2Mo-2Fe 합금은 Mo, Fe와 같은 저비용 β 안정화 원소와 소량 의 Al 원소를 첨가하여 경제성과 기계적 성능을 모두 만족시키는 LCB 타이타늄 합금 으로, 초고강도, 고인성, 저탄성, 고내식 등 탁월한 물성을 나타내어 자동차 스프링과 같은 고응력 부품에 적용하기에 적합하다. 이 합금에 대한 선행연구에 미세조직 변화와 기본적인 기계적 특성(경도, 인장 강도 등)을 분석한 결과가 보고되었으나, 피로 특성 및 균열 초기화와 전파 메커니즘에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 피로 파괴는 구조 부품의 주요한 동적 파괴 메커니즘 중 하나로서, 미세조직의 미세한 변화가 피로 수명과 균열 전파 특성에 큰 영향을 미친다. 이에 이번 발표에서는 Ti-2Al-9.2Mo-2Fe 합금의 열처리-석출상 제어에 따른 미세조직 변화에 대한 연구를 진행하고, 이러한 미세조직 변화가 동적 피로 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

[타이타늄1-2 | 09:15]

Sn 첨가에 의한 미세 결정립 구조 타이타늄 합금: 남연우, 고성철 (한국재료연구원, 부산대학교), 심재원 (한국재료연구원), 이제인* (부산대학교), 이상원* (한국재료연구원)

Keywords: Titanium alloy, Sn effect, Ultra Fine Grain

결정립 크기 제어는 금속의 기계적 특성을 향상시키는 대표적인 방법이다. 이러한 미세구조를 얻기 위해 ECAP(Equal-Channel Angular Pressing), HPT(High-Pressure Torsion)등의 SPD(Severe Plastic Deformation) 공정이 활용되고 있지만, 이들은 특수한 장비와 복잡한 공정을 요구하여 제조 단가가 높고 대면적 소재 제조에 한계를 가진다. 반면, 합금화를 통한 미세화 방법은 상대적으로 간단한 공정으로 초미세 결정립을 얻을 수 있어 이러한 단점을 극복하는 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 타이타늄 합금에 Sn을 첨가하여 상변태 구동력의 변화에 따른 결정립 크기를 제어하고 기계적 성질의 변화를 분석하였다. 그 결과, Sn의 함량이 증가함에 따라 마르텐사이트 변태가 억제되었고, 10wt.% 이상의 Sn 함량에서 결정립이 크게 미세화되어 우수한 기계적 물성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

[타이타늄1-3 | 09:30]

미량원소 첨가를 통한 강산 환경에서의 타이타늄 부식저항성 향상 연구: 박지원 (한국재료연구원, 부산대학교), 강남현 (부산대학교), 김재혁*, 홍재근* (한국재료연구원)

Keywords: 타이타늄, 동전위분극, 부식저항성

타이타늄은 낮은 밀도와 우수한 기계적 특성, 그리고 뛰어난 부식저항성으로 항공우주, 바이오, 에너지 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 특히, 강한 부식 저항성이 요구되는 화학플랜트, 수전해 시스템, 연료전지 등의 환경에서 그 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 그러나 타이타늄 합금 중 가장 내식성이 우수한 순수 타이타늄조차 강산 환경(pH<1)에서는 심각한 부식 문제가 발생하는데, 이는 TiO_2 부동태 피막이 특정 산성 조건에서 조밀하고 안정적으로 형성되지 못하기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 산업적으로는 Pt, Ir 등의 귀금속 코팅을 적용하여 내구성을 향상시키는 방법이 활용되고 있다. 하지만, 귀금속 코팅 공정은 높은 비용을 초래하며, 부품 단가를 기존의 2배 이상 상승시켜 타이타늄 기반 부품의 경제성과 실용성을 저해하는 요인으로 작용하고 있다. 따라서, 별도의 표면 코팅 없이 타이타늄 자체의 부식 저항성을 향상시키는 소재 개선 방안이 필요하다.본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 미량원소 첨가를 통한 산화층 엔지니어링을 활용하여 강산 환경에서의 타이타늄 부식저항성을 향상시키는 전략을 제안한다. 이를 위해 Pourbaix Diagram을 분석하여 강산 환경에서 TiO_2 부동태 피막의 형성을 촉진할 수 있는 합금 원소 세 종류를 선정하였다. 이 원소들은 낮은 분율로 첨가될 경우, 타이타늄의 본래 기계적 특성을 크게 저해하지 않으면서도 부동태 피막의 성장과 안정성을 향상시킬 것으로 기대된다. 실험을 위해 Grade 1 순수 타이타늄에 0.1 wt.% 및 0.2 wt.% 비율로 합금 원소를 첨가하여 합금을 제조하였다. 시편은 Plasma Arc Melting을 이용해 용해한 후, 열간압연과 냉간압연 공정을 거쳐 두께 1.5 mm의 판재를 제작하였다. 또한, 후열처리 공정을 최적화하여 결정립 크기를 약 10 μm 및 30 μm로 균일하게 조절하였으며, 이를 통해 미세조직 변화가 부식 저항성에 미치는 영향을 추가적으로 분석하였다. 제조된 합금의 부식저항성은 0.5M H_2SO_4 용액에서 분극실험을 수행하여 평가하였으며, 부식 시험 후 산화층 분석을 통해 형성된 부동태 피막의 조성, 두께 및 균질성을 확인하였다. 본 연구를 통해 미량원소의 첨가가 강산 환경에서 TiO_2 부동태 피막의 형성을 촉진하고, 피막의 구조적 안정성을 향상시킴으로써 부식저항성에 미치는 영향을 확인할 수 있으며, 결정립 크기에 따른 부식 거동의 차이를 비교하여 부동태 피막의 균일성 및 조밀성을 비교 분석할 수 있다. 본 연구에서 제시한 미량원소 첨가 및 미세조직 제어 전략은 값비싼 귀금속 코팅을 대체할 수 있는 실용적인 방법으로 활용 가능하며, 타이타늄 기반 부품의 극한 환경에서의 장기적 내구성 향상을 위한 응용 분야로 활용성을 높이는데 기여할 것으로 기대된다.

[티이타늄1-4 | 09:45]

양극산화 공정을 활용한 타이타늄의 알칼리,해수 부식 저항성 향상 연구: 박수빈* (한국재료연구원, 부산대학교), 이제인 (부산대학교), 홍재근*, 김재혁* (한국재료연구원)

Keywords: 타이타늄, 양극산화, 부식 저항성

수소 에너지는 탄소 배출이 없는 친환경 에너지원으로 주목받고 있으며, 특히 수전해를 통한 수소 생산 기술이 차세대 에너지 전환의 핵심 기술로 떠오르고 있다. 현재 대부분의 수전해 시스템은 고순도 담수를 사용하고 있지만, 지속 가능한 수소 생산을 위해 해수를 직접 활용하는 해수 전해 기술 개발이 필수적이다. 그러나 해수에는 NaCl을 비롯한 다양한 염류와 이온이 포함되어 있어, 전극 및 주요 부품의 부식이 촉진되는 문제가 존재한다. 이러한 환경에서 타이타늄은 높은 내식성과 기계적 안정성으로 인해 해수 전해 전극으로 널리 활용되고 있으나, 장시간 사용 시 부식 및 성능 저하가 발생한다. 이를 해결하기 위해 현재 산업적으로는 RuO_2-IrO_2, Pt-Ir 등의 귀금속 산화물 코팅이 적용되고 있으나, 이는 높은 비용 문제를 야기하므로 비귀금속 기반의 경제적이고 내구성이 뛰어난 대체 기술 개발이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 양극산화 공정을 활용하여 타이타늄 표면에 조밀하고 안정적인 TiO2 산화층을 형성하였다. 특히, 해수 전해 환경에서의 내구성을 극대화할 수 있도록, 전해질 조성 및 양극산화 공정 조건(전압, 온도, 전해질 농도 등)을 조절하여 다양한 구조적 특성을 갖는 산화층을 제조하였다. 전극의 내구성과 부식 저항성을 체계적으로 평가하기 위해 다양한 전기화학적 및 침지 실험을 수행하였다. 부식 거동 분석을 위해 1M KOH, 1M KOH + 0.5M NaCl, 1M KOH + 해수 환경에서의 분극 실험을 진행하였으며, 장기적인 내구성 평가를 위해 자연 해수에서의 침지 시험을 수행하였다. 또한, 산화층의 두께, 표면 구조, 조성과 부식 반응 속도 간의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. 이 과정에서 산화층의 구조적 특성과 두께가 부식 반응 속도 및 내구성에 미치는 영향을 상세히 분석하였다. 본 연구를 통해 양극산화로 형성된 다양한 구조의 TiO2 산화층이 해수 전해 환경에서의 내식성에 미치는 영향을 정량적으로 확인할 수 있다. 특히, 양극산화로 형성된 TiO2 산화층이 부식 속도를 효과적으로 저감시키며, 장기적인 내구성을 크게 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과는 해수 전해 기반 수소 생산 시스템에서 타이타늄 부품의 실용적 적용 가능성을 제시하며, 비귀금속 기반의 경제적이고 내구성이 높은 소재 개발을 위한 표면 개질 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[티이타늄1-5 | 10:00]

상온에서 초탄성 거동을 보이는 Ti-xNb-8Sn (x = 10, 11, 12, 13)(at. %) 합금의 탄성계수 및 recrystallization texture 에 미치는 Nb 의 영향.: 김수영, 구태균, 남태현* (경상국립대학교)

Keywords: 타이타늄, 형상기억합금, 생체재료, 초탄성거동, 저탄성계수

Ti-Ni 계 형상기억 합금은 우수한 기계적 특성 및 내부식성을 바탕으로 생체재료로 사용되고 있다. 하지만 체내에서 Ni이 이온 형태로 용출될 경우 알러지 반응을 일으킬 수 있기 때문에 무독성 원소로 구성된 β type Ni free Ti 합금이 요구되고 있다. 또한 생체재료로 사용되는 금속의 경우 뼈와 유사한 탄성계수를 가지는 것이 요구된다. 탄성계수의 차이가 클 경우 상대적으로 높은 탄성계수를 가지는 뼈에 응력이 집중되어 골조직의 형성을 악화시키고 임플란트의 탈출을 야기하는 응력 차폐 효과를 일으킬 수 있다. 선행연구에 따르면 Ti-Nb-Sn 3원계 합금은 상온에서 초탄성 거동을 보이며 다른 Ti계 형상기억 합금에 비해 낮은 탄성계수를 가지는 것으로 보고되었다. 이러한 낮은 탄성계수는 Nb 함량에 따른 e/a ratio, recrystallization texture와 관련이 있다고 사료된다. 선행연구 결과 Ti-Nb-Zr-Sn 4원계 합금에서 e/a ratio가 감소함에 따라 탄성계수가 감소하는 경향을 보였고, e/a ratio가 4.15 일 때 가장 낮은 탄성계수를 가지는 것으로 나타났다. 또한 <111>, <110>, <001> 순으로 탄성계수가 가장 낮은 것으로 보고되었다. 이러한 선행연구 결과를 통해 e/a ratio와 recrystallization texture는 탄성계수와 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다. 따라서 적절한 e/a ratio값의 탐색과 적절한 어닐링을 통해 뼈와 유사한 탄성계수를 가지는 최적 조건을 탐색하는 것이 중요하다. 다른 선행연구에 따르면 4.15의 e/a ratio를 갖는 Ti-15Nb-5.5Sn 합금에서 치밀골과 유사한 32.2 GPa의 탄성계수를 가지고 Sn의 함량이 5.5at. % 에서 4at. % 로 감소함에 따라 탄성계수가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 탄성계수의 증가는 낮은 β 안정화 정도로 인한 ω상의 석출에 의해 탄성계수가 증가하는 것으로 보고되었다. 하지만 4.15 이하의 e/a ratio와 ω상의 억제를 통해 낮은 탄성계수를 가지는 합금에 대한 연구는 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 8 at. % 의 Sn을 첨가하여 ω상의 석출을 억제하였고 Nb 함량 조절을 통해 4.15보다 낮은 4.1-4.13의 e/a ratio를 가지는 Ti-xNb-8Sn (x = 10, 11, 12, 13)(at. %) 합금을 설계하였으며 상온에서 낮은 탄성계수 및 우수한 초탄성 거동을 보이는 합금을 조사하는 것을 목표로 한다.

[티이타늄2-1 | 10:25]

Commercially Pure Ti-Pd 합금의 고온 변형 거동 분석: 이현석*, 장경현, 최미선* (포항산업과학연구원(RIST))

Keywords: 타이타늄, 팔라듐, 압연, 고온변형, 변형기구맵

본 연구에서는 팔라듐(Pd)이 0.120~0.25W% 포함된 타이타늄-팔라듐(Ti-Pd) 상업용 순수 티타늄(Commercially Pure Titanium, CP-Ti) 소재의 고온 변형 거동을 분석 하였다. Ti-Pd 합금은 우수한 내식성을 바탕으로 화학 반응 용기 및 판형 열교환기와 같은 부식 환경에서 널리 사용디고 있다. 본 연구에서는 700~950°C 범위에서 글리블(Gleeble) 열기계 시뮬레이터를 이용한 열변형 실험을 수행하였으며, 변형률 속도와 온도에 따른 유동 응력 거동을 분석하였다. 이를 바탕으로 변형 기구 맵(Deformation Mechanism Map, DMM)을 도출하여 Ti-Pd 합금의 고온 변형 특성을 정량적으로 평가하였다.

[티이타늄2-2 | 10:40]

Ti-5Mo-xFe 합금의 Fe함량에 따른 기계적 특성 평과와 변형 메커니즘 분석: 김홍민, 이동근* (국립순천대학교)

Keywords: Fe content, quasi-static and dynamic properties, colony, deformation mechanism

베타 타이타늄 합금은 생체적합성과 기계적 특성이 우수하여 임플란트 소재로 사용되고 있다. 특히, 임플란트는 반복적인 하중을 받기 때문에 동적 기계적 특성은 중요한 요소이다. 본 연구에서는 임플란트 적용을 위한 Ti-5Mo-xFe (x=1, 2, 4 wt%) 합금을 설계하였으며, 준정적 및 동적 시험을 수행하였다. 정적 시험 결과 Fe 함량이 증가함에 따라 고용강화효과 및 alpha phase width와 prior beta grain size가 감소하여 경도 및 항복강도가 증가하였다. 그러나 고주기 회전 굽힘 피로시험 결과 정적 특성과 반대의 결과가 나타났으며, Ti-5Mo-4Fe 합금의 피로강도가 가장 낮았다. 이후 준정적 과 동적 특성이 균형을 이루고 우수하다고 판단되는 합금에 대해 열간압연을 수행하였고, 상온 압축시험을 통해 상온 변형메커니즘을 규명하였다.

[타이타늄2-3 | 10:55]

Ti-6Al-4V 합금의 열처리 온도 별 미세조직 변화에 따른 인장 특성 및 충격인성 분석: 황정우 (한국재료연구원, 창원대학교), 양준하, 김재호 (한국재료연구원), 정영웅 (창원대학교), 염종택* (한국재료연구원)

Keywords: α+β 타이타늄, 열처리, 미세조직, 인장 특성, 충격인성

타이타늄 합금은 우수한 기계적 특성과 부식 저항성을 지니며, 항공·우주, 의료, 자동차 및 산업 분야에 광범위하게 사용되는 합금이다. 그 중 가장 널리 활용되는 타이타늄 합금은 α+β 미세조직을 갖는 Ti-6Al-4V 합금이다. α/β 변태의 존재는 열처리를 통해 특정 적용처를 위한 다양한 미세조직 및 그에 따른 기계적 특성 조합을 구현할 수 있음을 의미한다. 이에 따라, 본 연구에서는 최적의 인장 특성 및 충격인성 구현을 위해 열처리 온도에 따른 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 변화와 기계적 특성을 비교하였다. 먼저, 다른 미세조직 구현을 위해, α+β 영역 및 β 영역 열처리 수행 후 OM 및 SEM을 활용하여 미세조직을 확인하였다. 다음으로, 기계적 특성에 미치는 열처리 온도에 따른 미세조직 변화의 영향을 분석하기 위해, 인장 및 충격시험을 통해 인장 특성 및 충격인성(흡수에너지) 상대적인 비교를 수행하였다. 최종적으로, 인장 및 충격시험 후 시편의 파면 및 파단면 분석을 통해 열처리 온도에 따른 미세조직 변화가 파괴거동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 열처리 온도 별 미세조직 변화 – 인장 특성 및 충격인성 비교 – 파괴거동 분석의 결과를 바탕으로 선정된 최적의 열처리 공정은 합금의 성능을 극대화할 수 있는 기초 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

[타이타늄2-4 | 11:10]

Al의 첨가가 TRIP Titanium 합금의 기계적 특성에 미치는 영향: 고성철, 남연우 (한국재료연구원, 부산대학교), 심재원 (한국재료연구원), 최윤석* (부산대학교), 이상원* (한국재료연구원)

Keywords: 타이타늄 합금, TRIP, 마르텐사이트

TRIP Titanium합금은 외부 응력에 의해 준안정상이 마르텐사이트로 변태하면서 재료의 소성 변형 능력을 향상시킨다. 이러한 합금의 TRIP 효과는 재료의 연성과 강도를 동시에 개선하는 데 기인한다. 일반적으로, 대부분의 TRIP Titanium 합금은 β 에서 α″ 마르텐사이트로 변태하면서 TRIP 효과를 나타낸다. 한편, α′ 마르텐사이트로의 변태 역시 TRIP 효과를 나타내면서, 더욱 높은 강도를 제공할 수 있어, 초고강도 특성이 요구되는 산업 분야에서 더 유용할 수 있다. 본 연구에서는 α′ TRIP Titanium합금에 Al을 첨가하여 응력 유기 변태를 제어함으로써 우수한 물성을 확보하는 것을 목표로 하였다. Al은 고용강화 효과로 강도를 증가시킬 뿐만 아니라, β 상을 안정화시켜 마르텐사이트 변태를 억제하고 임계 응력을 상승시킨다. 이로 인해 응력 유기 변태가 제어되며, 그 결과 강도가 증가하는 효과를 얻을 수 있었다. 결론적으로α′ TRIP효과를 이용하여 인장강도 1.4 GPa 이상의 초고강도 타이타늄 합금을 개발할 수 있었으며, 산업적으로 적용할 경우 높은 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

[타이타늄2-5 | 11:25]

Investigating cryogenic pre-stain behaviour of pure titanium: Ha-Seong Baek*, Hyun-Hak Kang (Incheon National University), Yong-Taek Hyun (Korea Institute of Materials Science), and Tea-Sung Jun(Incheon National University)

Keywords: Pure titanium, Pre-strain process, Cryogenic

Titanium and its alloys exhibit excellent properties, including high strength-to-weight ratio, outstanding corrosion resistance, and superior biocompatibility. Due to these properties, they are widely used in a variety of industries like aerospace, biomedical, and structural applications[1-2]. However, commercially pure titanium (CP-Ti) requires enhanced strength use in certain industries, particularly biomedical applications. Although processes such as shot peening and severe plastic deformation have been developed to increase strength, they often result in reduced ductility. Recently, it was reported that cryogenic processing techniques improve strength and maintain ductility[3-4]. In order to enhance the strength of CP-Ti, pre-strain process was conducted on CP-Ti at both cryogenic temperature (CT) and room temperature (RT) in this study. Electron backscatter diffraction (EBSD) and scanning electron microscopy (SEM) were used to analyze slip traces, twinning, and fracture morphology. Tensile results showed that CP-Ti pre-strained at both RT and CT have similar ductility and higher strength compared with unprocessed CP-Ti. Moreover, CP-Ti pre-strained at CT has higher strength than RT at the same pre-strain level. SEM fractography images indicated that deformation mechanisms are different between pre-strained CP-Ti at RT and CT. The fractography of RT pre-strained specimens displayed quasi-cleavage areas, where cleavage and dimples co-existed, whereas the CT pre-strained specimens showed smaller dimples compared with those of RT pre-strained specimen, which is similar with results in other cryogenic deformation studies [5]. These findings indicate that cryogenic pre-strain can be a potential method for enhancing strength.

대형 차체부품용 알루미늄 주조기술 심포지엄

Room 202A, 4월 25일

[차체부품1-1 | 09:00] 초청강연

컴팩트 가압주조용 고유동・고강도 알루미늄 매트릭스 합금설계: 최승규 (한국자동차연구원, 전북대학교), 방현식, 김진평* (한국자동차연구원)

Keywords: Aluminum alloy, Casting Of Minimized Pressure Applied for Composite Technology, Fluidity, Mechanical propertie

국내외 자동차 산업에서는 환경 규제 강화와 같은 외부 요인과 더불어 기존 기술의 한계를 극복하고, 차량의 경량화가 요구되고 있는 부품의 전환과 알루미늄 제조 공정기술 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 차체 부품의 알루미늄 적용 확대에 따라 후드, 도어, 테일게이트, 펜더, 루프 등 BIW(Body in White) 전반에 알루미늄 소재 적용이 되고 있으며, 또한 기존 판재의 결합으로 구성되고 있는 차체 부품을 다이캐스팅 부품으로 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 알루미늄 소재를 적용한 고압 다이캐스팅 공정에서의 강도와 성형성을 개선하고자 고압다이캐스팅 적용 알루미늄 합금 및 주조공정, 공법에 대한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 고유동・고강도 특성을 확보하기 위해 기존 상용합금 분석 및 열역학 시뮬레이션 해석을 기반으로 차체용 비열처리형 합금을 벤치마킹하여 적합한 합금 설계 방안을 도출하고자 하였으며, 강도와 유동성을 동시에 확보하기 위해 Si, Mg, Cu 등의 원소 비율을 조절하여 합금 조성을 최적화하고, 또한 컴팩트 가압주조 공정에 적용하기 위한 선응고 로드를 활용하여 혼합 공정 상 매트릭스 합금을 제조하여 분석 및 평가를 진행하고자 하였다

[차체부품1-2 | 09:25] 초청강연

금속분말 특성 제어를 위한 제조공정 연구: 박성주 (주식회사에코파우더), 임영석, 손명균, 이한찬* (주식회사이엠에스)

Keywords: 금속분말, 분사법, 밀링, 형상학, 입자크기

금속분말은 첨단 산업분야와 전통 산업분야를 가리지 않고 다양하게 적용되고 있는데 최근 글로벌 무역 갈등 등으로 인해 소재에 대한 관심이 증가하게 되면서 금속분말의 필요성이 재조명되는 추세이다. 일반적으로 금속분말을 제조하는 방법 중 가장 보편적으로 알려진 방법은 아토마이징(Atomizing)인데, 고압의 가스나 액체 등의 매질을 이용하여 용융 금속 flow를 미세한 입자로 분해하는 공정이다. 다음으로 많이 활용되는 공정은 밀링(Milling) 공정으로, Size reduction의 하나이며 기계적 합금화 또는 형상학적으로 소성가공시켜 분말화 또는 특성 제어를 하는 방법이 있다. 이외에도 원심분사법(Centrifugal) 공정이나 습식 화학 공정인 침전법 등 필요에 따라 다양한 분말 제조 방법이 존재하며, 요구되는 분말의 특성에 따라 사용자가 최적의 제조공정 방식을 선택할 필요가 있다. 본 연구에서는 아토마이징 공정과 밀링 공정에 시험 결과에 근거하여 각종 사례에 대해 고찰하고 요구하는 분말 특성에 따라 공정 변수를 어떻게 제어하는 것이 유리한지에 대한 방향성을 제시하고자 한다.

[차체부품1-3 | 09:50] 초청강연

Door Inner Panel 생산을 위한 주조 공정 열 변형 해석: 한도석*, 이승철, 도신혁 (서강대학교)

Keywords: 주조 공정, 열 변형, 주조 시뮬레이션, 유한요소해석,Door Inner Panel

최근, 상대적으로 낮은 톤수의 주조 장비를 활용하여 대형 부품을 생산할 수 있는 슬러리 상태의 용융 금속 주입 방식이 개발되었다. 이 공정은 기존의 고압 프레스 방식으로만 제조 가능했던 문 내부 프레임과 같은 부품의 주조 생산을 가능하게 한다. 그러나, 본 공정에서는 **열 변형(thermal deformation)**이 주요한 문제로 대두되었다. 본 연구에서는 FDM(Fluid Dynamics Model) 기반 주조 시뮬레이션을 수행하여 공정을 모델링한 후, 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 이용한 열 변형 해석을 통해 변형 정도를 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 주조 과정에서 상당한 열 변형이 발생하는 것이 확인되었으며, 이를 개선하기 위한 공정 최적화의 필요성이 제기되었다. 향후 연구에서는 주조 변수의 최적화 및 열 변형 저감 방안을 집중적으로 탐색하여, 제품의 품질과 신뢰성을 향상시키는 방향으로 연구를 진행할 예정이다.

[차체부품1-4 | 10:15] 초청강연

컴팩트 가압주조 적용 다운사이징 최적화 고품질 일체형 도어 인너 프레임 개발: 최지석 (삼기), 강동하, 강정민 (현대자동차), 김효섭 (한국생산기술연구원), 심종철 (인성), 윤상일* (삼기)

Keywords: 컴팩트 가압주조, 대면적·고박육 차체부품, 알루미늄 비열처리형 합금, 사출압력 저감

전기자동차의 경량화가 중요해지면서, 대형 싱글피스 알루미늄 주조품 개발과 생산이 크게 증가하고 있으며, 국내에서는 뿌리산업의 특성상 대형 가압주조기에 대한 새로운 투자가 어렵기 때문에, 기존의 주조기를 사용하면서 사출 압력을 낮추는 컴팩트 가압주조* 방법의 개발이 점점 더 요구되고 있음 * 컴팩트 가압주조 : 사출 압력을 30% 이상 낮춰, 제품생산에 필요한 설비 사양(ton)을 다운스케일하는 공법으로 기존 가압주조 산업에서 보유 중인 주조기를 활용 대형제품 생산이 가능함. 본 강연에서는 컴팩트 가압주조 기술을 활용하여 전기차 차체부품인 일체형 도어 인너 프레임 개발한 결과를 소개하고, 대면적·박육 성형성을 구현하기 위해 적용한 핵심 요소기술을 공유하고자 함.

[차체부품2-1 | 11:00] 초청강연

다이캐스팅 설비 플런저 시스템내 Load-cell 센서를 활용한 사출압력 데이터 신뢰성 확보기술: 이광희*, 최형규* ((주)세미코)

Keywords: Load-cell, Die-casting, 사출압력, 시계열데이터, 차체부품

- 다이캐스팅이란 융해된 금속을 금형에 고압으로 강제 주입 시키는 것이 특징인 주조 공정으로 사출성형과 비슷한 방식으로 2개의 경화된 공구강 금형을 사용하여 만들어지고 있으며, 대부분의 다이캐스팅은 아연, 구리, 알루미늄, 마그네슘 등의 비철금속을 기반 합금으로 만들어짐. - 다이캐스팅 산업은 기존 엔진 및 변속기 부품에서 차체, 섀시로 확대 적용하는 추세가 이어짐에 따라 발전하고 있으며, 최근에는 Tesla사가 기가캐스팅을 통해 차체 양산을 시작한 이래로 대형 제품 양산 기술개발에 대한 지속적인 투자가 이어지고 있고, 다양한 제품군에 확대적용 됨에 따라 제2의 도약기를 맞이하고 있음. - 그러나, 기존 공정요소기술로 대형 제품 양산 체계를 구축하는 데 한계에 부딪히고 있으며, 특히 사출압력이 주요 공정변수인 대형 제품에서 기존 유압시스템의 주변환경과 계절적 요인의 한계로 실제 플런저 로드에 작용하는 정확한 압력값을 인지하지 못한 채 주조기에서 출력되는 데이터에 근거하여 양산해야 하는 실정임. - 실제 고압 다이캐스팅 공정 현장은 사출시 요구하는 압력의 정량 수치를 유압 사출 실린더에 의해 출력되는 값을 기준으로 생산되어지고 있으나, 이는 온도, 습도, 용탕 충진율 등 작업 환경의 계절적 요인과 유압 챔버 이후 유압 라인의 누유, 기계적 특성에 따라 압력 데이터의 편차가 작게는 3%에서 크게는 10% 이상으로도 수치가 출력되는 등 신뢰성 확보에 어려움이 있어, 이에 따라 유압의 출력 값을 교정하기 위한 방안도 마련되어지고 있으나, 각 장비의 교정에 소요되는 시간과 고비용의 부담과 더불어, 유압의 교정 측정 또한 여러 변수에 의해 감안되어, 약 5%의 오차 범위를 인지하거나 승인하고 있는 상황임. - 이처럼 주조 업계에서는 공정에서의 균일화되고 안정화된 품질 확보를 위해 주조 압력 변수에 있어, 유압의 출력 값에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 중장기적으로 기술 개발을 시도 하고 있음. - 이러한 문제점을 극복하기 위해, 고압 다이캐스팅용 Load-cell 센서 적용 플런저 시스템 기술을 통하여, 실제 Injection Rod 및 Plunger Tip에 가해지는 힘을 모니터링 하고 시계열 데이터로 관리하는 체계를 구축하여, 제품의 불량률 저하는 물론 생산성 향상 방안에 대해 논하고자 함.

[차체부품2-2 | 11:25] 조청강연

대형 차체부품 알루미늄 주조 공정에서 진공밸브 공기 배출 단면적 변화가 진공 형성에 미치는 영향: 최경한* (한국신소재산업(주))

Keywords: 알루미늄 주조, 진공 다이캐스팅, 진공밸브

본 연구는 대형 차체 부품 알루미늄 주조 공정에서 진공밸브 공기 배출 단면적의 설계 변화가 금형 캐비티의 진공 형성과 진공도 유지에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것을 목표로 한다. 대형 알루미늄 차체 부품을 주조할 때는 금형 내부의 공기 체적이 상대적으로 크기 때문에, 잔류 공기를 효과적으로 신속하게 배출하는 것이 더욱 중요하다. 진공도가 충분히 확보되지 않으면 내부 기포 결함, 기계적 강도 저하, 표면 결함 및 치수 정밀도 저하 등의 문제가 발생할 수 있으며, 이는 제품 품질에 직접적인 영향을 미친다. 이에 따라, 본 연구에서는 대형 차체 부품 주조 시 진공 성능을 극대화하기 위한 설계 방안으로 진공밸브 공기 배출 단면적을 실험적으로 분석하고자 한다. 이를 위해, 공기 배출 단면적이 다른 실험용 진공밸브와 다양한 내부 체적을 갖는 실험용 금형 캐비티를 구성하였다. 실험에서는 진공밸브의 공기 배출 단면적을 단계적으로 증가시키면서, 시간에 따른 진공도 변화를 측정하였다. 또한, 내부 체적이 서로 다른 실험용 금형 캐비티를 사용하여, 동일한 진공밸브 조건에서 내부 체적 변화가 진공 형성 속도에 미치는 영향을 비교하였다. 이러한 실험을 통해, 진공밸브 공기 배출 단면적과 금형 캐비티 내부 체적 간의 상관관계를 분석하고, 대형 차체 부품 주조에서 최적의 진공 성능을 구현하기 위한 설계 방안을 도출하고자 한다. 실험 결과를 통해 진공 형성 속도와 최종 진공도가 진공밸브 공기 배출 단면적에 따라 변화하는 경향을 확인하였으며, 이를 바탕으로 대형 차체 부품 알루미늄 주조 공정에서 진공 환경 개선을 위한 설계 방향을 논의할 수 있다. 이를 통해, 보다 신뢰성 높은 진공밸브 및 진공 시스템을 구축할 수 있으며, 특히 대형 차체 부품의 기계적 품질 향상과 기포 결함 감소에 기여할 것으로 기대된다.

[차체부품2-3 | 11:50] 조청강연

컴팩트 가압주조 다이캐스팅 금형의 열피로 및 용손 특성: 윤국태*, 김주업, 홍창완, 이락규, 김선주 (대구기계부품연구원), 윤상일 ((주)삼기), 김형신 (세아창원특수강), 양상규 (대국정공(주))

Keywords: Compact Pressure Die-casting, Thermal fatigue, Heat checking, Melt-out, Hot work tool steel

다이캐스팅 금형은 주조공정 중 cavity 표면에서 용융 금속과의 접촉에 의해 급격히 가열되었다가 제품 취출 시 이형제의 분무 등으로 급속히 냉각되는 가열-냉각의 반복 열응력을 받게 된다. 먼저 용탕에 의한 표면의 국부적 팽창과 금형 심부로의 온도구배 발생으로 인한 구속과 압축응력이 발생하고, 제품 배출 후 이형제 도포에 의한 급속한 냉각으로 인장응력이 발생됨에 따라 가열시의 압축응력에 의한 소성 고온강도를 높이는 것이 열피로 균열 억제에 효과적인 것으로 알려져 있다. 이러한 열응력은 Poisson's ratio, 탄성계수, 열팽창 계수와 온도구배의 관계식으로 나타낼 수 있으나 열적, 물리적 재료 물성은 실제로 제어하기가 어려워 다이캐스팅 조업 조건 상 ΔT 를 최소화하는 것이 반복 열피로 응력 저감에 유효할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 주조기 톤수의 컴팩트화(다운사이징) 및 미세조직 컴팩트화로 고품질 다이캐스팅 제품 생산을 목표로 하는 컴팩트 가압주조(Casting Of Minimized Pressure Applied for Composite Technology, COMPACT) 공법을 개발함에 금형재로 쓰이는 열간 공구강의 주요 손상메커니즘인 열피로 및 용손 특성과 개발 공법 조건에서의 금형수명 향상에 대한 효과를 고찰하였다. 먼저 유한요소법을 이용한 가열-냉각시 열응력 변화를 일반적 다이캐스팅 온도 구간인 650~700ºC 열싸이클과 개발 컴팩트 주조 공정에서 예상되는 600~610ºC 구간의 최대 노출온도에서의 열응력을 비교하였으며, $\Delta\sigma$는 온도구배의 감소에 의해 약 200 MPa 이상 줄어들어 heat checking 발생과 균열전파에 의한 gross cracking, 금형 파괴 등을 근본적으로 저지하는 효과가 클 것으로 예상되었다. Induction heating(max. 700ºC) 및 water spray(상온) 방식의 열피로 시험장치를 이용하여 상용 VD급 및 ESR급 열간 공구강 소재의 heat checking 및 propagation 양상을 관찰하였으며, 열피로 시험 후 균열 길이별 분포도에서 VD급 보다 ESR급 공구강에서 조대 균열이 적고 3000cycle 이후에도 각 구간별 균열크기가 작은 것을 확인하였다. 더하여 상용 STD61 열간 공구강 소재를 대상하여 열피로 최대 온도별(600, 650, 700ºC) 반복 3000cycle 열피로 시험을 실시한 결과 개발 컴팩트 가압주조 공정 용탕온도에 해당하는 최대 온도 600ºC에서 조건에서 최대 균열길이와 총 균열길이가 크게 감소하는 것을 확인하였다. 용손시험은 상용 고연신 알루미늄 합금(AlSi9MnMoZr)에 대하

여 680ºC 온도조건에서 금형재 및 침적시간별 계면 금속간화합물 생성거동을 분석하였으며 STD61 대비 국산 개발 VD급 소재가 우수한 내용손성을 나타내었다. 또한 컴팩트 가압주조 공정을 고려하여 개발 VD급 열간 공구강에 대한 600ºC 및 700ºC의 용손시험을 실시한 결과는 컴팩트 가압주조 공정조건인 상대적 저온 용탕에서의 반응성이 3배 이상 낮아졌다. * Acknowledgements 본 연구는 2024년 산업통상자원부 소재부품기술개발사업(이종기술융합형/투자연계형, RS-2024-00421087)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[자체부품2-4 | 12:15] 조청강연

시뮬레이션을 활용한 컴팩트 가압주조 알루미늄 유동 해석: 송호섭, 최지석, 윤상일* (삼기오토모티브)

Keywords: 컴팩트 가압주조, 다이캐스팅, 유동해석, 시뮬레이션

자동차 업계에서 경량화와 단가 감소를 목표로 대면적·일체형 제품 생산이 많이 확대되고 있다. 대면적·일체형 알루미늄 주조품 생산을 위해서는 최소 5,000톤급 이상의 가압주조기가 필요하며 재정적 여력이 충분하지 않은 중소·중견 뿌리산업 업체들은 진입이 불가한 상황이다. ㈜삼기에서는 주조 압력을 30% 이상 낮춰, 제품생산에 필요한 설비 사양(ton)을 다운스케일하는 신기술인 컴팩트 가압주조법을 적용하여 국내 중소·중견 뿌리산업 업체들의 대형 싱글피스 알루미늄 주조품 고부가가치 산업으로 진입을 가능케 하고자 하였다. 이에 따라 주조 해석 시뮬레이션 프로그램를 활용하여 타겟 부품인 도어 인너 프레임의 유동 및 응고해석을 통해 금형 내 용탕의 충진 패턴, 불량 예측을 진행하고 이를 실제 타겟 부품과의 실물 검증을 통해 정합성을 확인하고자 하였다.

가공-소성가공
Room 202B, 4월 25일

[소성1-1 | 09:00]
Study of the influence of process condition parameters on the press forming on Zinc-coated steel sheets: Jiyoung Kim*, Seung-Chae Yoon, Jin-Hwa Jeon (Hyundai steel company), and Myoung-Gyu Lee (Seoul national university)
Keywords: steel sheets, press forming, friction, tribology, process condition

As vehicle body structures become stronger and part designs more complex for lightweight, controlling frictional properties in automotive press forming has gained critical importance. Friction, a key factor in formability, is influenced by variables such as contact pressure, sliding velocity, sheet strength, and coatings. This study investigates the friction characteristics of steels with tensile strengths of 340 MPa and 980 MPa, under galvanized (GI) and galvannealed (GA) zinc coatings.Experimental results reveal that asperity flattening, a significant factor in determining friction, increases with contact pressure normalized by tensile strength, particularly for GI-coated steels. The study's findings provide a foundation for predicting friction behaviour and coefficient changes in zinc-coated steel sheets under varying speed and load conditions during press forming, incorporating roughness deformation and lubrication systems. The research integrates roughness deformation and lubrication mechanisms, offering critical foundational data for predicting friction variability in press forming applications.

[소성1-2 | 09:15]
Analysis of the formability of steel sheets considering friction effect in the stamping process: Seung-Chae Yoon*, Ji-Young Kim, Byong-Keuk Jin (Hyundai-Steel R&D Center), and Yun-Jun Song (Hyundai Motor Company)
Keywords: Sheet metal forming, Friction effect, Finite element method

This study investigates the effect of friction on the formability of automotive steel sheets to optimize the stamping process. During stamping, the sheet metal undergoes complex interactions with the tool surfaces, where friction plays a critical role in deformation behavior. Various formability parameters, such as the limiting drawing ratio (LDR), limiting dome height (LDH), and cup drawing tests, are influenced by frictional effects. Therefore, understanding and optimizing frictional behavior is essential for improving sheet forming performance. This study analyzes the frictional behavior of high-strength automotive steel sheets by considering the deformation mechanisms during formability testing. A finite element method (FEM) combined with numerical solutions is employed to evaluate the influence of friction on the forming process. The findings contribute to the enhancement of formability assessment and the development of efficient stamping processes for automotive applications.

[소성1-3 | 09:30]
Analysis of mechanical trimming methods to enhance the performance of aluminized hot-stamped vehicle parts: Seung-Chae Yoon* (Hyundai-Steel R&D Center), Seong-Guk Son (Hyundai·Kia Namyang R&D Center), Jea-Myoung Park, Kye-Jeong Park, Je-Youl Kong, and Kyoung-Ju Sohn (Hyundai-Steel R&D Center)
Keywords: Hot stamping, 22MnB5, Mechanical trimming

To improve the quality and productivity of the hot stamping trimming process, various mechanical trimming methods, including aus-piercing, room-temperature mechanical trimming, and pre-piercing, are being implemented as alternatives to conventional laser trimming. This study aims to optimize edge quality and mitigate defects such as cracking and delayed fracture by effectively controlling residual stresses generated during trimming. The influence of different trimming methods on burr formation and edge integrity was analyzed through microstructural examination after hole punching. Additionally, the delayed fracture resistance was evaluated by assessing hydrogen embrittlement susceptibility. The results demonstrate that the mechanical trimming approach enhances trimming efficiency, reduces burr-related quality issues, and improves the overall mechanical performance of hot-stamped parts. These findings contribute to the development of advanced trimming strategies for high-strength automotive components, ensuring both durability and manufacturability.

[소성1-4 | 09:45]
페라이트계 스테인리스 냉연강판의 리징(Ridging) 분석 방법 개발: 정양진, 안덕찬 (㈜포스코), 박진홍 (Ohio State University), 이형림*, 이명규* (서울대학교)
Keywords: 스테인리스, 리징, 결정소성, EBSD, CPFEM

페라이트계 스테인리스 냉연강판의 판재 성형품 제조 시 프레스 성형에 의해 소재가 연신되면, 표면에 수μm~수십μm 높이의 표면 굴곡이 소재 압연방향으로 수mm~수십cm 길이로 발생하는데 이를 리징(Ridging)이라 한다. 광휘소둔을 통한 미려한 표면의 페라이트계 스테인리스 표면은 본 현상에 의해 광택 불균일이나 성형성 하락 등의 문제가 발생하기도 한다. 이를 개선하기 위해, 스테인리스 제조 공정 중 제강, 연주, 열연, 냉연 공정에서의 지속적인 개선이 이루어졌으나, 1970년대 이후 아직까지도 리징 발생 기구에 대해 명확하게 설명되기 어려운 것은, 집합조직의 복잡성과 EBSD 측정 면적의 협소함, 그리고 결정소성 전산해석의 컴퓨팅 파워

등이 발목을 잡고 있는 실정이다. 본 연구에서는 400계 스테인리스 냉연강판 2 종(0.5 mm, 0.6 mm 두께)에 대해, 압연방향으로 50 μm 길이를 10 μm 간격으로 축정하고, 폭은 2 mm의 EBSD data를 측정하여 결정소성유한요소해석(CPFEM)을 통해 일축인장 시 리징의 발생 기구에 대해 설명하고자 하였다. 본 소재는 γ-fiber가 발달한 집합조직이므로, γ-fiber 내에서 표면 굴곡을 발생시키는 방위를 shear strain의 positive, negative 부호와 절대치로 구분하여 분석하고자 하였고, 해당 기준의 도출 방법에 대해 설명하였다. 또한, 상기 방법에 의해 리징에 가장 주요하게 미치는 방위를 positive 6가지, negative 6가지를 선정하였으며, EBSD data에서 위치에 따른 해당 방위의 분율만을 측정하면 CPFEM 전산해석의 결과와 경향이 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이에 시간 소모가 많은 CPFEM 컴퓨팅 계산 대신 간단한 EBSD 분율 측정으로 리징의 원인 분석이 가능하게 될 것을 기대한다.

[소성1-5 | 10:00]

3DQ 기술 및 부품 개발 연구: 이석규*, 김소연 (현대자동차㈜), 박현경, 정지원 (㈜디에이치)

Keywords: 3DQ, 초고강도, 고온, 성형, 폐단면

최근 자동차 산업에서는 차량 경량화와 함께 충돌 안전성 향상에 대한 많은 개발 이 이루어지고 있고 이러한 요구들을 만족시키기 위해 소재의 고강도화가 진행되고 있다. 개단면 부품에 새로 개발되는 초고강도 소재들의 적용이 많이 확대되고 있지만, 폐단면 부품의 경우에는 성형 공법의 제약으로 상온에서 낮은 연신율을 갖는 초고강도 소재의 적용에 어려움을 겪고 있다. 초고강도강의 폐단면 부품 적용을 위해서는 핫스탬핑 공법과 같이 고온에서 성형을 하는 기술이 필요한 상황이다. 최근 3D Hot Bending and Direct Quenching (3DQ) 공법이라는 고온에서 성형을 하고 수냉하여 원하는 형상을 구현하면서 물성을 확보하는 기술이 여러 나라에서 개발되고 있다. 관련 기술 중, 3DQ 공법은 굽힘 성형에서 다양한 R값을 구현할 수 있다는 이점이 있어 기존에 성형 공법의 한계로 구현이 어려웠던 형상들도 제작 가능하여 관심을 받고 있다. 현재 국내에서도 3DQ 기술의 이점을 활용한 부품을 개발하기 위해 여러 연구를 수행하고 있고 부품의 물성과 치수 정밀도 확보를 위해 여러 연구들이 진행되고 있다.

[소성1-6 | 10:15]

A Semi-analytical Approach for Numerical Analysis of Residual Stress in Oxide Scale Grown on Hot-rolled Steels: Jigang Yoon, Yeongje Jun, Wooram Noh* (Andong National Univ.)

Keywords: Semi-analytical method, Residual stress, Oxide scale growth, Thermal expansion, Hot-rolled steel

In this study, we developed a semi-analytical approach for the numerical analysis of residual stress in oxide scales formed on hot-rolled steels. The oxide scale, formed during the hot rolling process, experiences complex interactions due to thermal and mechanical influences, significantly affecting the material's integrity and performance. Our research focuses on integrating various stress components such as thermal stress, growth stress, and creep behavior to predict the residual stress within the oxide layer. The semi-analytical method combines analytical expressions for each stress component with numerical integration to account for their cumulative effects. Validation through instrumented indentation tests confirms the reliability of our model, which considers thermal expansion coefficient (CTE) differences, scale growth, and creep-induced stress relaxation. Our findings indicate that thermal stress resulting from CTE differences significantly impacts the overall residual stress, with growth stress contributing a compressive component during cooling, and creep behavior playing a minor role in stress relaxation. This comprehensive approach enhances the accuracy of residual stress prediction, facilitating the optimization of material design and processing conditions for hot-rolled steel products. Acknowledgement : This work was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (RS-2024-00409639, HRD Program for Industrial Innovation)

[소성2-1 | 10:40]

단조 휠의 원가절감을 위한 로타리 단조 기술 개발: 배찬희*, 김영찬 (현대자동차기초소재연구센터), 최완희, 박동암, 이근길 ((주)알룩스)

Keywords: 알루미늄, 단조, 휠

고가의 해외 공급업체 의존과 복잡한 형상단조 공법에서 요구되는 막대한 장비 투자비는 국내 알루미늄 단조 휠 제조업체에 큰 부담으로 작용하고 있다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 로타리 단조 기술을 개발하여 국산화를 이루고 생산 원가를 절감하는 것을 목적으로 한다. 기존의 형상단조 공법은 1차 단조, 2차 단조로 스포크와 디스크를 성형하여 대규모 장비와 공정을 필요로 하지만, 본 기술은 간단한 블랭크를 로타리 단조로 제작한 후 기계 가공을 통해 최종 휠 형상을 얻는 방식으로 효율성을 극대화하였다. 로타리 단조 공정을 최적화하기 위해 반응표면법을 활용하여 주요 공정 인자인 빌렛온도, 금형 하강속도, 포밍온도 인자를 체계적으로 분석하였다. 실험계획법에 따라 설계된 실험표를 통해 최적 조건을 도출하였으며, 도출된 최적 조건의 유효성은 추가 실험을 통해 검증되었다. 본 연구에서 개발된 로타리 단조 기술은 복잡한 장비 투자를 대폭 줄이면서도 단조 휠의 요구 품질을 유지할 수 있는 효과적인 대안으로 확인되었다. 이 기술은 국내 제조 역량을 강화하고, 단조 휠 산업에서의 원가 절감 및 수입 대체에 실질적인 해결책을 제시한다.

[소성2-2 | 10:55]

Sedimentation of Fe-containing particle in aluminum melt via electric current: Jang Hyun Bae (Korea Institute of Industrial Technology, Seoul National University), Chan Gyeol Yun (Korea Institute of Industrial Technology, Inha University), Heung Nam Han (Seoul National University), and Moon-Jo Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Aluminum, solidification, sedimentation, electric current

The electrolytic refining of aluminum from bauxite requires approximately 15 MWh of electricity per ton. In contrast, using recycled aluminum can reduce energy consumption by more than 90% compared to primary production, making it a more economically viable and sustainable process. Particularly in industries such as automotive and aerospace, the use of recycled aluminum lowers production costs and enhances competitiveness. However, recycled aluminum scrap is recovered from various industries, including automotive, construction, and electronics, where it is often mixed with Fe-based materials such as steel and stainless steel. As a result, Fe impurities tend to accumulate in recycled aluminum. Fe reacts with aluminum to form Al-Fe intermetallic compounds, which are not easily dissolved and remain in the recycled material. In Al-Fe-Si alloys, β-Al_5FeSi precipitates are formed, which significantly degrade mechanical properties. Industrial methods for Fe removal, such as filtration, sedimentation, and electrochemical techniques, have been studied; however, complete removal is challenging, and process costs increase. Furthermore, cost-effective and highly efficient processes for controlling Fe accumulation in aluminum scrap are still lacking. In this study, we investigated a method to effectively control Fe precipitation behavior in molten aluminum by applying an electric current. The molten aluminum was poured into a sand mold, and an electric current was applied until solidification was complete. The chemical composition of the samples was analyzed at different heights, and microstructure was examined. The effect of electric current on Fe precipitation behavior was evaluated based on these analyses.

[소성2-3 | 11:10]

SUS316L 금속 분말의 Bead Mill을 이용한 판상화(Flake) 가공 시 공정 변수에 따른 영향 분석 Analysis of the Effect of Process Parameters on Flake Processing of SUS316L Metal Powder Using a Bead Mill: 이한찬*, 손명균, 임영석, 최순호, 권희준, 임혜경, 이지희 ((주)이엠에스 기술연구소)

Keywords: SUS316L, Bead Mill, Flake, Wet Milling, Microstructure Analysis

본 연구에서는 SUS316L 구형(15μm) 금속 분말을 대상으로 습식 공정을 이용한 Bead Mill(지르코니아 볼밀) 기반의 판상화(Flake) 가공 시 공정 변수가 미세구조 및 형상 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 공정 변수로는 가공 Pass 수, 용매와 금속 분말의 비율, 비드 중량, 유량(속도 및 펌프 RPM), Mill RPM 등을 설정하여 실험을 진행하였다. 실험 결과, 가공 Pass 증가에 따라 재료의 판상화 진행이 뚜렷하게 나타났으며, 일정 Pass 이후 형상 변화가 포화 상태에 도달하는 경향을 보였다. 용매와 분말의 비율은 분말 분산성과 유동성에 직접적인 영향을 미쳐 가공 효율에 중요한 역할을 하였으며, 비드 중량과 Mill RPM의 변화는 판상화 정도 및 입도 분포에 영향을 미치는 주요 인자로 작용하였다. 또한, 유량 조절(속도 및 펌프 RPM)은 공정 중 입자의 체류 시간 및 충돌 강도에 영향을 주어 최적화된 가공 조건을 도출하는 데 중요한 변수로 작용하였다. 본 연구를 통해 Bead Mill 기반의 판상화 가공에서 각 공정 변수가 미세구조 변화에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 최적의 공정 조건을 제시하였다. 이러한 결과는 고기능성 금속 Flake 소재의 제조 및 응용 연구와 반도체 가스필터 산업에 기여할 것으로 기대된다.

[소성2-4 | 11:25]

마찰용접에 의한 이종소재 마찰용접부의 초음파 나노표면개질 공정에 따른 영향 분석: 최언준 (한국재료연구원, 경상국립대학교), 우영윤 (한국재료연구원), 김정기 (경상국립대학교), 신재우, 조재현 (케이에스피), 윤은유* (한국재료연구원)

Keywords: Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, Friction Welding, Residual Stress, Ni-based superalloy

니켈 초내열합금은 뛰어난 내열성과 내식성 덕분에 엔진부품, 배기밸브 등 고온 고압 환경에서 널리 사용되지만 높은 비용으로 인해 활용이 제한된다. 배기밸브 스핀들의 헤드 부분은 열 영향을 많이 받지만 스템 부분은 열 영향이 적기 때문에, 활용용도에 따라서 니켈 초내열합금과 비교적 경제적인 스테인레스강을 용접하여 사용할 경우 가격 경쟁력을 높일 수 있다. 그러나 마찰용접 시 용접부에서 열팽창과 수축으로 인한 높은 잔류응력이 응력부식 균열(SCC)을 초래하며, 이는 부품의 피로 수명을 크게 감소시킨다. 초음파 나노표면개질 (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, UNSM)은 정적 및 동적하중이 적용된 볼을 초음파 진동으로 금속 표면에 20 kHz 이상의 속도로 타격하여 압축 잔류 응력을 부가하여 응력부식 균열을 효과적으로 완화할 수 있다. 그러나 마찰용접부의 위치별 초음파 나노표면개질 공정 적용에 대한 압축 잔류 응력, 표면 거칠기, 경도 및 미세구조 등의 분석들이 필요하다. 본 연구에서는 니켈 초내열합금 및 스테인리스강 마찰용접부에 초음파 나노 표면개질 공정을 진행하여 그 영향을 평가하였다. 마찰용접 부의 위치에 따른 초음파 나노 표면개질 공정 영향을 분석하기 위해 X선 회절(XRD) 분석법을 통한 잔류응력 및 비커스 경도 측정을 수행하여 기계적 특성을 평가하고 미세조직을 비교하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 초음파 나노 표면개질 공정이 마찰용접부의 기계적 성질과 내구성 향상에 미치는 영향을 분석하였다.

[소성2-5 | 11:40]

Reverse engineering of Material Properties Using Bayesian Probability and Finite Element Analysis: Application and Validation on the Ring-Pull Test: Bohye Jeon (Department of Materials Convergence and System Engineering, Changwon National Univ.), Carlos Tomé (MST-8, Los Alamos National Lab.), Youngung Jeong* (Department of Materials Convergence and System Engineering, Changwon National Univ., School of Materials Science and Engineering, Changwon National Univ.), and Laurent Capolungo* (MST-8, Los Alamos National Lab.)

Keywords: Reverse engineering, Bayesian probability, Ring pull test, Finite element analysis, FeCrAl alloy

The ring-pull test is a representative mechanical testing method for evaluating the hoop direction mechanical behavior of nuclear cladding materials. Nuclear cladding materials are typically manufactured in tube or rod through extrusion, which induce anisotropy.

Understanding the hoop- direction mechanical behavior is essential for characterizing the anisotropy of tube materials; however, experimental measurement of these behaviors is relatively challenging compared to the longitudinal direction. To address this challenge, various mechanical testing methods, including the ring-pull test, C-ring compression, and ring compression, have been developed. However, these experimental methods still present limitations related to specimen geometry, friction between mandrel and ring, and complex strain path variations. This study introduces a method for reverse engineering hoop direction mechanical behaviors was proposed using Bayesian inference and finite element analysis without requiring additional mechanical tests. The target material was C26M steel, an Fe-Cr-Al alloy. Six input parameters were selected based on an isotropic elasticity model, J2 plasticity, and a ductile fracture model. For each input parameter, three ranges were considered, leading to a total of 3^6 (=729) finite element simulations. From these simulations, five pre-selected target parameters were extracted from the normalized force-displacement curve of the representative specimen to construct a database. Based on this database, the optimal material parameters were determined and validated by comparing the results with those obtained from tests using six different mandrel sizes and uniaxial tensile test. Finally, a Sobol index analysis was conducted to qualitatively and quantitatively evaluate the influence of input parameters on each target parameter, and the effect of friction coefficients depending on mandrel size was also analyzed.

항공재료
Room 203, 4월 25일

[항공1-1 | 09:00]
항공기 투명창 성형공정 개발: 정대호, 김덕성, 안교진, 이재훈, 송민환* (한국항공우주산업(주))
Keywords: 투영창, 성형, 항공재료
항공기 투명창은 조종사의 시야 확보 및 기체 내외부 환경과의 차단 역할을 수행하며, 강도, 내구성, 광학적 특성 등이 요구된다. 본 연구에서는 항공기 투명창을 제조하기 위한 성형공정 개발을 목표로 하였다. 이를 위해 수행한 소재 선정, 성형 절차 및 공정 변수 분석 내용을 소개하고자 한다.

[항공1-2 | 09:15]
전투기 캐노피용 투명 전도성 코팅에 대한 연구: 윤영준* (한국세라믹기술원), 김용환 (인포비온), 홍익표 (공주대학교), 황민제, 최광식 (한국항공우주산업)
Keywords: 캐노피, 투명 전도성 코팅, 전파 차폐, 전파 흡수, 태양열 차단
전투기용 캐노피 투명체의 전파 차폐 및 흡수, 태양열 차단에 응용될 수 있는 투명 전도성 코팅에 대한 이론적인 배경과 원리, 실험 결과를 제시하고자 한다. 캐노피 투명체의 기본 요구사항인 광투과율 및 헤이즈와 같은 광학적인 가시성을 만족하면서 내부 전자기를 보호할 수 있는 전파 차폐 기능, 적의 레이더에 검출되지 않는 전파흡수(스텔스) 기능, 강한 태양복사에너지에 대한 열차단 기능을 발현할 수 있는 투명전도성 코팅에 대한 세부 요구사항들과 실제 평가 결과들이 함께 제시될 것이다. 본 발표를 통해 캐노피 투명 전도성 코팅을 전투기에 적용함에 있어 필수적으로 요구되는 추가 사항들과 이슈들에 대한 논의를 통해 보다 실질적이면서 효율적인 방향성을 제시하고자 한다.

[항공1-3 | 09:30]
PMMA 진공 성형의 두께 균일성 확보를 위한 변형 메커니즘 분석: 백민재, 신윤우, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남 (한국재료연구원), 김덕성, 정대호, 송민환, 정유인 (한국항공우주산업(주)), 최현성* (한국재료연구원)
Keywords: PMMA, 진공 성형, 두께 균일성, creep 변형, 소성 변형, 고온 인장 시험, 가교도
폴리메틸메타크릴레이트(PolyMethyl MethAcrylate, PMMA)는 항공기 캐노피 및 투명 구조 부품에 널리 사용되는 소재로, 진공 성형을 통해 다양한 부품으로 가공된다. 본 연구에서는 PMMA 소재의 고온 진공 성형 과정에서 성형 속도와 변형 특성이 두께 균일성에 미치는 영향을 분석하였다. 먼저, creep변형과 소성변형을 정량적으로 구분하기 위해 시편 단위의 creep실험과 고온 인장 시험을 수행하였다. creep실험은 일정한 온도와 하중 조건에서 진행되었으며, 시간에 따른 변형률을 측정하여 creep곡선을 도출하고 변형 거동을 분석하였다. 소성 변형 분석을 위해 상온 및 고온 인장 시험을 수행하였으며, 이를 통해 항복 강도 및 연신율 변화를 비교하고, 각 실험에서 게이지부의 두께 변화량을 정량적으로 평가하였다. 성형공정에서의 두께 균일도 분석을 위해, 직사각형 형상의 부품을 진공 성형하였으며, 성형 공정에서 온도와 성형 속도를 주요 변수로 설정하여 다양한 조건에서 실험을 수행하였다. 성형 후 제품의 두께 균일성과 표면 투과도를 측정하고, 성형된 PMMA 부품의 가교도를 분석하여 creep및 소성 변형의 차이를 평가하였다. 또한, 성형 속도와 온도 조건에 따른 내부 구조 변화를 분석하고, 소재 안정성에 대한 종합적인 평가를 수행하였다.

[항공1-4 | 09:45]
항공용 알루미늄 압출재 기계가공 유한요소해석을 위한 이방성을 고려한 연성파단 물성 실험: 심현보, 이승환, 신윤우 (한국재료연구원), 정찬욱 (동양AK), 오석근 (KAI), 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성* (한국재료연구원)
Keywords: 알루미늄, 압출재, 기계 가공, 유한요소해석
알루미늄 2xxx 계열 합금은 우수한 강도와 피로 저항성을 가지며, 높은 내열성과 뛰어난 기계 가공성을 가지고 있어서 항공기 부품 제작에 적합한 소재로 널리 사용된다. 또한 알루미늄 압출 재는 후속 기계가공을 통해 복잡한 형상을 가진 제품을 효율적으로 제작할 수 있으며, 치수 정밀도가 우수하다는 장점을 가지고 있어 항공산업에서 중요한 역할을 한다.항공기에 사용되는 wing rib, stringer, frame 등의 부품은 압출 공정을 거친 후 기계 가공을 통해 최종 형상으로 가공되어 사용된다. 기계가공 후 발생하는 가공 변형 및 잔류응력은 항공기 부품의 치수정밀도와 피로 성능에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 가공변형을 최소화하는 최적 가공 조건 도출이 요구되며, 이를 위해 가공변형 및 잔류응력의 정확한 예측이 필요하다. 직접적인 실험을 통한 최적 조건 도출은 비용과 시간이 많이 소요되며, 절삭 공정의 특성상 매우 짧은 시간 내에 변형이 발생하므로, 유한요소해석이 널리 활용되고 있다. 유한 요소 해석을 활용하여 기계 가공 중 발생하는 변형 및 잔류 응력을 정밀하게 예측하기 위해서는 해석의 정확도가 필수적이다. 이를 위해, 기계가공에서 순간적으로 발생하는 고온, 고변형률 속도, 소재 이방성, 하중 경로에 따른 소재 파단 물성 정량화 및 구성방정식 개발을 통한 유한요소해석으로의 적용이 요구된다. 따라서, 구성방정식 개발에 필요한 물성치를 확보하기 위해서 2xxx 계열 알루미늄 압출재의 이방성과 하중경로를 고려한 파단 물성치를 실험으로 검증해보려 한다.

[항공1-5 | 10:00]

항공용 Aluminum 소재의 균열 개시해석에 따른 파단면 분석 사례: 조은준* (한국항공우주산업(주)), 석무영, 권용남 (한국재료연구원), 손진일 (테스코(주)), 장영환 (한국항공우주산업(주))

Keywords: 항공소재, AL7050-T7451, Block Counting, 균열개시해석

항공기 설계의 최종목적은 구조물의 안정성과 경량화에 초점을 맞추고 있으며 이 중 구조물의 안정성을 위해 항공기 하중을 지탱하는 주요 구조물의 수명을 고려하여 설계하게 된다 .항공기 해석 방법 중 결함이 없는 상태에서 결함 발생 후 최종적으로 파괴에 이르기까지의 수명을 계산하는 균열개시해석(Crack Initiation Analysis)이 있으며, 항공기 개발의 최종단계에서 적용해서 진행하게 된다. 이때 항공기 운용 조건을 고려하여 Random Spectrum을 부과 후 최종적으로 구조 시험을 진행하게 되는데 기본 Random Spectruam의 단위를 Block로 구분하며 시험 종료 후 발생된 균열에 대해서 Block Conunting 기법을 적용하여 분석을 진행하게 된다. 이에따라 항공용 소재로 적용되는 Al7050-T7451의 구조 시험 중 발생한 예상치 못한 균열에 Block Counting 기법을 적용하여 파단면을 분석한 사례에 대해서 소개하고자 한다.

[항공2-1 | 10:25]

항공기 엔진용 소재 개발을 위한 핵심 요구도 분석: 안수진*, 송민환, 정유인 (한국항공우주산업(주))

Keywords: 금속, 엔진용 소재, 항공기 엔진

국내 항공산업은 지속적으로 성장하고 있으며, UAM 및 AAV와 같은 미래 사업의 등장으로 시장 규모는 더욱 확대될 전망이다. 이에 따라 항공기 엔진의 독자 개발 필요성이 증가하고 있으나, 높은 기술 장벽과 해외 선진국의 전략적 기술 보호로 인해 국내 독자 개발은 쉽지 않다. 현재 국내 항공산업은 제작 및 조립 기술에서의 경쟁력은 갖추었지만, 핵심 부품인 엔진 개발은 여전히 해외 기술 의존도가 높다. 이는 국가 안보 및 항공산업 자립 측면에서 중요한 문제로 대두되고 있으며, 장기적 연구개발과 핵심 원천 기술 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 항공기 엔진 개발을 위한 핵심 요소 중 하나인 엔진용 소재 개발 요구도를 분석하여 향후 엔진용 소재 국산화의 기준 정립을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

[항공2-2 | 10:40]

항공기 제트 엔진 블레이드용 TiAl 4822 합금의 질화 처리에 따른 마모 및 피로 특성: 정영훈, 이용재, 박정연, 김홍민 (국립순천대학교), 유주현 (한화에어로스페이스), 이동근* (국립순천대학교)

Keywords: TiAl 4822, nitriding, ball-on disk test, fatigue test

Ti-Al 금속간 화합물을 기반으로 하는 TiAl 합금은 높은 비강도와 우수한 크리프 강도 및 고온 내산화성으로 항공기 제트 엔진의 블레이드로 주로 이용되고 있다. 그러나 제트 엔진이 작동하며 흡입되는 공기로 인해 모래, 얼음 등 미세한 입자들이 빨려 들어가며 블레이드와 충돌해 침식 손상을 유발할 수 있다. 블레이드의 침식 손상은 설계된 공기역학적 성능에 악영향을 미치며, 블레이드의 내구성을 약화시키는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 TiAl 4822 (Ti-48Al-2Nb-2Cr) 합금을 대상으로 소형 입자의 지속적인 고속 충돌에 의해 발생하는 침식 손상을 최소화하고자 질화 처리를 적용하였다. 질화 처리 후 TiAl 4822 합금의 마모 메커니즘을 분석하기 위해 ball-on disk 시험을 수행하였으며, 피로 시험을 통해 질화 층이 피로 특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

[항공2-3 | 10:55]

Ni일방향 초내열합금에서 Zr원소가 액적 젖음성과 주조성에 미치는 영향: 진혜숭 (창원대학교 공대 금속재료공학과 응고실험실), 한승전, 최은애, 서성문, 정일석 (한국재료연구원), 구지호 (두산에너빌리티(주)), 이재현* (창원대학교 공대 금속재료공학과 응고실험실)

Keywords: Superalloy, IN792, Directional solidification, Castability, Zirconium

IN792 합금은 석출경화형 Ni 기 초합금으로, 600~900ºC의 중온에서도 높은 강도와 우수한 크리프 저항성을 유지하며, 고온 환경에서의 내산화성과 내식성이 뛰어나다. 이 합금은 입계 강도를 향상시키기 위해 C, B, Zr을 첨가하였으며, 주요 강화 기구는 γ' 석출에 의한 강화이다. 그러나 높은 γ' 함량으로 인해 주조성이 저하되며, 특히 응고 과정에서 고온 균열에 민감한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 입계 강화 원소가 응고 거동과 주조성에 미치는 영향을 조사하였다. 파면 분석 결과, Zr 함량이 가장 높은 시편에서 다량의 편석이 발생하는 것을 확인하였으며, 이는 응고 과정에서 Zr이 액상으로 편석되었음을 의미한다. 이를 바탕으로 Zr의 액상 편석이 응고 거동에 미치는 영향을 분석하였다. Zr 편석은 응고 과정에서 국부적인 조성 변화를 유발할 뿐만 아니라 액적의 젖음성(wettability)에도 영향을 미칠 수 있다. 젖음성은 응고 균열 발생 여부를 결정하는 중요한 요소 중 하나로, 응고 중 Zr 편석이 액적의 젖음성을 어떻게 변화시키는지를 규명하기 위해 분자 동역학(MD) 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 Zr 편석에 따른 액적 젖음성 변화와 응고 균열 간의 관계를 분석하였다.

[항공2-4 | 11:10]

장기간 지속되는 시험의 셋업 건전성 확인 방안: 정근완, 이원석* (한국항공우주산업(주))

Keywords: 전기체 내구성 시험, 구조시험, 하중 스펙트럼

구조시험은 시험 목적에 부합하는 양질의 데이터를 확보하는 것이 중요하며, 이는 센서의 수량과 시험기간에 반비례한다. 시험의 복잡도가 낮고, 시험 기간이 짧을 수록 관리가 쉬운 반면 시험 계획에서 목적하지 않은 데이터를 이용하기 어렵다. 반대로 시험 복잡도가 높고 시험기간이 길면 시험 관리가 어렵지만 센서의 수량 증가로 수많은 데이터를 확보하는 것이 가능하기 때문에 시험 관리 방안 또한 다양하게 사용할 수 있다. 이러한 시험들 중 전기체 내구성 시험은 높은 복잡도를 가지고 장기간 데이터를 얻어야 하는 시험으로 시험기간 동안 여러가지 제약사항에 의해 셋업이 수시로 해체와 설치가 반복되어야 하는 상황이 필연적으로 발생한다.

하지만 인적 오류나 장치 류의 노후화로 셋업 오류가 생기거나 애초에 계획했던 목적과 다른 거동을 나타내는 장치들이 발생할 수 있기 때문에 셋업 건전성을 확인하는 방안이 필요하다. 전기체 내구성 시험 셋업 건전성 확인 방안으로 하중과 반력을 이용한 방법을 구상하였다. 각 하중 조건(Load Case)에서 측정된 반력을 이용하여 셋업 건전성을 평가하는 방법을 시도하였으나 계속 움직이는 시험체와 하중 부가장치로 인해 각 하중 조건에서 측정된 반력을 이용하여 셋업 건전성 평가를 수행하기에는 다수의 알 수 없는 변수들이 존재하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 이를 해결하고 셋업 건전성을 확인하기 위해 전기체 내구성 시험이 블록 단위의 하중 스펙트럼을 반복적으로 부가하여 수행한다는 것에 주목하였다. 각 하중 조건에서 나타나는 알 수 없는 변수를 줄이기 위해 반복되는 하중 블록 전체에 대한 하중 – 반력 데이터에 대해 선형회귀분석을 수행하여 각 반력 위치에서 추세선을 생성하고 블록별 추세선을 비교하여 셋업이 정상적으로 유지되고 있는지 판별하는 방법을 제시한다. 최종적으로는 이를 발전시켜 장기간 데이터 획득이 요구되는 시험들에 활용할 수 있도록 시험 계획단계에서 적용하는 것을 목표로 한다.

[항공2-5 | 11:25]

블록카운팅 기법을 적용한 항공기 구성품 수명 예측: 정영훈 (경상국립대학교), 은성진 (경상국립대학교, (주)테스코), 노건우 (경상국립대학교), 손진일 ((주)테스코), 조은준 (한국항공우주산업), 김정기* (경상국립대학교)

Keywords: Fatigue property, Fractographic analysis, Damage tolerance

항공기 사용 수명이 증가함과 동시에 극한 환경에서의 운용 사례가 증가됨에 따라 장기 운용 중 발생하는 피로 균열의 생성 및 성장에 대한 예측은 매우 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 상기 필요성에 따라 항공기 부품은 손상허용설계에 기반한 균열 분석을 거치고 있으며, 설계가 적절히 적용되었는지 검증하기 위해 운용 중 균열 성장에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 기반 해석적인 접근과 파면 분석을 통한 금속학적 접근을 동시에 수행하게 된다. 두 접근법은 상호 보완적으로 실험적 분석을 통해 획득한 피로균열 성장 선도를 시뮬레이션에서 획득한 피로 균열 속도와 비교하는 것은 실제 균열의 성장 특성에 대한 정확한 결과를 얻어내는 데에 있어 중요하다. 이에 본 연구에서는 항공기 구조 시험을 중 균열이 형성된 부품의 균열을 실험적으로 분석하였다. 주사전자현미경 (SEM) 고배율 분석을 통한 파면의 striation 패턴과 주기적인 반복 하중에서 높은 인장 하중이 작용하는 지점들과의 상관관계를 확인한 결과, 반복 하중이 규칙적으로 형성되는 블록 길이를 확인할 수 있었다. 상기 각 블록 간의 간격을 활용해 균열 성장 선도를 획득한 결과, 부품 내 피로 균열은 32번째 블록 이전에 생성되었으며, 36번째 블록까지 성장하여 최종적으로 우측면에 4.71 mm, 좌측면에 5.91 mm 길이의 균열로 성장한 것으로 확인하였다. 상기 사례를 통해 항공기 피로 파단에 대한 정밀한 예측과 손상 허용 설계에 기반한 구조체 부품의 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

[항공3-1 | 11:50]

적층 가공 기술을 활용한 인공결함 시편 제작 및 비파괴검사 신뢰성 추정: 구현수 (국방대학교), 권혁준, 김영찬 (공군 항공기술연구소), 이두열* (국방대학교)

Keywords: 적층 가공 기술, 비파괴검사, 컴퓨터 단층촬영, 와전류검사, 모델지원탐지확률

MIL-HDBK-1823A에 따르면, 항공기 구조물의 균열 검사를 위한 비파괴검사의 신뢰성 추정에는 40개 이상의 데이터가 필요하다. 실제 결함 부품을 확보하는 것은 어렵기 때문에, 본 연구에서는 3D 프린팅 기술을 활용하여 표면에 인공결함이 포함된 시편을 2종 제작하였다. 인공결함 시편 제작에는 분말 적층 용융(PBF, Powder Bed Fusion) 방식의 금속 적층 가공 기술을 적용하였으며, 실제 항공기에 많이 사용되는 Al과 Ti 두 종류의 금속을 활용하였다. 결함이 모서리(Edge)와 중앙(Center)에 제작된 시편은 압연 등의 추가 공정을 통해 목표로 하는 균열 열림 변위를 확보하였으며, 파괴 검사 또는 컴퓨터 단층촬영, 와전류탐상검사 등의 비파괴적인 방법을 통해 특성화하였다. 이후 추가적인 데이터 확보를 위해 모델지원탐지확률(MAPOD, Model-assisted Probability of Detection) 방법을 적용하였다. 이 방법을 활용하여 물리적 실험을 기반으로 매개변수를 조정한 시뮬레이션을 수행함으로써 데이터 확보의 제약을 해결하였고, 결함 검출 능력을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 비파괴검사의 신뢰성 평가와 구조신뢰성분석에 활용될 수 있으며, 특히 실험 데이터 확보의 어려움을 극복하고 신뢰성 높은 결함 검출 모델을 구축하는데 기여할 것으로 기대된다.

[항공3-2 | 12:05]

ML-DIC 이미지를 이용한 인공지능 기반의 AI 합금 과대하중 시 피로균열전파 거동 분석: 김도현, 최영원, 좌비오, 이승환, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남* (한국재료연구원)

Keywords: 항공재료, 피로균열전파, 가변하중, 과대하중, 기계발광, DIC, CNN

항공기의 성능, 안전성, 내구성, 경제성은 사용되는 구조재료에 크게 의존하며, 이에 따라 항공기 구조 재료는 경량화, 고강도, 피로 저항성 등 다양한 요구 사항을 충족해야한다. 항공기 구조재료는 주로 티타늄 합금, 복합재료, 특수 합금, 알루미늄 합금 등이 사용된다. 특히 7000계 알루미늄 합금은 우수한 강도와 경량성, 뛰어난 피로 수명, 우수한 부식 저항성, 파괴 인성 등의 특성을 가지고 있다. 이러한 알루미늄 합금을 적용한 항공우주 구조물에서는 손상 허용 설계를 바탕으로 피로 균열 전파 특성에 대한 심도 있는 이해가 필수적이다. 이는 구조적 무결성 평가와 개선의 핵심 요소로, 피로 손상 분석 및 평가의 기초를 제공하며 항공우주 구조물의 유지보수 전략 수립에 중요한 역할을 한다. 특히, 항공기 구조물의 장기적 신뢰성을 보장하기 위해서는 균열이 임계 수준에 도달하기 전에 적절한 대응이 필요하며, 이를 위해 정기적인 구조 안정성 평가가 필수적이다. 피로 균열의 초기 단계에서 이를 정확히 감지하고 신속하게 대응하는 것은 사고 예방 및 안정성 향상에 매우 중요하다. 따라서 검출된 피로 균열의 응력 확대 계수와 그에 따른 균열 성장 속도를 종합적으로 평가하여 구조물의 손상 상태를 정밀하게 판단하는 것이 필수적이다. 대부분의 구조물에 작용하는 실제 하중은 일정 하중 피로 시험과 달리 진폭이 불규칙하게 변화하는 변동하중(random loading)이므로, 변동하중 시 판형 금

속에서의 피로 손상 해석을 위해서는 탐지된 피로 균열의 정확한 상태를 파악할 필요가 있다. 이를 위해, 본 연구에서는 기계적 자극을 가할 때 밝은 녹색의 기계 발광(Mechanoluminescence, ML)을 보이는 $SrAl_2O_4:Eu^{2+}$(SAO)와 탄소나노튜브(CNT)를 혼합한 ML-DIC 필름을 이용하여 응력 감지 센서로서의 가능성과 피로 균열 전파 특성 및 과대하중 시 균열 전파의 거동을 정밀하게 분석하고자 하였다. ML-DIC 필름에 포함된 SAO의 ML 특성을 이용하여 극한 환경에서의 균열 탐지와 균열 선단의 정확한 위치 및 균열 길이를 특정하며, CNT를 통해 무작위 패턴을 구현하여 DIC 분석을 수행하였다. 이를 통해 균열 선단의 변형장을 도출하며, 피로 균열 성장률 및 K 값을 유추해 ML-DIC 필름을 이용한 새로운 구조물 안전 진단 시스템을 제안하였다. 또한, 인공지능 모델 CNN(Convolutional neural networks)을 사용하여 새로운 형태의 피로 균열 평가 기법을 제시하였다.

[항공3-3 | 12:20]

ML-DIC 이미지를 활용한 알루미늄 합금에서의 피로 균열 전파의 인공 지능 기반 분석: 최영원, 좌비오, 김도현 (한국재료연구원, 경북대학교), 이승환 (한국재료연구원), 신윤우 (한국재료연구원, 경북대학교), 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남* (한국재료연구원)

Keywords: 기계발광, 피로균열, 알루미늄 합금, 이미지 상관법(DIC), 인공지능

7xxx 계 알루미늄 합금은 뛰어난 강도 대 중량 비율, 우수한 피로 수명, 뛰어난 내식성, 응력 부식 균열 저항성 및 높은 파괴 인성으로 인해 항공 우주 산업에서 널리 사용되고 있다. 알루미늄 합금으로 만든 항공 우주 구조에서는 손상 허용 설계 원칙에 따라 피로 균열 전파 특성을 심층적으로 파악하는 것은 구조물 건전성 확보 면에서 중요하다. 기계 발광(Mechanoluminescence, ML) 재료는 인장, 전단, 압축 등 다양한 기계적 자극이 가해질 때 발광하는 고체 물질로 이루어져 있다. 기계 발광은 응력 및 변형과의 상관관계를 보이며 응력 감지에 활용되어 균열 발생 및 구조적 손상의 실시간 모니터링이 가능한 장점이 있다. 본 연구의 주요 목표는 피로 균열과 관련된 응력 강도 계수(ΔK) 값을 정확하게 추정하여 항공우주 구조물에 대한 예측 유지 관리 전략을 향상하는 것이며, 이를 위해 피로 균열 전파 시험에서 ML-CNT 필름을 활용하여 구조적 구성 요소의 안전 진단 평가에 대한 접근 새로운 방법을 제안한다. CNT에 의해 생성된 무작위 speckle 패턴을 디지털 이미지 상관법 (DIC)을 통해 분석하여 균열 선단의 변형 및 응력 확대 계수(ΔK)를 정량화 하였다. ML 및 DIC 이 기술에서 얻은 응력 및 변형률 시각화 데이터를 활용하여 ΔK 값과 피로 균열 성장률을 예측하기 위한 자동화된 인공지능 모델을 제안하며, 이를 통해 피로 균열을 조기에 발견하고 예후 사고 예방과 안전성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

[항공3-4 | 12:35]

항공용 금속소재의 피로 균열 치유를 위한 펄스전류 인가 공정설계: 홍범락 (한국재료연구원, 부산대학교), 최현성, 석무영, 이동준, 권용남, 박현일* (한국재료연구원)

Keywords: Fatigue crack healing, Electropulsing treatment, Aerospace metallic material, Process design

항공기 구조설계시 주로 적용되는 손상 허용 설계(Damage Tolerant Design) 개념은 작은 결함이나 균열이 있을 때 이를 즉각적으로 수리하지 않더라도 추적 관리하여 안전하게 운용할 수 있도록 하는 설계 방식을 의미한다. 균열을 관리하기 위한 방법으로 용접, 스톱-홀, 접착 패치 기법 등이 연구되어 왔으며, 최근에는 일정한 품질이 유지 가능하고 비파괴적 방법이라는 장점이 있는 펄스 전류를 활용한 균열 치유 기술(Electropulsing treatment, EPT)이 주목받고 있다.펄스전류가 균열부에 인가될 경우 균열선단에서 줄 가열(Joule heating)로 인해 조건에 따라 일부 용융용접 또는 열팽창에 의한 압축응력으로 국부적인 확산접합이 발생할 수 있다. 이러한 기본 메커니즘은 알려져 있으나, 공정조건에 따른 구체적인 치유 메커니즘 규명은 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 EPT 공정의 인가 전류 타입, 최대 인가 전류, 균열 형상 등의 변수들이 균열 치유에 미치는 영향을 분석하고, 그 상관관계를 고찰하였다. 열-전자기-구조를 포함하는 다물리 유한요소 해석을 통해 균열부의 온도 분포와 변형량을 살펴보았고, 공정 변수에 따른 로렌츠 힘의 영향도 분석하였다. 이를 기반으로 EPT 공정을 설계하고 균열치유 시험을 진행하였다. 실험에 사용된 소재는 SUS 321 이며, 5 mm 두께의 ASTM E647 규격 기반 SE(B) 및 M(T) 시편을 가공하여 약 1 mm 길이의 피로 균열을 생성한 후 조건 별 EPT 공정을 수행하였다. 결과적으로, 전류의 파형, 세기, 주기 등의 공정 조건을 조절하여 인가하였을 때, 소재의 열팽창과 로렌츠 힘의 영향 등을 분석할 수 있었고, EPT 공정의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구는 한국재료연구원 기관고유사업(주요사업, PNK9910)의 지원을 받아 수행되었습니다.

이차전지 원료소재
Room 삼다A, 4월 25일

[이차전지1-1 | 09:30]

FeO-rich 슬래그와 용융 Fe-Ni 합금 사이의 황 분배 거동: 라만 분광법을 활용한 구조적 이해: 남세현 (한양대학교), 최준성, 박진균 (포항산업과학연구원), 박주현* (한양대학교)

Keywords: Pyrometallurgy, Desulfurization, Slag, Thermodynamics, Raman spectroscopy

폐 리튬 이온 배터리(SLIB) 건식 재활용 공정에서 슬래그 내의 리튬(Li)과 유가금속(Mn, Co)등을 효과적으로 회수하기 위해 포집 금속으로 ferro-nickel(Fe-Ni) 합금이 활용되고 있다. 그러나 합금 내 불순 원소인 황(S)은 목적 금속과 황화물을 형성하여 금속의 회수율을 저하시킬 수 있다. 따라서 금속 회수율을 높이고 공정 효율성을 개선하기 위해 황 함량의 적절한 관리가 필요하다. 이에 따라 SLIB 재활용 공정에서 형성되는 슬래그 조성이 황의 분배거동에 미치는 영향을 파악하기 위해, 1823 K에서 FeO-SiO_2-MgO-Li_2O-MnO-Al_2O_3 슬래그와 Fe-Ni 합금 간 열역학적 평형 실험을 수행하였다. 또한 라만 분광 분석을 통해 슬래그의 구조적 변화를 분석함으로써, 슬래그 내 황의 분배 메커니즘을 이해하고자 하였다. 실험 결과, FeO/SiO_2 비율과 Li_2O 및 MnO 농도가 증가함에 따라 황 분배비(L_S=(%S)/[%S])는 증가하였으나, Al_2O_3 첨가 시 L_S는 감소하였다. 이는 염기성 산화물 증가로 슬래그 구조의 해리반응(depolymerization)이 촉진되어 자유 산소 이온(O^{2-})이 증가하고, 이에 따라 슬래그의 산소 이온 활동도(basicity, a_O^{2-})가 증가하기 때문이다. 광학염기도 모델(optical basicity model)로 계산한 슬래그의 탈황능(sulfide capacity, C_S^{2-})은 실험 결과와 선형적으로 일치하였으며, 이는 C_S^{2-}의 증가가 L_S의 증가에 기여함을 시사한다. 따라서 라만 분석을 통해 슬래그의 구조적 변화를 실험적으로 확인하고자 하였다. 분석 결과, 현재 슬래그 시스템에서 높은 염기성 산화물 함량으로 인해 [SiO_4] 사면체 구조(800–1200 cm^{-1})가 모두 해리되어 해당 라만 밴드는 관찰되지 않았으며, 대신 중간 주파수 범위(400-800 cm^{-1})에서 [FeO_6] 팔면체 및 [FeO_4] 사면체의 Fe–O stretching vibration에 해당하는 라만 밴드가 관찰되었다. 이는 FeO 및 Li_2O와 같은 염기성 산화물이 높은 함량으로 존재할 경우, [SiO_4] 사면체 구조가 완전히 해리됨을 의미한다. 또한 FeO, Li_2O, 그리고 MnO 첨가 시 [FeO_6]/[FeO_4] 비율이 증가하였으며, 이는 슬래그 내 자유 산소 이온 농도가 증가하면서 다음과 같은 반응을 통해 구조적 변화를 유발했기 때문이다: $[FeO_4]^{5-} + 2O^{2-} \rightarrow [FeO_6]^{9-}$ 결과적으로, 본 연구에서는 라만 분석을 통해 O^{2-} 농도가 증가하면서 슬래그 구조가 변화하며, 이러한 변화가 황 분배비 증가에 기여함을 실험적으로 검증하였다.

[이차전지1-2 | 09:45]

이차전지 상공정 리사이클링 기술 개발: 손현직*, 한상우, 이주승, 이환석, 박중길 (포스코홀딩스미래기술연구원)

Keywords: 리튬이온아치전지, 건식리사이클링, 전기방전, 블랙매스

이차전지 리사이클링은 폐배터리에서 유가금속을 회수하고 이를 재활용 가치가 높은 물질로 전환하는 핵심 기술이다. 특히, 배터리의 주요 원료인 리튬은 앞으로 리사이클링을 통해 확보되는 양이 광석에서 채굴하는 양을 초과할 것으로 전망되며, 이에 따라 폐배터리 자원화를 위한 전략적 접근이 더욱 중요해지고 있다. 또한, 폐배터리 리사이클링 시장 규모는 2023년 약 15조 원에서 2040년에는 300조 원까지 성장할 것으로 예상되며, 이는 산업적·경제적 측면에서 리사이클링 기술의 중요성을 더욱 부각시킨다. 본 발표에서는 리사이클링 상공정 기술 중 리튬이온배터리 리사이클링 공정을 중점적으로 다루며, 친환경적인 방식으로 효율적인 블랙매스를 생산하는 기술을 소개하고자 한다. 특히, 배터리 모듈의 방전 과정은 리사이클링 공정에서 중요한 단계로, 효율적인 전기 방전 기술을 통해 안전성을 확보하고 금속 회수율을 높이는 연구가 필수적이다. 이에 따라, 본 연구에서는 전처리 조건에서 블랙매스의 순도를 향상시키기 위한 프로세스를 진행하였으며, 전기 방전 및 선별 등의 다양한 인자를 고려하여 불순물을 최소화하는 기초 연구를 수행하였다. 따라서, 배터리 방전 및 진단 기술의 개발 현황과 적용 사례를 분석하고, 이를 기반으로 최적화된 공정 방안을 모색한다. 이를 통해 지속 가능한 배터리 재활용 체계 구축을 위한 기술적 방향성을 제시하고, 향후 발전 가능성을 논의하고자 한다.

[이차전지1-3 | 10:00]

Investigation of Li Penetration Mechanism in Sagger Oxides During Cathode Material Calcination: Young-Joon Park, Won-Bum Park (GIFT, POSTECH), Juhun Lee, Jaewon Kim, Inkyung Bae (POSCOFUTUREM), and Youn-Bae Kang* (GIFT, POSTECH, DMSE, POSTECH)

Keywords: LNCM, calcination, sagger corrosion, Li penetration, k-means clustering

The increasing demand for Li-ion battery cathode materials, such as Li-Ni-Co-Mn oxide ($Li(Ni_xCo_yMn_z)O_2$, LNCM), has highlighted the importance of optimizing the calcination process. LNCM is synthesized by high-temperature calcination (800–1000 ºC) of Ni-Co-Mn hydroxide precursor ($(Ni_xCo_yMn_z)(OH)_2$, NCM) with a Li source, such as Li_2CO_3 or LiOH, in a refractory container known as a "sagger". However, the chemical interaction between the Li source and the sagger oxides leads to corrosion, Li loss, and contamination of the cathode by spalling corrosion products, ultimately reducing lifespan and process efficiency of the sagger. Understanding the reaction mechanism and Li penetration behavior is crucial for mitigating these issues. In the present study, the reaction characteristics between Li sources and sagger oxides, including corundum (Al_2O_3), spinel ($MgAl_2O_4$), mullite ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$), and cordierite ($2MgO{\cdot}2Al_2O_3{\cdot}5SiO_2$) was investigated. Calcination experiments were conducted with NCM precursor mixed with Li_2CO_3 and LiOH to compare their reactivity. To quantitatively assess the reaction extent, a k-means clustering algorithm was applied to distinguish the

original oxide from the reacted regions based on BSE imaging and elemental mapping. Additionally, phase identification of reaction layers was conducted using EDS and thermodynamic predictions with thermodynamic calculations. Furthermore, the penetration mechanism of Li during calcination of cathode material was interpreted from two perspectives: (1) Li migration through pre-existing pores in the sagger and (2) direct diffusion of Li into the oxide matrix. The study provides a quantitative index for evaluating the interaction between Li sources and sagger oxides, offering insights for improving the durability and efficiency of saggers in LNCM production.

[이차전지 1-4 | 10:15]

리튬광석 하소 공정 중 로터리 킬른 내부에 생성되는 클링커와 융착물의 생성 메커니즘 규명: 박성환 (한양대학교), 이승석 (포스코 미래기술연구원), 박주현* (한양대학교)

Keywords: 스포듀민, 로터리 킬른, 클링커, 융착물, 맥석 성분

환경 문제와 탄소 중립 목표로 전기차 전환이 가속화되면서, 핵심 부품인 리튬이온배터리(LIB)의 수요 증가와 함께 리튬 수요도 크게 증가하였다. 리튬 함량이 가장 높은 광석(3.7wt% Li)인 스포듀민(spodumene)에서 리튬을 추출하는 과정은 로터리 킬른에서 α-스포듀민을 β-스포듀민으로 변환하는 하소 공정으로 시작된다. 이 과정에서 스포듀민은 약 30% 부피 팽창이 일어나며, 그에 따라 반응성이 증가하여 이후 배소 공정을 통한 리튬 추출 효율이 향상된다. 그러나 하소 공정 중 로터리 킬른 벽면에 ring이라 불리는 융착물이 형성되어 공정 효율성을 저하시킬 뿐만 아니라, 덩어리 형태의 클링커도 형성되는 문제가 발생한다. 이에 본 연구에서는 스포듀민 하소 공정에 사용되는 원료에 대한 분석과, 하소 공정 중 형성된 클링커와 융착물의 사후 분석을 통해 그 생성 메커니즘을 규명하고자 하였다. Rietveld 분석을 통해 원료의 주요 맥석 성분으로 백운모(muscovite), 각섬석(hornblende), 석영(quartz)이 존재하는 것을 확인하였다. 클링커와 융착물의 결정상 분석에서는 β-스포듀민과 석영이 관찰되었으며, 백운모와 각섬석은 확인되지 않았다. 미세구조 분석 결과, 클링커는 스포듀민과 사장석(plagioclase), 휘석(pyroxene), 스피넬(spinel)이 K-장석(feldspar) 조성의 유리상(glassy phase)에 의해 응집된 형태로 존재하며, 다공성 구조를 가진다. 반면, 융착물는 스포듀민과 휘석, 스피넬이 K/Ca-장석 조성의 유리상에 의해 응집된 형태로 존재하고, 클링커에 비해 조밀한 구조를 나타냈다. 하소 공정에서 로내 온도가 증가함에 따라, 백운모의 부분용융으로 K-장석 조성의 유리상이 형성되며, 각섬석의 분해로 사장석과 휘석, 스피넬이 생성된다. 이후, 사장석이 K-장석 조성의 유리상으로 용해되면서 K/Ca-장석 조성의 유리상이 형성되고, 이로 인해 유리상의 양이 증가하게 된다. 증가한 유리상이 로터리 킬른 벽면에 부착되면서 융착물을 형성하는 것으로 해석된다. 본 연구를 통해 스포듀민 광석의 하소 공정 중 클링커와 융착물 형성 메커니즘을 규명함으로써, 공정 최적화를 위한 기초 데이터를 제공할 수 있으며, 공정 효율을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

[이차전지 2-1 | 10:40]

메탄술폰산과 말릭산을 이용한 리튬이차전지 양극활물질의 전략금속 침출 및 메커니즘 분석: 김유진 (서울과학기술대학교), 김재연 (한국재료연구원), 변재원* (서울과학기술대학교)

Keywords: 배터리 재활용, 리싸이클링, 양극재, 메탄술폰산, 침출 메커니즘

전기차와 리튬이차전지 수요 증가로 양극활물질의 전략금속 회수 기술이 중요해지고 있다. 현재 황산 기반 습식 침출 공정이 주로 사용되지만, 폐수 및 유독 가스 배출로 인한 환경 문제가 있다. 이에 반해 유기산은 생분해성이 뛰어나 친환경 침출제로 주목받고 있으나, 낮은 침출 효율과 높은 비용으로 인해 상용화에 한계가 있다. 본 연구에서는 메탄술폰산(Methaensulfonic acid, MSA)과 말릭산(DL-malic acid, MA)을 혼합하여 리튬이차전지의 양극활물질인 Li[Ni0.6Co0.2Mn0.2]O2(NCM622)를 효과적으로 침출하는 MSA-MA 혼합 침출 시스템에 대해 연구하였다. MSA-MA 침출 시스템은 최적 조건에서 리튬 97.48%, 니켈 92.53%, 망간 94.13%, 코발트 95.09%를 성공적으로 침출하였다. 침출 메커니즘을 규명하기 위해 X선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 분석을 수행하였다. 말릭산이 금속 이온과의 강한 착화력으로 환원제 역할을 수행하며, MSA가 저산화 상태의 금속 용해를 촉진하여 시너지 효과를 통해 침출 효율을 향상시키는 것이 확인되었다. MSA-MA 혼합 침출 시스템의 NMC 용해 거동은 아브라미 방정식(Avrami equation)을 통해 설명되었다. Li, Ni, Mn, Co의 활성화에너지는 각각 60.03, 72.73, 80.53, 109.28 kJ/mol로 계산되었다. MSA-MA 침출 시스템의 경제성은 실험실 수준에서 침출제 및 공정 비용을 기준으로 다양한 유기산 및 기존의 침출제인 황산과 비교되었다. 침출액 내의 전이금속과 리튬 이온이 각각 전이금속 수산염(Oxalate, MC2O4·2H2O), 탄산리튬(Li2CO3)으로 회수되었다. 전이금속 수산염과 탄산리튬은 높은 온도에서 고상반응을 통해 양극활물질로 재합성될 수 있다. 이러한 전략을 통해, MSA-MA 혼합 침출 시스템을 이용하여 배터리 양극활물질은 성공정으로 재활용 및 재합성될 수 있을 것으로 사료된다.

[이차전지 2-2 | 10:55]

Investigation of Moisture-Induced Degradation Mechanism in Sulfide Solid Electrolytes and Reviving Strategies for Electrode Interface Stabilization: Yujeong Hwang, Hwiho Kim, and Jongwoo Lim* (Seoul National University)

Keywords: All-solid-state batteries, Moisture-tolerance, Ionic conductivity, Sulfide solid electrolytes, Argyrodite

Inorganic sulfide-based solid-state electrolytes (SSEs) are critical for enhancing the ionic conductivity. However, these SSEs suffer from interfacial chemical instability, reacting with even trace amounts of moisture to produce toxic hydrogen sulfide (H_2S) gas and other by-products. This sensitivity leads to compositional changes at SSE particle interfaces and significant performance degradation through additional parasitic reactions. Despite the critical impact of moisture-induced degradation at the electrode level, particularly with cathode materials like $LiNi_xCo_yMn_zO_2$ (NCM), systematic studies under practical conditions, especially those focusing on electrode-

level interactions rather than SSEs themselves, remain scarce, leaving key mechanisms inadequately understood. In this study, we elucidate the moisture-induced degradation mechanisms of the sulfide electrolyte Li_6PS_5Cl (LPSCl) within NCM-SSE composites by employing synchrotron-based high-resolution imaging and advanced X-ray absorption techniques. Contrary to previous reports that emphasized gaseous by-products, our findings reveal that moisture exposure leads to the formation of solid-phase reductive products that attack active NCM materials at the electrode level, resulting in significant spinel-like phases on the surfaces of NCM particles. Quantitative depth profiling demonstrates severe degradation near the electrolyte layer, with the reduction of cathode particles confined to their surfaces, suggesting a limited overall impact. Furthermore, we show that subsequent vacuum heating effectively removes surface moisture and reductive by-products. By flowing oxygen gas at a constant rate during the vacuum annealing process, residual materials undergo oxidation and oxygen substitution occurs at sulfur sites in the LPSCl lattice, forming stable surface layers that restore lithium ion conductivity in the sulfide SSE. These mitigation strategies, including O_2 annealing with vacuum treatments, not only restore the ionic conductivity of the degraded SSE but also prevent the degradation of NCM when combined as a composite electrode. Our study provides a deeper understanding of the electrode-SSE interface chemistry and offers practical solutions for improving the durability and efficiency of solid-state energy storage systems.

이차전지2-3 | 11:10]

Novel Surface Activation Treatment for Enhanced Direct Bonding Between Aluminum 8079 and Cast Polypropylene using Triazine Derivatives and their Mixtures: Emmanuel Appiah, Kim Jeoung Han*, Jin Woong Park, Byoung Jun Han, and Jung Hyun Kang (Hanbat National University, Materials Science and Engineering)

Keywords: Triazine Derivatives, Environmental Resilience, Direct Adhesion, Tensile Strength

The growing need for precise and reliable adhesions in electronic applications has increased interest in studying and developing interface bonding and direct adhesion between different materials. This study focuses on a direct adhesion method for bonding polymer and metal using triazine derivatives or their mixtures for developing lithium-ion battery pouches. In this research, cast polypropylene (CPP) and aluminum (Al) 8079 are bonded polymer and metal, respectively. A comparative analysis was conducted to assess the impact of the individual triazines on the bonding strength of Al-CPP. The selected triazines were mixed with other chemicals and used for bonding. The results showed that the individual triazines had a limited effect on the initial tensile strength of the Al-CPP bonding, with a maximum of 22MPa. In contrast, their mixtures had a stronger effect, reaching approximately 30MPa. These effects were also evident in various environmental resilience tests, such as humidity and thermal shock, where the mixtures maintained higher tensile strengths. The surface characteristics of the aluminum before and after the triazine treatment at the nanoscale were studied using Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), contact angle analysis, and Fourier Transform Infrared (FTIR) analysis. The SEM analysis revealed the formation of nanopores with diameters ranging from 25-30nm on all the treated aluminum samples, aiding in mechanical adhesion. XPS analysis indicated that the triazines formed covalent bonds on the aluminum, enabling molecular adhesion with the polymer matrix.

[이차전지2-4 | 11:25]

리튬 이차전지용 실리콘 음극재를 위한 Si-Al-Ti-Fe 합금 설계 및 미세조직·전기화학적 특성 평가: 김지용 (인하대학교), 서종민, 양정윤, 석은 (강원대학교), 김상욱 (로터스머티리얼즈), 정구환* (강원대학교), 성재욱*, 현승균* (인하대학교)

Keywords: 리튬 이차전지 음극재, 실리콘 합금, 금속간 화합물, 전기화학적 성능, 미세조직 분석

탄소계 음극재는 372 mAh/g의 낮은 이론 용량을 가지며 이를 극복하기 위해 높은 이론 용량을 제공하는 실리콘(Si) 음극재가 주목받고 있다. 그러나 Si는 충·방전 과정에서 발생하는 부피 팽창으로 인해 구조적 안정성이 저하될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 활성 Si와 비활성 매트릭스로 구성된 합금 구조가 주요 연구 대상으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 리튬 이차전지의 고용량 음극 소재로 활용하기 위해 Si-Al-Ti-Fe 합금을 설계하였다. 그러나 초기 설계된 Si-Al-Ti 합금에서는 리튬 삽입 및 탈리 과정 중 성능 저하를 유발하는 Al 단일상이 존재함을 확인하였다. 이를 해결하기 위해 Fe를 첨가하여 Al과 금속간 화합물을 형성하도록 유도하였다. Fe 첨가를 통해 Si-Al-Fe 금속간 화합물인 Al_3FeSi가 형성되면서 Al 단일상의 생성을 억제하였고 동시에 Si 결정립이 미세화됨을 확인하였다. 또한 Al-Ti 비율과 Fe 첨가량을 조절하여 미세조직 및 전기화학적 성능 변화를 분석하고 이를 바탕으로 최적의 합금 조성을 도출하였다. 미세조직은 FE-SEM, TEM, XRD로 분석하고 전기화학적 특성은 coin cell로 평가하였다. 그 결과 개발된 합금은 높은 초기 비용량과 우수한 사이클 유지율을 나타내었으며 합금 조성이 미세조직과 전기화학적 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

에너지재료
Room 삼다B, 4월 25일

[에너지1-1 | 09:00]
Facet Modulation of Cu_2O Nanoparticles for Selective CO_2 Reduction: Dong-Hyun Shin (Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology) and Dae-Hyun Nam* (Korea University)
Keywords: CO2RR, Cu2O Nanoparticle, High-index Facet, Metal Nanocatalyst

Electrochemical CO_2 reduction reaction (CO_2RR) has emerged as a promising approach to mitigating carbon emissions while producing valuable carbon-based chemicals. Among various catalytic materials, Cu-based catalysts are particularly attractive due to their ability to facilitate C–C coupling, enabling the formation of C_2+ products. In particular, Cu_2O nanoparticles have demonstrated high C_2 selectivity, attributed to their large surface area and abundant active sites. Extensive research has investigated the catalytic activity of low-index-facet Cu_2O nanoparticles, with various applications explored to enhance performance and stability. In this study, we focus on facet engineering to control product selectivity in CO_2RR. High-index facet star-like Cu_2O nanoparticles (332) were synthesized and systematically compared with low-index facet Cu_2O nanocubes. Structural differences and their influence on catalyst reconstruction during CO_2RR were analyzed to gain insights into the relationship between facet structure and product selectivity. These findings contribute to the fundamental understanding of Cu_2O-based catalysts and provide a framework for designing more efficient CO_2RR systems.

[에너지1-2 | 09:15]
Ligand-Modified Cu Sulfide Catalysts for Selective CO_2 Reduction: Seo-June Park (Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), Jeong-Gyu Lee (Dongguk University), Seolha Lim (Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), Min-Jae Choi* (Dongguk University), and Dae-Hyun Nam* (Korea University)
Keywords: CO2RR, Ligand, Reconstruction, Faradaic Efficiency

The electrochemical carbon dioxide (CO_2) reduction reaction (CO_2RR) is a technology that utilizes renewable energy to convert CO_2 into high-value hydrocarbons, contributing to carbon neutrality by mitigating CO_2 of the main causes of global warming. Among metal catalysts for CO_2 reduction reaction (CO_2RR), Cu uniquely facilitates the formation of C_{2+} products with higher energy density and economic value. During CO_2RR, Cu undergoes dynamic structural reconstruction, resulting in a phase transition from its initial state to intermediate configurations. Therefore, precise control over the reconstruction of Cu during CO_2RR is crucial for optimizing catalytic performance. This research investigates the effect of ligand length modification on Cu sulfide reconstruction and its influence on CO_2RR selectivity. Among ligand length, 3 types of catalysts were synthesized and classified as MUA, MOA and MPA, from longest to shortest. We measured CO_2RR performance of MUA, MOA and MPA. At -0.85 V (V vs. RHE), MPA achieved a C_{2+} Faradaic efficiency (FE) of 51.8% and a partial current density of 280 mA/cm^2, whereas MUA exhibited an FE of 24.9% and a partial current density of 103 mA/cm^2 under the same voltage condition. This indicates that MPA has more than twice the C_{2+} selectivity compared to MUA at the same potential, and in terms of partial current density, it demonstrates nearly 2.8 times higher performance. In MPA, the C_{2+}/C_1 ratio is approximately 3.08, which is about 5.15 times higher than that in MUA. Operando Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS) data reveal that as the ligand length decreases, Cu coordination number rises. It can be shown that modified short ligand catalyst can control Cu reconstruction. High coordinated Cu enhances C_{2+} selectivity due to activated C-C coupling. In conclusion, this study demonstrates that Cu reconstruction can be controlled by ligand length, thereby tuning the product selectivity in CO_2RR.

[에너지1-3 | 09:30]
원자 단위 촉매를 활용한 전기화학적 탄소 포집 용액 전환 시스템: 최현욱 (한국과학기술원), 송학현, Carlos A. Fernández, Po-Wei Huang, Marta C. Hatzell* (조지아 공과 대학교), 오지훈* (한국과학기술원)
Keywords: 이산화탄소 전환, 탄소 포집 및 전환, 단일원자 촉매, 중탄산염 전환 기술, 양극성 전해막

전기화학적 CO_2 환원 반응(CO_2RR)은 포집된 CO_2를 고부가가치 화합물로 전환할 수 있는 유망한 기술이다. 기존 가스상 CO_2 전해 시스템은 원활한 CO_2 공급을 강점으로 활발히 연구되고 있지만, CO_2 활용 효율이 최대 50% 이하로 감소하고, 침전 형성으로 인해 장기 안정성이 저하되는 문제가 있다. 이에 대한 대안으로, 이중층막(BPM) 기반 중탄산염 전해 셀이 개발되었다. 이 시스템은 직접공기포집(DAC) 기술과 연계하여 CO_2를 중탄산염 상태로 포집한 후 전기화학적으로 환원할 수 있으며, 기존 CO_2 가스 전해 셀보다 공정이 단순하여 경제적 이점이 크다. 그러나 BPM 기반 전해 셀에서는 촉매층과 BPM 인터페이스에서 발생하는 산성 환경이 수소 발생 반응(HER)을 촉진하여 $CO_{22}RR$의 선택성을 저해하는 문제가 있다. 본 연구에서는 Ni 단일원자 촉매(Ni-SAC)를 환원 전극으로 적용하여 기존 Ag 전극 대비 CO_2RR 성능을 획기적으로 향상시켰다. Ni-SAC 전극은 기체 확산 전극(GDE) 시스템에서 산성 환경(pH ≈ 2)에서도 높은 활성을 나타내었으며, HER을 효과적으로 억제하면서 CO_2RR의 선택성이 높음을 확인하였다. 또한, 기체상 CO_2를 지속적으로 중탄산염 전해질에 공급하여 반응성 탄소 용액을 재생성함으로써 시스템을 정상 상태(steady state)로 유지할 수 있었다. 최적화된 Ni-SAC 전극과 운영 조건에서, -3.7V에서 93% 패러데이 효율(FE)과 -186 mA cm^{-2}의 CO 부분

전류 밀도를 18시간 이상 유지하는 성과를 달성하였다. 이는 기존 기체상 CO_2 전해기술에 비해 높은 안정성과 Ag 기반 중탄산염 전해 기술과 비교하여 선택성에서 현저한 개선을 보인 결과이다. 이 연구에서는 중탄산염 전해와 기존 가스상 CO_2 전해 시스템을 비교 분석하였으며, 생성물 선택도, 구동 전압, 에너지 효율, 생성물 내 CO 농도, 장기 안정성을 종합적으로 평가하였다. 또한, 탄소 배출 강도와 에너지 요구량을 비교하여 BPM 기반 전해 셀의 실용 가능성을 검토하였다. 본 연구는 기존Ag 기반 전극을 Ni-SAC으로 대체함으로써 CO_2RR 성능을 극대화할 수 있음을 입증하였으며, 탄소 포집과 전환을 통합할 수 있는 새로운 전해 시스템 개발의 방향을 제시한다. 이는 지속 가능한 탄소 중립 기술 발전에 기여할 것으로 기대된다.

[에너지1-4 | 09:45]

산성 환경에서의 효율적인 이산화탄소 환원 촉매 및 시스템: 하태현, 오지훈* (한국과학기술원(KAIST))

Keywords: 전기화학적 이산화탄소 환원, Nickel single atom catalyst, zero-gap electrolyzer, diaphragm, 산성

본 연구는 현대 산업 사회에서 증가하는 화석 연료 사용에 따른 이산화탄소 배출 문제를 해결하기 위한 전기화학적 CO_2 환원(CO_2RR) 전략을 다룬다. 기존의 알칼리·중성 환경에서는 전기화학 반응 중 생성되는 OH^-가 CO_2와 반응하여 bicarbonate 및 염 형성을 유발, CO_2 crossover와 전해조 내 염 침전 문제로 이어지며, 이는 선택도와 시스템 안정성을 크게 저해하는 한계점으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 산성 환경에서의 CO_2RR을 통해 이러한 문제들을 극복하고자 하였다. 산성 조건에서는 bicarbonate가 열역학적으로 형성되기 어렵고, 널리 사용되는 Nafion 멤브레인을 활용할 수 있어 내구성과 이온 전도성 면에서 장점을 보인다. 먼저, pH에 따른 CO_2RR 및 수소 발생 반응(HER) 특성을 상용 은 촉매와 Nickel 기반 single-atom catalyst (Ni SAC)를 비교 분석하였다. 실험 결과, CO_2 환원 반응은 pH에 크게 의존하지 않는 반면, HER은 전위와 pH에 따라 다르게 나타났으며, 특히 Ni SAC의 경우 낮은 overpotential 내에서 HER이 효과적으로 억제되면서 CO_{222}RR의 선택도가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 이러한 촉매 성능을 바탕으로, 상용화에 적합한 zero-gap electrolyzer 시스템에 적용하였다. 전통적인 cation exchange membrane(CEM) 대신, 다공성 구조의 diaphragm을 도입하여 이온의 자유로운 이동과 charge balance 유지를 도모함과 동시에 염 형성 및 CO_2 crossover 문제를 효과적으로 억제하였다. 실험적으로 전류밀도가 증가함에 따라 기존 시스템에서 나타나는 선택도 저하 및 flow rate 감소 문제를 개선하여, 최대 약 88%의 CO Faraday 효율과 안정된 반응 조건을 확보하였다. 또한, 장시간 운전 테스트에서 diaphragm을 사용한 시스템은 염 침전 없이 지속적인 성능 회복과 안정성을 보였으며, CEM 및 BPM과의 비교 실험에서도 우수한 전류밀도 및 선택도를 나타냈다. 이와 같이 본 연구는 산성 환경에서의 CO_{22} 환원 반응 및 Ni SAC를 통한 촉매 활성 증진, 그리고 diaphragm 도입을 통한 시스템 안정성 향상 전략을 제시하며, 향후 대면적화 및 상용화에 기여할 수 있는 전기화학적 CO_2 활용 기술의 발전 가능성을 입증한다.

[에너지2-1 | 10:10] 초청강연

Three-Dimensionally Nanofabricated Ir Nanoarchitecture Electrode for Highly Efficient and Robust PEMWE: Jong Min Kim* (Korea Institute of Science and Technology)

Keywords: Ir nanoarchitecture, nanotransfer printing, polymer electrolyte membrane water electrolysis

Polymer electrolyte membrane water electrolysis (PEMWE) is attracting significant attention due to its high efficiency, fast response rate, and potential for downsizing. However, the Ir-based electrodes used in the oxygen evolution reaction of PEMWE require a large amount of expensive Ir and suffer from low durability, posing challenges to PEMWE commercialization. Recently, various high-performance Ir nanoparticle-based electrode materials have been reported to reduce Ir usage in PEMWE, but there have been fundamental limitations in simultaneously enhancing durability while reducing Ir loading. To overcome these limitations, we applied a novel nanofabrication technique known as nanotransfer printing, which is used in semiconductor processes, to electrode manufacturing. This allowed us to produce 3D Ir nanoarchitecture electrodes with precisely controlled nanostructures, minimizing Ir usage while achieving excellent durability. These 3D Ir nanoarchitecture electrodes, free of ionomers and capable of facile oxygen bubble transport, demonstrated rapid bubble detachment characteristics on the electrode surface, resulting in a 47% performance enhancement despite 50 times lower electrode loading than conventional nanoparticle-based Ir electrodes. Additionally, the absence of ionomers eliminates ionomer corrosion, and the suppression of large bubble formation reduces stress within the electrode, contributing to excellent durability even under extremely low Ir loading conditions. This semiconductor process-based electrode manufacturing technique, i.e., nanotransfer printing, is expected to present a new paradigm in PEMWE electrode manufacturing technology.

[에너지2-2 | 10:35]

Silicon photocathode with vertically aligned TiO_2 nanorods and CO catalyst for enhancing Photoelectrochemical nitrate reduction to ammonia: Lee Enok and Sanghan, Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology)

Keywords: Photoelectrochemistry, Nitrate reduction reaction, Silicon photocathode, E-beam evaporation

Ammonia (NH_3) is a promising hydrogen carrier due to its high hydrogen content (17.6 wt%) and ease of liquefaction. However, conventional NH_3 production via the energy-intensive Haber–Bosch process significantly contributes to global energy consumption and CO_2 emissions. In this background, the photoelectrochemical nitrate reduction reaction (PEC NO_3^-RR) offers a sustainable alternative for green ammonia synthesis. PEC NO_3^-RR not only utilizes solar energy to reduce nitrate for ammonia production but also facilitates the purification of industrial and agricultural wastewater containing nitrate pollutants. Nevertheless, the commercialization of PEC NO_3^-RR remains challenging due to its low ammonia yield and poor selectivity. The complex multi-electron transfer process leads to the

formation of various intermediates, which hinder the efficient conversion of nitrate to ammonia. Silicon (Si) is a promising material for highly efficient photocathodes due to its abundance, narrow bandgap ($E_g \approx 1.1$ eV), broad solar absorption, excellent charge carrier mobility, and long carrier diffusion length. However, it is hard to optimize light harvesting due to poor catalytic activity, chemical contamination in liquid electrolytes, and unnecessary light reflection. To address these challenges, an in-sequence decoration of TiO_2 nanorods and cobalt (Co) catalysts on p-Si was employed using an e-beam evaporator. TiO_2 nanorods were precisely deposited via the Glancing Angle Deposition (GLAD) method. The vertically aligned TiO_2 nanorods enhance the stability of Si photocathodes in alkaline electrolytes and improve light absorption by reducing surface reflectivity. Furthermore, the decorated Co catalyst exhibited outstanding catalytic activity for NO_3^-RR. The Co/TiO_2 nanorods/p-Si photocathode exhibited a lower onset potential of 0.15 V_{RHE} and achieved a high photocurrent density of -30.33 mA cm^{-2}, a faradaic efficiency of 84.8% and an ammonia yield rate of 2002 μg $h^{-1}cm^{-2}$ at -0.2 V_{RHE} measured in an electrolyte solution of 1 M KOH + 0.1 M KNO_3. We expect our study to pave the way for the development of a Si-based photocathode for enhancing PEC NO_3^-RR by improving both activity and selectivity, leading to high yield ammonia production.

[에너지2-3 | 10:50]

탠덤 반응 기반 이중원자촉매를 이용한 전기화학적 암모니아 합성: 서정원, 최현욱, 공유진, 오지훈* (한국과학기술원)

Keywords: 전기화학, 질산염 환원, 암모니아 합성, 단일원자촉매, 이중원자촉매

질산염 (NO3-)의 전기화학적 환원을 통한 암모니아 (NH3) 생성은 탄소 중립 에너지원 및 수소 운반체와 같은 환경 응용 분야에서 에너지 집약적인 하버-보쉬 공정의 대안이 될 수 있는 유망한 지속 가능 합성 방법이다. 그러나 높은 과전압과 선택성의 한계로 인해 높은 에너지 효율을 달성하는 데에는 여전히 도전 과제가 존재한다. 이러한 촉매적 한계는 이종 활성 부위에서 연속적인 반응이 진행되는 탠덤 촉매 반응을 통해 극복할 수 있으며, 탠덤 촉매 반응의 증폭을 위해서는 중간체 NO2-의 전달이 원활하게 촉진되어야 한다. 이에 본 연구에서는 원자 단위의 활성 부위를 활용한 이중원자 촉매 구조를 도입하여, 활성 부위 간 거리를 최소화함으로써 촉매 간 상호작용을 극대화하고 연속 반응 경로의 효율성을 향상시켰다. 따라서 본 연구에서는 탄소 블랙 지지체를 둘러싼 탄소 층에 고르게 분산된 코발트 및 구리 활성 부위를 고정한 코발트-구리 이중원자 촉매를 제시하며, 이 촉매는 이종 활성 부위 간의 상호작용으로 인한 시너지 효과 덕분에 낮은 전위(-0.3 V vs. RHE)에서 91.2%의 높은 NH3 페러디이 효율을 보인다. 본 촉매는 대량 합성이 가능한 바텀-업 방식의 리간드 열분해 공정을 통해 합성되었으며, 이 공정은 촉매의 균일한 분산과 높은 활성 부위 노출을 보장한다. 전기화학적 분석 결과, 코발트-구리 이중원자 촉매 내 구리 원자 활성 부위는 우선 NO3-를 NO2-로 전환시키는 경로를 촉진하고, 이후 코발트 원자 활성 부위가 NO2-를 NH3로 전환시키는 반응을 촉진한다. 이러한 순차적 전기환원 메커니즘은 코발트와 구리 활성 부위 각각의 반응속도 결정 단계를 우회함으로써 전체 반응 에너지 장벽을 낮추고, 스케일링 관계의 한계를 극복한다. 또한, 활성 부위 간 거리가 단축된 이중원자 구조에서 전기촉매 성능 향상 메커니즘이 증폭되어, 개별 코발트 및 구리 단일 원자 촉매 대비 각각 2.3배 및 5.4배 높은 NH3 생산량을 달성했다. 탠덤 촉매 반응 기반의 코발트-구리 이중원자 촉매를 이용하여, 양극막 기반 제로갭 반응기(MEA)에서 100 mA cm-2 전류밀도로 24시간 반응을 통해 0.8 M의 암모니아를 생성하였으며, 이를 통해 2.1 g의 순수 염화암모늄 파우더를 생산하였다

[에너지2-4 | 11:05]

Electrochemical Urea Oxidation Using High-Entropy Transition Metal Dichalcogenide Catalysts: Hyojung Lim, Jinuk Choi, Junho Shim (Korea Institute of Energy Technology (KENTECH)), and Uk Sim* (Korea Institute of Energy Technology (KENTECH), NEEL Sciences, Inc.)

Keywords: Urea Oxidation, Electrocatalysts, Energy Conversion, Transition Metal Dichalcogenide

The urea oxidation reaction (UOR) has emerged as an essential electrochemical process for addressing environmental challenges and advancing energy technologies. Urea, a prevalent nitrogenous pollutant in wastewater, poses ecological risks; however, it offers a sustainable route for hydrogen production and nitrogen recovery. Compared to the oxygen evolution reaction (OER), which requires a high theoretical redox potential of 1.23 V vs. RHE, UOR significantly lowers the energy demand, reducing the theoretical redox potential to as low as 0.37 V vs. RHE. This makes it a highly energy-efficient alternative, facilitating wastewater treatment and contributing to developing sustainable energy systems. Transition metal dichalcogenides (TMDs) have shown promise as catalysts for various electrochemical reactions due to their 2D structure, tunable electronic properties, and cost-effectiveness. However, conventional TMDs often suffer from limited stability and moderate catalytic activity. High-entropy TMDs (HE-TMDs) have been developed to overcome these challenges by incorporating multiple transition metals and chalcogenides to achieve high configurational entropy and synergistic effects. These attributes enhance the electronic structure, active site density, and stability. In this study, we synthesized a novel HE-TMD catalyst, MoCrSnSSe/rGO, via a hydrothermal method. The HE-TMD exhibited a high configurational entropy of 1.78R, ensuring a stable single-phase 2D structure. The reduced graphene oxide (rGO) provided uniform dispersion of the HE-TMD catalyst and facilitated improved electron transfer. The HE-TMD catalyst achieved a low potential of 1.394 V vs. RHE at 10 mA cm^{-2} under 1 M KOH + 0.33 M urea conditions. This performance is comparable to that of the commercial noble metal catalyst Ir/C, showcasing the feasibility of HE-TMDs as cost-effective alternatives. The unique combination of high entropy, 2D structure, and synergistic multi-element effects enables MoCrSnSSe/rGO to exhibit excellent catalytic activity and high stability. This study highlights the potential of HE-TMDs as next-generation catalysts for UOR, contributing to the advancement of energy-efficient and sustainable technologies. Future research will explore the broader applicability of HE-TMD catalysts in other critical electrochemical reactions.

[에너지2-5 | 11:20]

CoNiCuRu on MWCNT Catalyst for Electrochemical Ammonia Synthesis from Nitrate Under Ambient Conditions: Jinuk Choi, Gyoung Hwa Jeong, Hyojung Lim (Korea Institute of Energy Technology), Tae-Hoon Kim (Chonnam National University), Hyunjung Park (Chosun University), and Uk Sim* (Korea Institute of Energy Technology, NEEL Sciences, Inc.)

Keywords: Electrochemical Ammonia Synthesis, Electrocatalyst, Nitrate Reduction Reaction,

Ammonia is a critical material widely used in fertilizers, hydrogen storage, and as a carbon-free fuel. However, its conventional production via the Haber-Bosch process operates under high temperatures and pressures, consuming vast amounts of energy derived primarily from fossil fuels such as coal and natural gas. This process contributes significantly to greenhouse gas emissions, particularly CO_2 and NO_x, posing environmental and sustainability challenges. Electrochemical ammonia synthesis offers a sustainable alternative that operates under ambient conditions and reduces energy consumption and environmental impact. Moreover, utilizing nitrate (NO_3^-) as the nitrogen source enables efficient NH_3 production and mitigates environmental pollution by removing nitrate, a major water pollutant. This study presents a quaternary metallic CoNiCuRu catalyst supported on multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) for electrochemical ammonia synthesis from nitrate under ambient conditions. The CoNiCuRu/MWCNT catalyst exhibits remarkable performance, achieving a high ammonia yield of 11,850 mg h^{-1} cm^{-2} at -0.6 V vs. RHE and an exceptional Faradaic efficiency of over 90% at 0.2 V vs. RHE. The system demonstrates superior energy efficiency of 43.3%, primarily due to suppressing the hydrogen evolution reaction, which theoretically does not occur above 0 V vs. RHE. These findings highlight the potential of the CoNiCuRu/MWCNT catalyst for environmentally friendly and economically viable ammonia synthesis, providing a sustainable pathway to address energy and environmental challenges. Future research will focus on scaling the system for industrial applications and elucidating the precise reaction mechanism.

역학측정 Ⅱ
Room 201A, 4월 25일

[역학2-1 | 09:00]
Dual phase FeMnCoCr계 고엔트로피합금의 상분율에 따른 수소 영향 분석: 정지윤, 정현, 이동현* (충남대학교)
Keywords: 고엔트로피합금, 수소취성, 나노압입시험, 변형-유기 상변태

수소충전소용 금속용기는 수소를 저장하고 공급하는 과정에서 높은 압력 변화와 온도 변화가 수반되어 극한 환경에서의 고강도 및 고인성이 확보된 소재의 사용이 요구되고 있다. FCC 구조의 고엔트로피합금은 수소 취성에 대한 저항성이 높으며 변형-유기 상변태를 도입할 경우, 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있다고 알려져 있다. 이 때, FCC계 고엔트로피합금에서 발생 가능한 변형-유기 상변태로는 HCP 구조의 ε 마르텐사이트와 BCT 구조의 α′ 마르텐사이트이다. 따라서, 변형-유기 상변태 현상이 수소취화 거동에 미치는 영향을 온전히 파악하기 위해서는, 각 변태상에서의 수소 영향을 규명하는 것이 필수적이다. γ 상과 α′ 상 간의 수소 영향 차이는 많은 연구를 통해 밝혀진 바 있으나, γ 상과 ε 상에서의 수소 영향 차이를 비교/분석한 연구는 미비한 실정이다. 이에, 본 연구에서는 γ 상과 ε 상을 지닌 이중상 고엔트로피합금 Fe50Mn30Co10Cr10에 대해 나노압입시험을 수행하여, 각 상의 기계적 특성을 파악하고 사전 수소 장입 방법을 이용하여 각 상에 미치는 수소의 영향을 분석하고자 하였다. Strain rate sensitivity, 수소 확산계수, 수소의 의한 경도변화 등을 분석하여 각 상의 수소 취성 메커니즘을 파악하고자 하였다. 인장시험을 진행하여 합금의 미세조직 변화, 수소 취성 거동을 평가하고 사전 변형에 의한 HCP 분율에 따른 기계적 특성을 분석하고자 하였다. 추가로 XRD를 이용하여 전위밀도를 배제한 HCP 상만의 영향을 분석하고자 하였다.

[역학2-2 | 09:15]
전사 공정을 이용한 메타광소재 기반 디스플레이 소자의 메타패턴 유무 및 공정 온도에 따른 나노스케일 계면 특성 분석: 박연경, 박민지, 신기승 (울산대학교), 정주연, 최준혁, 최대근 (한국기계연구원), 전은채* (울산대학교)
Keywords: 전사 공정, 접합력, 나노스케일, 메타패턴, 공정 온도

그래픽 기술 발전 및 고해상도 촬영 장비의 상용화에 따라 4k~8k 콘텐츠가 보편화되면서 VR, AR장비를 비롯한 마이크로디스플레이의 수요가 커지고 있다. 마이크로디스플레이는 OLEDoS, Micro-LED, LCoS(Liquid Crystal on Silicon) 등의 기술로 구현되며, 그 중 OLEDoS는 높은 응답 속도와 뛰어난 명암비로 주목받고 있다. OLEDoS 제작 과정의 증착 공정 단계에서는 RGB 패터닝을 위해 FMM(Fine Metal Mask)의 사용이 필수적인데, 공정 중 열이 발생하여 FMM의 홀을 초미세 수준으로 제작하는 데 어려움이 존재한다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 다양한 제작 공정 기술이 연구되고 있으며 그중에서 나노스케일 패터닝이 가능한 전사 공정을 활용하여 광학적 위상 조절 능력이 우수한 메타광소재를 제작함으로써 초고해상도를 구현하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 전사 공정은 초미세 패터닝된 전사 몰드 위에 타깃 물질을 증착한 후 전사 기판으로 옮기는 방식으로 진행되며, 이 과정에서 전사 몰드와 전사 기판의 접합력을 제어하는 것이 중요하다. 특히, 타깃 물질의 표면에 나노스케일의 메타패턴을 형성하면 접합 면적이 변하면서 접합력에 영향을 미치며, 공정 중 가해지는 열이 냉각 과정에서 불균일한 잔류응력을 유발하여 접합력을 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전사 몰드와 전사 기판의 접합력에 미치는 메타패턴 유무 및 공정 온도의 영향을 정량적으로 분석하여 전사 공정의 최적화를 목표로 하였다. 나노스케일에서 정량적인 접합력 분석을 하기 위하여 나노스크래치 테스트를 활용하였으며 반경이 1 μm인 conical tip을 사용하여 최대 하중 50 mN를 점진적으로 인가하여 1 mm 수행하며 수평 힘을 측정하였다. 이를 통해 생성한 트랙을 SEM(Scanning Electron Microscope)을 통해 관찰하여 박리 지점을 특정하였으며 정량적 결과와 종합하여 박리가 발생한 시편의 경우 해당 지점의 수평 힘을, 박리가 발생하지 않은 경우 모재 파괴 하중을 인자로 사용하여 접합력을 분석하였다. 또한 이러한 결과를 토대로 최적의 공정 조건을 확립하기 위하여 기계적, 열적 접합 메커니즘 분석을 통해 나노 패턴과 공정 변수의 변화에 따른 접합력 변화 원인을 규명하고자 하였다. 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00408446)

[역학2-3 | 09:30]
Ultra-sensitive Crack Sensors for Measuring Mechano-biological Signals: Do-Hoon Kwon, Jae-Hwan Lee, Yoon-Nam Kim (Seoul National Univ.), Jun-Sang Lee (Purdue Univ.), and Seung-Kyun Kang* (Seoul National Univ.)
Keywords: Ultra-sensitive Strain Sensor, Piezoresistive Sensor, Meta-crack Sensor, Biomechanical Signal Detection

The precise detection of subtle biomechanical signals within the human body is crucial for early diagnosis and monitoring of disease progression. The challenge lies in detecting these biomechanical signals at the initial stage of pathological conditions, as they often result in microscopic local deformations. To accurately detect and track these micro-level deformations, it is crucial to use sensors with exceptional sensitivity capable of operating within an extremely low strain range. Inspired by the structural features of spider legs, we have developed a piezoresistive strain sensor with pre-induced cracks. This innovative sensor can detect nanometer-scale displacements and subtle vibrations, achieving significantly enhanced sensitivity. Notably, the sensor demonstrates a gauge factor exceeding 1300 for strains up to 1.5% with pre-induced cracks, and is capable of tracking minute deformations below 10^-5 strain through the integration of mechanical meta-structures. These advanced sensors enable real-time observation of biological system growth, localized deformations, and mechano-biological data such as cerebral vascular pressure and blood flow distribution, which were previously measurable only

through imaging techniques. By monitoring a wide range of biological signals, we anticipate this sensor to deliver transformative benefits in advancing disease prevention, diagnosis, and treatment.

[역학2-4 | 09:45]

나노스케일 MXene 박막 차폐재의 500시간 지속 굽힘 조건에서 시간 경과에 따른 저항 및 크랙 거동 분석: 박민지, 조아름, 박연경, 박태원, 신기승, 손슬미 (울산대학교), 박재은, 진영호, 권순용 (울산과학기술원), 이정구, 전은채* (울산대학교)

Keywords: MXene, 전자기파 차폐, 굽힘 변형, 저항, 크랙

최근 웨어러블 디바이스의 활용 범위가 의료 및 헬스케어 산업까지 확대됨에 따라, 신체 곡률에 맞는 웨어러블 디바이스에 센서를 삽입하여 사용자의 건강 정보를 측정하는 기술이 주목받고 있다. 이러한 웨어러블 디바이스로 정확한 건강상태를 진단하기 위해서는 전자기파 간섭 (Electromagnetic Interference, EMI)을 최소화하고 전기적 성능을 안정적으로 유지해야 한다. 이에 두께가 얇고 유연한 전자기파 차폐재인 MXene을 적용하는 연구가 이루어지고 있다. MXene은 전이금속 탄화물 기반 소재로, 1 mm 이하의 박막 형태로 전자기파를 흡수하여 차폐할 수 있으며 반사 기반 차폐재 대비 2차 간섭이 적다는 장점이 있다. 그러나 웨어러블 디바이스 내부에서 MXene 차폐재는 지속적인 굽힘 변형을 받게 되며, 이로 인해 표면에 크랙이 발생하고 저항 변화가 나타나 차폐 성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 MXene 박막을 500시간 동안 굽힘 상태로 유지하면서 특정 시간마다 저항 변화를 측정하고, 표면 상태를 관찰하여 성능 변화를 분석하였다. PET(Polyethylene Terephthalate) 기판 위에 Ti_3C_2을 약 40 nm 두께로 spray coating하여 시편을 제작하였으며, 굽힘고정장치를 사용하여 굽힘 반지름 5 mm로 고정시킨 상태에서 멀티미터를 이용하여 저항 변화를 측정하였다. 또한, SEM(Scanning Electron Microscope)에서 사용 가능한 굽힘 지그를 활용하여 크랙의 폭과 밀도를 정량적으로 분석하였다. 실험 결과, 초기 굽힘 상태에서는 저항이 비교적 급격히 증가하였으며 일정 시간 경과 후에는 더 이상 저항 변화가 발생하지 않고 일정한 높은 저항값을 유지하는 것으로 나타났다. 이는 초기 크랙 형성으로 인해 전기의 흐름이 변화하였다가 추가적인 크랙 발생이 점차 감소하면서 저항이 임계값에 도달한 것으로 판단하였다. 이를 통해, MXene 박막 차폐재는 초기 굽힘 변형에서 급격한 전기적 특성 변화가 발생하지만, 일정 시간이 지나면 표면의 크랙 변화가 최소화되며 차폐성능이 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다. 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00408180)

[역학2-5 | 10:00] 초청강연

Micromechanical Properties of Additively Manufactured Copper Microarchitectures under Extreme Loading Conditions: Sung-Gyu Kang* (Gyeongsang National University)

Keywords: Copper, Micromechanics, Strain rate, Temperature, Localized electrodeposition

The intrinsic mechanical properties of metals vary significantly with environmental conditions. For instance, high strain rates (1000 s^{-1}) can substantially increase metal strength due to a viscous drag effect on dislocations, while cryogenic temperatures reduce stacking fault energy, promoting the formation of deformation-induced nanotwins. However, the deformation behavior and micromechanical properties of metallic materials at nano- and micro-scales under these conditions remain largely unexplored. In this study, we systematically examine the deformation behavior and micromechanical properties of copper micropillar across six orders of magnitude in strain rates (0.001 to 100 s^{-1}) at two distinct temperatures: room temperature (RT, 25ºC) and cryogenic temperature (CT, −150ºC). Microstructural analysis confirmed a polycrystalline grain structure with an average grain size of 1.04 μm and a high fraction (86%) of Σ3 boundaries in the micropillars. In situ SEM compression tests revealed pronounced temperature- and strain rate-dependent deformation behavior. Post-mortem microstructural analysis indicated that plasticity at RT was dominated by dislocation slip, whereas at CT, a transition from dislocation slip to mechanical twinning was observed. Finally, we demonstrate that the strain rate- and temperature-dependent deformation mechanisms of micropillars can account for the complex deformation behavior of a three-dimensional microlattice structure fabricated using the same electrodeposition process. This study provides new insights into the micromechanical robustness and reliability of copper under varying temperature and strain rate conditions, highlighting the potential of the localized electrodeposition process for advanced electronic devices.

[역학3-1 | 10:35] 초청강연

나노카드보드 구조의 역학적 특성과 공중 부양 장치로의 활용: 김종형* (국립부경대학교), Benjamin Schafer, 황경석, Joost Vlassak (Harvard University)

Keywords: 나노격자구조, 강성, 나노압입시험, 유한요소해석, 박막소자

Nano-cardboard 구조는 두 개의 면판이 속이 빈 튜브형 지지대(리가멘트)로 연결된 초경량 셸 구조이다. 전적으로 두께 100 nm 이하의 박막으로 제작되며, 독특한 기하학적 설계를 통해 밀도가 5–20 kg/m^3에 불과하면서도 동일한 밀도의 에어로겔이나 나노래티스보다 강성이 10배 이상 높다. 또한, 나노래티스와 유사한 탄성 변형 특성을 가지며, 에어로겔과 유사한 낮은 열전도도를 보인다. 특히, 나노-카드보드는 광영동(photophoretic) 힘에 의해 공중 부양이 가능하여, 센서 기판이나 지구공학적 응용에 활용될 수 있다. 본 연구에서는 나노-카드보드 구조를 신속하고 저비용으로 대량 제작할 수 있는 공정을 개발하였다. 저렴한 실리콘 웨이퍼를 활용하여 딥 리액티브 이온 에칭(DRIE) 공정을 통해 희생 지지대를 형성한 후, 원자층 증착(ALD)을 이용해 균일한 세라믹 박막을 코팅하였다. 이후, XeF_2 가스를 이용하여 실리콘을 제거함으로써, 원래 웨이퍼 크기에 해당하는 세라믹 나노-카드보드 구조를 형성하였다. 이 공정을 통해 다양한 세라믹 및 금속 재료로 나노-카드보드를 제작할 수 있으며, 크기 제한은 웨이퍼의 크기에만 의존한다. 또한, 다양한 주기적 리가멘트 패턴(예: 헥사고날, 바스켓 위브)에 대한 유한요소 해석을 수행하여 나노-카드보드의 강성, 좌굴 하중, 좌굴

이후 거동을 분석하였다. 구조적 최적화를 통해 높은 비강성과 강도를 달성할 수 있음을 확인하였으며, 나노-인덴테이션 실험을 통해 나노-카드보드의 기계적 특성을 검증하였다. 나아가, 나노-카드보드의 변형 거동을 기반으로 광영동 효과를 적용하여 지속적인 부양이 가능한 구조를 제안하였다. 태양광에 의해 내부 온도 구배가 형성됨으로써, 1 sun 이하의 빛 강도에서도 부양이 가능함을 실험적으로 입증하였다. 본 연구에서 개발한 광영 부양 장치는 대기 밀도가 낮아 기존 프로펠러 기반 추진 시스템이 적용되기 어려운 상층 대기 및 화성 환경에서 활용될 가능성이 있다.

[역학3-2 | 11:00]

Investigating the carbon effect on the tensile strength in 6061 aluminum alloy-C thin films: Zion Lee, Hojang Kim, Sunkun Choi, Injong Oh (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Jaehong Park (Hyundai Motors), and Gi-Dong sim* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: 6061 aluminum alloy-Carbon, mechanical properties, thin films, micro-tensile test

6061 aluminum alloy (6061AA) is a heat-treatable Al-Mg-Si alloy known for its excellent formability, corrosion resistance, and moderate tensile strength. This study aims to enhance the strength of 6061AA while maintaining its inherent advantages by fabricating 6061AA-carbon (6061AA-C) thin films through co-sputter deposition of 6061AA and graphite targets. Microstructural analysis showed that the carbon atoms were uniformly distributed within the aluminum alloy matrix through this fabrication technique. Subsequently tensile tests were conducted using a custom-built micro-tensile tester. The 6061AA-C films exhibited an increased tensile strength while maintaining its failure strain compared to pure 6061AA films. However, it was demonstrated that excessive carbon content resulted in a decrease in both tensile strength and ductility. This result can be explained by the different strengthening mechanisms occurring in the co-sputtered 6061AA-C thin films: the aluminum alloy undergoes substitutional solid solution strengthening, while the carbon addition induces interstitial solid solution strengthening and grain refinement.

[역학3-3 | 11:15]

Exploring micromechanical behavior of laser-powder bed fusion processed multi-layered medium-entropy alloy: Zhe Gao (Hanyang University), Dong-Hyun Lee (Chungnam National University), Yakai Zhao (Institute of Materials Research Engineering), Hyoung Seop Kim (POSTECH), Upadrasta Ramamurty (Nanyang Technological University), and Jae-il Jang* (Hanyang University)

Keywords: Additive manufacturing, Medium-entropy alloy, Nanoindentation

This study explored the micromechanical behavior of additively manufactured multi-layered samples with alternating layers of hard CoCrNi and soft $CoCrNi_2$ medium-entropy alloys (MEAs), both derived from the Cantor high-entropy alloy. The multi-layered MEAs, produced via laser powder bed fusion, were analyzed using macro- and micro-scale digital image correlation (DIC). The results are discussed in terms of the complex interaction between local and global deformation and its underlying mechanism.

[역학3-4 | 11:30]

Prediction Convolutional neural network based residual stress prediction using indentation plastometry: 박민우, 정든봄 (서울대학교), 정경재 (성균관대학교), 한흥남* (서울대학교)

Keywords: 구형 압입, 유한 요소 분석, 비등축 잔류 응력, 합성 신경망, 민감도 분석

잔류응력은 재료의 기계적 특성과 피로 수명에 중요한 영향을 미치지만, 기존 측정 기술은 높은 비용과 파괴적 특성 등의 한계를 갖는다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 Indentation Plastometry와 합성곱 신경망(CNN)을 결합한 유한 요소 해석(FEA) 기반 방법을 활용하여 비등방성(non-equibiaxial) 잔류응력 및 소성 변형 특성을 평가하는 기법을 제안한다. 유한 요소 해석(FEM)과 외력 생성 장비를 이용한 압입 시험을 병행하여 다양한 잔류응력 조건에서의 압입 반응을 분석하고, 파라미터 민감도 분석을 통해 최적의 압입 조건을 도출하였다. 또한, 하중-변위 곡선 및 압입 프로파일 변형 데이터를 CNN 모델에 학습시켜 reference stress-free state 없이 잔류응력을 예측할 수 있도록 하였다. 제안된 FE-NN 모델은 등방성 및 비등방성 잔류응력뿐만 아니라 소성 특성까지 높은 정확도로 예측하였으며, 이를 검증하기 위해 실험적 압입 테스트 및 중성자 회절 측정을 수행하였다. 본 연구에서 제시한 비파괴적 잔류응력 측정 방법이 기존 기술 대비 비용 효율적이며 신뢰할 수 있는 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

[역학3-5 | 11:45]

나노 석출물과 전위 상호작용의 마이크로 범위 모델링: 연경미, 류일*, 심규장 (서울대학교)

Keywords: 석출 경화, 다차원 전산모사, 결함동역학, 유한요소법, 구조재료

전위와 나노석출물 간의 상호작용을 이해하는 것은 첨단 재료의 기계적 특성을 예측하고 최적화하는 데 매우 중요하다. 특히, 최근 구조 재료로써 각광받고 있는 고엔트로피 합금(High Entropy Alloy)에서는 다양한 석출물이 복잡한 상호작용을 하여 강화를 일으키므로, 각각의 나노석출물과 전위의 상호작용이 최종적으로 재료의 변형 메커니즘에 미치는 영향을 분석하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 최근 개발된 전위 동역학(Dislocation Dynamics)과 유한요소법(FEM)을 결합한 결합동역학(Defect Dynamics) 모델을 활용하였다. 본 연구의 핵심은 나노석출물의 존재에 의해 발생하는 응력에 의한 장거리 상호작용과 전위와 나노석출물의 접촉면에서 발생하는 단거리 상호작용을 정확하게 분석하고 변형 메커니즘을 규명한 데에 있다. 이를 통해, 전위-모재(matrix) 계면의 정합성(coherency), 전위-석출물 상호작용 유형, 시료의 크기가 거시적 기계적 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다. 본 모델을 통해 다양한 하중 조건에서의 미세구조 진화를 분석할 수 있으며, 고강도와 고성능을 지닌 재료 설계에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

집합조직
Room 301, 4월 25일

[집합1-1 | 09:00]
Investigating deformation mechanism of AZ31 alloy in the temperature range of 25ºC ~ 200ºC : Dain Choi and Tea-Sung Jun* (Incheon National University)
Keywords: AZ31, Non-basal slip, Microstructure, Temperature, Deformation mechanism
The aim of this study was to investigate the effect of temperature on the deformation behaviour of AZ31 sheets in the mid-high temperature range of 25ºC to 200ºC. Tensile tests were performed using a micro-tensile stage at 25ºC to 200ºC and strain was measured using Digital Image Correlation (DIC). Interrupted tests were performed at strains of 5%, 10% and 15% to further understand the detailed deformation as a function of applied temperature. Dislocation density and slip/twin activity at each temperature were investigated using X-ray diffraction techniques. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) was used to follow the deformed texture and slip activity. We found that as temperature increases, the deformation mode changes from basal slip and twinning to DRX and non-basal slip activity, resulting in an increase in fracture strain. As the temperature increases from room temperature to 100ººC, slip becomes more active and the influence of twinning decreases. At temperatures above this, twinning is rarely seen, but at 150ºC, unlike other temperatures, it is identified as TDRX, where a decrease in twinning occurs as strain increases. However, the influence of slip is greater than that of twinning due to the low occurrence of twinning. Above 150ºC, non-basal slip is dominant and more modes of non-basal slip become active as the temperature increases. A switch in the deformation mechanism was observed around 150ºC.

[집합1-2 | 09:15]
점소성 다결정 결정 소성 모델을 활용한 동적 재결정 모사 및 검증: 전보혜 (창원대학교 소재융합시스템공학과), Carlos N Tomé (Los alamos national Laboratory, MST-8), 정영웅* (창원대학교 소재융합시스템공학과, 창원대학교 신소재공학부)
Keywords: Crystal plasticity model (결정 소성 모델), Dynamic Recrystallization (동적 재결정), Texture (집합조직), Ni-30Fe-Nb-C
재결정은 크게 정적 재결정과 동적 재결정으로 구분된다. 동적 재결정은 정적 재결정에 비해 더욱 활발한 전위의 움직임을 수반하고, 따라서 재결정 발생 구동력이 높으며 기계적 물성 및 집합조직의 변화가 더 짧은 시간내에 발생한다. 동적 재결정은 핵생성, 성장, 그리고 소멸 단계로 이루어지며 재결정 초기에 재료의 응력 반응이 상승과 하강을 반복하며, 이후 특정 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 점소성 다결정 결정 소성 모델(VPSC)과 유동응력-변형률 곡선 기반 보세 (Voce) 경화 모델을 활용하여, 재결정의 각 단계에서 슬립 활성도와 집합조직 변화 등을 살펴보고자 한다. 이를 위해 니켈 베이스 합금인 Ni-30Fe-Nb-C를 타겟 재료로 사용하였다. 동적 재결정이 발생하지 않는 925ºC와 활발히 발달하는 1075ºC 두 가지 온도에 대하여, 채널 다이 압축 응력 조건 하에서 옥타헤드랄({111}<110>, Octahedral) 슬립과 비-옥타헤드랄({011}<110>, Non-octahedral) 슬립을 사용하여 모사하였다. 보세 경화 계수와 재결정 계수가 각 슬립 시스템의 활성화 정도에 미치는 영향을 살펴보았고, 브라스 (Brass), 큐브 (Cube), 고스 (Goss) 등의 집합조직 성분 발달에 미치는 영향을 해석하였다.

[집합1-3 | 09:30]
고강도강판에서의 변형모드와 잔류응력에 따른 수소취성 특성: 송상윤, 이건직 (고려대학교), 신건진 (서울대학교), 김기정, 엄호용, 정승필, 현주식 (현대제철), 이명규 (서울대학교), 손석수* (고려대학교)
Keywords: 초고강도강, 집합조직, 성형성, 수소취성
본 연구에서는 변형/가공 전 판재상태에서의 수소취성 특성이 아닌, 부품 단위에서의 수소취성 특성을 이해하기 위하여 변형모드와 잔류응력이 수소취성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 통상적으로 수행하는 수소 주입 전/후 인장시험을 통해 수소취성 평가를 진행하는신, Nakajima test와 Cup drawing을 통해 시편에 다양한 변형모드와 잔류응력을 조절하였고, 조절된 시편에 대해 수소주입을 통해 수소취성 민감도를 평가하였다. 이를 통해 복합성형과 잔류응력 하에서 수소취성 저항성을 향상시킬 수 있는 방향을 제시하고자 한다.

[집합1-4 | 09:45]
Investigating creep anisotropy behaviour of pure titanium at cold creep temperature: Ha-Seong Baek (Dept of Mechanical Engineering, Incheon National University), Min-su Lee (Functional Materials Components Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gangneung), Jeong-Rim Lee (Smart Forming Process Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan), Yong-Taek Hyun (Metallic Materials Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon), and Tea-Sung Jun* (Dept of Mechanical Engineering, Incheon National University)
Keywords: Pure titanium, Anisotropy, Creep behaviour, Digital image Correlation
Titanium and its alloys have been extensively used in applications associated with aerospace owing to their excellent mechanical properties and corrosion resistance [1-2]. However, Dwell fatigue issue occurs in α-Ti or near α, α+β titanium alloys, resulting in a significant reduction in fatigue life. [3]. It has been reported that the dwell fatigue issue becomes more severe at temperature between

90ºC and 120ºC, and vanishes at temperatures above approximately 230ºC [4]. Significant plastic deformations were observed during dwell or creep period in cold creep research [2, 4]. Therefore, in this study, cold creep tensile tests for CP-Ti grade 1 rolled plates along rolling direction(RD), transverse direction(TD) were performed with an aid of digital image correlation (DIC) at variable temperatures (20ºC, 120ºC and 200ºC). In order to analyse local deformation of specific grain combinations, DIC analysis coupled with an optical microscope and electron backscatter diffraction(EBSD) was used. As cold creep temperature was increased, the true strain and strain rate for creep was higher in cold creep results along RD. However, the true strain and strain rate for creep was highest at 120ºC in cold creep results along TD. This creep behaviour is similar to earlier research findings [4]. According to creep mechanism inferred via stress exponent, TD at 120ºC exhibits power-law breakdown involving cross-slip, whereas the others indicate power-law where dislocation glide and climb dominate. These results indicate that cold creep in pure titanium is dependent on texture and temperature. In addition, the cold creep resistance was lowest in TD at 120ºC, indicating the worst-case scenario.

[집합1-5 | 10:00]

Pattern matching indexing기법을 활용한 변형량 정량 분석: 강주희*, 김민성 (웨이브센스)

Keywords: EBSD, 변형량, 응력, Pattern matching법

EBSD 분석은 금속 소재뿐만 아니라 세라믹, 기능 소재의 미세구조와 집합조직 해석을 위해 널리 사용되고 있다. 지금까지 EBSD분석시 카메라에서 받은 Kikuchi 패턴의 2차원 선을 1차원 점으로 변화시키는 Hough 변환을 통해 자동화 indexing을 적용하였다. 2000년대 후반 Kikuchi 패턴을 저장하여 미소 변형량을 계산하는 HR-EBSD (High angular resolution EBSD)기법이 소개되었으며 Hough indexing 보다 angular resolution이 매우 우수하여 탄성변형량은 10^{-4}, misorientation 분해능은 0.01도 수준으로 측정할 수 있게 되었다. 다만 고해상도 Kikuchi 패턴을 요구하기 때문에 측정 시간이 길고 대용량 데이터로 인해 계산 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 한편 pattern matching(PM) indexing의 단점을 극복하기 위해 근래 하이브리드 PM indexing 기법이 제안되었으며, 개선된 indexing 기법에서는 고해상도 패턴을 저장하지 않아도 되고 계산시간도 수십분에서 수시간으로 단축되어 indexing rate가 상대적으로 낮게 나오는 강가공재나 mis-indexing 오류가 생기는 결정 대칭성이 낮은 소재에서도 널리 적용할 수 있게 되었다. 또한 하이브리드 PM indexing의 계산 기법이 개선되어 HR-EBSD에서만 가능했던 변형량과 응력의 정량 분석까지 가능하다고 알려졌으며, 본 연구에서는 작은 변형을 받은 금속소재에서 HR-EBSD분석법을 사용하지 않고 하이브리드 PM indexing 기법을 통해 변형량 정량 해석 사례를 소개하고자 한다.

[집합1-6 | 10:15]

고강도/저철손 무방향성 전기강판의 GGA중 결정성장 거동과 자성특성 변화: 홍재완*, 김재훈 (POSCO 기술연구원), 박종태 (POSCO 기술연구원, 포항공과대학교)

Keywords: 무방향성 전기강판, 친환경차용 소재, 집합조직, 자기적 특성

친환경차 구동모터에 사용되는 무방향성 전기강판은 회전자용으로는 고강도 특성을, 고정자용으로는 저철손 특성을 필요로 한다. 최근 개발된 고강도/저철손 특성을 갖는 GGA (Grain Growth Annealing)용 무방향성 전기강판은 열처리 전에는 미세한 결정립경을 가지고 있어 회전자에 적합한 고강도 특성을, GGA 열처리 중에는 적절한 결정성장이 이뤄질 수 있어 고정자에 적합한 저철손 특성을 갖고 있다. 따라서 GGA용 무방향성 전기강판의 열처리 후 자성특성을 이해하기 위해서는 GGA열처리 후의 결정립경 및 집합조직에 연구가 필요한 상황이다. 본 연구에서는 고강도/저철손 특성을 갖는 GGA용 무방향성 전기강판의 GGA 열처리 중 발생하는 결정성장 거동을 EBSD를 통해 관찰하였다. 초기의 α-fiber 연신립들은 GGA 열처리 초기에 자성에 불리한 {111}<112>면으로 주로 재결정 된다. 이는 GGA 열처리 특성상 승온속도가 낮아 핵생성 속도가 빠른 {111}면의 재결정이 유리하기 때문으로 추정된다. 재결정이 완료된 후 결정성장 단계에서는 기존의 무방향성 전기강판과는 다르게 {411}<148> 및 {112}<241>과 같은 α*-fiber가 발달한다. 이와는 달리 자성에 유리한 {100}<013>면 및 {110}<001>면은 초기에 재결정된 면의 단순 성장으로 GGA 열처리 전/후의 분율에 차이가 없다. 이러한 GGA 열처리 중의 집합조직의 변화는 GGA용 PNX제품이 기존의 무방향성 전기강판과 다른 자속밀도 특성을 갖는 주요한 원인으로 추정된다.

[집합2-1 | 10:40]

직접 암모니아 연료전지용 분리판 소재의 고온 암모니아 분위기 부식 거동 고찰: 한지수 (한국과학기술연구원, 고려대학교), 허주열 (고려대학교), 김동익* (한국과학기술연구원)

Keywords: 연료전지, 암모니아, 분리판, 부식

2050 탄소중립 실현과2030 국가온실가스감축목표 달성을 위해 수소경제를 활성화 하고자 하는 노력이 국가적으로 많이 이루어지고 있다. 하지만 국내 산업적, 지리·기후적 환경의 한계로 청정수소 생산 능력의 증가가 국가의 목표에 미치지 못하고 있는 것도 사실이다. 이에 국가 전체 수요의 상당부분에 해당하는 양의 수소를 수입을 통해 충당하고자 계획되고 있으며 특히 대량 운송에 적합한 암모니아가 크게 관심을 받고 있다. 이렇게 수입된 암모니아는 수소 형태로 전환하여 사용되는 것이 일반적인데, 연소, 발전등의 분야에서 암모니아를 직접 활용하여 연료 전환 과정에서의 에너지 손실을 줄이고자 하는 노력들이 계속되고 있다. 직접 암모니아 연료전지는 암모니아를 직접 연료로 사용해 전기를 생산하는 연료전지이다. 순 수소를 사용하는 시스템 대신 수소화합물을 이용하여 연료 다양성을 추구하려는 노력의 일환으로, 탄화 수소를 이용하는 시스템에 비해 온실가스 배출을 줄이는데 더 기여 할 수 있으며 암모니아 분해 장치를 따로 거치는 시스템에 비해 시스템 단순화 및 효율 극대화에 장점을 가지고 있다. 그러나 스택을 이루는 중요 부품인 금속 분리판이 고온 암모니아 분위기에 장시간 노출되면서 표면에 산화와 질화 등 부식이 발생하고 이로 인해 표면 구조

가 변형되어 스택 성능과 내구성이 저하되는 문제가 발생한다. 따라서 스택 내구성 향상을 위해서는 금속 분리판 표면의 부식 문제를 이해하고 개선하는 노력이 필수적이다. 본 발표에서는 SOFC용으로 개발된 고Cr 함유 페라이트계 스테인리스강, SUS316, SUS304, Inconel600 4종류의 금속 분리판 소재를 고온 암모니아 분위기에 노출 시킨 후 표면 부식층의 형성 거동을 확인해 보고자 한다. 암모니아 분해 비율 (암모니아 연료 전환율)에 따른 부식거동 차이, 암모니아 유량 및 노출 시간에 따른 부식층의 변화를 EBSD와 EDS를 사용하여 관찰하고 직접 암모니아 연료전지에서 4가지 소재의 사용 가능성에 대해 고찰해 보고자 한다

[집합2-2 | 10:55]

구리 전해도금 시 유기첨가제에 따른 박막 내 불순물과 미세조직/집합조직 간의 관계: 박현*, 신한균, 김정한, 이효종 (동아대학교)

Keywords: 구리 전해도금, 유기첨가제, 불순물, 미세조직, 집합조직

구리 전해도금 기술은 반도체 및 반도체 패키지의 구리 배선, 이차전지의 집전체 동박 등 현대 주요 전자 제품의 핵심 구성요소의 제조를 위해 사용되고 있으며, 이에 관련 산업은 신뢰성 있는 구리 배선 또는 동막을 제조하기 위한 노력을 지속하고 있다. 이러한 노력 중 구리 도금 시 적절한 유기첨가제 조합을 적용하여 배선 또는 동박의 미세조직을 제어하고 물성을 향상시키고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그런데, 구리 도금 시 도금용액에 포함되어 있는 전해질 물질 및 유기첨가제 성분원소들이 구리 원자와 함께 증착되어 (co-deposition) 구리 도금층 내에 여러 종류의 불순물 원소들이 존재하게 되고, 이들이 구리 박막의 미세조직/집합조직의 발달에 큰 영향을 끼칠 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 전해도금 기술을 통해 제조된 구리 박막들의 미세조직 및 집합조직과 불순물의 성분 및 함량을 분석하여 이들 간의 관계를 규명하고자 하였다. 이를 위해 도금 시 상이한 유기첨가제 조합을 적용하여 구리 박막들을 제조하였고, EBSD 분석기술을 이용하여 이들 박막들의 미세조직, 즉 결정립 크기/형상과 국부적 집합조직을 확인하였다. 또한 TOF-SIMS 기술을 통해 각 박막 내에 존재하는 불순문의 성분과 함량을 측정하였다. 그 결과, 적절한 유기첨가제 조합의 적용을 통해 구리 박막에 혼입되는 불순물의 종류 및 양을 제어하여 미세조직을 제어할 수 있으며, 이를 통해 구리 박막의 기계적 물성, 특히 연신율이 개선될 수 있음을 확인하였다. 회전 전극 (rotating disk electrode: RDE)을 이용한 정전류 실험 (galvanostatic measurements) 결과, 구리 도금 시 불순물의 혼입이 도금 용액에 포함되는 유기첨가제들 중 억제제의 전기화학 거동과 밀접히 연관되어 있음을 유추할 수 있었다.

[집합2-3 | 11:10]

Effects of the Schmid factor and strain compatibility on twin variant selections and twin transmissions of Mg alloys: Jaehyung Cho*, G.Y. Lee, H.S. Jang (Korea Institute of Materials Science), and S.H. Choi (Sunchon National University)

Keywords: Magnesium alloy, ZK60, Schmid factor, Twin variant selection, Strain accommodation

Effects of the Schmid factor and the strain compatibility factor (m′) on the twin variant selection and twin transmission of tensile twins in ZK60 are examined in detail. The analysis focuses on twin activation in various grains in CA//RD and CA//ND samples in which the compression axis (CA) is aligned with the rolling direction (RD) and the normal direction (ND), respectively. Twinning behavior is more pronounced in the CA//RD case, where twinning led to concave stress-strain behavior, indicating significant microstructural changes due to twin formation and growth. Trends of twin activation differ across the various grains. Some grains revealed a single twin variant with the highest-ranked Schmid factor, which is predominantly activated in both the CA//RD and CA//ND samples. In other grains, double twin variants with first and second rank pairs are frequently co-activated, particularly in the CA//RD case. Twin transmission across the grain boundaries also occurs when the strain compatibility factor (m′) is high (above 0.8) and the misorientation angle is low (below 35°). In contrast, transmission is hindered when m' values are moderate (around 0.6), even with low misorientation angles.

[집합2-4 | 11:25]

실시간 3D-XRD 시험을 이용한 마그네슘 합금의 변형기구 분석: 이상봉* (국립금오공과대학교, 재료공학부 신소재공학전공), 김영민 (한국재료연구원, 경량재료연구본부), Gaoming Zhu (Helmholtz-Zentrum Hereon, Germany), Ulrich Lienert (Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Germany), Dietmar Letzig (Helmholtz-Zentrum Hereon, Germany)

Keywords: 마그네슘 합금, 실시간 회절, 3DXRD, 전위, 변형거동

마그네슘합금의 성능최적화를 위해서 합금조성-공정조건 사이의 상관관계에 대한 이해를 바탕으로한 미세조직 조절이 필수적이다. 예를 들어 집합조직 약화와 결정립의 기저면이 압연방향에서 심하게 기울어지도록 결정립 방위를 조절함으로써 상온 성형성의 극대화를 이루는 방법이 제시되고 있다. 이러한 집합조직의 약화 및 주요 집합조직 성분의 변화는 Ca 또는 희토류금속을 Zn와 함께 합금원소로 첨가함으로써 얻어지지만, Zn대신 Al을 첨가하는 경우 집합조직 약화로 인한 성형성 향상효과는 사라진다. 이는 Ca 및 희토류원소가 Al원소와 높은 친화성을 가짐으로써 고용원소로 존재하는 양이 감소하는 것과 더불어, Zn를 Al로 대체함으로써 변형시 구동되는 주변형기구의 변화에 따른 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 마그네슘 합금내 Al과 Zn용질원소에 따른 변형기구 변화에 대하여 실시간 회절실험을 이용하여 연구하였다. Al 또는 Zn를 함유한 마그네슘합금에 대하여 싱크로트론 빔라인의 경X-선을 이용한 실시간 far field 3D-XRD 분석을 실시하였다. 평균결정립도 100μm로 미세조직을 조절한 Mg-1Al (wt.%), Mg-1Zn, Mg-1Al-1Zn 합금판재에 변형을 가하며 실시간3D-XRD 실험을 수행하고, basal <a>와 prismatic <a>전위슬립 구동에 대한 정량적 분석을 통하여 전위슬립에 미치는 용질원소의 영향을 평가하였다. Zn첨가는 prismatic <a>전위구동을 크게 증가시키며 이는 임계분해전단응력의 감소로 인한 것임을 알 수 있고, Al첨가는 고용강화를 유발함을 확인하였다. Zn와 Al을 동시에 첨가한 ZA11합금의 경우 가장 높은 prismatic <a>슬립의 구동을 보이며, prismatic <a>과 basal <a>슬립에 대한 분해전단응력의 비(RSS_{prism}/RSS_{basal})도 본 연

구에서 이용한 3가지 합금 중 가장 작은 값을 나타낸다. 즉, ZA11합금은 non-basal전위슬립의 구동도가 높은 상대적으로 균질적인 변형거동을 가짐을 알 수 있다. 결정립 회전(grain rotation) 분석결과 ZA11합금의 경우 비기저면 전위의 높은 구동으로 인해 응력 집중이 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 합금원소가 전위활성화도에 미치는 영향을 나타내며, 이를 통하여 Mg합금의 연성과 기계적 특성 향상을 위한 합금설계 방향을 제시한다.

[집합2-5 | 11:40]

Role of recovery in Mg-Zn-Nd-Y-Zr alloy studied via ex-situ EBSD scans and crystal plasticity simulation with dislocation density model: Youngung Jeong* (Changwon National University) and Jose Victoria-Hernandez (Helmholtz-Zentrum Hereon)

Keywords: Magnesium, texture, anisotropy, recovery, CRSS

Addition of rare-earth (RE) elements to Mg alloy may promote the activity of non-basal slip systems. As a result, addition of RE elements has been widely investigated as a means to improve the formability of magnesium alloys. At temperatures above 200C, the mechanical flow stress response of magnesium alloys is significantly reduced, which can be attributed to the decrease in CRSS of hard non-basal slip systems, as well as potential recovery and recrystallization. A series of ex-situ EBSD scans served to validate the crystal plasticity simulation results, which showed that recovery, especially of non-basal dislocations, may play a more significant role in the flow stress and anisotropy than previously expected.

[집합2-6 | 11:55]

강판 두께 변화에 따른 열이력이 핫스탬핑 공정을 모사한 고온 인장 특성에 미치는 영향: 지민기 (인천대학교), 손현성 (포스코), 전태성* (인천대학교)

Keywords: Hot stamping, 22MnB5, High-temperature, DIC, Tensile

전기자동차의 발전에 따라 기존 내연기관 대비 높은 내충격성 등의 우수한 특성이 요구되고 있다. 이러한 특성을 확보하기 위해 다양한 측면에서 변화를 시도해 왔으며, 그중 대표적인 요소가 소재의 두께 변화이다 [1]. 핫스탬핑 공정을 모사하여 고온 특성을 평가하는 데에는 대표적으로 글리블 시험기가 사용된다. 그러나 글리블 시험기에서 시편을 급속 열처리하는 과정에서 시편 내부에 온도 구배가 발생할 수 있으며, 이로 인해 확보된 고온 특성의 신뢰성에 대한 문제가 제기된다. 이러한 한계를 고려할 때, 핫스탬핑 공정을 보다 정확하게 재현할 수 있는 대체 시스템에 대한 지속적인 연구가 필요함을 강조할 수 있다. 본 연구에서는 22MnB5 강을 대상으로 강판 두께 변화에 따른 열이력이 핫스탬핑 공정을 모사한 고온 인장 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해, 실제 공정을 재현할 수 있도록 두 개의 가열로를 이용한 고온 인장 시스템에서 단축 인장 실험을 수행하였다. 변형률을 정밀하게 측정하기 위해 고온 단축 인장 실험에 이미지 상관 기법(DIC)을 적용하였다. 또한, 22MnB5 강의 두께를 조정하여 동일한 열처리 조건에서도 서로 다른 열이력을 부여하였으며, 실 공정과 동일하게 Al-Si 코팅이 적용된 상태에서 고온 특성을 평가하였다. 열이력에 따른 미세조직의 차이를 전자 후방 산란 회절(EBSD)를 통해 분석하였고, 이미지 상관 기법을 통해 이방성계수(r-value)를 비교하였다. 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 열이력이 핫스탬핑 공정에 미치는 영향을 심층적으로 논의하고자 한다.

참고 문헌 [1] Ji, M. K., Son, H., Shim, G. H., Ahn, H. S., & Jun, T. S. (2025). Effects of Fe diffusion driven by thermal history on the tribological behaviour of Al-Si coated 22MnB5 under varying load conditions in hot stamping. Journal of Materials Research and Technology.

[분석1-1 | 09:00]
TEM 회절패턴 자동해석 프로그램 (REDI, RIST Electron Diffraction Interpreter): 강성* (포항산업과학연구원(RIST))
Keywords: TEM, Diffraction, SAED, microstructure, phase

TEM을 이용하여 어떤 재료의 국소 영역에 대한 미세 결정구조 분석을 위해서는 SAED나 NBD와 같은 전자 회절상을 얻거나, atomic level의 고분해능 이미지를 얻어 FFT 변환 후 획득한 회절 이미지를 통하여 결정상을 해석해야 한다. 이러한 결정상 해석을 위해서는 획득한 이미지 속 회절점(Spot) 사이 거리 및 각도, 그리고 특정 면에 대한 면간거리를 측정하기 위한 Digital-micrograph과 같은 별도의 S/W 등이 필요하며, 회절 패턴을 해석하는 연구자의 경험에 크게 의존한다는 단점이 있다. 이에, 그동안 회절패턴을 해석하며 느껴왔던 불편한 점들을 해결하고자, 1) 회절패턴 해석을 위해 사용했던 SW들을 하나의 플랫폼으로 통합하고, 2) 필요한 소재 정보(DB)를 결합시켜, 3) 회절패턴 이미지와 성분의 입력만으로도 결정상에 대한 해석 정보를 얻을 수 있는 시스템을 개발 하였다. 본 발표에서는 TEM으로부터 획득한 회절패턴 이미지 내 Spot 간 거리와 각도를 정확하게 인식하고 측정하여 성분 입력만으로 어떤 결정상인지를 자동으로 해석해주는 TEM 회절패턴 자동해석 프로그램인 REDI를 소개하고자 한다.

[분석1-2 | 09:15]
In-situ μ-DIC study of strain localization in B4C-reinforced Al metal matrix composite at high temperature: Min-Su Lee, Chan-Wool Ahn (Korea Institute of Industrial Technology), Tea-Sung Jun (Incheon National University), Donghyun Lee, Junghwan Kim, Seungchan Cho (Korea Institute of Materials Science), and Chang-Soo Park* (Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: Aluminium metal matrix composite, Boron carbide, High temperature, Strain localisation, Digital image correlation

Boron carbide (B_4C) reinforced aluminium (Al) metal matrix composite (MMC) has been commercially used for the spent nuclear fuel (SNF) storage due to its high stiffness, low density and good wear resistance and excellent neutron absorption capacity [1]. Immediately after the discharge from the reactor, the SNF is moved to the on-site water pool for wet storage during ~5 years due to its heat and high radioactivity, and then it is stored in out-of-site repositories (i.e., dry cask storage) until final disposal [2]. The temperature at the cladding of dry cask is limited up to ~400ºC according to the U.S. Nuclear Regulatory Commision [3]. In MMCs, the external load is transmitted to the reinforcements carrying more load than its metal matrix. The interface between hard ceramic particles (B_4C) and soft Al-matrix acts as a site for strain localisation. The interfacial strengthening and stress transfer could be affected by the interfacial bonding, depending on the temperature. In the present study, we investigated the deformation behaviour and strain localisation of Al1100-B_4C composite in the temperature range of 20-300ºC. Digital image correlation (DIC) technique was used for full-field deformation measurement at both macro- and micro-scale. The strain localisation at the Al/B_4C interface was explored by combiend μ-DIC and in-situ optical microscopy (OM). The plastic deformationa and cracking at the B_4C particles and in the Al-matrix were characterised by field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and electron probe micro analyser (EPMA). The strain heterogeneity and crack damage are much less in the deformation at high temperature than that at room temperature. The damage reduction at high temperature is attributed to the effect of temperauture on the interfacial bonding strength between B_4C reinforcement and Al-matrix Reference [1] H. Guo, Z. Zhang, Y. Zhang, Y. Cui, L. Sun, and D. Chen, J. Alloys. Compd 829 154521 (2020). [2] P. Konarski, C. Cozzo, G. Khvostov, and H. Ferroukhi, J. Nucl. Mater 555, 15138 (2021). [3] NRC, US, 3, ISG-11 (2003).

[분석1-3 | 09:30]
Rapid Synthesis of Large-Area and Super-Flat Single-Crystal Graphene: Yongqiang Meng (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Meihui Wang (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS)), Minhyeok Kim (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Anirban Kundu (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS)), Alisher Sultangaziyev (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong* (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))
Keywords: Graphene, Ni(111), graphene wrinkles, step-bunching

To date, super-flat (wrinkle-free and step-bunching-free) single crystal (or polycrystalline) graphene films have not been achieved on metal foils. We report the growth of large-area and super-flat monolayer single crystal graphene films on Ni(111) foils. We have measured and will report the electrical transport and macroscopic mechanical properties of these graphene films. Single crystal graphene films each having the same quality and flatness can be repeatedly grown on the same Ni(111) foil without the need for any (additional) carbon precursor being supplied, with each growth cycle taking just three minutes. We thus report an efficient method for rapidly

diffusing carbon atoms from the sub-surface of Ni(111) foil to make, over and over, high-quality and super-flat monolayer single crystal graphene films. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[분석1-4 | 09:45]

아연욕 내의 Al이 융용 아연 도금 시 젖음성에 미치는 영향: 신상훈 (포항공과대학교), 서신욱 (포스코), 정창곤 (포항공과대학교), 김영하 (포스코), 허윤욱* (포항공과대학교)

Keywords: Hot-dip galvanizing, Aluminothermic reaction, Fe-Al inhibition layer, Selective oxidation

자동차용 강판의 내식성을 향상시키기 위해 사용되는 용융아연도금은 강판의 부식을 방지하는 역할을 하지만, 고강도 강판을 사용할 경우 표면 산화물로 인해 기지와 liquid Zn 사이의 wettability가 IF 강을 사용할 때보다 상대적으로 저하되는 현상이 보고되고 있다. 본 연구에서는 고강도 강판의 용융아연도금 과정에서 Zn/steel 계면에 형성되는 $Fe_2Al_{5-x}Zn_x$ inhibition layer의 형성 메커니즘을 연구하여, 고강도 강판의 wettability 저하 원인을 규명하고자 하였다. IF steel (IF), low silicon-containing steel (LS: Si/Mn=0.3), high silicon-containing steel (HS: Si/Mn=1.0)을 판 형태로 제작하였다. 일정한 크기로 가공한 각 시편을 아연욕에 침지한 후, 강판 표면과 Al을 포함하는 liquid Zn 사이의 wetting force를 측정하고, Zn/steel 계면에 형성되는 $Fe_2Al_{5-x}Zn_x$ inhibition layer의 coverage를 평가하였다. IF 강의 경우, 균일한 $Fe_2Al_{5-x}Zn_x$ 층이 형성되었으며, 높은 wetting force를 나타내었다. 반면, LS와 HS 강에서는 상대적으로 낮은 wetting force를 보였으며, 아연욕 내 Al 함량이 증가할수록 wetting force는 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 이러한 차이를 분석하기 위해 Zn/steel 계면의 미세조직 변화를 조사하였고, 강종별 inhibition layer의 형성 거동과 wetting force 변화의 상관관계를 조사하였다. 또한, Al을 포함한 아연 욕에 침지 시 발생하는 aluminothermic reaction이 강종별 inhibition layer의 형성거동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

[분석1-5 | 10:00]

Thermal Aging Effect on the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of High-Nitrogen Austenitic Stainless Steel: Seongjun Kim, Junhyuk Ham, and Ji Hyun Kim* (Ulsan National Institute of Science and Technology)

Keywords: High-nitrogen austenitic stainless steel, Thermal aging, Secondary phase, Microhardness

High-nitrogen austenitic stainless steel (HNASS) is being actively investigated as a suitable material for structural applications in small modular reactors (SMRs) due to its exceptional strength, ductility, and corrosion resistance. However, prolonged exposure to elevated temperatures during service can induce microstructural changes, potentially degrading its mechanical properties. Understanding the thermal aging behavior of HNASS is essential to ensure its long-term performance and reliability in SMR environments, where material stability and predictability are critical for safety and efficiency. During extended operation at typical SMR temperatures (285–300 ºC), Cr-rich carbides ($M_{23}C_6$) and nitrides (Cr_2N) can precipitate at grain boundaries, which may strengthen the grain boundaries but also cause chromium depletion, leading to sensitization. This phenomenon can potentially reduce the durability and corrosion resistance of HNASS. However, at 300 ºC, diffusion is limited, resulting in a slow precipitation rate, necessitating long-term thermal aging experiments to observe these changes. To address this issue and simulate long-term microstructural changes at 300 ºC within a shorter time frame, accelerated thermal aging was conducted at 400 ºC. At this temperature, the same types of precipitates (Cr-rich $M_{23}C_6$ and Cr_2N) form more rapidly, effectively reducing experimental time. This study investigates the effects of thermal aging on the microstructural evolution and mechanical properties of HNASS with a nitrogen content of approximately 0.4 wt%. Specimens will be thermally aged at 400ºC for up to 5,000 hours, and this paper presents initial analysis results for up to 1,000 hours. The microstructures of the base metal and aged specimens will be analyzed using transmission electron microscopy (TEM) and electron backscatter diffraction (EBSD). Additionally, specimens were analyzed using hardness and tensile tests to assess changes in mechanical properties. The findings aim to provide fundamental data necessary for assessing the long-term stability of HNASS as an SMR structural material.

[분석1-6 | 10:15]

4D-STEM 기반 전자회절 패턴 분석을 통한 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ 박막의 다형체 상의 정량 분석: 성민찬, 정지훈, 이기용 (한국에너지공과대학교), 박범수 (삼성전자), 오상호* (한국에너지공과대학교)

Keywords: Ferroelectric, $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O$, 4D-STEM, Phase mapping

$Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ (HZO) 기반 강유전상(Ferroelectric phase)은 전통적인 페로브스카이트(Perovskite) 산화물 기반 강유전체와 비교하여 크기 효과(Ferroelectric size effect)에 대한 저항성이 크며, 기존 반도체 공정과의 호환성이 우수하여 차세대 메모리 소자로 주목받고 있다. HZO의 다양한 다형체(Polymorphs)들은 결정 대칭성이 차이가 적고, 서로 유사한 격자 상수를 가지기 때문에 정확한 상 구분이 어렵다는 한계가 존재한다. 특히, 사방정계(Orthorhombic) 결정구조를 갖는 강유전상은 열역학적으로 안정한 상이 아니므로, 형성 여부가 공정 조건(온도, 도핑, 산소 분압 등)에 큰 영향을 받는다. 따라서, 차세대 메모리 소자의 성능과 신뢰성을 확보하기 위해서는 강유전상의 비율을 정량적으로 분석하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 다결정 HZO 박막으로부터 얻은 4차원 주사투과전자현미경(4D-STEM) 기반 전자회절 패턴을 활용하여 다형체 상의 분율을 정량 분석할 수 있는 방법론을 제시한다. 결정방위 맵핑에 활용되는 오픈소스 소프트웨어인 py4DSTEM의 Template matching 기법을 4D-STEM 결과에 적용하여 총 4가지 다형체의 결정구조에 대한 시뮬레이션 패턴과 실험으로 얻은 회절 패턴을 비교하여 각 다형체에 대한 결정방위를 결정한 후, 각 상의 결정방위에서 가장 높은 Correlation 값을 갖는 상을 최종 상으로 결정하였다. 또한, 신뢰도를 향상시키기 위해 동일한 영역에서 2도 간격으로 시료를 tilt 하여 총 8개의 회절 패턴을 추가로 획득하여 동일한 방식을 적용하였으며, 최종적으로 신뢰도 (Reliability, R)가 가장 높

은 상을 결정하는 방식을 적용하였다. 이러한 과정을 통해 기존 대비 평균 신뢰도를 약 30% 향상시킨 Phase map을 얻을 수 있었다. 제안된 방법은 SEM 기반 Orientation & Phase mapping 대비 우수한 공간 분해능(3 nm)을 제공하며, 높은 신뢰도(R~26)를 확보하여 HZO와 같이 다형체 간 격자 상수가 유사해 XRD 기반 상분석이 어려운 경우에도 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

[분석1-7 | 10:30]

High-Quality Graphite Films with Mirror-Like Surfaces from Ni-Mo Melts: Liyuan Zhang, Meihui Wang (Institute for Basic Science), Yongqiang Meng (Institute for Basic Science, UNIST), Sun Hwa Lee (Institute for Basic Science), Dongho Jeon, Myeonggi Choe, Zonghoon Lee (Institute for Basic Science, UNIST), Won Kyung Seong* (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, UNIST)

Keywords: Ni-Mo alloy melts, High-quality graphite, Thick film, Mirror-like surface

Graphite, known for its anisotropic physical properties, has widespread applications in thermal management, composites, and various other fields. Achieving high-quality artificial graphite crystals with large grain sizes and smooth textures has been a long-standing challenge. We report the synthesis of mirror-like, large-grained graphite films with controllable dimensions, achieved by using flat Ni-Mo alloy melts as catalysts. In our method, after the formation of the graphite film, we deliberately evaporated a significant portion of Ni, producing a porous metallic substrate. This step weakens the substrate-graphite film interaction before cooling down to room temperature, resulting in graphite films with only a few nano kinks and a mirror-like appearance. The synthesized films are 100% AB-stacked with millimeter-sized grains, much larger than the multi-micron grain size of highly oriented pyrolytic graphite and rivaled in size only by a small percentage of natural graphite. The films demonstrate an electrical conductivity of 5.59×10^6 S/m at 4 K and 7.75×10^5 S/m at 300 K. Tensile testing of macroscale samples revealed an average Young's modulus of 969 ± 69 GPa and an average fracture strength of 1.29 ± 0.203 GPa, which are, to the best of our knowledge, the highest values reported for macroscale artificial graphite materials. Our method provides a promising approach for synthesizing high-quality graphite films with exceptional properties, opening up new avenues for their potential applications in various fields. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[분석1-8 | 10:45 Canceled]

[분석2-1 | 11:10]

슬라브 품질 등급 자동화 판정 방법에 관한 연구: 박태창*, 김정관, 서용기 (현대제철연구소)

Keywords: 슬라브, 표면결함, 품질등급, 디지털이미지, 딥러닝

연주공정에서 냉각 및 응고과정을 거쳐서 생산되는 슬라브에는 극한의 열역학적 조건으로 인하여 여러가지 형태의 표면결함이 나타나게 된다. 현업에서는 표면결함의 수준을 시험원의 육안분석을 통해 1~5등급으로 판정하고 있는데, 마네스만 참고 이미지를 기준으로 품질을 평가하는 현재의 방법은 정확성 및 신뢰성이 낮은 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 기존의 방식을 대체하기 위하여 디지털 이미지의 픽셀값을 기준으로 슬라브의 품질등급을 판정하는 새로운 방법을 제안한다. 또한 딥러닝 모델의 학습을 통하여 슬라브의 표면결함을 자동으로 구별하고, 최종적으로 등급을 판정하는 새로운 방법을 소개한다.

[분석2-2 | 11:25]

화력발전소 보일러 튜브 장시간 사용재 상태 분석: 정진성*, 민혜련, 신동익, 김영대 (한전 전력연구원)

Keywords: Power Plant, corrosion, boiler tube

석탄 화력 발전소의 온실가스 배출 저감을 위해 무탄소 연료인 암모니아를 활용하는 방안이 추진되고 있다. 이러한 추진 계획에 따라 암모니아를 100% 연료로 연소하기 전에 일정 비율을 혼소하여 연소 및 설비의 영향 평가를 검증하는 실증단계를 필수적으로 수행한다. 실증은 기존 발전설비를 변경하지 않고, 일부 연소 분야의 기술개발을 통해 추진되고 있는 실정이다. 그러나, 암모니아를 연소함에 따라 보일러 발전설비, 특히 보일러 튜브에 연소환경 변화로 인해 문제가 발생할 수 있다. 이에 암모니아 혼소에 따른 설비의 영향을 평가하기 전에 기존 보일러 튜브 상태를 분석함으로서 추후 암모니아 혼소로 인한 영향을 평가할 수 있다. 암모니아 혼소에 따라 예상되는 보일러 튜브의 영향은 수냉벽(water-wall) 튜브에서의 환원 부식, 과열기(superheater) 및 재열기(reheater) 튜브에서의 고온부식, 그리고 절탄기(economizer) 부분의 이슬점 부식이다. 이러한 문제점이 예상됨에 따라, 실제 발전소에서 장시간 보일러 각 위치별 튜브 상태를 조사하기 위해 표면 및 단면 미세구조를 분석하여 향후 실증에 따른 영향을 평가하기 위한 참고자료로 활용하고자 한다. 이 논문은 2025년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (00437207, 석탄-암모니아 혼소에 따른 공급 및 발전설비 부품소재 열화평가 기술개발)

[분석2-3 | 11:40]

HR-XRD를 이용한 기능성 구조재료 내부응력 평가기술: 홍은표, 유성주, 이의종, 최용규* (한국산업기술시험원)

Keywords: 구조재료, 내부응력, 비파괴분석, HR-XRD

구조재료는 우수한 기계적, 열적 특성으로 우주·항공, 배터리, 자동차, 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 구조재료는 공정과정에서 반드시 내부응력이 형성되며, 이는 표면 특성뿐만 아니라 내구성, 수명 등에 큰 영향을 미치기에 정밀·정확한 평가가 중요하다. 내부응력 평가에는 Hole drilling, Curvature 등의 파괴적 방법 및 XRD, 중성자 회절법 등의 비파괴적 방법이 있다. XRD를

이용하여 내부응력을 평가할 시 $Sin^2\Psi$법을 활용하는데, 이는 Bragg's law에 기반한 XRD 분석과 Hooke's law에 기반한 소재의 응력 분석을 통해 내부응력을 정량적으로 계산하는 방법이다. 하지만 Iso-inclination 방법의 일반 XRD의 경우, Ψ를 구할 때 high angle에서 분석하여 내부응력 평가에 대한 신뢰성이 낮다. 이를 극복하기 위해 Side-inclination 방법의 HR-XRD를 적용하였으며, 격자면의 방향에 따른 tilting을 통해 low angle에서 Ψ를 구하여 내부응력 계산에 대한 신뢰성을 향상시켰다.

[분석2-4 | 11:55]

폐리튬배터리 양극재를 수소 분위기에서 아크 플라즈마를 통한 합금을 제조 기술: 노이준, 이창기, 김세호* (고려대학교)

Keywords: 폐배터리 양극재, 수소환원, 합금 설계, 친환경

친환경 에너지에 대한 관심이 전세계적으로 각광을 받으며 이차전지 사용량의 증가와 함께 폐배터리의 발생량도 급속도로 증가하는 추세이다. 차세대 폐배터리 재활용 기술은 환경 문제, 원자재 공급 부족의 문제를 완화시키고, 특정 국가에만 매립 되어있는 양극재 원자재의 해외 수입 의존도를 낮출 수 있기 때문에 신기술을 활용한 폐배터리 재활용의 도약이 필요하다. 본 연구는 폐리튬배터리 양극재를 수소 분위기에서 아크 플라즈마 환원시켜 합금을 제조하는 방법에 관한 것으로 수소분위기에서 발생하는 고온의 아크 플라즈마를 이용하여 폐리튬배터리의 양극재에 포함된 유가금속을 회수하는 것 뿐만 아니라 합금을 원스텝으로 설계할 수 있다.

[분석2-5 | 12:10]

Electric Current Driven Carbon Isotope Fractionation - Electromigration: Alisher Sultangaziyev (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Yongchul Kim (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS)), Yongqiang Meng (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong* (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM), Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: Metal electromigration, carbon isotope, fractionation, Raman, ToF-SIMS

The movement of atoms induced by an electrical current in a material, known as electromigration, has been extensively studied for its detrimental effects in microelectronics and its ability to remove impurities. However, to the best of our knowledge, its potential for deliberate transport and thus fractionation of isotopes has not been reported. In our study, we investigate carbon isotope fractionation via electromigration in metals with high carbon solubility, specifically nickel (Ni) and cobalt (Co). We infused bars of Ni and Co with mixtures of carbon isotopes and then applied either alternating or direct current at elevated temperatures. Under direct current, graphite formed exclusively on one side of the bar, demonstrating that electromigration induced carbon diffusion. Raman spectroscopy and TOF-SIMS analyses of the graphite, precipitated in regions of the bar between approximately 800 ºC and 1000 ºC, revealed a pronounced enrichment of ^{12}C relative to ^{13}C, regardless of the initial isotope mixture. Our experimental findings were further supported by density functional theory (DFT) calculations and kinetic Monte Carlo (KMC) simulations. In summary, we introduce a novel method for isotope fractionation and provide new insights into the mechanisms underlying carbon isotope movement during electromigration. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[분석2-6 | 12:25]

Large-Area Single Crystal Graphite using Metal Flux: Dongho Jeon (Institute for Basic Science, UNIST), Won Kyung Seong* (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, UNIST)

Keywords: Graphite, Single crystal growth, Flux method

We report the growth of high-quality, single-crystal graphite films using a metal flux method with cobalt. Our home-built 4-inch crucible induction heating system enables precise control of growth above the cobalt-carbon eutectic temperature (1325 ºC). Real-time video monitoring and emissivity measurements provide insights into the early stages of graphite film formation. The resulting films are comprehensively characterized by EBSD, SAED, Laue diffraction, and Raman spectroscopy, revealing grain orientation, crystallinity, and degree of graphitization. We are currently investigating the mechanical, electrical, and thermal transport properties using dynamic mechanical analysis (DMA) and a physical property measurement system (PPMS), anticipating significant performance enhancements compared to polycrystalline graphite. This study establishes a foundation for the rational design of graphite films with tailored functionalities. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

반도체
Room 한라A, 4월 25일

[반도체1-1 | 09:00]
딥러닝 기반 원자이미지 분석을 활용한 Y-도핑된 HfO_2 에피택셜 박막의 미세구조 정량 분석: 최하늘 (한국과학기술연구원(KIST)), 이근원 (국민대학교), 백승협 (한국과학기술연구원(KIST)), 조기섭 (국민대학교), 장혜정* (한국과학기술연구원(KIST))
Keywords: Y-doped HfO2 thin film, Epitaxial thin film, Deep learning-based image machine learning, HRSTEM

도핑된 HfO_2 기반 강유전 소재는 무작위 배향을 가진 다결정 박막에서도 10 nm 이하의 두께에서 강유전성을 유지할 수 있어 많은 관심을 받아왔습니다. 그러나 대부분 연구에서는 단사정계(monoclinic), 사방정계(orthorhombic), 정방정계(tetragonal) 상(phase)들이 혼합된 다결정 박막 형태로 존재하기 때문에 물성을 균일하게 유지하기 어렵습니다. 따라서 상 안정화 및 자발 분극을 정밀하게 제어할 수 있는 단일 사방정계 상을 갖는 HfO_2 기반 에피택셜 박막이 필요하며, 상과 배향의 정량적 분석이 필수적입니다. 그러나 HfO_2 기반 에피택셜 박막의 경우, 상들 간의 격자 상수가 유사하여 X-선 회절(XRD) 분석만으로는 명확한 식별이 어렵습니다. 고해상도 주사투과전자현미경(STEM) 이미지를 활용하여 원자 단위에서 상을 구분할 수 있지만, 넓은 영역에서의 통계적 분석은 숙련된 전문가의 노동력과 시간이 필요하며, 정확도성에도 한계가 존재합니다. 본 연구에서는 딥러닝 분석법을 도입하여 STEM 원자 이미지 데이터를 효율적으로 활용함으로써, 6 mol% Y-도핑된 HfO_2 (YHO) 에피택셜 박막의 상과 그 분율을 정량적으로 규명하였습니다. YHO 박막은 RF 스퍼터링 이용해 이트리아 안정화 지르코니아(YSZ) 기판에 성장시킨 후, 집속이온빔(FIB)으로 샘플링하여 Cs-corrected STEM(Titan, FEI)을 통해 HRSTEM 원자 이미지를 획득하였습니다. 이후, 다양한 스케일에서 원자 이미지를 분류하기 위해 리사이징(resizing) 기법과 앙상블(ensemble) 방법을 적용하였으며, 사전 학습된(pre-trained) 구조를 기반으로 결정구조 맵(structure map)과 엔트로피 맵(entropy map)을 도출하였습니다. 이를 통해 원자 배열의 점진적인 변화를 포함한 복잡한 미세구조를 정확히 분석하고, 상의 공간적 분포 및 변형(strain) 등의 정량적 정보를 추출할 수 있었습니다. 또한, 자동화된 이미지 분석을 통해 TEM 전문가의 개입 없이도 재료 특성을 직접 도출할 수 있었습니다. 본 연구를 통해, 딥러닝에 기반한 구조 및 엔트로피 맵 통합 분석법은 복잡한 원자 구조, 상 전이, 결정립계를 보다 명확하게 시각화하여, YHO 박막의 두께에 따른 상 분율 변화와 정렬된 성장 배향을 정량적으로 분석할 수 있었습니다. 분석 결과, YHO 박막에서 단사정계상과 사방정계상이 혼합될 수 있는 임계 두께는 33 nm로 나타났으며, 이 두께에서 약 92%의 사방정계상이 형성되었음에도 불구하고 성장 배향은 약 76%가 a-축을 따라 정렬되는 것으로 확인되었습니다. 반면, 5 nm 두께에서는 배향이 약 96%의 a-축 정렬을 보이며 보다 높은 결정성 및 배향성을 나타내었으며, 이를 통해 낮은 두께에서 강유전성 특성을 보다 정밀하게 제어할 수 있는 가능성을 확인하였습니다.

[반도체1-2 | 09:15]
Cu to Cu direct bonding in the air for advanced fine-pitch 3D packaging: Yu Hayoung, YehRi Kim, and Dongjin Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: Cu to Cu direct bonding, Diffusion bonding, Advanced packaging, 3D integrated circuits

With the advancement of artificial intelligence (AI), semiconductor packaging technologies have been requiring exceptional heat dissipation and reliability performances to realize large computational and massive data processing. In this context, copper-to-copper (Cu-Cu) direct bonding via thermal compression is getting attention as one of the next-generation packaging technologies, but it is difficult to commercialize because of difficulty of preventing oxidation on the interface in high temperature and pressure. In this study, we successfully implemented Cu-to-Cu direct bonding in the air at 250°C and low pressure without an oxidation, evaluated the shear strength of the bonding part according to the bonding time, and observed the microstructure. In the case of a conventional method (i.e., oxidized joints), the bonding strength was less than 5 MPa, whereas the Cu to Cu joint without oxidation achieved shear strength from 20 to 40 MPa with promoted diffusion using partially oxygen encapsulation methods. The Cu to Cu bonding in the atmosphere developed in this study can reduce the bonding temperature by approximately 30 to 50°C compared to the existing auxiliary gas utilization method, and is effective in reducing costs as the process eliminates the consumption of a large amount of auxiliary gas. Furthermore, we successfully implemented fine pitch interconnections through this Cu to Cu direct bonding technology, which has potential for ultra-fine-pitch advanced packaging.

[반도체1-3 | 09:30]
Enhanced Memory Performance of Flash Memory Using TiN Metal-Dot embedded SiN_x Charge Trap Layer: Yun Seo Lim, San Park, Se Hyeon Choi, Bon Cheol Ku, Seong Ho Lee (Hanyang University), Hyung Jun Kim, Jae Hyun Yang, Bio Kim, Young Seon Son, Han Mei Choi (Samsung Electronics Co.Ltd.), and Chang Hwan Choi* (Hanyang University)
Keywords: NAND Flash, Charge trap layer, Metal dot, Atomic layer deposition

Over the years, in order to greatly improve the data density of NAND flash memory, 3D-NAND memory structure was developed from 2D-NAND structure, and the number of stacked cells determines the data density [1]. However, as scaling in 3D NAND flash memory, a trade-off between retention and memory window (MW) in the device has been encountered [2]. The promising solution is to engineer the charge trap layer with a high density of accessible deep-level traps, ensuring enhanced operation efficiency while

simultaneously reducing charge loss. In this study, TiN nanocrystals (TiN-NCs) formed by the ALD process were embedded in SiN_x and utilized as the Charge Trap Layer (CTL). The metal-dot embedded SiN_x thin films exhibited excellent retention characteristics compared to the reference SiN_x thin films without metal-dot. However, under vacuum conditions, a reduction in TiN-NCs size resulted in degradation of both memory properties, including MW and retention. We observed that the memory characteristics were changed by the oxygen-related bond formed at the interface between NCs and SiN_x matrix. To enhance memory properties, the amount of Ti-N-O bond within the charge trap layer was intentionally increased by modifying the heat treatment atmosphere during TiN-NCs formation. We also evaluated the writing efficiency and endurance, the results demonstrated that an increase in Ti-N-O bonding at the NCs-dielectric interface enhanced erase efficiency, retention, and endurance. This study will serve as an important foundation for further research when exploring the alternative layer to SiN_x-based CTL. Acknowledgements This work was supported by the SAMSUNG ELECTRONICS. References [1] A. Goda et al. 3D NAND Technology Achievements and Future Scaling Perspectives. IEEE Transactions on Electron Devices. pp. 1373-1381. (2020) [2] Sivaram, S et al. Searching for Nonlinearity: Scaling Limits in NAND Flash. VLSI. IEEE. pp. 1-4. (2023)

[반도체1-4 | 09:45]

Enhanced Conformality in ALD-based Cobalt Thin-Film in High-Aspect-Ratio Structures Using Plasma Pre-Treatment and Atomic Layer Etching: Yeh been Im, Young Seo Na, Hyun jin Lim, and Changhwan Choi* (Hanyang University)

Keywords: Interconnect, Cobalt, Area selective deposition, Atomic layer etching, Plasma pre-treatment

Achieving uniform step coverage has become a critical challenge in semiconductor fabrication, particularly in extremely scaled high-aspect-ratio (HAR) three-dimensional (3D) architectures, where conventional atomic layer deposition (ALD) based techniques often fail to ensure conformal material distribution [1]. Furthermore, in advanced nano electronic semiconductor devices, low resistivity and high reliability are essential requirements for interconnect materials. Cobalt (Co) has emerged as a promising next-generation interconnect material, offering superior properties compared to conventional copper (Cu) interconnect. Cobalt exhibits lower electron migration resistance, excellent electrochemical stability, enhanced resistance to electromigration, void formation, and making it highly suitable for fine-pitch interconnects. However, in deep trenches and narrow gaps, conventional ALD techniques often lead to defects and void formation, compromising device performance and reliability. To address these challenges, area selective deposition (ASD) and atomic layer etching (ALE) has emerged as a promising alternative. In this study, we proposed a further advanced method to achieve ALD based uniform cobalt thin-film deposition in HAR structures by combining plasma pre-treatment with ALE. Plasma pre-treatment suppresses nucleation during plasma-enhanced atomic layer deposition (PE-ALD), enhancing selectivity and enabling defect-free film growth. We confirmed the Co ALD nucleation delay by analyzing SiO_2 substrates with and without plasma treatment, revealing a significant nucleation delay on treated substrates, which consequently enhanced the bottom-up gap-fill property. [2]. Simultaneously applied ALE method further improved film quality and conformality by removing surface impurities and optimizing surface composition. This integrated approach ensures reliable Co deposition in HAR structures, ultimately could serve as a key knob for improving both device and system performance in the highly scaled semiconductor industry. Acknowledgments This work was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00407291), This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00260527). References [1] Clark, R. et al. Perspective: New process technologies required for future devices and scaling. APL Mater. 6, 058203 (2018). [2] Choi, Y., Kim, T., Lee, H. et al. Bottom-up plasma-enhanced atomic layer deposition of SiO2 by utilizing growth inhibition using NH3 plasma pre-treatment for seamless gap-fill process. Sci Rep 12, 15756 (2022).

[반도체1-5 | 10:00]

Exploring Substrate and Interlayer Effects in 2D vdW Heterostructure Growth: Lia Saptini Handriani, Suhee Jang, Hyuncheol Yun, and Won Il Park* (Hanyang University)

Keywords: 2D TMDs, MoS2, WS2, vertical heteroepitaxy

The growth of 2D van der Waals (vdW) heterostructures (HSs), including vertical and lateral configurations of transition-metal dichalcogenides (TMDs), offers unique opportunities to explore novel physical phenomena. Chemical vapor deposition enables the scalable synthesis of TMDs with precise control over thickness by adjusting parameters such as temperature and precursor concentration. Despite notable advancements, the nucleation and growth mechanisms governing 2D-on-2D vertical HSs remain poorly understood, particularly for systems involving smooth, chemically inert surfaces. In this study, we investigate the heteroepitaxial growth of TMDs using another TMD material as an interlayer via metal-organic chemical vapor deposition. Our findings demonstrate that substrate interactions significantly affect adatom adhesion and lateral overgrowth, even in the presence of the interlayer. This effect is pronounced for interlayers up to 2–3 layers thick but diminishes for thicker interlayers. Notably, while the substrate influences nucleation and early-stage growth, the crystallographic orientation is ultimately dictated by the interlayer, leading to heteroepitaxial alignment. These insights provide a fundamental understanding of 2D vertical HSs growth and highlight the pivotal role of interfacial interactions and interlayer thickness in guiding nucleation and epitaxial growth.

[반도체1-6 | 10:15]

Thermal shock reliability of vertical shunt resistors for double side cooling SiC power modules: Yeh Ri Kim (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Advanced Packaging Integration Center (APIC),, Korea University), KUE JIN HAN, TAESEONG HAN (KOSTECSYS Co., Ltd), and Dongjin Kim* (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Advanced Packaging Integration Center (APIC),)

Keywords: Shunt resistor, double-side cooling, vertical shunt, power module, Thermal reliability

In response to wide band-gap semiconductor with double side colling (DSC) power modules, minimizing shunt resistor size is crucial for achieving high power density. Reducing the interface resistance between the resistor element and the terminals helps reduce power dissipation and improve efficiency. However, conventional horizontal shunt resistors face challenges in thermal management, electrical performance, and mechanical integration. In this study, a vertical shunt resistor of 8.0 × 5.6 × 0.7 mm was developed using manganese (Mn) as the resistor with copper (Cu) as the terminal metal to reduce size and interface resistance while ensuring precision and durability. To evaluate the thermal reliability of the diffusion-bonded shunt resistor, a thermal shock test between -50ºC and 150ºC for 1000 cycles was performed. As a result, the newly developed vertical shunt resistors achieved significant reductions in both geometric volume and resistance, with a measured resistance as low as 42 μΩ. In this study, a comprehensive quantitative analysis was performed to identify the crystallographic behavior of diffusion-bonded Cu/Mn/Cu interfaces after thermal shock.

[반도체1-7 | 10:30]

양면방열 파워모듈용 고성능 방열 스페이서의 변형제어 구조설계에 따른 내열 성능 검증: 김병찬, 김예리 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 한규진, 한태성 (코스텍시스), 김동진* (한국생산기술연구원)

Keywords: 스페이서, 양면 냉각, 파워 모듈, 수치해석

이 연구는 고전력밀도 양면방열구조 파워모듈 (DSC power module) 구현을 위한 고성능 방열 스페이서의 응력완화 구조물 설계 변경에 따른 내열성을 검증 위해 수행되었다. 이를 위해 6 × 6 × 2.5 mm 크기의 Cu/Mo/Cu/Mo/Cu 라멜라 구조의 방열 스페이서가 설계 및 제작되었다. 내열성과 관계된 제품의 내구성을 평가하기 위해 250 ºC 에서 100, 250, 500 시간에 따라 고온 환경 내구성 테스트가 수행되었으며, 방열 스페이서 내부의 결함 여부와 이의 성장 여부가 주사음향단층촬영(SAT) 분석을 통해 추적 관찰되었다. Cu와 Mo 간 계면의 결함 여부는 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 정량적으로 평가되었고, X-ray나 SAT에서 검출될 수 없는 1 μm 이하 수준의 공극이 간헐적으로 관찰되었다. 500 시간의 고온 신뢰성 테스트 이후 방열 스페이서의 열팽창계수(CTE) 변화는 0.05 ppm/ºC으로, 초기상태와 큰 차이를 보이지 않았으며, 열전도도(thermal conductivity) 또한, 초기의 양산 직후 상태 수준으로 유지되었다. 방열 스페이서의 Cu/Mo 계면의 금속간화합물을 포함한 2차 상(phase)과 합금화 등 미세구조 변화는 EDS 분석을 통해 철저히 고찰되었다. 이 연구는 양면방열형 파워모듈에 적용하기 위한 방열 스페이서의 응력완화층 구조 설계 변경에 따른 내열성능의 변화를 미세구조와 열팽창계수, 열전도도의 관점에서 체계적으로 고찰되었으며, 개발품 스페이서의 파워모듈 제품화 성능 검증에 대해 실험적 및 수치적으로 논의된다

재료정책 세션III
Room 한라A, 4월 25일

[정책3-1 | 11:00]

한국화학연구원의 탄소중립 연구분야 소개: 이영국* (한국화학연구원)

탄소중립은 기상이변 및 지구 온난화 문제를 해결하기 위한 중요한 전략으로, 온실가스 배출을 최소화하고 배출된 이산화탄소를 재활용하는 전략을 주요 내용으로 한다. 탄소중립 분야의 연구는 1) 에너지 생산 및 사용의 효율성 향상을 통한 배출 저감 기술, 2) 신재생 에너지 기술 개발과 보급을 통해 화석 연료 사용 저감 기술, 3) 탄소 포집 및 저장 기술의 개발로, 배출된 탄소를 효과적으로 포집하여 지속 가능한 방법으로 처리하는 연구가 포함되며 끝으로 사회적 및 정치적 차원에서의 정책 개발과 국제 협력을 통해 글로벌 차원에서의 탄소중립을 달성하기 위한 전략까지 포함된다. 본 발표에서는 탄소중립 연구 분야 중 현재 한국화학연구원에서 중점적으로 연구 개발하고 있는 탄소 포집, 포집된 탄소의 전환을 통한 중간 화학 물질 합성, 수소 생산 및 저장, 탄소중립 필수 에너지원인 신재생 전기 에너지 생산 및 저장 기술 등을 소개하고자 한다. 또한 탄소중립과 관련된 각국의 규제에 대해 알아보고 지속 가능한 국가 전략 산업 육성 및 지구 환경 보호를 위한 대응 전략 등을 소개하고자 한다.

철강B Ⅱ-제선, 제강, 환경, 에너지
Room 한라B, 4월 25일

[철강B5-1 | 09:00]
Modeling and Correlation Analysis for the Catalytic Activity of Binary Molten Alloy Catalysts in Methane Pyrolysis: Tae-Gyu Wi, Young-Joon Park (POSTECH), Uendo Lee (KITECH), and Youn-Bae Kang* (POSTECH)
Keywords: turquoise hydrogen, methane pyrolysis, molten metal catalyst

The pyrolysis of methane (CH_4) for turquoise hydrogen production offers a promising route to CO_2-free hydrogen (H_2) generation, especially when molten metal catalysts are utilized. These catalysts are advantageous due to the density difference between molten metal and carbon, which facilitates effective separation of the produced carbon. For large-scale application of this process, the development of high-performance molten metal catalysts is crucial. In this study, the catalytic activity of various molten metal alloys for CH_4 pyrolysis was evaluated experimentally, with a temperature range of 900–1200 ºC. The measured catalytic activity was used to develop a model describing the catalytic behavior of binary molten alloy catalysts based on their compositions and the activity of their pure components. Additionally, correlations between catalytic activity and surface and electronic properties were explored. The results indicate that surface tension and electron affinity significantly influence the methane pyrolysis rate, suggesting electron transfer and surface adsorption as key mechanisms of CH_4 pyrolysis.

[철강B5-2 | 09:15]
철광석 유동환원 공정의 sticking 현상 연구: 김은주, 명다빈, Dereje Degefa Geleta, 서인국, 이준호* (고려대학교)
Keywords: 직접환원철(DRI), 유동환원공정, Sticking, iron whisker

최근 제철소의 CO_2 배출 저감을 위해 전기로에서 에너지 저감형 대체 철원을 사용하는 공정이 검토되고 있다. 특히, 국내에서 원천기술을 보유한 유동환원 공정을 이용하여 함수소 가스 기반의 직접환원철(DRI) 제조 공정이 검토되고 있다. 철광석의 유동환원 공정에서는 환원된 입자의 sticking에 의한 유동성 저하가 문제가 될 수 있기 때문에 이에 대한 기술적 검토가 요구된다. 특히, 전기로에서 활용되기 위한 DRI의 경우 높은 금속화율(약 92~95%)을 요구하기 때문에 sticking 발생 가능성이 높다. 한편, 유동환원에 사용되는 광석은 그 종류별로 다른 화학조성과 성분상을 갖고 있기 때문에, 환원에 따른 미세 구조의 변화도 다를 것으로 예상할 수 있다. 본 연구에서는 2단 유동로 온도조건 및 다양한 가스 조성에서 TG(thermogravimetry)를 사용하여 세 가지 광석의 환원실험을 진행하였으며, 실험 후 샘플은 SEM을 통해 미세구조를 관찰하였다. CO 분위기 환원에서는 iron whisker가 관찰되었으나, H_2가 50% 이상인 H_2-CH_4 혼합가스 분위기에서는 환원철 표면에서 iron whisker가 관찰되지 않았다. 갈철광의 경우 적철광에 비해 iron whisker 생성이 억제되었는데, 이는 갈철광 내의 미세 기공이 발달하여 기공 중 확산 율속 반응일 가능성이 높기 때문인 것으로 추정되었다. 수소 농도가 높은 환원 조건에서는 입자 표면의 금속철의 결합에 의한 sticking이 발생할 것으로 예상되었으며, CFD-DEM 시뮬레이션을 통하여 sticking 발생에 미치는 가스의 유속, 조성, 온도의 영향을 살펴보았다. 결과적으로, H_2단독 사용에 비해 CH_4 혼합 가스에서 효과적으로 유동성을 개선할 수 있으며, COG를 사용할 경우 가격 경쟁력도 개선될 수 있을 것으로 판단되었다.

[철강B5-3 | 09:30]
수학적 모델링을 통한 분산판 유무에 따른 유동층 내 환원반응 거동 변화 모사: 조봉민, 양현진* (인하대학교)
Keywords: 수소 환원, 다물리 모델, 유동 영역

본 연구는 유동층(fluidized bed) 내에서 분산판(Distributor plate)의 유무가 환원 반응 속도에 미치는 영향을 분석하고, 분산판 형상을 반영할 때 발생하는 계산 비용을 완화할 방안을 모색하고자 하였다. 분산판은 입자를 지지함과 동시에 가스가 균일하게 분산될 수 있도록 설계되며 가스 주입 시 물리적으로는 협소한 분산판 노즐 단면적으로 인해 근처의 유속은 높아지는 반면 수치해석적으로는 노즐 형상 구현을 위해 세밀한 격자가 필요하다. 이는 결과적으로 과도해석 시 작은 시간 간격(time step)을 요구하여 장시간 해석이 필요한 유동층 내 환원 반응의 전산 모사에 비용 증가를 유발한다. 한편 유동층의 유동 패턴(flow pattern)은 일반적으로 공탑 속도(superficial velocity)와 입자 직경(particle diameter) 간 상관관계를 기반으로 도출된 유동영역지도(flow regime map)과 유사한 경향을 보이게 되어 기존 유동층 해석에서는 분산판을 생략하고 공탑 속도를 입구 속도(inlet velocity)로 설정하는 방법이 일반적으로 사용된다. 그러나 분산판을 통해 가스가 국부적으로 주입되면 유동층 하부의 유동 패턴이 단순한 공탑 속도 기반의 유동 패턴과 달라질 수 있으며, 이로 인해 환원 가스와 입자의 접촉 영역 차이가 발생하여 동일한 조건에서도 환원 반응 속도가 달라질 가능성이 있다. 따라서 분산판 반영 여부가 환원 반응 속도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 이를 구현할 때 증가하는 계산 비용을 줄이는 방안을 마련하는 것이 필요하다. 이에 계산 비용 증가를 최소화하면서도 분산판의 효과를 반영하기 위해, 실제 분산판 형상을 구현하는 대신 O-grid mesh와 perforated wall method를 적용하였다. 이를 기반으로 격자 독립성 연구(grid independence study)를 수행하여 메시 크기에 따른 유동 패턴 변화를 분석하고, 계산 비용 증가를 줄이는 해석 조건을 도출하고자 하였다. 또한 철광석의 환원 반응을 모사하기 위해 미반응 핵 수축 모델(Unreacted Shrinking Core Model, USCM)을 다상열유동과 결합하여 적용하였다. 이를 통해 동일한 반응 속도 상수(kinetic parameters)를 가정한 상태에서 분산판 유무에 따른 환원 반응 속도를 비교하고, 분산판 구현의 필요성을 확인하고자 하였다.

[철강B5-4 | 09:45]

Fundamental research for multi-stage hydrogen reduction of limonitic ore: Seong-Jin Kim, Seongkyu Cho, Dohyeon Kim, Leonardo Rocha, and Sung-Mo Jung* (POSTECH)

Keywords: hydrogen, iron ore reduction, limonite, TGA

Fluidized bed reduction technology is increasingly recognized as a viable approach to achieve Net Zero Carbon emissions by 2050. Among its implementations, the HyREX system at POSCO exemplifies an H_2-based fluidized bed reduction process tailored for ironmaking. This technology necessitates extensive academic and technical scrutiny, particularly due to the unique properties of hydrogen as a reductant — low density and endothermic reaction characteristics. The aim of this research is to simulate the multi-stage hydrogen reduction of fine iron ore through Thermogravimetric Analysis (TGA), thus optimizing the multi-stage fluidized bed reduction condition. In this study, 0.4 grams of Australian limonite ore were subjected to TGA, dividing the experimental conditions into four stages (R4-R3-R2-R1) using N_2, H_2, and H_2O gases. Each reduction stage was determined based on the Baur-Glassner diagram, which maps the stability regions of Fe oxides according to reduction temperature and gas oxidation degree (GOD). As the reduction proceeded, the temperature was stepwisely increased, and GOD was decreased to simulate the stepwise reduction of iron oxide until reaching metallic Fe. After the R4 stage, an 11% reduction degree was achieved, corresponding to the theoretical oxygen removal from transformation of hematite to magnetite. After the R3 and R2 stages, the absolute values varied, but the reduction degree consistently aligned around 33%, representing the transformation of magnetite to wustite. Most oxygen removal took place in the R2 and R1 stages, highlighting the reduction of wustite to metallic Fe. This step required the longest duration, as changes in reduction degree relative to temperature and GOD were substantial. In stages R2 and R1, a simultaneous reduction in GOD led to an accelerated weight loss, while independent reductions in R2 GOD showed negligible change in final reduction degree, whereas R1 GOD remained influential.

[철강B5-5 | 10:00]

1073K에서 Fe의 침탄 반응속도에 미치는 CO-H_2 혼합가스 영향성 평가: 조다한, 김영재* (인하대학교), 김혁 (현대제철)

Keywords: 직접환원철, 침탄, 속도론, 오제 전자 분광법, 더스팅

온실가스 배출 저감을 위해 철강 산업에서 원료 물질로 DRI(Direct Reduced Iron)와 HBI(Hot Briquetted Iron)의 활용이 증대되고 있다. DRI와 HBI 생산 과정에서 CO와 H_2 가스의 반응을 통해 철광석의 환원과 침탄이 이루어지며, 특히 침탄 반응은 직접환원철의 융점을 낮춰 후속 공정의 에너지 효율을 향상시키고, DRI 자체의 안정성을 향상시키는 등 중요한 역할을 한다. 일산화탄소와 수소 가스를 혼합하여 취입하는 경우, 수소 가스 함량의 증가는 침탄 반응을 가속화시키는 한편 장시간 진행될 경우 직접환원철 표면에서 metal dusting 현상을 유발할 수 있다. 이는 불안정해진 탄화물이 미세한 금속 및 탄소 입자로 분해되는 과정으로, 가스 및 금속 손실을 유발하고 DRI의 취급성을 저하시키는 등 공정상 다양한 문제를 야기한다. 따라서 metal dusting 현상을 방지하기 위해 철의 침탄 메커니즘을 면밀히 분석하고, 가스 조성에 따른 반응 속도를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 1073K의 CO-H_2 혼합가스 분위기에서 100μm 두께의 Fe foil을 이용하여 침탄 반응 속도를 측정하였다. 열중량분석(Thermogravimetric Analysis)을 통해 혼합 가스 분압에 따른 중량 변화를 실시간 측정하고, 광학 현미경 (Optical Microscopy)과 오제 전자 분광법 (Auger Electron Spectroscopy)을 이용하여 침탄 시간 변화에 따른 Fe의 미세구조 변화를 확인하였다. 실험 결과, 철 내 고용 탄소가 포화된 후 표면에 형성된 cementite 층이 분해되면서 metal dusting이 진행되며, 이후 탄소 침적 속도가 증가하는 경향을 관찰하였다. 이에 따라 침탄 반응은 dusting 발생 이전의 표면 반응 단계와 dusting 진행 단계를 구분하여 속도 상수를 평가할 필요가 있음을 확인하였다. 추가적으로, 수소 가스 분압이 증가할수록 침탄 속도가 빨라지는 경향이 확인되었다. 이는 수소 가스가 철의 표면 산소를 제거함에 따라 침탄 반응이 촉진됨을 의미하며, 따라서 Fe 표면에서의 흡착 산소의 제거 단계가 CO에 의한 침탄 반응의 율속 단계로 작용하는 것으로 예상된다.

[철강B5-6 | 10:15]

폐플라스틱 첨가 가탄재를 적용한 슬래그 포밍 특성 및 환원 반응 연구: 안효주, 박노근* (영남대학교), 강영조, 심상철 (동아대학교), 이은진, 김효민 (머티리얼솔루션파크)

Keywords: 가탄재, 전기로, 폐플라스틱, 슬래그 포밍, 탄소 중립

최근 전 세계적으로 기후 변화와 탄소 배출 저감에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라, 산업 전반에서는 환경 부담을 줄이기 위한 대체 소재 및 공정 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 철강산업과 같이 에너지 소비가 크고 온실가스 배출량이 많은 분야에서는 친환경 기술 도입이 절실한 상황이다. 이에 본 연구는 기존의 가탄재 사용을 대체할 수 있는 친환경 가탄재의 활용 가능성을 모색하고자 하며, 이를 위해 폐플라스틱을 첨가한 가탄재를 사용하여 고온 반응 및 포밍 공정 내 미세 구조 변화를 면밀히 분석하였다. 실험에서는 3원계 슬래그에 폐플라스틱과 가탄재를 일정 비율 혼합하였으며, 정면에서 시간에 따른 포밍 면적을 실시간으 로 관찰하여 포밍 효율성을 평가하였다. 포밍 과정은 총 5단계로 세분화하여 각 단계별 시편을 제작하였으며, 제작된 시편에 대해 X-ray CT 분석을 실시하여 내부 기공 분포를 파악하였다. 분석 결과, 고온 반응 중 폐플라스틱과 가탄재가 고온에서 반응하면서 발생한 미세 기공들이 초기에는 분산된 상태로 존재, 포밍 진행에 따라 점차 합쳐지는 경향을 보였다. 또한 각 시편에 대해 EPMA 분석을 진행한 결과, 폐플라스틱을 첨가하였을 때 FeO 내 산소 비율 이 감소한 것을 확인하였다. 이는 폐플라스틱이 고온에서 불완전 연소되어 CO 가스를 생성함으로써 보다 효율적인 환원이 이루어졌다고 판단하였다. 이러한 결과는 폐플라스틱을 활용한 친환경 가탄재 위 결과를 통해 폐플라스틱을 첨가한 친환경 가탄재가 기존 가탄재와 비교하였을 때, 탈산 효율과 포밍 성능에서 유사한 효과가 나타나는 것을 확인하였으며, 폐플라스틱 기존 가탄재의 대체 가능성을 확인하였다.

[철강B6-1 | 10:40]

Application of High-MgO Pellets as Raw Material for Blast Furnace Operations: Leonardo Rocha*, Dohyeon Kim, Seongkyu Cho (POSTECH), Hwanjae Kim (POSCO Ironmaking Engineering Group), Jung Ah Kim (POSCO Ironmaking Research Group), and Sung-Mo Jung* (POSTECH)

Keywords: high-MgO iron ore pellet, Blast Furnace, Cohesive Zone, Melilite

To achieve carbon neutrality, the use of sinter in blast furnaces should be reduced due to the high CO_2 emissions associated with the sintering process. This trend could drive the increased adoption of iron ore pellets, offering lower CO_2 emission during fabrication, and improved reducibility and gas permeability owing to great mechanical strength. The pelletizing process predominantly relies on high-grade iron ore, such as magnetite (Fe_3O_4) as the primary raw material; however, the depletion of these ores has led to increased use of the higher Al_2O_3 content, which deteriorates slag fluidity and hinders slag movement in the blast furnace smelting zone. The current study aimed to explore the application of high-MgO pellets in actual blast furnace operations, while also drawing a comparative analysis with acid pellets. The acid pellets indicated superior physico-chemical characteristics than those of high-MgO pellets, in terms of compressive strength, reduction disintegration and reducibility. The high-melting point phases such as spinel ($MgO{\cdot}Al_2O_3$) and dicalcium silicate ($2CaO{\cdot}SiO_2$) in the high-MgO pellets mixed burden could disappear gradually with increasing temperature and the low-melting point phase melilite (2CaO·MgO·2SiO2) where MgO occupies a higher stoichiometric ratio, would eventually form as analyzed by FactSage calculation. The augmented high-MgO pellet ratio in the burden facilitated the formation of a low-melting point melilite phase, resulting in a narrower cohesive zone. The MgO content can contribute to an improvement of slag fluidity, demonstrating lower S-values, which reflect an enhancement in gas permeability. The coke breeze consumption in blast furnace process might increase with the rising high-MgO pellet ratio which results were predicted by the remaining FeO phase in dripped slag after softening under load (SUL) test. These findings could suggest the potential to utilize high-MgO containing pellets in mixed burden blast furnace operations.

[철강B6-2 | 10:55]

제강-연주공정 연속 버블링 기술: 김성줄* (㈜포스코 기술연구원 제강연구그룹)

Keywords: 버블링, 래들, 개재물

용강에 존재하는 개재물을 제거하기 위한 가장 핵심적인 수단의 하나로써, 래들 또는 턴디시에 수용된 용강으로 불활성 가스를 주입하여 개재물을 부상시킴으로써 상부 표면에 도포된 슬래그에 포집하는 버블링 방법이 주로 사용된다. 그러나, 버블링을 위한 가스를 주입하기 위해서는 가스 설비 등을 구비해야 하며, 생산 시간을 준수해야 하는 등 장소와 시간의 제약이 존재한다. 이러한 버블링을 위한 공간과 시간의 제약을 해소하기 위해, 래들에 가스 압력용기를 부착하여 버블링을 실시할 수 있는 장치들이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 제강공정부터 연속주조 공정에 이르기까지 가스의 공급이 끊기지 않고 연속적으로 버블링을 할 수 있는 장치를 개발하였고, 개발된 장치를 장기간 현장 생산공정에 적용하였다. 이를 통해 장치의 적용 유무에 따른 용강과 제품의 개재물 품질 수준을 비교하였다.

[철강B6-3 | 11:10]

제강공장의 용강 물류 최적화를 위한 Crane 및 Ladle Tracking 기술: 송민호*, 서성모, 장영환 ((주)POSCO)

Keywords: 제강 물류, 위치 추적, UWB(Ultra Wide Band), Digital Twin

제강공장은 철강 생산의 핵심적인 역할을 수행하는 복잡한 환경으로, 효율적인 물류 관리가 생산성 향상과 비용 절감에 중요한 영향을 미칩니다. 현재 제강 및 연주공정에서 단위설비의 자동조업을 위한 시스템 구축은 상당 부분 이루어졌으나, 공정 전반을 아우르는 관통형 기술은 여전히 부족한 상황입니다. 특히, 통과공정 설정과 크레인 및 레이들의 관제는 전적으로 조업자의 주관적인 판단에 의존하고 있어, 시각 및 온도 편차가 발생하며, 정량적인 데이터가 부재한 상황입니다. 이러한 정보 부족은 제강공정 온도 모델의 적중률 상승에 제약을 가하고 있으며, 크레인 및 레이들의 대기로 인한 리드 타임(Lead Time) 증가 가능성도 존재합니다. 따라서, 크레인 관제 관련 관통형 기술을 개발하여 속인성 작업을 최소화하는 것이 필요합니다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제강공장에서의 용강 물류 최적화를 목표로, 크레인 및 레이들의 위치 추적 기술을 개발하였습니다. 특히, 제강공장의 특수한 환경 제약조건을 고려하여, UWB(Ultra Wide Band) 통신 기술을 적용한 위치 추적 시스템을 설계하고 구현하였습니다. UWB 기술은 넓은 주파수 대역을 활용하여 높은 정밀도의 위치 추적을 가능하게 하며, 금속 구조물과 고온 환경이 혼재하는 제강공장에서의 신뢰성 있는 데이터 수집을 지원합니다. 위치 추적 인프라의 구축은 제강공장의 물류 경로 최적화에 있어 매우 중요합니다. 제강공장의 복잡한 환경적 특성을 철저히 분석하여, UWB 시스템의 최적 배치와 구성 요소를 설계하였습니다. 이를 통해 크레인과 레이들의 실시간 위치 정보를 정확하게 수집할 수 있는 인프라를 구축하였으며, 이는 물류 경로를 최적화하는 알고리즘의 기반이 됩니다. 이 알고리즘은 물류 흐름의 병목 현상을 최소화하고, 용강의 이동 시간을 단축하여 전체 공정의 효율성을 향상시킵니다. 또한, 실시간 위치 및 이동 정보를 제공함으로써, 온도모델의 정확성을 높이고, 제강 품질의 일관성을 확보하는 데 기여합니다. 특히, UWB를 활용한 위치 추적 기술의 개발 결과는 제강공장의 Digital Twin 시스템에서 활용되고 있습니다. 이를 통해 공정의 가시성을 높이고, 운영 효율성을 극대화하며, 예측 및 시뮬레이션 기능을 강화하여 제강공장의 경쟁력을 강화하는 데 기여하고 있습니다. 본 연구는 제강공장의 물류 관리에 있어 혁신적인 접근 방식을 제시하며, UWB 기술의 적용 가능성을 입증하였습니다. 향후 연구에서는 시스템의 확장성을 고려하여, 다른 공정 단계와의 통합 및 자동화 수준을 높이는 방향으로 발전시킬 계획입니다. 이러한 기술 개발은 제강공장의 운영 효율성을 극대화하고, 경쟁력을 강화하는 데 기여할 것으로 기대됩니다.

[철강B6-4 | 11:25]

철강부산물 활용 복합소재용 무기장섬유 제조기술 개발 연구: 정은진* ((재)포항산업과학연구원)

Keywords: 슬래그, 철강부산물, 장섬유, 고부가화, 자원순환

철강슬래그와 유관산업에서 발생되는 폐내화물 등 철강부산물의 자원순환을 위해 다양한 분야로 활용 검토중이다. 국내에서는 자원순환법 및 폐기물관리법이 시행됨에 따라 부산물을 시멘트 원료, 토목 건축용 골재, 도로용 노반재, 규산질 비료 등 경제성이 낮은 저부가가치 제품으로 전량 활용되고 있는 실정이나, 최근에는 슬래그의 고부가화 및 용도확대 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 슬래그의 고부가화 방안의 일환으로 무기장섬유의 제조가능성에 관하여 평가하고자 하였다. 기존에 현무암섬유를 이용하여 제조하는 바잘트섬유는 일반적으로 인장강도가 높고 고온 단열성 및 내식성을 가져 자동차 경량부품 및 건축, 항공 선박 등에 적용이 가능하지만 국한된 지역에서만 광석을 이용할 수 있고 유리섬유 대비 고가라는 한계가 있다. 이에 대응하기 위해 산업부산물인 슬래그를 이용하여 현무암섬유를 대체할 수 있는 가능성을 확인하고 장섬유에 부합하는 요구특성을 단계별로 접근해보았다.

[철강B6-5 | 11:40]

Mn 함유 더스트 재활용 기술 개발: 정용수*, 김현, 강순형, 김희원 (포항산업과학연구원(RIST)), 홍순곤 (POMIA)

Keywords: 더스트, 전구체, 재활용, 수세척, 합금철

환경부는 지속가능한 자원순환사회의 기반을 구축하기 위해 제정된“자원순환법”을 시행하고 있다. “자원순환법”은 순환자원 인정, 자원순환 성과관리, 제품순환 이용성평가, 폐기물처분부담금 등 제품의 생산부터 유통, 소비, 폐기에 이르는 전 과정에서 폐기물의 발생을 줄이고, 재활용을 촉진하기 위한 다양한 신규 제도를 담았다. 이러한 제도들은 폐기물이 발생한 이후의 관리에 초점을 맞췄던 그간 국내 자원순환 정책의 패러다임을 근본적으로 바꾸기 위해 도입된 것이며, 주요내용은 다음과 같다. 제품의 생산 단계부터 폐기물의 발생을 원천적으로 줄이고, 재활용이 쉽게 되는 제품을 생산하도록 개선했다. 연간 지정폐기물을 100톤 이상 또는 그 외 폐기물을 1,000톤 이상 배출되는 사업장에 자원순환 성과관리 제도가 적용된다. 이들 사업장에 대해 맞춤형 자원순환 목표를 설정하고, 순환이용 및 감량 실적 등을 지속적으로 평가한다. 사업장 별 목표는 국가 자원순환 목표, 업종별, 사업장 별 자원순환 여건 등을 고려하여 설정한다. 이행실적이 우수한 사업장에는 재정적, 기술적 우대조치를, 미달 사업장에는 명단 공개 및 기술지도 등을 조치한다. 슬래그, 더스트 및 내화물등 다양한 형태의 부산물이 철강 및 금속산업에서 발생하고 있다. 그 중 더스트 및 슬러지는 는 Fe, Cr, Ni 및 Mn 금속 공급원으로 철강 및 금속산업에 재활용이 가능하다. Mn합금철 제조 공정에서 발생하는 더스트는 Mn이 30% 이상 함유되어 있어 망간석과 동등의 Mn을 함유하고 있으나, K, Na 및 알카리 성분등에 의해 공정에 재활용 되지 못하고 있다. K, Na 및 알카리 성분은 고온 휘발성이 있어서 전기로 및 전로에서 고온에 휘발된다. 휘발된 K 및 알카리는 내화물에 흡착되어 내화물 용락의 원인이 된다. 이러한 더스트를 재활용 하기 위해 수세척에 의해 K, Na 및 알카리를 제거하고, 입상화와 예비환원을 통해 철강 및 금속 산업에 재활용이 가능한 합금철 전구체 제조 기술을 개발하였다. 본 기술 개발로 철강 및 금속산업의 부산물 순환활용 프로세스 구축이 가능하다.

나노융합소재
Room 400, 4월 25일

[나노융합1-1 | 09:00] 초청강연

Electrochemical Synthesis and Modification of Carbon-Based Materials: Sun Hwa Lee* (Institute for Basic Science, Ulsan National Instutute of Science and Technology), Won Kyung Seong (Institute for Basic Science), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Instutute of Science and Technology)

Keywords: Carbon, Electrochemistry, Synthesis, Functionalization, Nano-materials

I present electrochemical methods to synthesize and modify various carbon-based materials. First, we discuss the electrochemical synthesis of well-aligned carbon nanowalls on single crystal metal foils in molten salts. This method offers an alternative to traditional vapor deposition techniques that often result in randomly oriented nanowalls. The growth mechanism and nitrogen doping of these nanowalls will be discussed. Next, we delve into the electrochemical polymerization of polyhydrocarbons, a process whose reaction mechanism has remained elusive. We divide the process into initiation, propagation, and termination steps and combine electrochemical techniques with spectroscopy to elucidate each step. Finally, we introduce covalent functionalization by organic molecules of single-crystal, single-layer graphene directly on its Cu(111) foil substrate. This electrochemical approach enables us to study the inherent reaction behavior of pristine graphene without the interference of transfer processes (such as contamination by transfer). Thus, I present the versatility of electrochemical methods in the synthesis and modification of carbon-based materials, opening doors for future research and applications in various fields. This work is supported by Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[나노융합1-2 | 09:25] 초청강연

Downscaling Effects on Resistivity of Topological Metal Nanowires for Interconnect Applications: Hyeuk Jin Han* (Sungshin Women's University)

Keywords: Topological Materials, Nanowire, Interconnect

Information and communication technology (ICT) accounted for ~8% of total global electricity usage in 2015 and is predicted to account for > 20% by 2025. To reduce the energy consumption of ICT, computing technologies must become energy efficient. At the heart of this challenge is interconnects; on-chip metal wires that connect transistors and transmit signals. Copper (Cu) interconnects are currently used in integrated circuits; however, the resistivity of Cu interconnects increases with decreasing dimensions, posing a significant challenge for future computing technologies. A new breakthrough material is desperately needed. Topological semi-metals that exhibit high conductivity and mobility are promising material candidates for low-resistance interconnects to potentially replace current Cu interconnects. In particular, nanoscale topological semi-metals may surpass their bulk counterparts as interconnects due to the amplified contributions of topologically protected surface states to overall transport signals at the nanoscale. Recently, molybdenum phosphide (MoP) was discovered as a triple-point topological semi-metal with excellent transport properties of bulk resistivity of 8.2 μΩ·cm and high carrier density of 1.1×10^{23} cm^{-3} at room temperature (N. Kumar, et al., Nat Comm. (2019) 10, 2475). Due to the topological protection predicted to suppress electron scattering at the surface, MoP may preserve its low resistivity values at the nanoscale, which may rival the line resistance of current Cu interconnects. In this talk, I will present the synthesis and transport properties of metal phosphide nanowires which were synthesized by reacting oxide nanostructures with phosphorous precursors (H. J. Han et al., APL Materials (2020), 8(1), 011103, H. J. Han et al., Science Advances (2021), 7(41), eabh2012 and H. J. Han et al., Advanced Materials (2023), 35(13), 2208965, H. J. Han et al., Nature Communications (2024), 15, 5889). Our research indicates that MoP topological metal nanowires have been demonstrated as a breakthrough material for interconnect applications and exhibited better dimensional scaling of resistivity than Cu (with a TaN liner) and Ru. While the resistivity values of the polycrystalline MoP nanowires were measured to be higher than the reported resistivity of MoP bulk single crystals, due to the presence of nanoscale grains, we observed that the resistivity values approach those of the bulk as the diameter of the MoP nanowires decreases. Importantly, we show that the line resistance in relation to the total cross-sectional area of MoP nanowires is comparable to, or even superior to, those of effective Cu and barrier-less Ru interconnects, suggesting that MoP is a viable solution to the current scaling challenge of Cu interconnects. Furthermore, I will introduce ongoing research on topological semimetals, which exhibit promising potential for achieving reduced resistivity values in nanowire structures.

[나노융합1-3 | 09:50]

AI-Integrated Woodpile SERS Substrates for Enhanced Noble Metal Nanostructure-Based classification: Young Woo Han (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering), Eojin Rho, Sungho Jo* (Korea Advanced Institute of Science and Technology, School of Computing), and Yeon Sik Jung* (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering)

Keywords: Surface-enhanced Raman scattering, Machine learning, Woodpile SERS substrates, Beef origin classification

Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) is a highly sensitive analytical technique for molecular detection, but its widespread application has been constrained by challenges such as sample matrix complexity and signal variability. To overcome these limitations, integrating SERS with artificial intelligence (AI) has emerged as a promising strategy, requiring large datasets of high-quality SERS spectra for accurate classification. Noble metal SERS substrate with high sensitivity and uniformity requires highly precise and innovative nanofabrication techniques because Raman signals are further amplified in nanometer-scale narrow gaps, which means that creating a noble metal In this study, we fabricated high-uniformity woodpile SERS substrates by stacking gold nanowires (AuNW) into 1, 2, and 3 layers using thermally assisted nanotransfer printing (T-nTP). Each successive AuNW layer was stacked at a 90º rotation relative to the previous layer, enabling strong in-plane coupling within nanogap regions and out-of-plane coupling at densely stacked cross-points, resulting in substantial Raman signal enhancement. Machine learning models were employed to classify material origins with high accuracy, with 3-layer substrates demonstrating superior performance due to their dense hot spot distribution and distinct spectral features. This study underscores the potential of metal nanostructures in SERS-based AI classification, providing a scalable and precise approach for material authentication and characterization.

[나노융합1-4 | 10:05] Canceled

[나노융합1-5 | 10:20]

High Mobility $HfSe_2$ Thin Films Synthesized by Hybrid Deposition Method with Enhanced Stability: Jungdae Lee and Sanghan Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology)

Keywords: 2D materials, Transition metal dichalcogenides, TMD, $HfSe_2$

High-mobility two-dimensional (2D) semiconductors are promising candidates for overcoming the limitations of silicon-based devices. Among them, transition metal dichalcogenides (TMDs) offer exceptional charge transport properties, with hafnium diselenide ($HfSe_2$) theoretically predicted to achieve an electron mobility of ~3,500 $cm^2/V{\cdot}s$ at room temperature. However, mechanically exfoliated flakes exhibit mobilities around 10 $cm^2/V{\cdot}s$ (nearly 1/350 of the theoretical value) due to intrinsic selenium deficiency, which increases charge scattering and oxidation susceptibility, degrading electrical performance. To accurately assess the intrinsic properties of $HfSe_2$ and mitigate defect-induced degradation, precise thin-film synthesis is essential. Here, $HfSe_2$ thin films were synthesized via a hybrid deposition method, integrating laser ablation for hafnium (Hf) and thermal evaporation for selenium (Se). Raman spectroscopy confirmed the 1T phase, while X-ray diffraction (XRD) and φ-scan analysis revealed c-oriented growth with 6-fold symmetry, indicating strong epitaxial alignment and high crystallinity. Electrical measurements showed semiconducting behavior, with resistivity increasing as the temperature decreased, and showed lower resistivity than single crystal flakes. At 300 K, the sample with a Se/Hf ratio of 14 exhibited a resistivity of 0.59 Ω·cm, which is about six times lower than a Se/Hf ratio 7 sample (3.73 Ω·cm). This indicates that reduced selenium deficiency enhanced the electrical properties. Additionally, an amorphous BN (a-BN) layer was applied for in-situ passivation on the Se/Hf ratio 7 sample. The resistivity decreased to 1.00 Ω·cm at 300 K, about 3.7 times lower, indicating improved electrical properties. Furthermore, compared to bare $HfSe_2$, the passivated sample maintained phase stability three times longer during annealing tests. Hall measurements demonstrated the importance of composition control and passivation in optimizing electrical properties. These findings establish $HfSe_2$ thin films as a high mobility 2D semiconductor, demonstrating a scalable deposition approach for improved oxidation resistance and device integration, providing insights for advanced 2D electronics and optoelectronics.

[나노융합2-1 | 10:45] 초청강연

Group-IV semiconductor nanowire laser for mid-infrared application: Youngmin Kim* (Kookmin University)

Keywords: Nanowire, group-IV, germanium-tin, semiconductor, laser, mid-infrared

Semiconductor nanowires offer significant promise for creating ultra-compact lasers in integrated photonics platforms. Although considerable strides have been made in developing nanowire lasers, incorporating these devices into silicon (Si)-based photonic systems remains challenging, primarily due to the reliance on III-V and II-VI semiconductors for their gain media. These materials not only come with high costs but also require complex integration steps with standard Si fabrication, thereby driving up expenses and restricting widespread deployment. Moreover, existing nanowire lasers made from these materials seldom emit above 2 μm, a strategically important wavelength range for imaging and quantum sensing. In response, group-IV nanowires, especially direct bandgap germanium-tin (GeSn) nanowires that can emit beyond 2 μm, have recently been spotlighted as cost-effective and Si-compatible gain media. Yet, until now, no successful lasing has been demonstrated with this promising platform. Here, we report the experimental evidence of lasing at wavelengths above 2 μm from a single bottom-up grown GeSn nanowire. Through the combined use of strain engineering and optimized cavity design, the single GeSn nanowire achieves a high material gain capable of overcoming minimized optical losses, leading to single-mode lasing with a remarkably low threshold of about 5.3 kW cm^{-2}. This result lays the groundwork for fully group-IV mid-infrared photonic-integrated circuits with compact, Si-compatible lasers for on-chip classical and quantum applications

[나노융합2-2 | 11:10] 조청강연

Development of Non-toxic Colloidal Quantum Dots for Infrared Sensing and Imaging: Min-Jae Choi* (Dongguk University)

Keywords: Colloidal quantum dots, infrared, Non-toxic, photodetectors, imaging

Colloidal quantum dots (CQDs) are promising semiconductor materials for optoelectronic devices due to their adjustable bandgap, ease of fabrication through solution processes, and stability in various environments. One of the critical advantages of CQDs is their ability to tune absorption and emission into the infrared region, which is essential for applications in optical communications, night vision, biological imaging, and infrared photovoltaics. Although III-V compound semiconductors have historically been used in infrared devices due to their ability to surpass silicon's 1.12 eV bandgap, challenges such as reactive precursors, high reaction temperatures, and complex vacuum systems limit their widespread use. In this study, we introduce Ag chalcogenide CQDs as a promising alternative, specifically environmentally friendly Ag_2S CQDs for in vivo imaging and Ag_2Te CQDs with tunable bandgaps in the SWIR range for use as 1,550 nm photodetectors. These results underscore the potential of CQDs in the development of next-generation infrared applications.

[나노융합2-3 | 11:35]

Ultrafast and General Strategy for Direct Growth of Nanostructured Transition Metal Oxides on Substrates: Si Heon Lim (Kumoh National Institute of Technology), Geunwoo Kim (Korea University), Sungjin Cho (Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), University of Science and Technology (UST)), Yeong Kwon Kim (Kyungpook National University), Eun Bee Ko, Seon Yeon Choi, Jung A Heo (Kumoh National Institute of Technology), Daegun Kim, Hocheon Yoo (Gachon University), So-Yeon Lee (Kumoh National Institute of Technology), YongJoo Kim (Korea University), Pil-Ryung Cha (Kookmin University), Dong Yun Lee (Kyungpook National University), Sunghun Lee (Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DIGIST)), Byung Chul Jang (Kyungpook National University), Yeonhoo Kim (Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), University of Science and Technology (UST)), and Hyun Ho Kim* (Kumoh National Institute of Technology)

Keywords: Nanostructured transition metal oxide, Universal synthesis, Ultrafast synthesis, Gas sensors, Physical Unclonable Functions

Nanostructured transition metal oxides (NTMOs) have long attracted scientific interest due to their exceptional versatility across various fields. In recent years, they have garnered increasing attention as key materials for energy storage and harvesting devices, as well as electronic applications. However, achieving large-scale production of high-quality NTMOs with precise control remains a significant challenge. This study presents a universal, ultrafast, and solvent-free approach for directly synthesizing highly crystalline NTMOs on target substrates. The results indicate that the growth mechanism is driven by the solidification of condensed liquid-phase TMO microdroplets on the substrate under an oxygen-rich environment. This method enables continuous processing under ambient air conditions, requiring only a few tens of seconds per sample. Furthermore, it is demonstrated that this approach can be extended to the synthesis of various NTMOs and their related compounds.

[나노융합2-4 | 11:50]

α-Al_2O_3/MLG 멤브레인을 이용한 지속 가능하고 친환경적인 인공 해수 기반 리튬 회수: 정대엽, 김예림, 윤현철, 장수희, 박현수, 박원일* (한양대학교 신소재공학과)

Keywords: 그래핀, 리튬, 이온 추출, 원자층 증착, Al_2O_3

휴대용 전자기기, 전기자동차 및 에너지 저장 시스템의 수요 증가로 인해 지상 자원뿐만 아니라 지속 가능한 리튬 공급원이 필요해지고 있다. 약 2,300억 톤의 리튬을 함유한 해수는 유망한 친환경 대안이 될 수 있으나, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} 등과 같은 경쟁 이온이 존재하는 환경에서 선택적으로 Li^+을 추출하는 것은 큰 도전 과제이다. 본 연구에서는 원자층 증착(Atomic Layer Deposition, ALD)과 열 어닐링을 활용하여 α-Al_2O_3 나노 네트워크가 장식된 다층 그래핀(MLG) 멤브레인을 개발하였다. α-Al_2O_3/MLG 이종 계면에서 형성된 반데르발스 갭(van der Waals gaps)은 선택적인 이온 채널 역할을 수행하며, 이를 통해 Li^+의 선택적 투과가 가능해진다. 열 어닐링된 α-Al_2O_3/MLG 멤브레인은 Na^+ 대비 2.7배, K^+ 대비 3.6배 높은 Li^+ 선택성을 나타내며, 100시간 연속 작동 후에도 안정적인 성능을 유지하였다. 또한, 본 연구에서는 멤브레인의 실용성을 평가하기 위해 지속 가능하고 친환경적인 Li^+ 추출 시스템을 설계하였다. 이 시스템은 수소(H_2) 및 염소(Cl_2) 발생 반응을 활용하여 양이온 불균형 문제를 해결함으로써 인공 해수에서 연속적인 Li^+ 추출이 가능하도록 하였다. 세 번의 추출 사이클을 통해 88.9 wt%의 높은 리튬 순도와 총 88.6 %의 회수율을 달성하였다. 본 연구는 해수 기반 리튬 회수 기술의 발전에 기여하며, 친환경적인 이온 분리 공정 개발을 위한 새로운 가능성을 제시할 것으로 기대된다.

[나노융합2-5 | 12:05]

Morphology-Engineered ITO Nanotree Electrodes for Wide-Spectrum Modulated Smart Windows: Jae Han Chung, Yun-Haeng Cho, Ji-Hyeong Lee, Kwang-Mo Kang, Yoon-Chae Nah*, and Young-Seok Shim* (School of Energy, Materials and Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education)

Keywords: RME, VLS, GLAD, Ag, Smart Window

Reversible metal electrodeposition (RME), which changes its optical state in response to an applied voltage, has been widely studied for dynamic windows but faces challenges related to its limited transmission and reflection states. To overcome these limitations,

previous studies have proposed modifying the surface morphology of the electrode and applying a step voltage to achieve tunable absorption states and a diverse range of colors in RME devices. Despite these efforts, limitations such as poor reproducibility and uniformity still remain, hindering their practical application. In this study, we fabricated highly ordered, uniform single-crystal ITO nanotrees (INTs) using a vapor-liquid-solid growth-based glancing angle deposition (VLS-GLAD) technique. To determine the optimal structures for high-performance RME devices, we systematically investigated the morphological and geometrical characteristics of INTs by controlling the deposition rate, temperature, and angle of vapor flux. To evaluate the electrochromic properties, a single cell based on INTs was fabricated. It exhibited an optical reflectance of 87.30% in the mirror state, a transmittance of 79.99% in the transparent state, and a reflectance of 5.19% in the black state. Additionally, by fine-tuning the magnitude, duration, and transition of step voltages, we have successfully developed an RME device that enables reversible color changes across approximately 300 distinct colors including cyan, magenta, yellow and orange as well as transparent, mirror, and black.

복합재료
Room 401A, 4월 25일

[복합1-1 | 09:00]
Synthesis of $Ti_3C_2T_x$ Nanoflake Reinforced Sn-58Bi Composite for Low-Temperature Solder Applications in Packaging: 이재정, 쒸에한, 류혜지, 정두현, 우윤성* (단국대학교)
Keywords: $Ti_3C_2T_x$, Sn-58Bi solder, Ball milling, Reflow

Electronic packaging에서 solder는 주요한 재료가 된다. Pb이 주성분이었지만, 인체 및 환경에 심각한 피해를 주기 때문에 Sn을 기반으로 한 무연 솔더(Lead-free solder)가 활발히 사용되고 있다. 특히, SAC(Sn-Ag-Cu)을 통상적으로 사용하지만 용융 온도(217ºC)가 높아 이를 대체할 수 있는 저온에서 사용 가능한 Sn-Bi(138ºC)가 크게 관심을 받아 많은 연구가 진행되고 있다. 이는 Chip 및 회로들의 미세화로 인한 내열성 저하의 문제가 뒤따르기 때문이다. 그러나 Bi의 brittle 한 단점을 개선하기 위해 CNT, GNS 등의 nano composite을 합성한 연구가 진행되고 있다. 빠르게 경박단소 화 되는 Chip들을 패키징 하기 위해서 brittle 제어가 필수적이다. 따라서 MXene 첨가를 통해 IMC 성장의 억제 및 구조의 미세화 특히, 저온에서의 기계적 물성 강화 특성을 위한 합성 과정이 필요하다. 본 연구에서는 MAX 소재 중 하나인 Ti_3AlC_2를 etching 하여 MXene 소재인 2차원 시트 형상의 $Ti_3C_2T_x$ film을 제조하였다. 합성된 $Ti_3C_2T_x$ film을 powder 형태로 제작하여, ball milling과 paste mixer를 사용하여 0.03, 0.07 0.1, 0.13, 0.17, 0.2 wt% 함량으로 $Ti_3C_2T_x$ powder를 Sn-58Bi powder와 혼합하였다. 이후 혼합한 Nano composite에 일정 함량의 Sn-58Bi powder를 추가적으로 paste mixer를 통해 혼합하였다. 이때, 분말, 용매, flux 등의 소재와 ball milling, paste mixer 등의 공정 제어를 통하여 Sn-58Bi solder powder에 $Ti_3C_2T_x$ nano flake가 균일하게 분산된 nano composite를 제작하고자 하였다. Reflow 공정으로 형성된 $Ti_3C_2T_x$가 첨가된 Sn-58Bi solder 및 bump의 표면, cross-section 및 미세조직을 광학 및 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였으며, 이로부터 $Ti_3C_2T_x$ nano flake가 솔더링 및 기판과의 계면에서 금속간 화합물(IMC)의 형성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 마이크로 경도 측정과 전단 강도 측정(저속, 고속) 등을 이용하여 $Ti_3C_2T_x$의 유무 및 함량에 따른 Sn-58Bi composite의 기계적 강도를 비교하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 $Ti_3C_2T_x$가 첨가된 저온 솔더 복합체가 전력 반도체 등 우수한 방열 특성과 기계적 신뢰성이 요구되는 전자 패키징용 소재로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

[복합1-2 | 09:15]
Effect of Zn or Ca addition on microstructure and mechanical properties of Mg-Ti composites fabricated through liquid metal dealloying: Jang Jee-Eun, Hyun Jun Youn, Bo Hyun Park (Kyungpook National University), Soo–Hyun Joo (Dankook University), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)
Keywords: Mg-Ti composite, Liquid metal dealloying(LMD), Alloying addition, Microstructure

Liquid metal dealloying (LMD) is a novel process for fabricating metal-metal composites with a 3D bicontinuous structure through the selective dissolution of a precursor alloy in molten metal. The addition of alloying elements in the molten metal can affect the LMD behavior and the resultant microstructure and properties. In this study, two 3D interconnected Mg-Ti composites were fabricated by immersing $Ti_xCu_{(100-x)}$ alloy precursors in Mg molten metals containing Zn or Ca. The microstructure and hardness of the Zn- and Ca-added Mg-Ti composites were compared using scanning electron microscopy, electron backscatter diffraction, hardness tests, and other techniques. Results reveal that Zn addition does not cause significant variations in the area fraction and size of the Mg and Ti matrices of the composite. In contrast, Ca addition results in a refinement of the Ti matrix and an increase in the hardness of the Mg-Ti composite. The dealloying behaviors in the Zn- and Ca-containing Mg molten metals and the mechanical properties of the two Mg-Ti composites are systematically analyzed.

[복합1-3 | 09:30]
Al-Si 합금–질소 가스 간의 자발 반응을 통한 과공정 Al-Si 합금 기지 질화알루미늄 강화 복합재료 제조: 최정원, 이제인* (부산대학교)
Keywords: 알루미늄 합금, 알루미늄기 복합재료, 금속기지 복합재료, in situ 아크 용해

최근 경량화 및 소형화가 요구되는 전자기기 산업 분야에서 열관리를 통해 제품의 성능을 높이기 위한 고성능 방열 복합재료 개발에 관한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 반도체 재료와 비슷한 수준의 열팽창계수 및 높은 열전도도를 가지는 방열 소재의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 아크 용해 공정을 적용하여 합성된 강화재 질화알루미늄을 포함하는 과공정 알루미늄-실리콘 합금 기지 복합재료를 새로운 방열재료의 후보로 제시한다. 과공정 조성의 알루미늄-실리콘 합금(20, 30, 40 at.% Si)을 기지로 하여 고강도 및 경량 효과를 극대화하였고 알루미늄의 단점으로 지적되는 높은 열팽창특성을 합금 원소로 첨가한 실리콘 및 강화재 질화알루미늄을 통해 제어하였다. 아크 용해 공정을 통해 알루미늄 용탕과 질소 가스의 자발 반응으로 수 분 내 25 vol.% 이상의 질화알루미늄이 생성된 모재가 제조되었다. 복합재료의 단면 분석을 통해 기지에 균일하게 분산된 초정 Si와 연속적인 라멜라 형상을 가지는 강화재 AlN이 조합된 미세구조를 관찰하였다. 이는 기존의 분말 야금/교반 주조 공정과는 차별화된 결과로써, 수 분 내 제조된 고분율의 복합재료가 독특한 미세구조를 가짐을 의미한다. 본 연구에서는 열적/기계적 특성 분석을 통해 우수한 열적 특성 및 고강도 특성을 만족시키며 경량 방열 재료로 적용할 가능성이 있는 Al-Si/AlN 복합재료의 설계 방안을 제시하였다.

[복합1-4 | 09:45]

HP 및 SPS로 제조한 Al/B_4C 복합재료의 기지/입자 계면 및 강화기구 분석: 권택규, 조의제* (순천대학교)

Keywords: Al/B_4C 복합재료, HP, SPS, 계면, 강화기구

B_4C 입자를 강화재로 사용한 Al 복합재료는 뛰어난 강도, 강성, 내마모성, 열전도도 및 경량성을 지닌다. 분말야금으로 제조 시 열간 가압 소결(hot pressing, HP)과 방전 플라즈마 소결(spark plasma sintering, SPS)이 사용되며, 균일한 압력 전달을 통해 잔류 기공과 미세균열을 제거할 수 있다는 장점을 갖는다. HP는 외부 가열로 인해 공정 시간이 긴 반면, SPS는 균일한 줄 발열로 소결 시간이 짧다. 이러한 소결 공정 차이에 의해 기지와 강화재간 계면 반응을 위한 시간이 서로 다르기에, 반응물의 생성과 두께의 차이가 관찰될 수 있다. 또한, 미세조직 형성 및 치밀화에도 영향을 미치므로 복합재료의 주요 강화기구도 다를 것이라 예상된다. 따라서 Al/B_4C 복합재료의 공정 비용과 미세조직 및 특성간 균형을 고려하여, 계면 및 강화기구를 비교하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 Al/B_4C 복합재료의 계면 및 강화기구에 미치는 소결 공정의 영향을 조사하였다. 5–30 wt% B_4C와 Al 분말을 볼 밀링으로 혼합한 후, HP와 SPS를 각각 이용하여 630 ºC에서 소결하였다. 투과전자현미경(TEM)을 통해 복합재료 내부 기지/입자 계면, 결함, 결정구조를 관찰하였고, 제조된 공정에 따른 영향을 비교하였다. 미소 경도 측정기를 통해 기계적 특성을 평가하고, 소결 공정에 따른 강화기구를 하중 전달, 결정립 미세화, Orowan 강화, 열 특성 불일치, 기공도 등을 통해 분석하였다.

[복합1-5 | 10:00]

Al1100-B_4C-cBN 복합소재의 인장특성에 대한 압하율과 압연온도의 영향: 안찬울 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 이민수 (한국생산기술연구원), 이동현, 김정환, 조승찬 (한국재료연구원), 손석수 (고려대학교), 박창수* (한국생산기술연구원)

Keywords: 사용후핵연료, 복합재료, 교반주조

사용후핵연료는 방사성 및 높은 수준의 열을 방출하기 때문에 저장 및 관리가 중요하다. 현재 중성자 흡수능이 우수한 탄화붕소(B_4C)와 열전도도가 우수한 질화붕소(cBN)가 강화재로 첨가된 알루미늄 복합소재가 연구되고 있다. 본 연구에서는 이러한 사용후핵연료 저장 용기에 사용되는 알루미늄 복합소재를 제조하고 물성평가를 진행하였다. 교반주조를 통해 Al1100+18 wt%B_4C+4 wt%cBN을 제조하고 이 복합소재를 압연온도와 압하율을 다르게 하여 압연 공정 후 기계적 물성을 조사하기 위하여 변형률 속도 $1 \times 10^{-2}s^{-1}$ 조건에서 인장실험을 수행하였다. 추가적으로 인장시편의 국부변형집중 현상을 분석하기 위하여 디지털 이미지 상관법(DIC)을 이용하였다. 그 결과 압연온도가 증가할수록 항복강도와 인장강도는 감소하지만 연신율이 증가하였고, 압하율이 증가할수로 인장강도와 연신율이 증가하였다. X선 회절(XRD)로 Williamsin-Hall Plot을 활용하여 전위밀도를 계산해본 결과, 압연온도가 증가할수록, 압하율이 커질수록 전위밀도가 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 압연온도와 압하율에 따른 동적재결정의 결과로 예상된다.

[복합1-6 | 10:15]

진주층 구조 BMG-ZrO_2 복합소재의 기계적 특성에 미치는 침투온도의 영향: 김태윤 (부산대학교), 오현석 (University of Wisconsin-Madison), 이제인* (부산대학교)

Keywords: Bioinspired, Nacre-like, pressureless infiltration, compressive strength

항공 우주, 에너지 산업에서 높은 작동 온도범위와 우수한 기계적 특성을 갖는 구조 재료에 대한 요구가 증가함에 따라, 강도와 인성이 모두 우수하며 밀도가 낮은 구조재료에 대한 필요성이 증가하고 있다. 최근 많은 연구자들은 뼈, 나무, 조개껍질과 같은 자연물질은 취성의 세라믹 재료가 70 % 이상을 차지함에도 불구하고 강도와 인성이 단일재료에 비해 향상된다는 점에서, 자연의 미세구조 모방을 새로운 해결책으로 제시하고 있다. 특히 진주층 구조의 경우, 약 95 %의 탄산칼슘과 5 %의 고분자가 벽돌집(brick-and- mortar) 구조를 이루며, 강도와 인성이 상호 배타적인 관계에서 벗어나 각 구성성분에 비해 수십배의 파괴인성 증가를 보인다는 특이점을 갖는다. 진주층 구조의 고분자 기지를 세라믹에 대해 젖음성이 우수한 금속으로 대체할 경우, 기존에 비해 고인성의 복합재료를 제조할 수 있다는 점에서 진주층 구조 금속-세라믹 복합소재는 많은 주목을 받고 있다. 본 연구는 세라믹에 대해 우수한 젖음성을 갖는다고 알려진 지르코늄기 벌크비정질 합금을 지르코니아 다공체 내부로 무가압 침투시켜 진주층 구조BMG-ZrO_2 복합재료를 제조하였다. 침투 온도를 변수로 하여 온도에 따른 계면화합물 생성량을 달리하였으며, X-선 회절기 및 주사전자현미경을 통해 미세조직을 분석하였다. 시차주사열량계를 통해 복합재료 내 비정질 상의 결정화도와 열적 안정성을 분석하였다. 또한, 압축실험을 통해 기존에 알려진 복합재료 대비 고분율의 강화상과 우수한 압축 강도를 갖는 복합재료임을 확인하였다. 침투온도에 따른 미세구조와 기계적 특성의 차이 및 관계를 체계적으로 분석하여, 우수한 복합소재 설계에 미치는 요인들에 대해 고찰하였다.

[복합1-7 | 10:30]

파괴인성이 향상된 핵융합로 플라즈마 대면부품용 W-Cr 복합재 제작 및 물성 평가: 이성민, 김정석, 곽노준, 한흥남* (서울대학교)

Keywords: plasma facing components(PFCs), fracture toughness, tungsten heavy alloy, high-energy milling, spark plasma sintering

텅스텐은 높은 경도, 높은 융점, 높은 열전도도, 낮은 스퍼터링율 등의 특성으로 인해 핵융합로 플라즈마 대면부품(plasma facing components, PFCs)의 유망한 소재로 간주된다. 그러나 순수 텅스텐은 저온에서의 낮은 파괴 인성(fracture toughness)으로 인해 취성 파괴에 취약하여 플라즈마 대면부품의 표면부와 같은 고온 환경에서만 적용이 가능하다는 한계를 가진다. 이러한 한계를 극복하기 위해 연성 상(Ni-Fe)을 도입한 텅스텐 중합금(tungsten heavy alloy) 복합재가 활용되나, 중성자 조사 환경에서 Ni이 반감기가 긴 방사성 폐기물을 생성하므로 핵융합 산업에의 응용은 제한된다. 본 연구에서는 중성자 노출 환경에서 생성되는 방사성 폐기물의 반감기가 짧은 Cr을 활용하여 파괴인성이 향상된 3차원 네트워크 구조의 W-Cr 복합재를 제작하고 물성을 분석하였다. W-Cr 복합재 제작에 있어 기존의 Ni 기반 텅스텐 중합금 제조에 일반적으로 사용되는 액상 소결 방법을 활용할 수 없는데, 고온에서 W과 Cr이 고용체를 형성하여 복합재 구조가 파괴되기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위해 고에너지 밀링(high-energy milling) 공정을 활

용하여 W-Cr 코어-쉘(core-shell) 분말을 합성하였으며, 이를 통전활성소결(spark plasma sintering) 공정을 통해 치밀화하였다. 제작된 W-Cr 복합재는 순수 텅스텐 소재와 비교해 파괴인성이 향상되었으며, 플라즈마 대면부품에 가해지는 열응력에 의해 생성된 균열의 전파를 효과적으로 저지할 가능성이 있음을 확인하였다. 또한, 다양한 온도 범위에서 물성을 평가하여 플라즈마 대면부품으로써 활용 가능성을 분석하였다.

[복합1-8 | 10:45]

Fe계 저열팽창 금속복합소재의 Ni 첨가 영향 및 열팽창 특성 Tailoring 연구: 김민수, 신상민, 강민우, 조승찬, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 권한상 (부경대학교), 김정환* (한국재료연구원)

Keywords: 금속복합소재(MMCs), 저열팽창, 인바 효과, 구속 효과

금속복합재료(MMCs; Metal Matrix Composites)는 금속 기지(matrix)와 세라믹 강화재(reinforcement)의 조합을 통해 고온 안정성, 기계적 특성 및 열팽창 거동을 조절할 수 있어 우주항공 구조체, 반도체 패키징, 공작기계 부품 등 다양한 사용처에서 주목받고 있다. 본 연구에서는 Invar effect와 세라믹 강화재의 낮은 열팽창 특성이 상호 작용하여 MMC의 열팽창을 억제하여 낮은 열팽창을 유지하는 효과를 연구하였다. 이를 위해 Fe-Ni기지(matrix)에 TiC 강화재를 적용한 복합소재를 제조하고, Invar조성 뿐 만 아니라 Ni 함량 변화에 따른 결정구조 및 열팽창 특성을 분석하였습니다. 제조된 MMCs는 GPI(Gas Pressure Infiltration) 공정을 이용하여 제작되었으며, 미세구조 및 상 분석과 열팽창 측정을 위해 FE-SEM, EBSD, VSM, TMA를 활용하였다. 실험 결과, Ni 함량에 따라 기지의 결정구조와 자기상태가 변화하며 열팽창 특성도 제어할 수 있음을 확인하였으며, 특히 저온에서 Invar/TiC MMC 보다 높은 열팽창계수(CTE)를 가지지만 강화재와의 구속 효과를 통해 고온에서 낮은 열팽창계수를 유지하는 조성도 확인하였다. 또한, 강화재인 TiC의 CTE보다 낮은 CTE를 가지는 MMC를 만들 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 고온에서도 열적 안정성이 확보될 수 있음을 입증하였다. 본 연구는 Fe-Ni/TiC MMCs의 열팽창 특성을 조절하는 전략과 그 방법을 제시하며, 향후 극한 환경에서 저열팽창 구조용 소재, 중간재 개발에 기여할 것으로 기대된다. 본 연구는 과학기술정보통신부 나노및소재기술개발사업 (RS-2022-NR068258)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

마그넷
Room 401B, 4월 25일

[마그넷1-1 | 10:30]
Electrical tuning of compensation temperature via spin-orbit torque induced selective exchange in HM/AFM/FIM multilayers: WonChang Choi, Tae-Bo Sim, KwonJin Park, Tae-Hwan Kim, and Jung-Il Hong* (Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology (DGIST))
Keywords: spin-orbit torque, compensation temperature, ferrimagnet, helical spin structure, magnetic thin film

In the heavy metal (HM)/antiferromagnet (AFM)/ferromagnet (FM) multilayers structure, spin-orbit torque (SOT) of the spin current from the HM layer enables local controls of exchange bias coupling between AFM and FM layers without assistance of external magnetic field. Since SOT direction is determined by the current flow, field-free switching of the exchange bias field can be achieved rapidly and stably by electrical way. Additionally, local control of AFM via SOT has been demonstrated to control the dynamics of magnetic domains through a tilting of magnetic domain walls, suggesting that it can be utilized to manipulate the spin structures of neighboring FM layers. Based on an analogous principle, the spin structure of ferrimagnet (FIM) materials can also be artificially modified using SOT. In the present work, we demonstrate that a change of FIM compensation temperature (T_C) can be induced by locally controlling the spin alignments of AFM by SOT, which effectively drags part of the spins in the FIM layer. This alteration competes with the magnetic anisotropy of the FIM, resulting in a modified spin structure of the FIM. This process artificially transformed FIM into a helical-like spin structure that simultaneously have in-plane and perpendicular magnetic anisotropy. It was found that the T_C changed in response to the variation of FIM spin structure. Furthermore, the magnitude of T_C change varies depending on the degree of spin alignment change in the FIM. T_C of FIM was determined from the transverse resistance measurements with external magnetic field applied perpendicular to the film plane. ΔR_H in represents $R_{+2\,T} - R_{-2\,T}$, where $R_{\pm 2\,T}$ represents the transverse resistance at ±2 T magnetic field. The sign of ΔR_H changes abruptly around T_C for the pristine FIM specimen with uniform spin configuration while gradual change over the range of temperature was observed after the SOT was applied to the AFM layer, which is associated with gradual change of spin alignment in FIM resulting in the distribution of T_C within the FIM layer depending on the distribution of spin alignment angles. Quantitative understanding of the measured change in T_C could also be obtained by considering the magnetization of FIM with atomic moments aligned at various angles, rather than parallel or antiparallel directions, due to the presence of AFM spins nearby. Therefore, our results demonstrate that the magnetic state can be controlled by spintronics mechanism.

[마그넷1-2 | 10:45]
중희토류 합금리본활용 GBDP 공정의 보자력 향상에 대한 연구: 주현빈 (한국생산기술연구원 희소금속산업기술센터, 고려대학교), 박승연, 정세린 (한국생산기술연구원 희소금속산업기술센터), 오승주 (고려대학교), 임경묵* (한국생산기술연구원 희소금속산업기술센터)
Keywords: Nd-Fe-B, Grain Boundary diffusion process(GBDP), Alloy ribbon, Coercivity

전 세계적으로 탄소 중립의 중요성이 대두됨에 따라, 전기 자동차 및 신재생 에너지 발전기의 수요 또한 증가하고 있다. 전기차 및 발전기의 모터에 사용되는 영구자석은 고온에서의 높은 보자력이 요구되는데, 이를 위해서는 상온에서의 높은 보자력이 필수적이다. 현재 보자력을 향상시키기 위해 가장 많이 사용되는 방법은 입계 확산 공정(grain boundary diffusion process, GBDP)으로, 중희토류를 결정립 표면에 위치시켜 core-shell을 형성할 수 있도록 하는 방법이다. 현재 GBDP의 확산원으로는 실제 양산이 가능하도록 하기 위해, 전기 영동법 등으로 코팅이 가능한 희토류 불화물, 수화물 등의 분말을 사용하지만, 이외 희토류계 합금은 미세한 분말 형태의 제조가 어려워 확산원으로 활용하기 어렵다는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 미세 분말 제조가 용이하지 않은 확산원으로도 GBDP를 수행할 수 있도록 하기 위해 Dy-Al-Cu계 합금 리본을 확산원으로 활용하였다. 이후, 합금 리본이 분말에 비해 자석과의 접합력이 떨어진다는 문제점을 해결하기 위해 전처리 공정을 도입하였다. 합금 리본을 확산원으로 활용하여 전처리 공정 및 GBDP를 진행한 경우, 모재에 비해 약 5 kOe 이상의 보자력 향상을 확인하였다. 또한, 전처리 공정 없이 GBDP만 수행한 경우에 비해 입계 확산 시간을 약 75 % 감소시킬 수 있었다.

[마그넷1-3 | 11:00]
Micromagnetic study on the control of Chemically Induced Liquid Film Migration inside Nd-Fe-B Sintered magnet: Ganghwi Kim (Ulsan National Institute of Science and Technology), Sujin Lee, Tae-Hoon Kim (Korea Institute of Materials Science), and Ki-suk Lee* (Ulsan National Institute of Science and Technology)
Keywords: Micromagnetic simulation, permanent magnet, core-shell structure

Grain Boundary Diffusion Process (GBDP) is a highly effective technique used to improve the performance of permanent magnets. By replacing Nd atoms in Nd-Fe-B magnets with heavy rare-earth elements like Dy and Tb, the coercivity of the magnet can be significantly enhanced. However, this substitution typically leads to a reduction in both remanence and saturation magnetization. GBDP allows these heavy rare-earth elements to diffuse along the grain boundaries, limiting the substitution to regions near the boundaries. This approach helps retain remanence while still achieving a notable increase in coercivity. One of the key challenges in GBDP research

is how to enhance the diffusion depth of rare-earth elements. Since diffusion originates at the magnet surface, a large portion of the diffused atoms tends to accumulate near the surface. Therefore, determining the optimal process conditions to achieve deeper diffusion and form a substituted shell with the ideal thickness is a major focus of GBDP studies. Experimental results from Pr diffusion suggest that the depth of diffusion plays a more critical role than factors like shell thickness or substitution concentration. However, real permanent magnets are highly complex materials, and their performance is influenced by many factors. As a result, studying the isolated effects of shell characteristics remains challenging. In this study, we simulated the effect of Pr-rich shell formulated by the chemically induced liquid film migration (CILFM) mechanism inside the Nd-Fe-B sintered magnet. Inhibition or adjustment of CILFM mechanism variously change the composition and thickness of the Pr-rich shell. We designed the micromagnetic simulation system to implementn the CILFM-based Nd-Fe-B sintered magnet, and calculated their coercivity. The results of these simulation show the obvious relation among the coercivity and various features of the Pr-rich shell.

[마그넷2-1 | 11:15]

Fabrication of fine-grained Nd-Fe-B anisotropic magnets using single-crystalline particles synthesized by reduction-diffusion and oxidation-inhibited washing processes: Keunki Cho, Seol-mi Lee, Su-min Kim, Tae-Hoon Kim*, and Jung-Goo Lee (Department of Magnetic Materials, Korea Institute of Materials Science (KIMS))

Keywords: Nd-Fe-B sintered magnets, Reduction Diffusion process, Nd-Fe-B particle, Grain refinement

The current research on the development of Nd-Fe-B hard magnetic powders has primarily focused on reducing their size to achieve fine-grained sintered magnet with higher coercivity. The conventional 'top-down' approach, involving the strip-casting-hydrogen decrepitation-N_2-jet-milling processes, has faced the limitation in reducing the particle size to less than 2 μm. To overcome such a limitation, the reduction-diffusion (RD) method has attracted significant attention in preparing fine particles for developing fine-grained Nd-Fe-B bulks with a grain size of ~1 μm. During the RD process, the Nd atoms, reduced from the Nd_2O_3 by Ca, and B atoms are diffused into the Fe precursor particles to form a $Nd_2Fe_{14}B$ intermetallic product, thus the size of Fe precursors determines the size of $Nd_2Fe_{14}B$ particles. Therefore, the RD process, which is a 'bottom-up' powder synthesis process, is more advantageous to obtain a fine $Nd_2Fe_{14}B$ particles than a conventional 'top-down' process. However, a major challenge in RD is the washing step, where water is typically used to remove the byproduct CaO. Water, which is effective for eliminating the CaO, also induces the oxidation of the $Nd_2Fe_{14}B$ products, leading to significant deterioration in their magnetic properties and sinterability. Due to this issue, there is no reports on the successful fabrication of anisotropic Nd-Fe-B sintered magnets using the RD powders. To address this challenge, we introduced a novel oxidation-inhibited washing process, consisting of powder surface coating with ethylenediamine and powder surface etching with acetic acid, to synthesize low-oxygen $Nd_2Fe_{14}B$ particles and fabricate high-density sintered magnets using the RD powders. By the novel washing process developed in this work, we succeeded in obtaining high-purity and single crystalline ~1 μm sized Nd-Fe-B particles with the hard magnetic properties ($4\pi M_s$ ~ 15.9 kG and H_{cJ} ~ 1.5 kOe) comparable with those of commercial one. Thereby, for the first time, the Nd-Fe-B sintered magnets with the $4\pi M_r$ of 13 kG, H_{cJ} of 11 kOe, and $(BH)_{max}$ of 42 MGOe was also successfully fabricated from the RD powders obtained in this work. We believe that the RD process with the oxidation-inhibited washing process can be a solution that can breakthrough the limit of conventional 'top-down' process in preparing fine Nd-Fe-B particles for the fine-grained sintered magnets.

[마그넷2-2 | 11:30]

Investigation of selection rules for the magnetocrystalline anisotropy (MCA) of permanent ferromagnets: Changhoon Lee* (Max Planck POSTECH Center for Complex Phase of Materials, Division of Advanced Materials Science, POTECH), Taesu Parrk (Department of Chemistry, POSTECH), Jae-Hoon Park (Max Planck POSTECH Center for Complex Phase of Materials, Department of Physics, POSTECH), Ji Hoon Shim (Department of Chemistry, POSTECH, Division of Advanced Materials Science, POTECH), and Myung-Hwan Whangbo (Department of Chemistry, North Carolina State University)

Keywords: Permanent magnets, Density functional Theory, Orbital Interaction, Magnetocrystalline Anisotropy (MCA)

It was shown that the uniaxial magnetic anisotropy of permanent magnets with f-elements requires spin-polarization in one of the three doubly-degenerate pairs of their f-bands so the two members of such a pair become unevenly occupied. We verified this condition by analyzing the electronic structures of the two permanent magnets, uranium monosulfide (US) and samarium cobalt ($SmCo_5$). In permanent magnets with f-elements, the condition for uniaxial magnetic anisotropy induces a weak Jahn-Teller instability so it does not affect their uniaxial magnetism. A weak rhombohedral distortion of US accompanying the onset of its ferromagnetism manifests such a weak Jahn-Teller instability. The orbital moment of an f-element in permanent magnets is not described by Hund's second rule. How to correctly assign the orbital moment was presented.

[마그넷2-3 | 11:45]

고포화자화 연자성분말 최적화 설계: 김태영, 박언병 (RIST), 정재원 (KIMS), 최광덕 (서울대학교), 변지영 (KIST), 권기혁* (RIST)

Keywords: 연자성분말, 구동모터, 로봇

4차산업 핵심 산업인 로봇산업의 급속한 성장에 따라 로봇에 시용되는 모터도 고효율 및 고성능이 요구되고 있다. 이를 위해, 모터코어용 핵심 소재인 연자성소재의 성능 향상이 필요하다. 일반적으로 모터코어용 소재로는 전기강판이 주로 사용되나, 모터의 형태

와 요구성능에 따라 연자성분말 사용이 더 효과적인 사례가 증대되고 있다. 다만 연자성분말은 전기강판 대비 저비용으로 모터코어를 제조할 수 있으나, 자성특성이 상대적으로 열위하여, 사용에 제한이 있다. 본 연구에서는 고성능 로봇용 구동모터 구현을 위해 신개념 고포화자화 연자성분말 개발현황을 소개하고자 한다. 개발된 연자성분말은 우수한 투자율 및 자속밀도 확보가 가능하였으며, 분말 입도 제어를 통해 추가적인 자성특성 향상을 달성하였다.

마그네슘
Room 402A, 4월 25일

[마그네슘1-1 | 09:00]
Effect of Al content on microstructure and tensile properties of extruded SEN magnesium plates: Je Hyeong An, Hyung Jun Kim, Ji Yoon Lee (Kyungpook National University), Joung Sik Suh (Korea Institute of Materials Science), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)
Keywords: SEN alloys, Al content, Recrystallization, Microstructure, Tensile properties

This study investigates the effect of Al content on the microstructure and mechanical properties of extruded SEN series Mg alloys—SEN1, SEN3, SEN6, and SEN9—containing 1, 3, 6, and 9 wt% Al, respectively. The SEN1 and SEN3 plates exhibited a partially recrystallized microstructure, with area fractions of unrecrystallized grains of 24% and 13%, respectively, whereas the SEN6 and SEN9 plates had a fully recrystallized microstructure consisting of equiaxed grains. Increasing the Al content from 1 to 9 wt% led to a gradual decrease in average grain size from 36.9 to 16.9 μm. The average kernel average misorientation (KAM) and grain orientation spread (GOS) values decreased as the Al content increased, indicating a reduction in internal strain energy with increasing Al content. The mechanical properties were significantly influenced by Al content. The SEN9 plate exhibited the highest tensile yield strength (TYS, 214 MPa) and ultimate tensile strength (UTS, 318 MPa), while its elongation (8.0%) was the lowest. In contrast, the SEN6 plate showed a well-balanced combination ofμm strength (TYS: 151 MPa, UTS: 286 MPa) and elongation (18.6%). Fractographic analysis of tensile specimens revealed that twin-induced cracks were predominant in the SEN1, SEN3, and SEN6 alloys, whereas undissolved particle-induced cracks were observed in the SEN9 alloy. These findings demonstrate the critical role of Al content in tailoring the microstructure and mechanical properties of extruded SEN series alloys, providing valuable insights for the development of lightweight, high-performance Mg products.

[마그네슘1-2 | 09:15]
열처리 방식에 따른 고강도 LPSO 합금의 미세조직 변화 메커니즘: 이승엽, 유진영, 천세호, 이성호, 송종한, 박동준, 이정훈 (부산대학교), 김종현 (충칭대학교), 이태경* (부산대학교)
Keywords: 마그네슘, LPSO, EPT, FHT, 미세조직

마그네슘 합금은 높은 비강도, 큰 연성 등 우수한 기계적 특성으로 인해 자동차, 항공우주, 국방 등 다양한 산업에서 사용된다. 순수 마그네슘은 비교적 낮은 강도를 가지지만 합금 원소를 추가함으로써 강도를 증가시킬 수 있다. Y 원소를 포함하는 마그네슘 합금은 일반적으로 고강도 특성을 가지며, Mg-xY-1Cu-1Ni (x = 1, 2, 3) 4원계 합금의 경우 Long-Period Stacking-Ordered phase(LPSO) 라는 2차상으로 인해 고강도 특성을 나타낸다. 금속 재료의 기계적 특성을 개선하기 위해서는 열처리가 필요한데, 일반적인 퍼니스 열처리 방법은 긴 처리 시간과 비효율적인 에너지 사용이라는 단점을 가지고 있다. 따라서 electropulsing treatment(EPT)를 적용하여 열처리를 행하는 방안이 있다. EPT를 통한 열처리는 금속에 직접 전류를 가함으로써, 줄 가열 효과(Joule heating effect)를 활용한 효율적이고 빠른 열처리가 가능하다. 해당 방식은 직접적인 에너지 전달로 인해 높은 에너지 효율성, 공정 시간 단축 등의 장점을 가진다. 본 연구에서는 Mg-xY-1Cu-1Ni (x=1, 2, 3) 압출 합금 시편에 EPT를 적용한 경우와 퍼니스 열처리를 행한 경우에 대해 시편의 미세구조를 비교한다. EPT를 행한 경우와 달리, 퍼니스 열처리를 한 시편에 대해 LPSO 상의 형태 변화가 나타나며 그에 따른 미세조직 변화가 나타난다. 미세조직 변화 메커니즘을 규명함으로써 열처리를 행한 LPSO 상 함유 Mg-RE 합금내 LPSO 상이 가지는 효과와 그 특수성을 논한다.

[마그네슘1-3 | 09:30]
다이캐스팅으로 제조된 AZ91계 고내식 마그네슘 합금: 김정기, 민두원, 권재호, 박성수* (울산과학기술원)
Keywords: 마그네슘, 다이캐스팅, 고내식, 미량 합금화

전 세계적으로 강화되고 있는 환경 규제 정책에 따라 친환경 모빌리티 시장이 급격하게 성장하고 있으며 이에 따라 경량 금속 소재의 중요성이 더욱 증가하고 있다. 마그네슘은 티타늄, 알루미늄과 같은 타 경량 금속 대비 경량성이 우수할 뿐만 아니라 비강도, 진동 감쇠능 및 전자파 차폐능 측면에서도 부가적인 장점을 가지고 있기 때문에 차세대 엔지니어링 산업에 활용될 핵심 소재로 주목받고 있다. 그러나, 마그네슘은 수분 및 염분을 포함한 환경에서 빠르게 부식되어 적용 부품의 장기적인 수명과 신뢰성을 저하시키기 때문에 차세대 부품용 소재로서 보다 활발히 적용되기 위해서는 이러한 단점이 개선된 고내식성 마그네슘 합금 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 주조용 AZ91 마그네슘 합금에 미량의 희토류 원소를 첨가한 후 다이캐스팅 공정을 통해 시제품을 제작하고 소재의 부식 특성을 평가하였다. 평가 결과 기존 합금 소재와 비교해 미량 합금화가 적용된 경우 최대 5배 이상 향상된 내식성(14일 침지 기준 부식속도 0.18 mm y^{-1}) 확보가 가능함을 확인하였으며 이러한 우수한 내식성을 합금 성분과 연관된 미세조직 변화와 관련지어 고찰하고자 한다.

[마그네슘1-4 | 09:45]
Low-cycle fatigue properties of extruded SEN series Mg alloys: Hyung Jun Kim, Ji-Yoon Lee (Kyungpook National University), Jun Ho Bae (Korea Institute of Materials Science), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

Keywords: SEN alloy, Al content, Microstructure, Low-cycle fatigue, Life prediction model.

In recent years, a novel Mg alloy system with enhanced ignition and corrosion resistance has been developed by adding small amounts of Ca and Y into commercial Mg–Al-based alloys. This alloy system, named SEN (Stainless, Environmentally friendly, and Nonflammable), exhibits superior chemical stability and mechanical properties. Notably, extruded SEN alloys demonstrate higher mechanical strength compared to conventional extruded Mg–Al-based alloys devoid of Ca and Y, making them promising candidates for various industrial applications. When extruded SEN alloys are applied as structural components, fatigue failure becomes a critical concern due to cyclic loading or deformation during service. Therefore, the evaluation of their fatigue properties is essential to ensure mechanical reliability and safety. Additionally, the microstructure and mechanical properties of extruded SEN alloys are highly dependent on their Al content, influencing their fatigue behavior. Therefore, this study systematically investigates the low-cycle fatigue (LCF) behavior of extruded SEN series Mg alloys with varying Al contents (1, 3, 6, 9, and 11 wt.%). A comprehensive analysis was conducted to establish the correlation between microstructural characteristics and LCF properties. Moreover, an energy-based damage model was employed to predict fatigue life by utilizing total strain energy density as a damage parameter. The developed model provides a reliable and effective approach for estimating the LCF lifespan of extruded SEN alloys, facilitating their optimized application in structural components requiring high mechanical durability.

[마그네슘1-5 | 10:00]

금속 용탕 탈합금 공정 중 용탕 온도와 장입 시간이 Mg-Ti 복합재의 미세조직에 미치는 영향 : 윤현준, 장지은, 박보현 (경북대학교), 주수현 (단국대학교), 김영민 (한국재료연구원), 박성혁* (경북대학교)

Keywords: Liquid metal dealloying, Mg-Ti composite, Melt temperature, Immersion time, Microstructure.

금속 용탕 탈합금(Liquid metal dealloying, LMD) 공정은 전구체 합금(precursor alloy)에서 특정 원소를 용융 금속 내에서 선택적으로 용해시키고, 남은 전구체 합금 원소와 용융 금속 원소 간의 반응을 통해 3차원 연속연결 구조를 가지는 금속을 제조하는 최신 기술이다. 이를 통해 금속-금속 복합재를 효과적으로 제조할 수 있으며, 기존의 분말야금법이나 침투 주조법과 달리 두 금속 기지재가 미세하고 균일하게 분포된 복합재료를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 TiCu 합금 전구체를 Mg 용탕에 장입하여 LMD 공정을 수행함으로써, 3차원 연속연결 구조를 가지는 Mg–Ti 복합재를 제조하고, 용탕 온도와 장입 시간에 따른 복합재의 미세조직 변화를 체계적으로 분석하였다. 이를 위해 Ti30Cu70 (at.%) 합금 전구체를 800, 820, 840, 860 ℃에서 10, 20, 30, 60분 동안 pure Mg 용탕에 장입하였으며, Cu 탈합금 완료 여부와 제조된 Mg-Ti 복합재의 미세조직을 SEM, EDS, EBSD 등을 통해 분석하였다. 그 결과, 800 ℃에서는 60분 후에도 탈합금이 완전히 진행되지 않았으며, 820 ℃에서는 30분에 탈합금이 완료되었고, 840 ℃ 이상에서는 10분 만에 완전 탈합금이 이루어졌다. 또한, 용탕 온도와 장입 시간이 증가함에 따라 Mg-Ti 복합재의 Mg 기지재와 Ti 기지재의 폭이 점차 증가하였다. 그러나 두 기지재의 면적 분율은 공정 조건에 무관하게 약 5:5로 유지되었다. 본 연구를 통해 TiCu 전구체의 완전 탈합금를 위한 LMD 공정 지도를 구축하고, Mg-Ti 복합재의 미세조직을 제어를 위한 최적의 공정 조건을 도출하였다.

[마그네슘1-6 | 10:15]

Strengthening 3D interconnected Mg-Ti composite through post-Al alloying: Bo Hyun Park, Jang Jee-Eun, Hyun Jun Youn, In Sung Han (Kyungpook National University), Soo Hyun Joo (Dankook University), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

Keywords: Liquid metal dealloying, Mg-Ti composite, Al alloying, Microstructure, Hardness

Mg–Ti composites are promising advanced materials that offer excellent specific strength by combining the low density of Mg with the high strength of Ti. However, conventional powder metallurgy-based Mg–Ti composites face several challenges such as nonuniform reinforcement distribution, difficulties in microstructural control, high powder manufacturing costs, and design limitations. To overcome these issues, liquid metal dealloying (LMD) has been recently developed as a novel fabrication approach to produce metal–metal composites with a three-dimensional (3D) interconnected structure, significantly enhancing their mechanical properties. Despite the high hardness of LMD-processed Mg–Ti composites, further improvements are needed to expand their applicability, particularly in high-strength applications such as urban air mobility. To this end, we developed a post-Al alloying technique in which LMD-processed Mg–Ti composites are briefly immersed in molten Al for less than 1 min. This process facilitates Al diffusion from the composite surface toward the center, triggering reactions with both the Ti and Mg matrices. Notably, rapid and extensive phase transformations occur in the surface region even with short exposure to molten Al. The Mg matrix transforms into the Al_2Mg_3 phase, while the Ti matrix partially converts into the $TiAl_3$ phase, which consequently result in significant improvement in the hardness of the composites. These findings demonstrate that Al alloying via immersion in molten Al is an effective post-processing method for improving the mechanical strength of LMD-processed Mg–Ti composites, broadening their potential applications as structural and high-performance components.

[마그네슘2-1 | 10:40]

미세조직 조절을 통한 마그네슘 합금판재의 전자기파 차폐능 향상: 이상봉*, 강민혁, 김성제, 김경택 (국립금오공과대학교, 재료공학부 신소재공학전공)

Keywords: 마그네슘 합금, 전자파 간섭, 전자기파 차폐능, 미세조직

첨단 전자기기 및 통신산업의 발달과 더불어 전자기파 노출에 따른 인체유해성에 대한 우려와 함께, 전자기파 간섭으로 인한 전자

기기의 오작동 및 신호품질저하 등 기술적인 측면에서도 전자기파 차폐재의 고성능화에 대한 요구가 증대되고 있다. 전자기파 차폐능은 사용하는 차폐소재, 형상과 전자파원의 특성에 따라 영향을 받으며, 특히 재료의 미세조직도 차폐성능에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 유무인 수송기기 및 휴대용 전자기기에 적용을 위해서는 경량 차폐재의 개발이 요구된다. 현재 금속계 차폐재로 주로 이용되는 Fe, Ni, Cu기 합금은 상대적으로 높은 밀도로 인해, 수송기기 또는 휴대용통신기기로 적용하는데 한계가 있다. 이에 반해 Mg합금은 높은 비강도와 더불어 제진성과 전기전도도가 우수한 것으로 알려져 있다. 현재까지 Mg합금의 차폐능에 관한 연구는 대부분 주조재와 압출재에 대한 연구에 한정되어 있으며, 향후 수송기기 및 통신장비의 케이스재로 응용을 위해선 압연판재의 차폐능에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는Mg, Al, Cu합금판재를 제조하여 차폐능을 비교하고, AZ61 합금판재의 열처리에 따른 미세조직 변화와 전자기파 차폐능에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 분석을 진행하였다. 두께 1 mm인 Cu, Al5052, AZ31합금판재의 전자파 차폐능을 압연상태와 재결정열처리 후 30 MHz ~ 1.5 GHz주파수 대역에서 측정하였다. 판재의 미세조직은 광학현미경, SEM-EDX와 EBSD를 이용하여 분석하였으며, 재결정 열처리 후 Cu와 Al합금은 조대한 결정립을 나타내는 반면 AZ31판재는 결정립 조대화가 관찰되지 않았다. 소재별-열처리 상태별 상이한 전자파 차폐능을 보이며, 이러한 실험결과를 바탕으로 전자파 차폐능에 영향을 미치는 미세조직 요인을 분석하고, 전자파 차폐능 향상을 위한 미세조직 조절 방안을 도출하였다. 전자기파 차폐능에 미치는 제2상의 영향에 대한 분석을 위해 AZ61합금을 열간압연한 뒤, 400 ºC에서 균질화 처리하고 200 ºC에서 시효처리를 통해 $Mg_{17}Al_{12}$ 상의 분율이 다른 판재시료들을 제조하였다. 압연상태, 재결정 열처리 후와 각 시효조건에 따른 판재시료에 대해 전자기파 차폐특성을 네트워크 분석기와 차폐율지그를 이용해 30 MHz ~ 1.5 GHz 대역에서 측정하였다. 각 열처리 상태에 따른 전자기파 차폐능의 변화를 통하여 미세조직의 영향에 대한 분석을 수행하고 고찰하였다.

[마그네슘2-2 | 10:55]

탄도 충격에 노출된 AZ31 열연재의 소성 변형 및 파괴: 이정훈, 유진영, 천세호, 이성호, 송종한, 박동준, 이승엽 (부산대학교), 이정훈 (경북대학교), 김현수, 김윤호 (서울대학교), 이태경* (부산대학교)

Keywords: AZ31, 탄도 충격, 소성 이방성

마그네슘 합금은 낮은 밀도와 높은 비강도를 가진 금속으로 군사 및 항공 구조물의 목표 강도를 유지하면서 경량화를 실현할 수 있는 소재로 주목 받고 있다. 알루미늄 합금 대비 약 10배에 달하는 충격 감쇠 성능을 가진 마그네슘 합금은 특히 탄도 충격 환경에서 매력적인 소재로 주목받고 있다. 하지만 마그네슘의 육방정계(HCP) 결정 구조로 인해 변형 기구가 제한되며, 이는 결정의 비대칭성을 높여 방향에 따른 기계적, 열적 물성 차이를 야기한다. 이방성으로 인하여 마그네슘의 변형 거동은 예측하기 어려우며, 특히 방위산업 및 항공 분야에서 주로 발생하는 고속 변형거동에서 이방성의 역할은 아직 충분히 연구되지 않았다. 본 연구에서는 열간 압연된 마그네슘 합금 AZ31 판재를 5 mm, 20 mm 두께로 가공하여 c축에 평행한 normal direction(ND) 면, c축에 수직인 rolling direction(RD) 면에 대하여 약 860 m/s의 탄도 충격 실험을 수행하였다. 관통 및 비관통 소재에 대해 크레이터 주변부에 대해 EBSD 분석을 진행하였으며, Hill's Yield Criterion을 적용한 충격 해석 과정을 종합한 미세조직 및 파괴역학적 관점으로 탄도 충격 환경에서 이방성이 소성 변형에 미치는 역할을 규명하였다. 본 연구는 탄도 충격 환경에서의 소성 변형 거동을 이해하는 데에 기여하여 향후 경량 금속 구조재의 최적화 및 충격 저항성 향상을 위한 설계에 통찰을 제공할 것으로 예상한다.

[마그네슘2-3 | 11:10]

Effects of extrusion ratio on microstructure and mechanical properties of Mg-5Bi-3Al Alloy: Gun Woong An, Sang-Cheol Jin, and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

Keywords: BA53 alloy, Extrusion ratio, Dynamic recrystallization, Microstructure, Mechanical properties

This study investigates the influence of the extrusion ratio (ER) on the recrystallization behavior, microstructural evolution, and mechanical properties of a newly developed Mg–5Bi–3Al (BA53, wt.%) alloy. To systematically analyze these effects, BA53 alloy billets were extruded at 400 ºC under four different ERs of 10, 25, 50, and 76.5. The relationships between recrystallization kinetics, grain growth, microstructural features—including grain size, crystallographic texture, and second-phase particle distribution—and tensile properties such as yield strength and elongation were comprehensively examined. As the ER increased from 10 to 76.5, the maximum extrusion load rose from 168 to 254 tons, indicating a greater deformation resistance at higher ERs. During extrusion, undissolved Mg_3Bi_2 particles in the billets were fragmented, resulting in a higher number density of fine Mg_3Bi_2 particles in the extruded material as the ER increased. The greater strain energy induced by higher ERs facilitated dynamic recrystallization (DRX) at the initial stage of extrusion, leading to a higher fraction of DRXed grains. However, all extruded materials exhibited a fully DRXed microstructure due to complete DRX, with the material extruded at an ER of 10 displaying a finer grain size and weaker basal texture compared to the other extruded materials. The mechanical properties were significantly affected by the ER. As the ER increased from 10 to 76.5, the tensile yield strength improved from 175 to 203 MPa, whereas elongation decreased from 13.8% to 7.9%. This strength improvement was primarily attributed to enhanced texture strengthening and particle hardening effects, which became more pronounced at higher ERs. These findings provide critical insights into the optimization of extrusion processing parameters for Mg–Bi–Al alloys, facilitating the development of high-performance Mg alloys with tailored mechanical properties.

[마그네슘2-4 | 11:25]

Mg합금/Cu의 재충전 이종 고상 마찰교반점용접: 박시훈 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 김신일 (한국생산기술연구원), 김예리 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동진* (한국생산기술연구원)

Keywords: 자동차 전력 모듈, Mg 합금, RFSSW (리필 마찰 교반 점 용접), 고상 접합, 미세구조 분석

이 연구는 고방열 마그네슘합금 (AZ31B)과 무산소동 (high purity Cu)간 용접 이슈 극복을 위해, 리필 마찰 교반 점 용접 (RFSSW) 공정을 이용하여 스패터 가공경화 손실 등 종래의 용접결함이 극도로 억제된 Cu/Mg 이종 접합을 구현하는 것을 목표로 한다. 상판에 $30 \times 30 \times 1mm^3$의 크기를 갖는 무산소 동 (1100)과 하판에 $100 \times 30 \times 2\ mm^3$의 크기를 갖는 AZ31B는 1,500 rpm의 스핀들 속도와 약 0.1 mm의 AZ31B측 오프셋을 적용하여 1.2초 동안 회전과 압력이 인가되어 RFSSW 접합되었다. 그 결과, Mg/Cu 이종 접합 계면에서 소성 유동의 근거로 볼 수 있는 폭 700 μm, 높이 600 μm 크기의 후크 (hook)가 관찰되었으며, 본딩 툴에 따른 경도 차이 분석을 위해 미세 비커스경도 분포가 측정되었다. 그 결과, 핀, 슬리브, 클램핑 링 영역에서 결정립 미세화, 성장 및 전위의 도입에 따른 경도 분포의 차이가 현저했으며, 특히 Cu 상판의 재충전 영역의 가공경화 손실이 종래의 용접 공정 대비 극도로 억제되었음이 EBSD 미세구조분석을 통해 정량적으로 밝혀졌다. 소성 흐름에 기인한 후크 영역의 2차상 (phase)의 형성은 열역학 계산과 미세구조분석을 통해 실험적/수치적으로 규명되었다. 이 연구에서 제안한 소성 유동에 따른 혹 기반 접합은 용접성이 낮은 Mg 합금을 접합하는 데 매우 효과적인 방법임이 입증되었다.

[마그네슘2-5 | 11:40]

Density Functional Theory Investigation of Phase Transformation in Mg-Sc Shape Memory Alloys: Hye-Hyun Ahn and Won-Seok Ko* (Inha Univ.)

Keywords: Shape memory alloys, Density functional theory, Free energy calculation, Martensitic phase transformation, Mg-Sc alloys

Shape memory alloys (SMAs) are widely used functional materials in aerospace, robotics, automobiles, and microelectromechanical systems. Recently, lightweight SMAs, particularly Mg-based SMAs, have gained attention due to their lower density compared to conventional NiTi-based SMAs. The Mg-Sc system, the first discovered lightweight SMA, exhibits the shape memory effect via reversible phase transformation between high-temperature austenite (BCC) and low-temperature martensite (orthorhombic or HCP) phases. However, its low phase transition temperature limits practical applications, necessitating further investigation of transformation mechanisms. Previous studies suggest a diffusionless transformation between random solid solutions (BCC austenite ↔ orthorhombic or HCP martensite), but the role of structural ordering remains unclear. There is potential for transformation between ordered intermetallic compounds with partial disordering (B2 austenite ↔ B19 martensite). To explore this, we performed density functional theory (DFT) calculations, modeling both disordered (BCC, HCP) and partially disordered (B2, B19) structures using Special Quasirandom Structures (SQS). Harmonic approximation-based free energy calculations were conducted to determine phase stability and transition temperatures. Our findings provide fundamental insights into the phase transformation mechanisms of Mg-Sc SMAs, emphasizing the influence of structural ordering. This study offers new perspectives for designing lightweight SMAs with enhanced performance and broader applicability.

[마그네슘2-6 | 11:55]

스텐트용 2 mm급 초정밀 고강도 마그네슘 미세튜브 제조기술 개발: 서종식*, 임창동, 서병찬, 김하식, 이상은, 김재성 (한국재료연구원)

Keywords: 생체분해성 마그네슘 합금, 스텐트, 미세튜브, 초정밀, 고강도

혈관질환 치료용 생분해성 소재 및 의료기기 제조기술은 미래 생체삽입형 의료기기의 핵심기술이다. 막힌 혈관을 확장시키고 지지할 수 있는 고강도/저분해 생분해성 금속소재 설계 및 초정밀 튜브가공기술 개발함으로써 혈관질환 토탈 솔루션 제공하기 위한 생체분해성 금속 원천소재 개발을 목표로 한다. 본 연구는 심혈관계 스텐트용 2 mm급 생분해성 마그네슘 미세튜브를 제조하기 위한 초정밀 공정기술의 개발과 더불어 스트럿의 두께를 최소화시키기 위해 미세조직과 집합조직을 제어하여 강도를 최대화하기 위한 기술개발을 목표로 한다. 초정밀 생체분해성 금속튜브 제조기술을 통해 스트럿의 두께를 최소화함으로써 혈관 내 이동 시 스텐트의 유연성과 성능을 확보하여 임상 현장에서 활용성이 높아질 것으로 기대한다.

[마그네슘2-7 | 12:10]

이원계 Mg 합금에서 합금 조성 및 열처리 공정에 따른 비강도 및 열전도도 특성 변화: 김재연*, 임창동, 강동현, 김정환, 장효선 (한국재료연구원)

Keywords: 마그네슘, 비강도, 열전도도

최근 저궤도 통신위성에 대한 관심이 증대되고 있으며, 위성체의 소형화 및 경량화가 요구되고 있다. 이에 따라, 고비강도, 저열변형, 고방열 등의 상반특성이 우주환경에 최적화된 경량소재의 개발이 필수적이다. 세 가지의 요구특성은 강화상이 첨가된 복합소재 제조를 통해 효과적으로 개선될 수 있다. 하지만, 기지합금을 최적화하는 연구를 선행함으로써 복합소재의 요구특성들을 극대화 할 수 있다. 일반적으로 비강도는 합금원소 첨가 및 시효 열처리 통해 향상 될 수 있다. 하지만, 156 W/m·K의 우수한 순수 마그네슘의 열전도도는 합금원소 첨가에 의해 50% 정도 수준까지 감소될 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 발표에서는 이러한 상반특성을 확보하기 위해 다양한 합금원소와 열처리 공정을 적용하여 제조된 2원계 합금(Mg-Zn, Mg-Y, Mg-Nd)에서 비강도와 열전도도 특성 변화를 확인하고 이들의 상관관계를 규명하는 연구를 수행하였다.

적층제조 및 분말 Ⅱ
Room 402B, 4월 25일

[적층5-1 | 09:00]

Laser Powder Bed Fusion으로 제조된 18Ni 마레이징 강의 시효 온도에 따른 마모 특성 분석: 임승온, 공서윤, 김세희, 신세은* (순천대학교)

Keywords: laser powder bed fusion, maraging steel, dry sliding, wear, aging treatment

Laser powder bed fusion(LPBF)은 적층 제조 공정의 일종으로, 높은 치수 정밀도를 통해 복잡한 형상의 제작을 가능하게 해주는 공정이다. LPBF로 제조된 마레이징 강은 높은 내마모성, 강도, 우수한 용접성 덕분에 항공우주 및 도구 산업에서 널리 사용되며, 빠른 냉각 속도로 인해 기존 주조 방법에 비해 우수한 기계적 특성을 가지고 있다. 본 연구의 목적은 용체화 열처리 후 시효 처리 온도에 따라 LPBF로 제조된 마레이징 강의 마모 거동을 비교하고자 하였다. EBSD 분석을 통해, as-built, 390 ºC, 490 ºC 시편에서는 주로 마르텐사이트 상이 형성되었고, 590 ºC 시편에서는 과시효로 인해 reverted austenite가 형성된 것을 확인하였다. 390 ºC와 490 ºC에서 시효된 시편은 각각 610 HV와 643 HV의 높은 경도를 나타낸 반면, as-built 및 590 ºC에서 시효된 시편은 385 HV와 446 HV로 낮은 경도를 나타냈다. 상대적으로 낮은 경도로 인해 높은 마모율이 나타날 것으로 예상되었으나 590 ºC에서 시효된 시편은 낮은 마모율을 나타냈다. 이는 표면에 형성된 산화막이 마모 방지층으로 작용하여 추가적인 마모를 방지하였고 subsurface에서 austenite가 strain-induced martensite로 변태되면서 표면부 경도를 향상시켜 내마모성 향상에 기여하였다. 반면, 높은 경도를 나타낸 390 ºC와 490 ºC에서 시효된 시편은 마모 표면에 산화층 형성이 적었지만 낮은 마모율을 보였다. 이는 산화층의 존재로 인한 내마모성 향상보다 재료 자체의 기계적 특성이 내마모성에 더욱 큰 기여를 한 것으로 판단된다.

[적층5-2 | 09:15]

직접용융증착 중 스캔 전략 변화에 따른 18Ni300 마레이징 강의 미세조직 및 기계적 특성: 주수빈, 노건우, 정영훈 (경상국립대학교), 백민재, 이동준 (한국재료연구원), 김정기* (경상국립대학교)

Keywords: Additive Manufacturing, Maraging steel, Scan strategy, Microstructure, Mechanical properties

적층제조(Additive Manufacturing)는 기존 공정 대비 적은 원자재 손실과 높은 형상 자유도를 획득할 수 있는 장점이 있어 복잡한 제품의 제조에 강점을 가지고 있다. 하지만, 금속 분말의 용융을 위한 레이저 스캔은 공정 중 빠른 냉각 속도 및 레이저 중첩을 유발해 복잡한 열응력 상태를 유발하고, 이는 조형체 내부에 이방성 및 잔류응력 형성 등의 문제를 발생시킨다. 상기 이방성 및 잔류응력의 해결을 위해 다수의 연구에서 적층제조 중 레이저 스캔 전략을 변경하여 부품의 조형을 수행하였으나, 레이저 스캔 전략에 따른 미세조직 변화를 유발해 소재 물성에도 영향을 미치게 되므로 각 요소에 대한 정량적인 평가가 필요하다. 이에 본 연구에서는 레이저 스캔 전략 중 하나인 스트라이프 패턴의 각도를 조절하여 직접용융증착 공정으로 제조된 18Ni300 마레이징강의 미세조직과 기계적 특성을 변화시켰다. 그 결과, 각 layer를 45º로 회전할 경우, 0º와 90º에 비해 반복되는 적층 layer가 적고 용융풀의 중첩이 적어 더 많은 용융 풀 계면을 가짐과 동시에 각 layer의 냉각 속도가 증가하여 더 미세한 마르텐사이트 블록이 형성되는 것을 관찰하였다. 또한, 용융 풀 계면에 풍부한 Ni, Ti, Mo 편석이 형성되어 마르텐사이트 변태온도를 낮추고 잔류 오스테나이트가 집중적으로 형성됨을 확인하였다. 이로 인해 45º스캔 전략을 적용했을 때 더 높은 역응력이 형성되어 우수한 기계적 특성을 가지게 되었다. 상기 결과를 통해 레이저 스캔 중 각 layer 사이의 각도 차이가 미세조직 및 기계적 특성의 중요 변수임을 확인하였다.

[적층5-3 | 09:30]

Uniform Rapid Quenching (URQ) HIP 공정을 활용한 M-MEX 적층 제조 AISI D2 공구강의 인장 강도-연성 동시 향상: 전민수, 박소연, 조용훈 (인하대학교), 백소령 (Markforged), Mathias Englund (Quintus Technologies), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Material extrusion additive manufacturing, AISI D2 tool steel, Hot isostatic pressing, Uniform rapid quenching, Mechanical properties

Metal-Material Extrusion Additive Manufacturing(M-MEX AM)은 PBF 및 DED 기술과 달리 고에너지 열원을 사용하지 않아 고탄소강 적층 제조에 적합한 기술로 주목받고 있다. 그러나 M-MEX 공정으로 제조된 부품은 내부에 air ap defect 및 pore와 같은 결함이 발생하기 쉬우며, 이는 기계적 성질 저하의 주요 원인이다. 이러한 결함을 보완하기 위해 Hot Isostatic Pressing(HIP) 공정이 활용될 수 있다. 그러나 기존 HIP 공정은 냉각속도가 느려 미세조직 제어에 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 개발된 Uniform Rapid Quenching(URQ) 기술은 HIP 공정 후 균일한 gas quenching을 통해 급속 냉각을 구현함으로써, 기존 HIP 대비 미세조직 개선 효과를 극대화할 수 있는 새로운 기술이다. 본 연구에서는 MEX 공정으로 제조된 AISI D2 공고강에 오스테나이징 온도에서의 URQ-HIP(이하 UH) 처리와 표준 열처리(HT)를 후공정으로 적용했으며, 비교를 위해 as-built 상태의 시편(ASB)은 오스테나이징을 포함한 표준 열처리를 수행했다(ASB HT). 이후 후공정에 따른 미세조직과 물성 변화를 조사하였다. 미세조직 관찰 결과, ASB는 air gqp defect 및 pore등의 결함으로 인해 (2.293%)수준의 기공도를 보였으며, Ferrite 기지에 균일한 분포의 카바이드(M_7C_3)로 구성되었다. UH 후에 결함은 크게 개선되어 기공도가 크게 감소하였다(0.061%). 또한 기지의 구성 상들이 마르텐사이트 및 일부 오스테나이트로 변화하였다. HT 이후 ASB 와 UH 시편 모두 마르텐사이트와 M_7C_3로 구성되었으며, 각 상의 크기 및 분포는 차이를 보였다. 경도 측정 결과, 각 시편의 경도는 ASB: 231.20 Hv, ASB-HT: 649.24 Hv, UH: 691.43 Hv, UH-HT: 705.76 Hv로 UH 적용은 우수한 경도 향상 효과를 나타냈다. HT까지 처리한 시편의 인장 시험 결과, 인장 강도는 UH-HT: 2352.57 MPa, ASB-HT: 2089.15 MPa, 연신율은 UH-HT: 2.37%, ASB-HT: 1.21%로 UH 적용으로 인해 연신율은 2배 가까이

증가하였으며, 인장 강도 또한 12.61% 향상하였다. 상기 결과를 바탕으로 URQ-HIP 공정을 활용한 MEX 제조 부품의 효과적인 미세조직 및 물성 개선 방안에 대하여 고찰하였다.

[적층5-4 | 09:45]

Laser Powder Bed Fusion (LPBF) 로 제작된 Hastelloy X의 표면 거칠기 개선을 위한 전해연마 공정: 조현빈, 권태진, 배진성 (국립부경대학교), 김현식 (한국세라믹기술원), 최용규 (한국산업기술시험원), 이정훈* (국립부경대학교)

Keywords: 금속적층제조, 표면거칠기, 표면처리, 전해연마

금속 적층 제조 (Metall Additive Manufacturing) 기술은 차세대 금속 부품 제작 기술로 각광받고 있다. 특히, 고출력 열원인 레이저를 이용하여 분말을 녹여 층 단위로 적층하는 laser powder bed fusion (LPBF)는 높은 분해능으로 인해 복잡한 형상의 부품 제작이 가능하며 치수의 정밀도가 높고, 조형 후 과도한 기계가공이 요구되지 않는 장점이 있다. 소재 특성으로 인해 기계가공이 어려운 니켈계 초합금 (INCONEL 625, Hastelloy X, etc.) 부품 제작에 활발히 적용되고 있으며, 항공우주, 자동차 및 화학 플랜트 산업 분야 등에서 PBF로 제작된 기계부품에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 그러나, PBF로 제작된 부품은 적층 공정의 특성에 의해 완성 후 다양한 표면 결함을 가진다. 특히, staircase 효과 또는 balling 효과 등에 의해 응고가 완료된 후 부품의 표면은 매우 큰 거칠기를 나타낸다. 게다가, 적층 방향에 대한 표면의 방위에 따라 반용융 또는 미용융된 분말이 열에 의해 표면에 부착되어 매우 거친 표면을 형성한다. 불균일하고 큰 표면 거칠기는 치수 공차를 유발하며, 사용 중 표면에서 탈락된 분말 등에 의해 부품 불량 및 파손을 야기한다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 기계가공 수준의 균일한 표면 거칠기를 확보하기 위한 표면처리가 요구된다. 기존의 기계가공, 화학 에칭 등의 방식은 툴의 가공 범위 한계로 인해 PBF로 제작된 복잡한 형상의 부품 전체를 가공하기가 어려우며 과도한 용해로 인해 표면 품질을 만족하기 어렵다. 전해연마 (Electropolishing, EP)는 기존 표면처리의 한계를 극복하기 위한 대안으로써 활발히 연구되고 있다. 전해연마는 형상의 제약 없이 전해질과 접촉한 모든 면에서 균일한 연마가 가능하다. 또한, 인가전압과 처리시간을 제어함으로써 정밀한 물질 제거가 가능하여 PBF로 제작된 기계부품의 표면처리에 적합한 특성을 지닌다. 기존의 전해연마 연구는 합금에 적합한 전해연마 방법을 고안하여 표면 거칠기 개선 또는 금속 조직의 에칭 등을 위해 적용되어왔다. 최근 PBF로 제작된 기계 부품의 특성을 고려하여, 연마 후 치수의 변화를 최소화하면서 거칠기를 개선하기 위한 방법에 대한 연구가 보고되고 있다. 즉, 다양한 전해질에서 인가전압, 처리 시간 등의 변수에 대한 두께 감소량, 거칠기 변화 및 형상 변화를 복합적으로 조사하여 실부품에 적용이 가능한 최적 조건을 도출한다. 본 연구에서는, 항공우주산업 분야에서 활발히 적용되는 Hastelloy X 합금을 이용하여 PBF로 제작된 부품의 표면 거칠기를 개선하기 위한 전해연마 공정을 최적화하고자 하였다. 니켈계 합금 전해연마를 위한 전해질로 알려진 3종의 전해질과, 적층제조로 제작된 부품에 적용하기 위한 특성을 고려하여 신규로 고안된 전해질 1종을 이용하여 전해연마를 수행하였다. 두께의 변화, 표면 거칠기 및 전해연마 후 형상을 분석하여 효율이 가장 우수한 전해질 및 인가전압 조건을 도출하였다. 이를 바탕으로 LPBF로 제작된 다양학 적층각을 갖는 Hastelloy X 시편에 적용하여 연마 효과를 비교하였다.

[적층5-5 | 10:00]

Directed Energy Deposition 공정으로 제조된 CoCrFeMnNi 고 엔트로피 합금 적층재의 마모 조건에 따른 마모 거동 해석: 백건우, 조성재, 김대현, 김현중, 홍순직* (국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

Keywords: High entropy alloys, CoCrFeMnNi, Directed Energy Deposition, Wear properties

CoCrFeMnNi 고 엔트로피 합금은 상온 및 극저온에서 우수한 기계적 특성을 나타내는 합금으로 그 특성에 관한 다양한 연구가 보고되고 있지만 마모 특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 DED 공정으로 제조된 CoCrFeMnNi 합금 적층재의 마모 조건에 따른 마모 거동에 대해 조사하였다. 마모 시험은 선형 ball-on-flat 방식으로 수행하였으며, 마모 하중 및 시간 조건을 변화시키며 마모 거동 변화를 비교 분석하였다. 마모흔 및 미세조직은 Scanning Electron Microscopy와 3D surface profiler를 통하여 분석하였다. 그 결과 마모 하중이 증가함에 따라 sub-surface에서의 void 생성 및 균열 전파가 가속화되어 연삭 및 산화 마모에서 박리 마모로의 거동 변화를 보였다. 비마모율 측정 시 하중이 증가함에 따라 2.17×10^{-5} $mm^3/N \cdot m$에서 4.24×10^{-5} $mm^3/N \cdot m$로 약 2배의 차이를 보였다. 시간이 증가함에 따라 debris 미세화에 의한 윤활작용, sub-surface의 변형층 두께 증가로 인한 전단 응력에 대한 저항성 증가가 박리 마모에서 연삭 및 산화 마모로의 마모 거동 변화를 야기시켰다. 비마모율 측정 시 5.25×10^{-5} $mm^3/N \cdot m$에서 3.17×10^{-5} $mm^3/N \cdot m$로 약 40%의 차이를 나타냈다. 본 연구를 통하여 DED 공정으로 제조된 CoCrFeMnNi 합금 적층재의 마모 조건에 따른 마모 거동을 규명하였다.

[적층5-6 | 10:15]

적층제조공정을 이용하여 제작된 경사기능형 내마모 경량철강 미세조직 및 기계적 성질에 대한 연구: 박진수, 문준오* (국립창원대학교), 박성준, 권한솔 (한국재료연구원)

Keywords: 경사기능재료,경량철강,L-PBF,고탄소강,내마모 특성

CO_2배출 저감과 기계 성능 향상을 위해 구조 재료의 경량화 설계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 오스테나이트계 Fe-Mn-Al-C 경량 철강은 우수한 기계적 특성과 낮은 밀도로 주목받고 있다. Al과 C의 첨가는 밀도를 낮추고 나노 크기의 κ-carbide (Fe_3AlC-type)를 입내에 석출시켜 강도를 증가시키지만, 첨가량이 과도할 경우 조대한 κ-carbide의 입계 석출 및 제2상인 DO_3상을 생성시키는 등 오스테나이트계 경량철강의 불균질한 조직형성을 유발함으로써 내마모성을 저하시킨다. 이러한 경량철강의 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 내마모특성이 우수한 SKD61 공구강 분말을 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) 방식을 이용하여 오스테나이트계 경량철강 표면에 적층하여 내마모 특성이 우수한 경사기능형 경량철강을 제작하였다. 적층 후, SKD61표면의

내마모 특성 강화를 위해 퀜칭-템퍼링 (Quenching-Tempering, QT) 열처리를 수행하였으며, 이를 통해 템퍼드 마르텐사이트 기지상과 V-rich MX 석출물을 형성하여 내마모성을 확보하였다. 연구에 사용된 샘플의 미세조직은 광학 현미경(OM), 주사 전자 현미경(SEM), 후방 산란 전자 회절(EBSD), 투과 전자 현미경(TEM)을 활용해 분석하였으며, 기계적 특성은 비커스 경도 및 나노 압입 시험을 통해 평가했다. 내마모 특성 평가는 Ball-on-disk 슬라이딩 시험을 통해 수행되었으며, 이를 통해 표면 미세조직과 내마모 특성 간의 상관관계에 대해 고찰하였다.

[적층5-7 | 10:30]

HVOF 공정으로 제조된 Fe계 비정질 합금과 WC 코팅층의 미세조직, 상온 및 고온 마모 특성: 강민재, 원경운 (인하대학교), 함기수, 김폴 (코오롱 인더스트리), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Thermal spray, HVOF process, Fe-based amorphous alloy, Microstructure, Wear properties

비정질 합금은 Short-Range Ordered(SRO) 구조를 가지며 이로 인해 결정립계와 같은 미세조직학적 결함이 없어 우수한 기계적 특성, 내마모성, 내부식성을 갖는 소재이다. 그 중에서도 Fe계 비정질 합금은 다른 비정질 합금에 비해 경제적인 측면에서 유리하며 기계적 특성 또한 우수하여 산업적으로 많은 관심을 받고 있다. HVOF (High velocity oxygen fuel) 공정은 고온의 열원을 사용하여 용융 혹은 반용융된 feedstock을 기판 표면에 고속 분사하며 증착 시키는 공정으로, 증착물의 높은 냉각 속도로 인해 비정질 코팅층 제조에 유리한 공정이다. 본 연구에서는 HVOF 공정으로 Fe계 비정질 2종, WC-10Co-4Cr 조성의 코팅층을 제조하였고 그 내마모성을 비교하였다. Fe계 비정질 코팅층의 기공률 [%]은 1.49, 0.65, WC-10Co-4Cr은 3.46으로 코팅층이 건전하게 제조되었음을 확인하였다. 제조된 코팅층들의 XRD분석 결과, 비정질 코팅층에서 halo pattern이 관찰되어 코팅층 제조 시 거시적으로 결정질이 형성되지 않았음을 확인하였고, WC-10Co-4Cr코팅층에선 WC, W_2C, Co 상들이 확인되었다. 각 소재(HV)의 경도 값들은 732.2, 737.6, 1137.3 로 측정되었다. 제조된 소재의 마모 특성은 Pin-on-disk 시험을 통해 평가하였으며 상대재로 Al_2O_3 pin을 사용하였고, 하중 5 kgf, 마모 거리 14,000 m, 시험 온도는 상온과 250ºC에서 진행하였다. 상온에서 Wear volume [mm^3]은 51.77, 31.57, 1.73으로 측정되어 WC-10Co-4Cr의 내마모성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 반면 250ºC에서는 6.02, 11.35, 15.17 로 측정되어 Fe계 비정질 코팅층은 상온보다 고온에서 우수한 내마모성을 나타냈다. 마모 시험 후, 마모 트랙에 대한 SEM관찰을 진행하였다. 상기 상온과250ºC에서 마모 거동 차이의 주요 원인은 고온 마모 시험 중 비정질 코팅층의 마모 표면에 하중 분산과 윤활 작용을 하는 debris adhesion의 증가에 기인하는 것으로 제시되었다. 상기 결과들을 바탕으로, HVOF 공정으로 제조된 비정질 합금 및 WC 코팅층의 마모 기구와 비정질 코팅 소재의 응용 가능성에 대하여 함께 논의하였다.

[적층6-1 | 11:00]

Laser Powder Bed Fusion 공정으로 제조한 A20X 합금의 용체화 처리 온도에 따른 미세조직 및 물성변화: 한규미 (포항공과대학교), 박하음, 조용희, 박정민 (한국재료연구원), 김정기* (경상국립대학교), 김형섭* (포항공과대학교)

Keywords: Additive manufacturing, LPBF, Aluminum alloy, A20X, heat treatment

알루미늄 기반 적층 제조는 항공우주용 경량 부품 제조에 핵심적인 기술임에도 불구하고 용융-응고 중 발생하는 응고균열과 결정립 조대화에 의해 우수한 물성을 획득하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 상기 문제를 해결하기 위해 최근 Ti boride를 첨가해 응고 균열을 방지하고 균일한 등축정 조직을 갖는 고강도 알루미늄 합금인 A20X가 개발되었으며, 미세 결정립에 의한 균질한 미세조직 획득에 성공하였다. 그러나, 적층제조로 제조한 항공우주용 부품은 우수한 기계적 특성 달성을 위해 후열처리가 필수적이지만 상용 열처리가 아닌 A20X 합금에 최적화된 열처리에 대한 연구는 거의 이루어지지 못한 실정에 있다. 따라서, 본 연구에서는 480 ºC와 500 ºC의 두 온도에서 용체화 처리 후 시효 처리(ST-A)를 진행함과 동시에 미세조직 분석 및 상온(298 K) 에서의 인장 시험을 진행하였다. 미세조직 분석 결과, ST(480 ºC)-A 와 ST(500 ºC)-A 조건에서 나노 석출물인 θ’ 상 유무 및 Cu-rich 입자의 거동 차이가 나타나는 것을 확인하였으며, 그로 인해 ST(500 ºC)-A 조건에서 강도 및 연신율이 향상되고 DSA가 완화되는 것이 확인되었다. 본 결과는 용체화 처리 온도에 따른 조직 변화가 기계적 특성에 영향을 미치는 것을 보여준다.

[적층6-2 | 11:15]

L-PBF로 제조된 Ti-modified Al-Zn-Mg-Cu 합금의 미세조직과 기계적 특성: 장동민, 김수빈 (인하대학교), 이마태 (포항공과대학교), 최중호, 김경태 (한국재료연구원), 이병주 (포항공과대학교), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Laser powder bed fusion, Al-Zn-Mg-Cu, Titanium addition, Microstructure, Mechanical property

고강도 알루미늄 합금인 Al-Zn-Mg-Cu계 Al7075는 우수한 기계적 특성에도 불구하고, laser powder bed fusion (L-PBF) 공정을 이용한 적층 제조에는 어려움이 있어 왔다. 본 연구에서는 Ti 첨가를 통해 이러한 한계를 극복하는 접근 방식을 제시하여 Al7075 합금의 L-PBF 적층성을 개선하고자 시도하였다. Ti 첨가는 제조된 시편에서 nano scale의 Al_3Ti을 통한 fine grained microstructure를 형성하여 응고 거동을 개선하고 고온 균열 형성을 효과적으로 억제하였다. 그 결과, 개질된 합금은 99.7% 이상의 높은 상대 밀도와 함께 기존 Al7075 대비 현저히 감소된 균열 감수성을 나타냈다. As-built 상태에서 항복강도 339.7 MPa, 최대 인장강도 440.2 MPa, 연신율 12.16%의 우수한 기계적 특성을 달성하였으며, T6 열처리 후에는 항복강도 358.8 MPa, 최대 인장강도 460.8 MPa, 연신율 14.45%로 물성이 향상되었다. 미세조직 관찰을 기반으로 이러한 특성 향상은 Ti 첨가에 의한 결정립 미세화, 석출 경화 및 개선된 응고 특성의 시너지 효과에 기인하는 것으로 설명될 수 있었다. 상기 연구 결과들과 파단면 관찰을 바탕으로 적층 제조 L-PBF Ti 첨가 고강도 Al7075 합금의 변형 거동 및 구조용 소재로서 적용 가능성을 함께 고찰하였다.

[적층6-3 | 11:30]
균열 민감도 모델을 이용한 DED 및 PBF로 제조된 Al-Zn-Mg-Cu 합금의 균열 특성 비교: 이마태 (포항공과대학교), 김수빈 (인하대학교), 사공만재 (포항공과대학교), 이기안 (인하대학교), 김형섭, 이병주* (포항공과대학교)
Keywords: 금속 적층 제조, 균열 민감도, 열역학 계산, 온도 시뮬레이션

금속 적층 제조는 금속 층을 연속적으로 쌓아서 복잡하고 정밀한 형상을 제작할 수 있는 각광받는 제조 공정이다. 그러나 고강도 경량 합금을 출력할 경우 균열이나 기공 등의 결함이 쉽게 발생하여 원하는 기계적 특성을 확보하기 어렵다. 이러한 결함을 제어하기 위해서는 균열 발생을 예측하고 방지할 수 있는 적절한 모델이 필요한데, 기존의 균열 모델들은 주조나 용접 분야에서 발전되어 적층 제조에 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 이는 적층 제조가 좁은 영역에 높은 열원이 가해지고 매우 빠른 냉각속도를 보이기 때문이다. 또한 최근에는 결정립 미세화 등의 새로운 방안으로 균열을 방지하고 있지만, 기존 모델들로는 이를 충분히 반영하기가 어렵다. 이에 본 연구에서는 적층 제조의 특징을 반영할 수 있는 새로운 균열 민감도 모델을 개발하고자 한다. 열역학 계산인 Scheil 기법을 통해 응고 경로, 부피 변화, 액체 점도 등의 정보를 확보하고, 온도 시뮬레이션으로부터 공정 조건별 온도 이력을 얻는다. 이러한 정보를 바탕으로 액상 공급 기반의 균열 민감도 모델을 개발하고, 이를 각각 DED와 PBF 공정에 적용하여 Al-Zn-Mg-Cu 고강도 경량 합금을 적층함으로써 두 공정에서 발생하는 균열 민감도를 비교하고 분석한다. 이를 통해 적층 제조에서 적용 가능한 다원계 고온 균열 모델의 가능성을 제시하고, 향후 다양한 합금으로 적층 제조 시 결함 제어 및 기계적 특성 확보에 기여하고자 한다.

[적층6-4 | 11:45]
적층제조 AlSi10Mg 합금의 다양한 표면처리 공정 적용을 통한 표면조도 개선 및 기계적 특성 향상: 박소연, R Kreethi (인하대학교신소재공학), 박민재 ((주)쿠퍼시스템), 김경보 (인하공업전문대학), 이기안* (인하대학교신소재공학)
Keywords: Laser powder bed fusion, Surface treatment, AlSi10Mg, Surface microstructure, Tensile properties.

금속 적층제조 기술이 발전하고 있음에도, 높은 표면 조도로 인한 기계적 성질 저하와 수명 단축 문제는 여전히 해결해야 할 과제이다. 특히, AlSi10Mg 합금은 반도체 장비 및 모빌리티 전장 부품 등에 활용될 수 있으나, 적층제조 부품에서의 부착 분말, 볼링, 스패터 등 표면 결함이 성능 저하의 주요 원인으로 작용한다. 본 연구에서는 L-PBF 공정으로 제작된 ASTM E8 표준 인장 시편(as-built)의 표면 특성을 개선하기 위해 ball peening, dragging, 그리고 chemical polishing(CP) 등을 적용 시도하였다. 이후 처리된 시편의 미세조직 및 기계적 특성을 분석하였다. 표면 형상 관찰 결과, as-built 시편은 부착 분말과 용융 트랙 흔적을 포함하며, 표면 거칠기(Ra)는 0.8 μm 수준을 나타냈다. As-peened 시편은 부착 분말이 제거되었으나, 일부 영역에서 SUS 볼 충격에 의해 cracking과 tearing이 발생하였다. CP 처리 후에는 보다 균일한 표면 형상이 관찰되었지만, 일부 grain boundary에서 깊은 etch pits가 형성되었다. 반면, dragging 시편은 미세 연마제에 의한 균일한 마찰·마모 효과로 가장 낮고 균일한 표면 조도(Ra: 0.1 μm)를 보였다. 표면 미세조직 분석 결과, as-peened 시편에서는 충돌 변형에 따른 nano grains의 탈락이 확인되었으며, CP 처리 후에는 탈락된 결정층이 제거되고 일부 변형층이 남아 있었다. Dragging 시편에서는 표면 부근에서 높은 응력 집중이 관찰되었으며, 이에 따라 재결정 조직이 형성되었다. 인장 시험 결과, 인장 강도는 as-built (449.49 MPa) < CP (456.96 MPa) < as-peened (507.37 MPa) < dragging (540.81 MPa) 순으로 증가했으며, 연신율은 as-built (9.30%) < as-peened (10.36%) < dragging (12.09%) < CP (12.14%)로 나타났다. 상기 결과들을 바탕으로, AFM, Nano-indentation, EBSD 분석을 통해 표면 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 고찰하고, 적층제조 부품의 성능을 향상시키기 위한 표면처리 방안을 제시하고자 하였다.

[적층6-5 | 12:00]
레이저 분말 베드 용융법으로 적층제조된 탄소 첨가 CoCrFeMnNi 고엔트로피합금의 극저온 인장 거동: 박하윤 (한국재료연구원 나노재료연구본부, 고려대학교 미래소재융합학과), 권현석 (포항공과대학교 신소재공학과), 김경태 (한국재료연구원 나노재료연구본부, 한국재료연구원 3D프린팅재료연구소), 유지훈, 최중호 (한국재료연구원 나노재료연구본부), 성효경 (국민대학교 신소재공학과), 김형섭 (포항공과대학교 신소재공학과, 포항공과대학교 친환경소재 대학원, 도호쿠대학교 첨단소재연구소), 손석수* (고려대학교 미래소재융합학과), 김정기* (경상국립대학교 나노신소재공학부), 박정민* (한국재료연구원 나노재료연구본부, 고려대학교 미래소재융합학과, 한국재료연구원 3D프린팅재료연구소)
Keywords: High-entropy alloys, Laser powder bed fusion, Microstructure, Tensile behavior, Cryogenic temperature

본 연구에서는 레이저 분말 베드 용융(Laser powder bed fusion, LPBF)으로 제조된 탄소 첨가 CoCrFeMnNi high-entropy alloys (C-HEA)의 극저온 인장 거동을 체계적으로 조사하였다. LPBF로 적층제조된 C-HEA는 우수한 극저온 인장 특성을 나타내며, 항복 강도가 높을 뿐 아니라 상온 변형에 비해 변형률이 크게 증가함을 확인하였다. 특히, C-HEA의 연신율은 298 K에 비해 77 K에서 두 배 증가하였다. 극저온 변형 하에서 LPBFed C-HEA의 변형 경화율은 상온에서의 소성 변형보다 훨씬 높기 때문에 소성 불안정성을 지연시켜 균일 연신율을 크게 향상시키는 데 기여하였다. C-HEA의 유동 응력은 온도 감소에 의해 상당히 증가하기 때문에, 77 K에서 초기 변형 단계에서 임계 쌍정 응력을 초과 할 수 있으며, 변형 쌍정과 나노 탄화물은 극저온 인장 변형 하에서 C-HEA의 높은 역응력 향상에 시너지 효과를 발휘하였다. 본 연구를 통해 극저온 응용 분야에서 적층 제조에 사용되는 고성능 합금 개발에 대한 새로운 통찰력을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

[적층6-6 | 12:15]
입자 성장 억제 및 HIP 공정을 통한 고밀도 Binderless WC 소결체 제조 및 특성 분석: 곽종민 (한국재료연구원, 부산대학교), 박민수 (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교), 하국현* (한국재료연구원)
Keywords: Binderless WC, Nanopowder, Inhibitor, Hot Isostatic Pressing

기존 초경합금은 Co, Fe, Ni 등의 금속 binder를 사용하여 높은 경도와 내마모성을 제공하지만, 부식 및 고온 환경에서 성능 저하가 발생하는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 금속 binder 없이도 우수한 고온 및 부식 저항성을 지닌 기계적 특성이 향상된 binderless WC 소결체를 제조하고자 하였다. 실험에서 미립 WC 분말과 입자 성장 억제제인 VC 분말을 사용하였다. WC 입자의 성장을 효율적으로 억제하기 위해 고에너지 볼밀링 공정을 통해 미세화된 VC를 WC 분말과 혼합하였고, VC 함량에 따른 소결 특성을 비교하기 위해 VC 함량을 0, 1, 3, 5%로 조정하였다. 혼합된 분말은 1620, 1650, 1670, 1700°C에서 1시간 동안 진공 소결을 진행하였으며, 소결 후 95% 이상의 상대밀도를 달성한 시료를 대상으로 1650°C, 150 MPa의 조건에서 Hot Isostatic Pressing(HIP) 공정을 통해 고밀도화를 수행하였다. 소결 온도와 VC 함량에 따른 분석 결과, 소결 온도가 증가할수록 WC 입자 성장이 촉진되어 상대밀도가 증가했으나, 미세조직의 과도한 입자 성장으로 인해 기계적 특성이 저하되었다. 큰 결정립이 형성되는 것을 방지하고자 VC 첨가하여 소결 시 발생하는 입자 성장을 억제하였고, VC 함량이 많을수록 상대적으로 작은 결정립을 가진 WC 합금을 제조할 수 있었다. 그러나 inhibitor 첨가량의 증가로 고상 소결의 치밀화가 저하되어 밀도 감소가 발생했다. 이를 해결하기 위해 HIP 공정을 통해 합금 내 클로즈 포어를 제거함으로써 inhibitor가 첨가된 고밀도 binderless WC 소결체를 제조할 수 있었다. 따라서 본 연구는 금속 binder를 사용하지 않는 WC 소결체의 기계적 특성 향상을 목표로, 소결 시 발생하는 입자 성장을 억제하고 소결체의 고밀도화를 달성하기 위한 미세조직 제어 및 소결 공정을 연구하였다.

P1 : 알루미늄
Room 3층 로비, 4월 23일

[P1-1]
전해질 내 전분 첨가가 알루미늄-공기전지 성능에 미치는 영향: 박준엽, 박은하, 김정구* (성균관대학교)
Keywords: 알루미늄, 금속공기전지, 전해질 첨가제

최근 지구 온난화와 화석 연료 고갈이 주요 관심사로 떠오르면서, 친환경 에너지원으로의 전환을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 전기차는 내연기관 차량을 대체할 대안으로 제시되었으며, 이에 따라 전기차 산업은 가장 빠르게 성장하는 산업 중 하나로 자리 잡고 있다. 그러나 현재 전기차에 사용되는 리튬 이온 배터리는 열적 불안정성으로 인한 화제 위험성과 자원 고갈 문제 등의 단점을 갖는다. 이에 대해 금속 공기전지는 화재위험이 없는 안전한 대안을 제공한다. 특히, 그 중 알루미늄-공기전지는 높은 에너지 밀도를 제공하며, 지각에 풍부하게 존재하기에 안정적인 공급이 가능하고, 활용이 용이하다는 장점이 있다. 하지만 알루미늄 전극과 알칼리성 전해질 사이에서 발생하는 기생 부식 반응으로 인한 전지 성능 저하는 알루미늄-공기전지의 상용화를 어렵게 만드는 주요 문제 중 하나이다. 이에 따라, 본 연구에서는 친환경 부식 억제제인 전분(Starch)을 전해질 첨가제로 활용하여, 알루미늄 공기전지의 성능을 향상시키고자 하였다. 또한, 알루미늄-공기전지 전해질 내 전분 농도가 기생 부식 반응에 미치는 영향 및 전지 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 전해질 내 전분 농도에 따른 알루미늄 전극의 부식억제 효율을 분석하기 위하여 동전위 분극 시험(Potentiodynamic Polarization Test)과 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy)을 진행하였다. 또한, 전분 농도에 따른 수소 발생량 및 기생 부식 반응량을 평가하기 위하여 수소 발생 시험(Hydrogen Evolution Test)을 진행하였다. 이후 정전류 방전 시험(Galvanostatic Discharge Test)을 통해 전해질 내 전분 농도가 알루미늄-공기전지의 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy) 및 에너지 분산 X선 분광법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)을 이용하여 첨가제 유무에 따른 알루미늄 전극 표면 변화를 분석하였다.

[P1-2]
친환경 전해질 첨가제로서 호박씨 추출물의 알루미늄-공기 전지 적용 가능성: 이근재, 손경호, 김정구* (성균관대학교)
Keywords: 알루미늄, 에너지소재, 금속-공기 전지

최근 지구 온난화로 인해 친환경 에너지원에 대한 관심이 증가하며, 안정적이고 효율적인 친환경 에너지원에 대한 연구가 활발하게 되고 있다. 그중 알루미늄-공기 전지는 높은 에너지 밀도와 경제성을 갖춘 차세대 친환경 전지로 주목받고 있다. 알루미늄은 지각에 풍부하게 존재하며, 기존 리튬 이차전지에 비해 안정성이 뛰어나고 경제성을 지녀 실용화 가능성이 크다. 그러나 알칼리성 전해질을 사용하는 과정에서 알루미늄 전극의 기생 부식과 이에 따른 수소 발생이 심각한 문제로 작용한다. 이와 같은 부식 반응은 알루미늄 전극의 효율성을 저하시켜 전지 성능을 낮추므로, 이를 억제하기 위한 다양한 방법이 연구되고 있다. 본 연구에서는 호박씨 추출물을 전해질 첨가제로 활용하여 알루미늄-공기 전지의 부식 억제 및 성능 향상 효과를 분석하였다. 호박씨 추출물의 농도에 따른 알루미늄의 부식 속도 및 표면 보호 효과를 평가하기 위해 동전위 분극(Potentiodynamic Polarization) 및 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)을 수행하였으며, 정전류 방전 실험(Constant Current Discharge Test)을 통해 첨가제 농도에 따른 알루미늄-공기 전지의 방전 성능 변화를 확인하였다. 또한, 수소 발생량 및 침지 후 무게 감소량 측정을 통해 호박씨 추출물이 알루미늄의 손실을 효과적으로 줄이고 수소 발생 반응을 억제함을 실험적으로 입증하였다. 이후 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 전극 표면을 관찰한 결과, 첨가제가 없는 경우 심각한 부식 흔적이 나타났지만, 호박씨 추출물을 첨가한 경우 비교적 부식이 효과적으로 억제됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구는 팔미트산(palmitic acid), 리놀레산(linoleic acid) 등을 함유한 호박씨 추출물이 친환경적이고 효과적인 부식 억제 첨가제로서 알루미늄-공기 전지 성능 향상에 기여할 수 있음을 제시한다.

[P1-3]
Al-Zn-Mg-Cu 합금의 고온 비틀림 시험에서 Zn이 미세조직 진화 및 고온 가공성에 미치는 영향: 민병현 (인하대학교), 손태오 (HD 한국조선해양), 이지운 (공주대학교), 박현순*, 현승균 (인하대학교)
Keywords: Al-Zn-Mg-Cu alloy, Hot workability, Hot torsion test, EBSD, STEM

Al-Zn-Mg-Cu 계열(7000계) 알루미늄 합금은 석출경화 메커니즘을 통해 높은 강도와 우수한 기계적 특성을 가지며, 자동차 및 항공우주 산업에서 핵심 구조 재료로 활용된다. 특히, Zn 함량이 증가하면 η', η 상과 같은 석출상 형성을 촉진하여 기계적 특성이 강화된다. 이러한 석출상은 고온 가공성과도 밀접한 관련이 있어, 효과적인 제어를 위해 열간 소성 공정이 적용된다. 그러나 Zn 함량 증가로 인한 가공성 저하 문제가 존재하므로, 최적의 열간 변형 조건을 규명하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Al-Zn-Mg-Cu 합금의 열간 소성 공정을 최적화하고 미세조직 품질을 향상시키기 위해 Zn 함량에 따른 고온 변형 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 Al-Zn-Mg-Cu계 합금을 Zn 함량에 따라 7075, 7050, 7068으로 구분하였으며, 열처리 공정은 DSC 과정에서의 상 변화 온도와 2차상 분율을 기준으로 설정되었다. 합금은 DC 연속주조 방식으로 제작된 후, 각각 460ºC와 475ºC에서 12시간 동안 용체화 처리되었고, 이후 300ºC, 350ºC, 400ºC, 450ºC에서 0.05~5/s의 변형률 속도로 고온 비틀림 시험을 수행하였다. 이 시험을 통해 유동 곡선을 도출하고, EBSD로 미세조직 내 재결정 거동을 분석하며, STEM과 STEM-EDS를 활용하여 석출상의 분포와 형상을 관찰하였다.

[P1-4]

적층과 주조 공정을 통해 제조된 AlSi10Mg 합금의 열처리에 따른 미세구조 및 기계적 특성 분석: 이희상 (홍익대학교), 문준혁 (서울대학교), 류채우* (홍익대학교)

Keywords: 적층 제조, 미세구조, 기계적 특성, Al-Si 합금, 열처리

금속 재료의 적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 공정 중 하나인 분말 베드 융합(powder bed fusion, PBF)은 복잡한 형상의 제작, 재료 사용의 효율성 증대, 설계 자유도의 극대화 측면에서 우수한 이점을 제공한다. 특히 Al-Si 합금은 좁은 응고 범위, 낮은 열팽창 계수, 우수한 용융 풀 유동성으로 인해 수축 변형이 적고 고온 균열에 대한 민감도가 낮아 AM에 적합한 재료로 평가된다. 그 중 AlSi10Mg는 높은 인장 강도, 우수한 내마모성, 높은 강도 대비 낮은 중량 등의 특성으로 인해 AM 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. Laser-PBF(LPBF)로 제작된 AlSi10Mg는 셀(Al-cell) 경계에 Al-Si eutectic 구조를 가진 세포형 미세구조를 나타낸다. LPBF AlSi10Mg의 독특한 미세구조는 급속 응고 조건으로 인해 발생하며, 이는 주조된 동일 조성의 합금과 비교 시 기계적 물성에 차이를 보인다. 본 연구에서는 저온 열처리 공정을 적용하여 두 공정 간의 미세구조 변화와 기계적 특성 차이를 비교 분석하고자 한다. 저온 열처리 공정이 잔류 응력 제거 및 연성 향상에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통해 AlSi10Mg 합금의 가공 조건 최적화 가능성을 모색하고자 한다. 이 연구 결과는 LPBF로 제작된 AlSi10Mg의 미세구조 및 기계적 특성에 대한 가공 조건과 열처리 효과에 대한 데이터 베이스를 확보하고, Al-Si계 합금 개발에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

[P1-5]

Investigation of Fatigue Properties of AA6061 Alloy at 15 K: Thanh Dat Nguyen, Taeho Lee, Tien-Dung Nguyen, and Soo Yeol Lee* (Chungnam National Univ.)

Keywords: Aluminum alloy, Fatigue properties, 15 K, Fracture mechanism.

To ensure the long-term integrity of liquid hydrogen storage and transport vessels, fatigue properties of AA6061 at 15 K was investigated. The fatigue life at 15 K manifests eight times higher than that at room temperature (RT), even under higher applied stresses. The fractography analysis reveals that the crack initiated at the surface of the sample in both cases, but propagated with a different manner depending on distinct deformation mechanisms. Using fatigue striation spacing measurements and a finite element analysis, Paris law exponents (m) were determined to be 3.4 at 15 K and 3.8 at RT, which indicates that crack growth resistance at 15 K was higher than at RT. This is likely due to more homogeneous deformation behavior at 15 K. Moreover, the fracture mechanism was significantly changed as temperature decreased down to 15 K. While a mixed ductile/brittle fracture mechanism prevailed at RT, a ductile fracture mode was primary mechanism at 15 K, supporting an enhanced fatigue performance at 15 K. Our findings elucidate the exceptional cryogenic fatigue behavior of AA6061 and demonstrate its potential as a structural material for cryogenic applications.

[P1-6]

Al-Si 합금의 열처리에 따른 석출 거동 분석: 문준혁 (서울대학교), 류채우* (홍익대학교), 박은수* (서울대학교)

Keywords: Al-Si alloy, precipitation, phase evolution, heat treatment

최근 전 세계적으로 탄소 중립 실현을 위한 노력이 활발히 이루어지면서, CO_2 배출 저감을 위한 다양한 시도가 진행되고 있다. 이러한 흐름의 일환으로, 항공 및 자동차 산업에서는 기존의 철을 대체할 수 있는 경량 합금을 적용해 기체의 무게를 줄이고, 이를 통해 연료 효율을 향상시키며 온실가스 배출을 감소시키고자 한다. 이들 경량 소재 중 Al-Si 합금은 우수한 주조성, 높은 비강도, 뛰어난 내식성을 갖추고 있어 자동차 산업에서 널리 활용되고 있으며, 이에 대한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다. 그러나 주조 과정에서 형성되는 금속화합물로 인해 기계적 물성이 저하되는 한계를 지니고 있으며, 이를 극복하기 위해 다양한 열처리 공정을 적용하여 미세구조를 제어하고 기계적 물성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 현재 대부분의 연구는 열처리를 후 미세구조 분석 및 기계적 물성 측정에 집중되어 있으며, Al-Si 합금 내 석출상의 거동에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Al-Si 합금의 열처리 공정에 따른 석출 거동을 정밀하게 분석하고, 기계적 물성 및 미세구조와의 상관관계를 도출하고자 하였다. 다양한 열처리 조건에서 석출상의 형성, 미세구조 변화, 준안정상의 형성 여부, 조성 및 분율 변화를 면밀히 고찰하였으며, 이를 통해 합금의 특성을 최적화할 수 있는 열처리 공정 데이터 베이스를 구축하였다. 본 연구는 구축한 데이터 베이스를 바탕으로 Al-Si 합금의 기계적 물성 향상을 위한 최적 공정 가이드라인을 제시하는 것을 목표로 하며, 경량 합금 소재의 상용화 및 성능 개선에 기여할 것으로 기대된다.

[P1-7]

Al 클래드재의 브레이징 온도에 따른 접합 거동 및 특성 분석: 고은찬*, 이병권 (한국생산기술연구원, 전남대학교), 유효상, 김용호, 손현택* (한국생산기술연구원), 김태훈 (전남대학교)

Keywords: 알루미늄 클래드재, 브레이징 공정, 3000계/4000계 Al 합금, 미세조직 분석, 접합 특성

알루미늄 클래드재는 높은 열전도도와 우수한 비강도로 인해 자동차 열관리 시스템의 핵심 소재로 사용되고 있다. 특히 라디에이터, 증발기, 응축기, 오일 쿨러 등 부품의 브레이징(Brazing) 재료로 널리 활용된다. 또한, 자동차 경량화 트렌드에 따라 보다 높은 강도와 기능성을 갖춘 알루미늄 클래드재 개발이 필수적이다. 심재 합금으로 사용되는 3000계 Al 합금은 높은 강도를 바탕으로 브레이징 공정 중 구조적 안정성을 제공하며, 대량 생산과 경제성을 갖춘다는 장점이 있다. 반면, 클래드재로 사용되는 4000계 Al 합금은 우수한 내식성을 가지며, 표면 부식 방지와 더불어 용융점이 낮아 일반적인 Al 소재보다 낮은 온도에서 브레이징 공정을 수행할 수 있다. 본 연구는 3000계 Al 합금(심재)과 4000계 Al 합금(클래드재)을 대상으로 최적의 브레이징 공정 조건을 탐구하였다.

브레이징 온도는 570, 590, 610, 630ºC로 설정하고, 유지 시간은 10분으로 진행하였으며, 플럭스 소재로는 $KAlF_4$ 용액을 사용하였다. 브레이징 실험 전, 열처리 온도에 따른 심재와 클래드재 접합면을 EBSD로 분석한 결과, 570ºC 열처리 시 심재와 클래드재의 구역이 뚜렷하게 분리되어 관측되었다. 이는 570ºC에서는 브레이징 접합이 어려울 것임을 시사한다. 이후 브레이징 실험 결과, 570ºC에서는 접합이 이루어지지 않았으나 590, 610, 630ºC에서는 접합이 성공적으로 이루어짐을 확인하였다. 세부 관찰을 위해 FE-SEM 이미지를 분석한 결과, 590ºC와 610ºC에서 브레이징 시편의 fin 영역에서 Al-Si-Mn-Fe 상이 관찰되었다. 반면, 630ºC에서는 해당 상이 조대화되는 현상이 관측되었다. 이를 통해 적정 브레이징 온도가 590~610ºC 범위임을 확인할 수 있었다. 본 연구는 3000계 Al 심재와 4000계 Al 클래드재의 최적 브레이징 공정 조건을 제시하며, 알루미늄 클래드재의 성능 향상과 효율적 공정 개발에 기여할 수 있다.

[P1-8]

박판주조공정으로 제조한 Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc합금 판재의 인장특성: 정대한 (한국재료연구원, 부산대학교), 임익범, 이윤수, 김원경 (한국재료연구원), 김양도* (부산대학교), 김형욱* (한국재료연구원)

Keywords: 박판주조(twin roll cast), 알루미늄 합금

최근 탄소배출 저감 및 운송효율 향상을 위하여 전기자동차 및 도심 항공 모빌리티(Urban Air Mobility, UAM) 경량화를 위한 경량소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 비강도가 높고 부식 저항성이 우수한 고강도 Al-Zn-Mg-Cu합금에 대한 관심이 증가하고 있으나, 높은 생산 비용과 가공 난이도로 인해 실제 적용에 많은 어려움이 있다. 기존 알루미늄 판재를 제조하는 공정인 Direct-Chill (DC) 주조/열간 공정에 비하여, 박판주조(Twin Roll Casting, TRC) 공정은 주조와 열간 압연 공정을 통합하여 생산 비용을 효율적으로 절감할 수 있다. 그러나 고강도 알루미늄 합금의 넓은 응고 온도 범위로 인해 TRC 공정에서는 알루미늄 판재의 생산 시 표면결함 및 중심편석과 같은 주조 결함이 발생할 수 있다. Al-Zn-Mg-Cu 알루미늄 합금에 소량의 Sc와 Zr을 첨가하면 $L1_2$상인 $Al_3(Sc,Zr)$ 화합물이 형성되어 결정립 미세화, 고온 안정성 및 강도를 개선할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Sc와 Zr이 첨가된 Al-Zn-Mg-Cu 합금계를 대상으로 TRC 공정 중 발생하는 주요 결함을 분석하고, 합금 내 용질 원소량을 조절하여 결함 억제 방안을 모색하였으며 다양한 조성범위를 갖는 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr합금 박판주조재를 제조하였다. 제조된 합금을 압연 및 열처리하여 두께 1mm인 판재를 제조하였으며 Zn 및 Mg 함량 변화에 따라 각 합금성분이 인장강도 및 연신율에 미치는 영향에 대하여 조사하고 고찰하였다.

[P1-9]

AA 2026 압출재의 냉간 변형 및 시효 처리에 따른 항복 강도 변화의 해석 방법에 대한 연구: 김하늘, 강현우, 장병록*, 김희국* (인하대학교제조혁신전문대학원)

Keywords: 알루미늄, 전위 밀도, 석출 강화, TEM, 항복 강도

알루미늄은 가벼운 무게에 비해 높은 강도를 가지는 경량화 소재로써, 특히 2xxx계 합금은 항공용 소재로 사용되어지고 있다. 구조재의 강도 향상은 요구 강도를 만족시키기 위한 소재의 양을 줄일 수 있으며, 구조재로써의 성능 또한 향상시킬 수 있다. 따라서 소재의 기계적 특성을 개선하고 이를 해석하는 방법에 대해 연구를 진행하였다. 연구에 사용된 AA 2026 소재는 균질화 열처리 후 압출되었으며, 500ºC에서 4 hr 동안 용체화 처리되었다. 이를 각각 0%, 3%, 5%, 10% 냉간 인장하여 변형시켰다. 각 소재는 190ºC에서 각각 4 hr와 8 hr 동안 인공 시효를 진행하였다. 냉간 변형 직후와 인공 시효 후의 항복 강도 변화를 확인하기 위해 인장 시험을 진행하였다. 소재의 강화에 기여한 강화 메커니즘을 구분하기 위해 XRD를 통한 전위 밀도의 측정과 TEM을 통한 석출물의 크기 측정을 진행하였다. 냉간 변형량에 따라 전위 밀도와 항복 강도는 선형적으로 증가하였으며, 이는 Taylor 관계식을 통해 표현할 수 있었다. 인공 시효 후의 기계적 특성은 전위 밀도와 석출물의 크기에 의해 결정되므로 각각의 강화 효과를 확인하기 위해 Taylor 관계식을 통해 강도를 계산하고, 실제 측정한 강도와의 차이로부터 석출물에서 기인한 강화 효과를 계산하였다.

[P1-10]

개질화 원소 및 주조 온도에 따른 복합 주조 공정의 Al/Cu 바이메탈의 금속간화합물 미세화: 임하윤 (한국재료연구원, 부산대학교), 김병주 (중소조선연구원), 천현석 (한국재료연구원, 부산대학교), 이윤수 (한국재료연구원), 이욱진 (부산대학교), 김수현`* (한국재료연구원)

Keywords: Al/Cu 바이메탈, 복합주조, 금속간화합물, 개량화 원소, Sr

Al/Cu 바이메탈은 Al-Cu 합금이나 Cu 금속과 비교했을 때 무게, 비용을 각각 40, 60% 경감하고, 전기 및 열전도성을 비슷한 수준으로 유지할 수 있는 장점이 있다. 따라서 열교환 시스템, 외장 케이블과 같은 다양한 산업 분야에서 Al/Cu 바이메탈 수요가 증가하고 있다. Al/Cu 바이메탈 제조법 중 하나인 복합주조는 금형 내부에 위치시킨 고체 금속에 금속 용탕을 주입하여 응고시키는 공정으로 다른 제조 방법에 비해 주조 시간이 단축된다는 장점이 있다. 바이메탈 응고 과정 중 형성되는 금속간화합물은 수 밀리미터 두께까지 반응층을 형성할 수 있다. 그러나 조대한 층은 기지와의 강도 및 경도 차이를 가지고 균열이 발생하여 접합 특성이 저하되는 문제가 나타난다. 기존 연구에서는 Al/Cu 바이메탈의 반응층 제어를 위한 다양한 연구들이 보고되었고, 반응 온도, 열처리, 코팅 등을 통해 Cu와 Al의 원자확산에 의해 형성되는 반응층을 제어하였다. 하지만 이러한 후 공정은 응고 과정에서 형성된 금속간 화합물 개선에는 제한적인 효과를 보인다. 응고 과정 동안 생성되는 정출상은 개질화 원소 첨가를 통해 효과적으로 개량될 수 있다고 알려져 있다. 그러나 복합 주조 공정에 개량화 원소 첨가 시 반응층의 개질화에 미치는 영향 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Al-Si-Cu 합금의 주 개량화 원소로 알려진 Sr을 첨가하여 Al-Si-Sr/Cu 바이메탈을 제조하였다. 또한 복합 주조 공정 조건 및 Sr 함량이 계면 미세조직 변화와 기계적 특성에 미치는 효과를 연구하였다.

[P1-11]

Al-Mg_2Si-Cu-Zn 합금의 미세조직과 석출거동: 전정민, 박성현, 이상화, 정재길* (전북대학교)

Keywords: Al metal matrix composites, microstructures, precipitation, transmission electron microscopy, small-angle neutron scattering

다성분계 Al-Mg_2Si계 합금은 낮은 밀도, 우수한 기계적 특성 및 저렴한 생산 비용을 가지고 있어 자동차 및 항공 분야 소재로서 사용되고 있다. 이 합금은 응고 동안 생성되는 초정 Mg_2Si상과 이차상(η-$MgZn_2$, S-$AlCu_2Mg$ 등)들의 조대한 크기와 높은 분율로 인해 기계적 특성에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 더 나은 기계적 특성을 얻기 위해서는 주조 생성상들의 미세화와 함께 기지 석출상을 생성시키는 것이 필수적이다. 높은 온도에서 열처리는 이차상의 구상화와 초정 Mg_2Si상을 일부 재용해시켜 크기를 감소시키고 상당한 기지 강화효과를 발생시킨다고 알려져 있다. 하지만, 시효 열처리 동안 생성되는 석출상의 종류와 그들의 크기, 분율 등 정량적인 분석은 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 Al–30Mg_2Si–10Cu–10Zn (wt.%) 합금에서 450ºC 용체화 처리 동안 초정 Mg_2Si상과 이차상들의 변화를 관찰하였고, 경도와 전기전도도를 이용하여 25ºC와 120ºC에서 시효거동을 조사하였다. 또한, 시효 시간에 따른 석출상들을 투과전자현미경과 소각중성자산란을 활용하여 정량적으로 분석하였다.

[P1-12]

Al-Si-Mn-Mg 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 합금 조성의 영향: 김지수, 이혜인, 이민재, 김세훈* (한국자동차연구원)

Keywords: Al-Mg-Si-Mn alloy, Extruded alloy, Microstructures, Mechanical properties

현재 세계적으로 지구온난화를 막기 위해 국가 온실가스 감축목표(NDCs, Nationally Determined Contributions), 탄소국경조정제도(CBAM,Carbon Border Adjustment Mechanism)와 같은 다양한 정책이 시행되고 있다. 특히, 자동차 산업에서는 이러한 정책에 따라 내연기관 자동차에서 전기자동차로의 전환이 추진되고 있다. 전기자동차 시대가 도래함에 따라 자동차의 경량화가 필수적이다. 이에 따라 비강도, 성형성, 내식성이 우수한 Al-Mg-Si 합금이 주로 사용된다. 더 나아가, 탄소 배출을 줄이는 또 다른 방법으로 기존 자원의 활용이 있다. 특히, 알루미늄 합금의 재활용은 생산 과정에서의 에너지 소비와 탄소 배출을 줄이는 효과적인 대안으로 주목받고 있다. 그러나 재활용 과정에서 Mn, Fe와 같은 불순물이 발생하며, 이러한 불순물은 제거하거나 적절히 활용해야 한다. 본 연구에서는 Mn을 활용할 수 있는 방안을 마련하고자 하며, Si, Mn, Mg의 합금 조성에 따른 미세조직 및 기계적 물성을 관찰하여 그 영향을 분석하였다.

[P1-13]

레이저 클래딩 적층 공정을 이용한 알루미늄 고압 다이캐스팅 금형 강화: 최세원*, 김영찬, 김철우 (한국생산기술연구원)

Keywords: 레이저 클래딩, 다이캐스팅, 금형, 열피로, 알루미늄 합금

고압 다이캐스팅 금형의 표면은 뜨거운 용탕과 접촉하면서 가열과 냉각이 반복되어 열응력을 받게 된다. 이러한 열응력은 주조 사이클이 증가함에 따라 더욱 강화되며, 이로 인해 금형 표면 부근에서 열피로로 인한 소성 변형이 발생할 수 있다. 고압 다이캐스팅 과정에서는 용탕이 캐비티 표면과 접촉하여 금형이 급격히 가열되며, 이후 금형의 냉각 시스템과 이형제 도포를 통해 냉각이 진행된다. 이러한 가열 및 냉각의 반복적인 과정에서 열응력이 집중되는 부위에서 피로 파괴가 시작되는 것이 일반적이다. 특히 알루미늄 고압 다이캐스팅의 경우, 금형 소재와 클래딩 층 간의 열팽창 계수 차이와 열충격 특성으로 인해 열피로가 더욱 심화될 수 있다. 이러한 문제는 금형 표면에서의 급격한 온도 강하, 특히 스프레이 방식으로 이형제를 도포할 때 더욱 두드러진다. 최근에는 고출력 직접 에너지 증착(DED) 공정의 일환으로 레이저 클래딩 기술이 고압 다이캐스팅 금형의 손상 복구 및 표면 강화 방법으로 연구되고 있다. 현재 실용화 연구가 진행 중인 이 금형 강화 기술은 그 효율성과 장점으로 인해 프레스, 단조, 고압 주조 및 일반 주조 금형 산업에서 높은 관심과 수요를 받고 있다. 본 연구에서는 기능성 소재를 이용한 국부 및 대면적 클래딩을 위한 공정 조건을 확립하고, 고효율 DED 레이저 클래딩 시스템을 적용하였다. 사용된 분말은 높은 탄소 함량과 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo), 바나듐(V) 등의 성분을 포함하여 내마모성과 내구성이 우수한 M2 고속도강을 사용하였다. 실험에 사용된 모재는 고압 다이캐스팅 금형에서 널리 사용되는 SKD61이며, 시편은 100×100×25 mm 크기로 가공되었다. 또한, 레이저 흡수를 향상시키기 위해 #320~#2000 사포로 표면을 연마한 후, 아세톤으로 탈지 및 세척을 진행하였다. 레이저 클래딩 시스템은 900~1,070 nm의 파장 범위를 갖는 다이오드 레이저와 광섬유 전달 장치를 포함하고 있으며, 72 mm의 집광 렌즈, 400 mm의 초점 렌즈, 1500 μm 코어 직경의 레이저 광섬유를 갖추어 8.3 mm의 레이저 스폿 크기를 구현하였다. 또한, 동축 분말 공급 헤드와 기판 표면 간 거리는 20 mm로 유지되었으며, 아르곤(Ar) 가스 공급 속도는 15 L/min로 설정되었다. M2 분말의 안정적인 적층을 위해 레이저 출력과 분말 공급 속도를 조절하며 최적의 공정 조건을 도출하였다.

[P1-14]

LED 헤드램프 방열판을 위한 고방열·고주조성 알루미늄 합금 개발 및 특성 평가: 김철우*, 유효상, 김영찬, 최세원 (한국생산기술연구원)

Keywords: die-casting, mold, LED lamp, heat sink, heat dissipation, aluminum alloy

최근 LED 헤드램프의 발전은 개별적으로 제어 가능한 다중 LED를 활용하여 눈부심 없는 로우 빔과 하이 빔의 이점을 통합함으로써 가시성을 향상시키고 보행자의 안전을 보장하는 방향으로 나아가고 있다. 그러나 LED의 과열 문제로 인해 최적의 성능을 유지하기 위해서는 우수한 방열 특성을 가진 고성능 방열판이 필수적이다. 특히, 전자 부품 고장의 56%가 부적절한 방열로 인한 것으로 보고되면서, 고출력 LED 시스템에서의 효과적인 열 제어가 강조되고 있다. 현재 알루미늄 고압 주조(HPDC) 공정에서는 유동성이 우수한 ALDC12(Al-Si-Cu) 합금이 널리 사용되고 있으나, 열전도도(99 W/m·K)가 상대적으로 낮아 고성능 방열 제품 적용에 한계가 있을 수 있다. 비교적 높은 열전도도를 갖는 Castasil-1(Al-9Si-Sr) 합금(160 W/m·K)이 적용되기도 하지만, 주조성이 낮아 높은 주조 압력이 필요하며, 금형 수명 단축 및 생산성 저하와 같은 문제를 초래할 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 우수한 방열

성능을 유지하면서도 HPDC 공정에 적합한 알루미늄 합금 개발을 목표로 하였다. 본 연구에서는 ALDC12 합금과 유사한 주조성을 유지하면서도 열전도도를 향상시키기 위해 Si 및 Fe와 같은 미량 원소의 조성을 최적화하였다. 유동성 시험을 통해 합금의 주조성을 평가하였으며, 열전도도 측정을 통해 방열 특성을 분석하였다. 또한, 실제 방열판 시편을 제작하여 열 화상 카메라(Thermal Imaging) 분석을 수행함으로써 방열 성능을 정량적으로 검증하였다. 그 결과, 본 연구에서 개발한 새로운 알루미늄 합금은 기존 ALDC12 대비 열전도도가 크게 향상되었으며, 주조성 또한 기존 HPDC 공정에서 적용 가능할 수준으로 유지됨을 확인하였다.

[P1-15]

고용질 Al-Zn-Mg-Cu 합금의 고온변형거동 연구: 정영길*, 신재혁, 김세훈, 주경석, 김진평, 한범석 (한국자동차연구원)

Keywords: 알루미늄, 고온변형거동, 기계적물성, 미세조직

글로벌 환경규제 및 미래 모빌리티 산업에 있어 대표적인 경량금속소재인 알루미늄 합금 연구는 새로운 전환기에 놓여 있으며, 신규 공정기술 도입 및 다양한 어플리케이션 적용에 따라 기존 전신 및 주조재 합금의 경계가 모호해지고 있다. 이러한 관점에서 최근 Cross-over/Uni alloy system 컨셉으로서, 재활용성 및 경량화와 동시에 다중물성(고내식, 고내열, 고열전도도 및 고내구성)을 구현하고자하는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 본 연구팀은 알루미늄 5xxx/7xxx계 Hybrid 범위를 갖는 Cross-over 형 Al-Mg-Zn-Cu 합금계 (Zn and Mg content: 3.0~6.0 wt.%) 연구를 진행해왔으며, 그 중에서도 Al-5.25Zn-5.25Mg-0.5Cu 합금은 T6 및 Natural Ageing 상태에서 우수한 물성을 보이는 것을 확인 하였다. 이에 본 연구에서 고용질 Al-Zn-Mg-Cu합금의 고온변형거동에 대해 연구를 진행하고자 하였으며, 고용질의 A7175 합금을 비교군으로 선정하였다. 고온변형 거동 확인을 위해 고온 압축시험(Temperature range 350~500ºC, Strain rate 10~0.001 /s)을 통해 공정지도를 구축하였으며, EBSD분석을 통한 미세조직과의 상관관계를 분석 하였다.

[P1-16]

소량의 Si을 첨가한 7075 알루미늄 합금의 적층 제조: 열처리를 통한 기계 및 전기화학적 특성 분석: 채호병 (한국원자력연구원), 최가현, 김유섭, 홍순구 (충남대학교), 신은주 (한국원자력연구원), 이수열* (충남대학교)

Keywords: 적층제조, AA7075, 석출물, 기계적 거동, 전기화학적 거동.

Al 7075 합금(AA7075)은 우수한 강도를 지니고 있지만, 복잡한 조성 및 빠른 응고 과정에서 결함이 발생하기 쉬워 적층 제조 시 상당한 어려움이 따른다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 소량의 Si를 함유한 AA7075 합금을 도입하여 선택적 레이저 용융 공정으로 샘플을 제작하였다. As-built 및 후속 열처리(Direct Aging, Solid-solution, T6) 시편은 각각 고유한 미세조직 변화를 보였으며, 이에 따른 기계적·전기화학적 특성의 영향을 확인할 수 있었다. As-built 및 Direct Aging 조건에서는 Al_4Cu_9와 Mg_7Zn_3 석출물이 형성되었고 높은 강도를 달성했지만, 연성이 제한적이고 갈바닉 부식이 크게 진행되었다. 반면, Solid-solution과 T6 열처리를 거친 시편은 미세조직이 균질화되었고, $FeSi_2$, $AlCu_3$, Mg_2Si 등이 발견되었으며 연성이 개선되고 부식 민감도 역시 크게 감소하였다. 특히 T6 시편은 가장 균형 잡힌 성능을 보였다. 이처럼 소량의 Si를 함유한 Al 7075 합금은 적절한 열처리를 통해 주요 강화 상을 유지하면서 과도한 Si가 야기하는 취성 문제의 완화가 가능하였고, 개선된 기계·전기화학적 거동을 나타내는 것을 확인하였다.

[P1-17]

알루미늄 용탕 탈가스 거동에 미치는 교반 임펠러 및 불활성 가스 운용조건의 영향: 전해원, 김덕*, 하원, 김명균 (포항산업과학연구원(RIST))

Keywords: 알루미늄, 용탕, 탈가스, 청정화, 정량평가

알루미늄 용탕 내 수소가스는 용해 과정 중 불가피하게 다량 함유되는데, 적절한 처리가 이루어지지 않을 경우 주조품 단계에서 기포, 균열 등 다양한 결함을 유발한다. 따라서, 이를 해결하기 위해 수소가스를 제거하기 위한 다양한 탈가스 기법이 존재하며, 가장 널리 사용하는 것이 임펠러의 회전에 의한 교반과 불활성 가스의 투입을 동시에 수행하는 GBF(Gas Bubbling Filtration) 처리 방법이다. 이러한 GBF의 효과는 다양한 로터의 형상, 직경, 두께, 배치, 회전수, 가스투입량, 가스투입 방법 등의 변수에 의해 크게 변화할 수 있어 각각에 대한 영향도의 규명이 필요하다. 사전 연구를 통해 선정된 각기 다른 뚜렷한 장점을 가지는 3종의 로터 형상을 선정하였고, 동일한 직경으로 로터를 제작한 뒤, 각각에 대해 로터 회전속도, 가스투입량, 로터 설치높이 등을 변수로 하고 반복적인 산소 및 아르곤 가스 투입을 기반으로 각 조건에서의 GBF 성능을 정량적으로 평가하였다. 또한, 동일 조건들에서의 교반 경향, 탕면 안정성 등을 정성적으로 확인하여, 현장에서 발생할 수 있는 안전 문제 및 생산성 이슈를 검토하였다. 이를 통해 실험 변수인 로터의 형상, 회전속도, 설치높이 및 가스투입량과 GBF 성능의 상관관계, 효과도, 우선순위 등을 정량적으로 도출할 수 있었으며, 안전 문제 및 생산성 이슈에 대응할 수 있는 로터의 형상 및 운용 조건을 선정할 수 있었다.

[P1-18]

실험계획법을 이용한 모빌리티 헤드램프 알루미늄 방열판 고압주조 결함 정량화에 관한 연구: 김영찬*, 김철우, 최세원 (한국생산기술연구원)

Keywords: 모빌리티, 방열판, 고압주조, 실험계획법, 결함정량화

최근 경량화 및 고성능화를 위해 모빌리티 부품에 대한 열전도도 향상에 대한 요구가 크게 증가하고 있으며, 특히 헤드램프의 경우 효율 및 수명 향상에 영향을 미치는 높은 유동성 및 열전도도를 갖는 합금의 고압주조 특성에 대한 연구가 필요한 실정이다. 고압주조 공정으로 제작하는 헤드램프 방열판은 금형 캐비티 안으로 액상의 금속을 주입하는 과정에서 기공이나 수축공과 같은 주조 결함이 방열판 내부에 생성된다. 이 과정 중에 생성된 주조 결함들은 열전도도 감소, 변형 및 파괴 등의 원인으로 작용하므로 방열판의 특성을 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 모빌리티용 헤드램프 방열판 고압주조 금형에서 캐비티 내 발생하는 기포 결함과 수축결함을 제어하는 소재 제어 측면에서의 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 모빌리티 헤드램프용 알루미늄 방열판의 고압주조 공

정에서 발생하는 결함을 최소화하기 위한 금형 설계 방안을 비교분석하였다. 유동응고해석과 실험계획법을 활용하여 게이트 형상에 따른 주조 결함의 분포를 분석하고 정량화하였다. 연구 결과, 게이트 두께가 증가할수록 주조 결함이 감소하는 경향을 보였으며, 게이트 두께의 변화가 게이트 폭의 변화보다 주조 결함에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이를 통해 헤드램프 방열판의 열전도도와 내부 특성을 향상시키는 동시에 기포 및 수축 결함을 최소화할 수 있는 최적의 고압주조 금형 설계 조건을 도출하였다.

[P1-19]

Hillock 억제 및 전기적 특성 개선을 위한 Al 합금 타겟으로 제조된 박막 특성 평가: 윤상민, 김정준, 김영균* (고등기술연구원)

Keywords: Al alloy target, Thin Film, Hillock, Electrical properties

디스플레이의 핵심 구성 요소인 백플레인 배선 및 베리어층 형성을 위해 TFT 전극의 주배선에는 Al 또는 Al 합금 박막이 사용된다. 스퍼터링 공정을 통해 형성되는 Al 박막은 고순도가 요구되지만, Pure Al 박막은 Hillock 형성, Electromigration(EM), Splash 등의 불량이 발생하여 배선 신뢰성을 저하시킨다. 이를 해결하기 위해 다양한 원소가 첨가된 Al 합금이 개발되고 있으며, 첨가 원소는 Hillock 억제와 전기적 특성을 고려하여 신중히 선택되어야 한다. 특히 Hillock은 기판과 박막 간 열팽창계수 차이로 인해 발생하는 열응력 완화 과정에서 형성되며, 디스플레이 제조 공정에서의 열처리 과정 중 성장하게 된다. 본 연구에서는 Hillock 형성 및 전기적 특성 개선을 위해 고순도 Al 타겟과 상용화된 Al 합금 타겟, 그리고 Al-Sc, Al-Y 타겟을 제조하여 비교 분석하였다. 실험은 2인치 스퍼터링 설비를 이용하여 박막을 형성한 후, 460°C에서 30분간 진공 분위기에서 열처리를 수행하였다. 박막의 미세구조 및 Hillock 성장은 주사전자현미경(SEM)과 원자탐침현미경(AFM)을 이용하여 관찰하였으며, 전기적 특성 분석을 위해 4-point probe와 Alpha Step을 활용하여 비저항을 측정하였다. 또한, 첨가 원소가 결정립 미세화 및 내부 응력 완화에 미치는 영향을 고려하여 Al 합금 타겟의 조성과 미세구조 제어가 디스플레이 배선 신뢰성 향상에 미치는 영향을 평가하였다.

[P1-20]

스크랩 첨가 비율 변화가 알루미늄 합금 소재 특성에 미치는 영향에 대한 연구: 김선기*, 김경수, 이진욱 ((주)나이스엘엠에스), 이근효, 이상현, 정진아, 조대연, 김준현 (한국생산기술연구원), 양원석 (대한전선(주)), 구승현, 황종일 ((주)나이스엘엠에스)

Keywords: 알루미늄, 스크랩 첨가, 열간압출, 미세조직, 기계적 특성

알루미늄 합금(Al alloy)은 현재 철(Fe)와 함께 산업에서 폭넓게 사용되는 금속 소재로, 비중 2.7 g/cm^{3}의 경금속으로 분류되면서도 다양한 합금 원소의 첨가를 통해 소재 특성을 제어할 수 있는 특성을 가지고 있어, 다양한 산업 분야에 적용되고 있음. 또한 소재 재활용성이 우수하기 때문에 연간 재활용되는 알루미늄 캔은 약 75% 이상을 상회하고 있는 것으로 보고되고 있고, 자동차 산업을 비롯한 다양한 산업군에서 발생하는 알루미늄 소재 재활용률 역시도 크게 성장하고 있는 추세에 있음. 특히 수년전부터 대두되고 있는 탄소 중립 및 저탄소 제품 및 공정 개발 이슈에 따라, 각국에서는 제품 제조시 저탄소 소재의 적용 및 탄소 중립 공정을 적용하고자 하는 노력을 진행하고 있음. 알루미늄 산업에서 저탄소 소재의 적용을 통한 제품 생산의 경우, 알루미늄 스크랩을 첨가해 제품을 제조하게 되는데, 이 때 스크랩에는 알루미늄을 제외하고도 다양한 금속소재 및 불순물, 개재물 등이 공존하고 있어, 이들을 제거한 이후에도 일부 잔류하고 있는 이들이 알루미늄 용탕 및 제품에 혼입, 제품 특성의 저하가 우려되는 상황임. 이러한 이유로 제품 생산시의 스크랩 활용률은 상당히 제한적으로 이루어지는 것이 현실이지만, 탄소 저감 정책 관련하여 스크랩 사용량을 증가시키고자 하는 연구가 이루어지고 있음. 이에 본 연구에서는 상용 첨가 수준 이상의 스크랩 첨가가 알루미늄 용탕에 미치는 영향을 검토하기 위해 원소재 대비 스크랩 비율을 변화하여 소재를 용해한 후, 용탕의 특성 평가 및 주조 이후 빌렛 특성 평가를 진행하였음. 또한 제조한 빌렛을 봉(rod)상으로 압출한 후 압출재의 특성 평가를 통해 스크랩 첨가 비율이 제품의 특성에 미치는 영향을 검토함과 함께, 특성 향상을 위한 방안을 검토하고자 하였음.

[P1-21]

알루미늄 압출재의 결정립 제어를 위한 열처리 공정 조건 검토에 대한 연구: 김선기* ((주)나이스엘엠에스), 김용호, 하성호, 이근효, 이상현, 조대연 (한국생산기술연구원), 윤상민, 김영균 (고등기술연구원), 구승현 ((주)나이스엘엠에스)

Keywords: 알루미늄, 열간압출, 미세조직, 결정립 제어

알루미늄은 FCC 격자 구조를 가지고 있어 소성 변형 특성이 우수하고 이러한 특성 때문에 다양한 형상 조건의 판재 및 형재로 제조되어 산업적으로 다양하게 응용되고 있음. 특히 알루미늄 소재는 압연 공정을 통해 산업적 요구를 만족할 수 있는 다양한 두께로의 압연이 가능하며, 압하율에 따른 소성 변형 특성과 관련하여 미세조직의 변화와 압연 조건에 따른 풀림 열처리 공정 조건 및 이에 따른 특성 평가에 대한 다양한 연구 결과가 보고되고 있음. 그러나 압출 이후 소성 가공 공정을 적용할 수 있는 형재(ex. tube 형상)일 경우, 압출재의 조직 제어를 위해서는 압출시의 냉각 방안 및 열처리를 통한 냉각 공정을 적용하는 것만이 산업적으로 적용할 수 있는 조직 제어방안으로 검토되고 있으며, 순수 알루미늄은 냉간 소성 변형 이후 높은 회복특성을 보이는 것으로 알려져 있어, 열처리 공정 조건 및 관련 특성의 평가가 쉽지 않다는 특성이 있음. 이에 본 연구에서는 순수 알루미늄 빌렛을 tube 형상으로 다양한 온도에서 압출한 후, 열처리 공정 조건(열처리 온도 및 시간)을 변화하여 열처리를 진행하였음. 이후 각각의 시편에 대해 미세조직, 결정립 크기 및 기계적 특성 평가를 진행하였으며, 이를 통해 열처리 공정 조건이 특성 변화에 미치는 영향을 검토하고자 하였음.

[P1-22]

EOL(End Of Life) 알루미늄 합금의 전이원소 제어를 위한 B 첨가 영향: 장진혁, 김원호, 노정영, 연창한, 손정길, 김지혜* (포스코엠텍)

Keywords: Aluminum, EOL Scarp, Transition Metal, recycling, casting

탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustmnet Mechanism, CBAM) 시행으로 탄소배출량 감축 목표를 달성하기 위해 EOL(End

of Life) scrap에 대한 연구가 진행되고 있다. Scrap 알루미늄은 Primary 대비 최대 95% 생산 에너지 감소와 90% 이상의 CO_2 배출량을 감소키실 수 있는 지속가능한 소재이다. Scrap으로는 주로 UBC(Used Baverage Cans), Puck, Taboo 등으로 가공 형태와 성분이 다른 원료를 사용하고 있다. 합금 제조 시 Ti, V, Zr, Cr 과 같은 전이원소(Transition Metals)를 포함하고 있으며, 불순물로 작용하는 전이원소들은 합금의 전기전도도 및 용탕의 품질에 악영향을 미친다고 알려져있다. 따라서 본 연구에서는 700~900°C에서 EOL 알루미늄 합금(Al 93% 이상, Ti 및 Cr 0.2% 이하)을 용해, 교반 및 침전을 진행하여 전이원소의 함량에 따라 B를 투입하여 제어를 진행하였다. B첨가에 따른 합금의 조성 변화를 관찰하기 위하여 발광분광분석기를 사용하였으며, 미세조직 및 반응생성물 분석은 광학현미경과 주사전자현미경을 통해 관찰하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 EOL Scrap 알루미늄 합금 내 전이원소 제어 가능성을 확인하였다

[P1-23]

4343/3003/4343 알루미늄 클래드재의 침식성에 미치는 냉간압연량의 영향: 임익범 (한국재료연구원), 정대한 (한국재료연구원, 부산대학교), 김원경, 어광준, 김형욱* (한국재료연구원)

Keywords: 알루미늄, 압연접합, 클래드, 미세조직, 침식

최근 전기자동차의 열관리 문제로 인하여 자동차의 열교환기에 대한 특성 향상에 대한 요구가 증가하고 있다. 알루미늄 클래드 판재는 우수한 열전도도와 높은 비강도로 인하여 부품의 크기를 줄이고 열교환기의 효율을 높이는 데 기여하여 자동차용 열교환기 부품의 브레이징용 소재로 널리 활용되고 있다. 일반적으로 핀/튜브 형식의 확관에 의한 기계적 체결 방법을 사용하는 열교환기에 비하여 브레이징으로 핀과 튜브를 접합하는 경우가 열교환 성능이 우수하여 전체적인 시스템의 효율을 증가시키는 장점이 있다. 한편, 엔진 냉각 방식에서 전기 구동 방식으로 변화되면서 열교환기의 크기는 감소시킬 수 있는 반면 그 성능은 더욱 고효율화되어야 한다. 이에 따라, 알루미늄 클래드 판재는 열교환기의 고효율화를 위해 고열전도도, 고강도, 내식성, 브레이징성 등 다양한 특성을 요구하고 있다. 특히, 브레이징 시 우수한 침식 특성을 통해 제품 사용 중 수명 단축 문제 등을 방지하는 것이 중요하다. 이러한 브레이징용 알루미늄 클래드 판재의 특성은 주로 심재의 특성에 좌우된다. 브레이징 열처리에 따라 심재의 결정립이 다소 조대해지며, 피재의 용융에 따른 Si 입자의 심재 내부로의 확산으로 침식 현상도 일부 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 박판주조한 AA3003, AA4343을 각각 심재와 피재로 롤 본딩 공정을 통해 클래드를 제작하였다. 이후 200, 150, 100 μm로 냉간압연 한 시편을 열처리하고 70 μm로 추가 압연하고 브레이징 열처리를 진행하였다. 최종 냉간압하량이 다른 세가지 판재 및 이를 브레이징 열처리 한 판재에 대하여 미세조직을 관찰하였다. 이를 통해 최종 압하량에 따른 미세조직의 변화가 브레이징 열처리시 침식 특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

[P1-24]

알루미늄 합금의 Sr 원소 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가: 유효상*, 김용호, 김철우, 이병권, 고은찬, 손현택 (한국생산기술연구원)

Keywords: Aluminum, Extrusion, Mechanical properties, Microstructure, Electric conductivity

알루미늄은 낮은 밀도와 우수한 전기전도도를 갖춘 금속으로, 전력 및 전자 산업에서 널리 사용된다. 특히, 전력 전송선, 전자기기 및 차량 경량화 소재로 활용되며, 높은 전기전도도를 요구하는 분야에서 구리의 대체 소재로 주목 받고 있다. 그러나 순수 알루미늄의 경우 기계적 강도가 낮아 구조적 요구 조건을 충족하기 어렵다. 고전도 알루미늄 합금은 기계적 강도와 전기전도도의 균형을 최적화하기 위해 개발되었다. 이러한 합금에서는 Cu, Mg, Si 등의 합금 원소를 적절히 첨가하여 물성을 조정하며, 미세조직 제어를 통해 강도 향상과 전기전도도 저하를 최소화하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 Sr 첨가가 알루미늄 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 알루미늄 합금을 제조하기 위해 고주파 유도로를 이용하여 중력 주조하였고, 가공된 빌렛은 열간 압출하였다. 제조 된 주조재 및 압출재의 미세조직은 주사전자현미경 및 XRD를 이용하여 관찰하였으며, 인장시험을 통한 기계적 특성 평가 및 와전류법을 통한 전기전도도 특성 평가를 하였다.

[P1-25]

공정조건에 따른 Al-Mg-S계 합금 압연재의 미세조직 및 기계적 특성 비교 연구: 이혜인, 김지수, 주경석, 정영길, 김세훈* (한국자동차연구원)

Keywords: Al-Mg-Si계 합금, 압연재, 공정 최적화, 미세조직

탄소 감축과 환경 문제 해결을 위한 노력의 일환으로, 자율주행차 및 수소전기차와 같은 미래 모빌리티의 경량화가 필수적으로 요구되고 있다. 이에 따라 우수한 기계적 특성과 가공성을 갖춘 Al-Mg-Si계 합금이 자동차 차체 및 구조재로 주목받고 있다. 그러나 일반적으로 사용되는 슬라브 기반의 압연재는 응고 과정에서 원소 편석이 발생할 가능성이 높아, 균질한 미세조직을 확보하기 위해 추가적인 균질화 열처리 및 가공 공정이 필요하다. 이에 반해, 압출재를 기반으로 한 압연 공정은 원소 분포의 균일성과 미세조직의 정밀한 제어가 가능하여, 기계적 특성의 향상을 기대할 수 있다. 또한, 압출재의 압연은 표면 품질이 우수하고 연속 공정 적용이 용이할 것이라 판단되며, 자동차 산업에서의 활용 가능성이 높을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 Al-Mg-Si계 합금 압연재의 공정 조건에 따른 미세조직과 기계적 특성을 비교·분석하였다. 주조 후 압연재와 압출 후 압연재의 SEM, EBSD 미세조직 관찰을 통해 열처리 조건에 따른 압연재의 미세조직에 미치는 영향을 분석하고, 기계적 특성 간의 상관관계를 도출하여 최적의 열처리 조건을 제시하는 것을 목표로 한다. 최근 산업에서 요구되는 고강도·고연성 경량 소재 개발 및 친환경·에너지 절감형 제조 공정 구축에 기여할 뿐만 아니라, 알루미늄 판재의 표면 품질 향상과 연속 공정 최적화를 통해 자동차 산업의 생산성 향상에도 기여할 것으로 기대된다.

[P1-26]

Al-7Si-0.4Mg 주조 합금에서 용체화처리후 냉각속도가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 최예원, 손현우, 조영희, 이정무* (한국재료연구원)

Keywords: Al-Si-Mg casting alloy, quench, heat-treatment, microstructure, mechanical property

알루미늄 합금은 경량이며 주조성 및 가공성이 우수하여 수송기기의 경량화 소재로 널리 사용되고 있다. Al-Si-Mg계 주조용 합금은 열처리형 합금으로, 용체화 처리와 인공시효를 실시하여 특성을 향상시킬 수 있는데, 기지내부의 용질원소 및 공공의 고용도를 높이기 위하여 용체화 처리후에는 일반적으로 물에 급랭을 한다. 하지만, 급랭시 주조제품에서 뒤틀림 등의 변형이 발생하는 문제가 있다. 변형 발생을 완화시키기 위하여 용체화처리후 냉각속도를 느리게 하거나, 냉각시작 온도를 저하시키는 등 다양한 방법이 사용되고 있다. 냉각시에 냉각속도가 느리면 강도, 연성 등 기계적 특성이 저하되는데, 이는 주로 과포화고용도가 낮아지고 냉각 도중에 발생하는 예비석출물의 생성으로 인하여 주강화상이 분율이 감소하는 데 기인하는 것으로 알려져 있다. 냉각속도 제어와 관련하여 지금까지 주로 피크경도를 갖는 시효처리 조건에서 연구가 수행되어 왔다. 최근 자동차의 전동화에 따라 부품에서는 강도뿐만 아니라 연성도 많이 요구되고 있다. 따라서 강도/연성의 적절한 조합한 특성이 중요한데, 냉각속도에 따른 피크 시효에서의 특성 변화에 더하여 아시효 구간에서의 특성 변화도 중요하다. 본 연구에서는 상용 A356합금을 용체화 처리한 후 수냉 (WQ), 강제공랭 (FAB), 공랭 (AC)의 3가지 방법으로 냉각을 실시하고 인공시효 처리를 진행하였다. 이 시편들에 대하여 아시효 및 피크시효 조건에서 인장시험을 실시하여 기계적 특성을 평가하고, 이의 미세조직적 특징을 분석하여 용체화 처리후 냉각속도가 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

[P1-27]

La 함량별 첨가가 Al-Si-Cu합금의 미세조직 및 부식특성에 미치는 영향: 이현주, 정영민, 김경훈* (포항소재산업진흥원)

Keywords: 알루미늄, 희토류, 전기화학 시험, 미세조직, 내부식성

Al 합금은 낮은 비중으로 인해 항공우주 및 자동차와 같은 산업에서 널리 사용된다. 최근 산업이 발전하며, 고특성 합금 개발의 요구되고 있기 때문에 희토류를 첨가하여 특성개선 연구를 수행하고 있다. Al-Si-Cu계 합금은 Cu와 Al간 전위차에 의한 갈바닉 부식으로 안해 내부식성 특성의 한계가 존재한다. 본 연구는 La 함량에 따른 Al–10%Si–2%Cu 합금의 미세구조와 부식 특성을 연구하였다. Al 합금 시편은 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 wt%의 La 함량을 첨가하여 중력 주조법으로 합성되었으며, 전기화학 시험과 미세구조 분석을 수행하였다. 그 결과 조직의 미세화 및 새로운 석출상의 형성으로 부식 전류 밀도가 68% 감소하여 부식 특성이 개선됨을 확인하였다.

[P1-28]

주조 방법 및 La 첨가량에 따른 Al-Si계 합금의 특성 분석 연구: 김대욱, 이현주, 김경훈* (포항소재산업진흥원), 김성탁* (한국생산기술연구원)

Keywords: 알루미늄, 다이캐스팅, 특성분석, 희토류, La

Al-Si-Cu 합금은 우수한 주조성 및 기계적 특성으로 다이캐스팅 주조시 주로 사용되는 소재이다. 그러나 전위차에 의한 갈바닉 부식의 영향으로 부식특성이 저하되는 특징을 가지고 있기 때문에 La, Ce, Eu와 같은 희토류를 활용한 개선 연구가 진행되고 있다. 그러나 아직까지 주조 방법 및 La의 첨가에 따른 Al-Si-Cu 합금 특성분석 연구는 부족하다. 본 연구는 La첨가량 및 주조방법에 따른 Al-Si-Cu 합금의 미세조직(SEM, EBSD) 변화에 따른 기계적 특성 분석(Micro Vikers)을 수행하였다.

[P1-29]

고강도 알루미늄 합금 압출재의 인공 시효 조건에 따른 기계적 특성 평가: 양현석, 윤상민, 정우철, 최광수, 공만식* (고등기술연구원)

Keywords: 7xxx계 알루미늄 합금, 인공 시효, 기계적 특성, 석출 거동

본 연구에서는 7xxx계 고강도 알루미늄 합금 압출재의 인공 시효 조건이 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 7xxx계 합금은 높은 강도와 우수한 내식성을 바탕으로 항공, 자동차 및 구조용 소재로 널리 활용되고 있으며, 기계적 성질의 최적화를 위해 적절한 열처리 조건 설정이 필수적이다. 인공 시효는 석출 거동을 조절하여 강도와 연성을 최적화하는 중요한 공정으로, 본 연구에서는 특정온도에서 시효 시간을 조절하여 기계적 특성 변화를 분석하였다. 압출 공정을 거친 시편에 대해 124℃에서 최대 25시간까지 인공 시효 열처리를 수행하였으며, 시효 시간이 증가함에 따라 인장 강도, 항복 강도, 연신율 및 단면 수축률의 변화를 측정하여 기계적 특성을 정량적으로 평가하였다. 또한, 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 미세조직 변화를 관찰하고, 석출상의 분포와 크기가 기계적 성질에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 124℃에서 25시간 시효 처리한 시편에서 인장 강도 400 MPa, 항복 강도 330 MPa, 연신율 9% 이상의 목표 기계적 특성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 또한, 시효 시간이 증가함에 따라 석출상의 거동이 변하며, 특정 시간 이후에는 강도 증가가 둔화되는 경향이 나타났다. 미세조직 분석을 통해 이러한 기계적 특성 변화의 원인을 규명하였으며, 석출상 형성과 결정립 구조의 안정화가 기계적 성질에 미치는 영향을 논의하였다. 향후 연구에서는 더 높은 기계적 특성을 확보하기 위해 시효 온도 및 합금 조성의 최적화 연구를 추가적으로 수행할 예정이며, 이를 통해 기존 한계를 극복하고, 고성능 경량 구조재로서의 산업적 응용 가능성을 더욱 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgment: 본 연구는 산업통산자원부/한국산업기술기획평가원의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 RS-2024-00405428)

P2 : 고엔트로피합금
Room 3층 로비, 4월 23일

[P2-1]
철계 $L1_2$ 석출강화 합금의 냉간 압연 후 열처리 미세조직 및 기계적 물성: 문광현, 김진경* (한양대학교)
Keywords: 다성분계합금, 석출강화, $L1_2$ 석출상, 기계적 물성
$L1_2$ 석출강화 합금은 기존 다성분계 합금에 Al과 Ti를 첨가하여 고밀도의 Ni_3(Al, Ti) 조성을 가진 $L1_2$ 석출물을 형성한다. FCC와 유사한 $L1_2$ 석출물은 FCC 기지 내에서 정합 계면을 이루어, 높은 강도와 우수한 연성에 기여하는 것으로 보고되어 왔다. 또한, 최근에는 소재 비용 절감을 위해 Co를 첨가하지 않은 철계 $L1_2$ 석출강화 합금이 개발되었다. 본 연구는 철계 $L1_2$ 석출강화 합금을 냉간 압연 후 균질화 열처리 및 어닐링을 통해 결정립 내부의 석출물 크기와 분포를 제어하였다. 이후 인장 시험을 통해 기계적 물성을 평가하고, X선 회절 분석(XRD), 주사 전자 현미경(SEM), 후방 산란 전자 회절 분석(EBSD)를 활용하여 미세조직과 기계적 물성 간의 상관관계를 고찰하였다.

[P2-2]
탄소 첨가 $L1_2$ 석출강화 철계 다성분계 합금의 미세조직 및 기계적 물성: 윤주희, 김진경* (한양대학교)
Keywords: 다성분계 합금, $L1_2$ 석출물, 탄소 첨가
다성분계 합금은 기존 합금 대비 우수한 기계적 물성과 여러 독특한 특성으로 큰 주목을 받았으며, 그중 $L1_2$ 석출 강화 합금은 연성 감소 없이 강도를 크게 증가시킨다고 보고되었다. 최근 실제 산업에서의 적용을 위해 Co 및 Ni와 같은 고가 원소의 사용을 줄여 우수한 가성비를 보이는 철계 $L1_2$ 석출 강화 합금이 보고되고 있다. 본 연구에서는 철계 $L1_2$ 석출 합금에 탄소를 첨가하여 조직 미세화, 탄화물 형성에 따른 물성 증가와 상 안정성 증가를 통한 고가 원소 저감 가능성을 검토하였다. 코발트가 첨가되지 않은 철계 $L1_2$ 석출 강화 합금을 아크 멜팅을 통해 세멘타이트와 함께 용해하여 탄소 첨가 합금을 제조하였으며, 열간 압연 및 균질화 후 냉간 압연을 거친 재료에 2차 균질화 열처리를 수행한 결과, 재결정된 FCC 단상 조직과 Ti-rich 석출물이 확인되었다. 이후 2차 균질화 재료에 여러 온도 범위에서 열처리 시 $L1_2$ 석출물이 형성되는 것을 확인하였으며, 복합 석출물이 물성에 미치는 영향을 인장 시험을 통해 평가하였다. 해당 연구는 니켈 저감 합금 설계에 기여할 것으로 예상된다.

[P2-3]
새로운 가공열처리 방식으로 미세구조를 제어한 $L1_2$석출강화 고엔트로피합금의 우수한 인장 물성: 김진우, 이재흥, 이정완, 권현석, 박효진, 김은성, 허윤욱, 김형섭* (포항공과대학교)
Keywords: 고엔트로피합금, 석출상, 열간압연, 직접시효, 강화기구
면심입방구조를 갖는 고엔트로피합금 내부에 $L1_2$구조를 갖는 금속간 화합물을 석출시킬 경우 석출상이 기지 내부에 고르게 분포하게 되며 $L1_2$석출상과 면심입방구조간의 뛰어난 정합성 덕분에 석출상의 성장속도가 느려 석출상의 크기를 제어할 수 있어 재료의 강도를 향상시킬 수 있다. 이때 $L1_2$석출상들은 결정립 내부에서 연속 석출되거나 불균질 핵생성이 일어나는 결정립계에서 불연속 석출로 인해 생성될 수 있는데 불연속 석출될 경우 인접 면심입방구조 기지 내 고용 원소들을 공핍시키고 취성이 강한 위상적최조밀구조를 갖는 석출상이 생성될 수 있어 합금의 기계적 특성에 안 좋은 영향을 끼친다. 이를 방지하기 위해 본 연구에서는 고엔트로피합금인 $(FeCoNi)_{79.5}Cr_{10.5}Al_5Ti_5$를 열간압연 후 직접시효 처리하여 미세구조를 제어하는 방법을 제시한다. 고온에서 열간압연 시 동적 재결정이 일어나 큰 평균 결정립과 높은 전위 밀도의 마이크로밴드를 갖는 강도 높은 기지가 생성되고 시효 이후에도 그 특성이 유지된다. 시효 이후 불연속 석출 영역이 기존 연구 결과보다 크게 감소하는데 이는 큰 결정립 크기로 인해 불연속 석출이 일어나는 결정립계 면적이 감소하기 때문이다. 시효 전 결정립 내부 전위 밀도가 높고 전위가 핵생성 장소 및 확산 경로 역할을 하여 결정립 내 연속 석출에 의한 석출상의 생성이 촉진되며 이로 인해 기지의 과포화도가 낮아져 안정성이 증가해 불연속 석출의 구동력이 감소하여 불연속 석출 영역의 확장이 억제된다. 변형과정에선 전위의 활주를 방해하는 석출상의 존재로 열간압연만 진행한 합금 대비 가공경화율이 증가한다. 본 불연속 석출을 억제한 고엔트로피합금은 높은 전위 밀도의 유지와 석출강화로 높은 항복강도(~1.07 GPa)를 얻을 수 있었다. 또한 가공경화 효과가 나타나 ~1.34 GPa의 극한 인장강도와 ~27.5%의 연신율을 달성했다.

[P2-4]
분말 강소성 가공을 통해 제작된 MEA-EHEA 다중 소재의 계층적 헤테로구조와 기계적 거동: 하수빈, 손수정, 이정완, 김래언, 박효진, 김형섭* (포항공과대학교)
Keywords: Material design, Multi-materials, High-entropy alloys, High-pressure torsion, Mechanical properties
헤테로구조는 이종 변형 유도 강화(hetero-deformation induced strengthening: HDI strengthening)를 통해 강도와 연성의 trade-off를 극복할 수 있는 효과적인 전략으로 알려져 있다. 그러나 나노·마이크로 스케일의 계층적 헤테로구조를 정밀하게 제어하는 방법은 제한적이었다. 본 연구에서는 powder severe plastic deformation (P-SPD) 공정과 열처리를 통해 계층적 헤테로구조를 가지는 CoCrFeNi medium-entropy alloy (MEA) 및 $AlCoCrFeNi_{2.1}$ eutectic high-entropy alloy (EHEA) 기반 다중 소재를 제작하는 방법을 제시하였다. MEA 및 EHEA의 분말을 혼합하고 고압 비틀림 공정을 적용하여 치밀화하였으며, 이후 열처리를 통해 미세구조를 제어하였다. 제작된 다중 소재는 EHEA 도메인의 FCC/B2 나노 상 분리와 마이크로 스케일의 도메인 분리로 인한 계층적 헤테

로구조를 형성하였으며, loading-unloading-reloading 시험을 통해 헤테로구조로 인한 HDI strengthening이 강도에 기여하였음을 확인하였다. 본 연구는 P-SPD 공정을 이용한 계층적 헤테로구조 형성이 전위 강화 및 추가적인 HDI 강화를 유도하여 다중 소재의 기계적 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

[P2-5]

$Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ 고엔트로피 합금의 저온 변형 거동 분석: 김진섭, 김진경* (한양대학교)

Keywords: 극저온 물성, HCP, TEM

차세대 구조재료로 주목받는 $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ 준안정 고엔트로피 합금은 HCP 변태유기 소성(TRIP) 효과로 인해 우수한 물성을 보이며, 저온에서 변형 시 TRIP 효과가 증가하여 상온 대비 높은 강도를 나타낸다고 보고되었다. 또한 준안정 고엔트로피 합금에서 나타나는 HCP 상은 상온에서 <c>축 방향으로 변형을 수용하여 큰 연성 손실 없이 강도를 효과적으로 증가시킬 수 있다. 그러나 극저온 환경에서의 각 상별 변형 메커니즘은 TRIP 효과를 제외하고 아직 면밀히 조사되지 않았다. 본 연구에서는 $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ 합금에 대해 상온(293 K)과 저온(123 K)에서 재료를 일정한 변형률로 인장한 뒤, 미세조직 관찰을 통해 변형 거동을 분석하였다. 상온과 저온에서 5% 변형을 수행한 후, 변형 전후 동일한 위치에서 주사전자현미경(SEM) 및 후방산란전자회절(EBSD) 촬영을 진행한 결과, 변형 온도 감소에 따라 재료에서 multi-variant 판형 결함이 증가한 반면, KAM 분포는 상온에서 더 높은 증가율을 보였다. 또한 저온 환경에서 5%와 20% 변형된 재료에 대해 투과전자현미경(TEM) 분석을 수행한 결과, 저온 변형 시 TRIP을 통해 형성된 HCP 상에서 방향으로 변형을 수용할 뿐만 아니라, HCP 쌍정(twin)이나 kink 등을 나타내며 변형을 활발히 수용하고 있는 모습을 확인하였다.

[P2-6]

중엔트로피합금의 LPBF 후열처리를 통한 셀 네트워크 제어: 정희재, 권현석, 김은성, 허윤욱 (포항공과대학교), 최중호 (KIMS), 김래언, 안성열, 오상호 (포항공과대학교), 박정민* (KIMS), 이병주, 김형섭* (포항공과대학교)

Keywords: 중엔트로피합금, 셀 구조, 가공 경화, 석출, 후방 응력 강화

본 연구에서는 CoCrFeNiMoC계 중엔트로피 합금의 LPBF 후열처리 가공에 따른 기계적 특성과 미세조직 변화를 셀 네트워크에 중점을 두어 분석하였다. 본 중엔트로피합금의 LPBF 후열처리는 셀 구조를 선택적으로 변화시켜 기존의 Mo 편석이 관찰되던 셀 경계를 μ 석출상과 M_6C 카바이드 석출상으로 치환하고 기계적 특성을 제어할 수 있게 해주었다. 항복강도는 셀 경계에 의한 강화 효과의 감소로 소폭 감소한 반면, 전위 쌓임 효과에 따른 back stress 강화로 인해 연성의 큰 감소 없이 인장 강도는 1.02 GPa에서 1.15 GPa로 증가하였다. 본 결과는 금속 적층 제조 후열처리로 chemical heterogeneity를 가진 셀 구조를 제어함으로써 합금의 기계적 특성을 효과적으로 조절할 수 있음을 시사한다.

[P2-7]

석출경화형 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금의 미세조직 및 전기화학적 부식 특성: 이정민 (국립공주대학교), 배재웅 (부경대학교), 주수현 (단국대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 문종언* (국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

Keywords: 고엔트로피 합금, 전기화학적 부식, 산화거동, 석출물, 미세조직

고엔트로피 합금은 다성분 금속 원소로 이루어진 신개념 합금으로 우수한 기계적 특성과 내식성을 보유하고 있다. 본 연구에서는 $Co_{17.5}Cr_{12.5}Fe_{55}Ni_{10}Mo_5$ 고엔트로피 합금의 전기화학적 부식 특성을 평가하고 이를 316L 스테인리스 강의 거동과 비교하였다. 해당 합금의 전기화학적 부식 거동 분석을 위해 동전위 분극 실험을 수행하였으며, 3.5 wt% NaCl 용액 환경에서 Ag/AgCl 기준 전극을 사용하여 진행되었다. 또한, XPS 분석을 통해 금속 표면의 산화막을 분석하였고, 주사전자현미경을 이용하여 화학적 조성을 분석하여 부식 생성물 및 부식 미세조직을 확인하였다. 실험 결과, 본 합금이 비교재인 316L 스테인리스 강에 비해 상대적으로 높은 부식 저항성을 나타내었다. 이는 합금 내에 존재하는 석출물과 부식 과정에서 형성되는 Mo-rich 산화물의 형성 거동과 연관이 있다. 본 연구를 통해 해당 고엔트로피 합금이 염수 환경에서 탁월한 내식성을 가질 수 있음을 확인하였으며, 향후 고내식성 합금 개발 및 전기화학적 부식 제어 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[P2-8]

정합 석출상 형성을 통한 초저온 강도 향상 및 불연속 소성 제어: 장태진, 이건직, 송상윤, 성민영 (고려대학교), 이준호, 김영균 (한국재료연구원), 성효경 (국민대학교), Aparna Saksena, Baptiste Gault (Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH), 김세호 (고려대학교), Alireza Zargaran (포항공과대학교), 나영상* (한국재료연구원), 손석수* (고려대학교)

Keywords: 고엔트로피합금, 액체 헬륨, 초저온

고엔트로피 합금(HEA)의 등장으로 초저온 합금 설계에 새로운 가능성이 제시되고 있다. 그러나 현재까지 금속 소재의 초극저온 기계적 거동에 대한 이해는 주로 액체 질소 온도에서의 평가에 집중되어 있으며, 0 K 근처의 초저온 기계적 평가가 미흡한 실정이다. 0 K 근처의 온도에서 필연적으로 발생하는 불연속 소성 변형(Discontinuous plastic flow, DPF)이 발생하게 되는데, 이를 조절하지 않으면 국부적인 변형 집중과 조기 파손을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 액체 헬륨 온도(4.2 K)에서 기계적 특성을 향상시키고 DPF를 제어하기 위한 방안으로서, 정합 석출물을 통한 석출강화 전략을 활용하였다. 냉간 압연 이후 바로 시효공정을 적용하여, 미세한 결정립과 높은 분율의 정합 석출상을 가지는 석출강화형 고엔트로피 합금을 제작하였고, 4.2 K에서 2186 MPa의 우수한 인장 강도와 16.2%의 연신율을 동시에 달성하였다. 석출강화형 고엔트로피 합금은 높은 강도를 가지면서도 DPF 중 응력 강하가 작은 초저온 구조재료로써 우수한 특성을 보였다. 이러한 우수한 초저온 특성은 정합 석출상에 의해 야기되는 단거리 상호작용에 의해 기인하였으며, 본 연구 결과는 초저온 환경, 특히 0 K 근처의 극한 조건에서도 정합 석출물을 활용한 설계 전략이 유망함을 시사한다.

[P2-9]

Fe-Ni-Co super invar 합금에서의 Al, Ti 첨가 통한 석출강화 다원계 합금 설계: 이상원, 정현 (고려대학교), 이태호 (한국재료연구원), 손석수* (고려대학교)

Keywords: Invar, 석출 강화, 기계적 특성, CTE, 합금 설계

Fe-Ni-Co super invar는 Fe-32Ni-4Co (wt.%)의 조성에서 0 ppm/°C에 가까운 열팽창 특성을 나타내는 소재로, 우주, 항공, 반도체 산업 등 낮은 열변형 특성의 구조체가 필요한 분야에 사용되고 있다. 하지만, 기존 super invar는 500 MPa 수준의 낮은 강도를 가져 이에 대한 개선이 필요하다. 강도 향상을 위한 일반적인 방법으로 석출강화가 사용되는데, 탄소 첨가 통한 탄화물 형성은 강도 향상은 가능하지만, 심한 연성의 열화가 발생한다. 이를 극복하기 위해 기존 Fe-Ni-Co FCC 단상 기지와 정합 계면을 가지는 $L1_2$ 석출물로 강화하는 방법이 가장 효과적이다. $L1_2$ 석출을 위해서는 기존 조성에 Al, Ti 원소의 첨가가 필요 하지만, Al, Ti 조성의 비율에 따라 $L1_2$, $D0_{24}$ 등 석출물의 종류가 바뀌기 때문에 효과적인 강화를 위한 각 원소의 적절한 함량을 찾는 것이 필요하다. 또한, Al, Ti 첨가에 따라 형성되는 $L1_2$, $D0_{24}$ 석출상이 super invar에서 조직, 기계적 특성, 열변형 특성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 Al, Ti 조성 비율 조절을 통해 서로 다른 석출물을 가지는 석출 강화형 Fe-Ni-Co-Al-Ti super invar를 설계하여 석출상이 미세조직 및 그에 따른 기계적, 열변형 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 근거로 석출강화 super invar 합금계 중 강도 1158 MPa, 연성 18%, CTE 2.16 ppm/°C으로 다른 석출강화형 super invar보다 기계적, 열변형 특성이 우수한 $L1_2$ 강화 super invar 합금을 제시한다.

[P2-10]

Fe–Co–Ni–Cr–Mo계 중엔트로피 합금에서 V 첨가가 석출 거동, 미세조직, 기계적 물성에 미치는 영향 연구: 박수정, 성지혜, 김태형 (단국대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 주수현* (단국대학교)

Keywords: Medium-entropy alloy, Coefficient of thermal expansion, cryogenic mechanical property, precipitate

고엔트로피(High Entropy Alloy, HEA) 및 중엔트로피(Medium Entropy Alloy, MEA) 합금은 기존 합금과 달리 다중 주원소를 기반으로 한 신합금으로, 극한 환경에서도 우수한 기계적·열적 성능을 보이는 것으로 알려져 많은 주목을 받고 있다. 최근에는 저열팽창 계수를 지닌 HEA 및 MEA 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이는 기존 Invar 합금이 큐리 온도 이하에서 제로 열팽창 특성을 나타내지만 강도가 낮아, 고강도·저열팽창 특성을 갖는 새로운 개념의 합금을 개발하기 위함이다. 그중 Fe–Co–Ni–Cr–Mo계 MEA는 높은 강도와 낮은 열팽창 계수를 가지는 특징이 있으나, 극저온 환경에서 네킹 현상 없이 파괴가 발생하며 큐리 온도가 감소하는 한계가 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 V을 첨가하여 생성되는 석출물의 거동을 분석하고, 열처리 온도 및 시간 변화에 따른 물성 변화를 조사하였다. Fe–Co–Ni–Cr–Mo계 중엔트로피 합금에 V을 2.0 at.% 첨가한 후 주조 및 냉간 압연을 수행하였으며, 이후 550°C부터 100°C 간격으로 열처리를 실시하여 경도, 인장 강도, 열팽창 계수 등의 변화를 평가하였다. 또한, 높은 물성을 나타내는 열처리 온도를 선정한 후, 5 min, 10 min, 30 min, 60 min, 120 min 동안 열처리를 진행하여 시간에 따른 물성 변화를 분석하였다. 본 연구를 통해 고강도·저열팽창 합금 개발을 위한 새로운 합금 원소 첨가 전략을 제시하고자 한다.

[P2-11]

CoCrNi계 중엔트로피 합금의 미세구조와 석출 거동에 따른 부식 특성 분석: 강승연, 한상윤, 류채우* (홍익대학교)

Keywords: Corrosion resistance, passive film stability, microstructure, high-entropy alloy, precipitates

고엔트로피 및 중엔트로피 합금은 high-entropy effect로 인해 기존 합금과 달리 단순 고용체를 형성하며, 이로 인해 우수한 기계적 물성과 뛰어난 부식 저항성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 특히, 석출물의 형성을 통해 이중상 구조를 갖는 고엔트로피 합금은 단일상 구조에 비해 우수한 기계적 성능을 보여 차세대 구조 재료로서의 가능성이 주목받고 있다. 그러나 석출물이 고엔트로피 합금의 기계적 거동과 변형 메커니즘에 미치는 영향은 널리 연구된 반면, 석출물이 전기화학적 특성과 부동태 피막 안정성에 미치는 영향은 충분히 연구되지 않고 있다. 특히 고엔트로피 합금이 주로 사용될 것으로 예상되는 해양 환경에서는 염화 이온의 침투로 인한 국부 부식 위험이 크므로, 고엔트로피 합금의 부식 저항성과 부동태 피막 특성을 체계적으로 분석하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 CoCrNi계 중엔트로피 합금을 대상으로 미세구조와 석출 거동이 해양 환경에서의 부식 거동과 부동태 피막의 안정성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 다양한 열처리 조건을 적용하여 석출물의 형성과 분포를 조절한 후, 전기화학적 분극 실험을 통해 부식 저항성을 평가하고, 미세구조와 부식 특성의 상관관계를 규명하였다. 본 연구는 CoCrNi계 중엔트로피 합금의 부식 저항성을 향상시키기 위한 최적의 미세구조 설계를 제안하고, 해양 환경에서의 응용 가능성을 평가하는 데 기여할 것으로 기대된다.

[P2-12]

TiHfNb 기반 중엔트로피 합금의 상온 역학 특성 및 고온 산화 거동 규명: 박태연, 이시연, 최인철* (국립금오공과대학교)

Keywords: medium-entropy alloy, nanoindentation, pop-in, high-temperature oxidation

내화 중엔트로피 합금은 주로 타이타늄(Ti), 나이오븀(Nb), 텅스텐(W) 등과 같은 내화 원소들로 구성되어 있으며, 고온에서 우수한 강도를 나타낸다고 알려져 있다. 이러한 내화 중엔트로피 합금의 상온 특성은 고용 강화 효과에 의해 발생된다고 알려져 있지만, 합금의 상온 항복 거동에 대한 연구는 미비하다. 또한 내화 원소들로만 구성된 내화 중엔트로피 합금은 일반적으로 고온 산화 저항성이 낮기 때문에 이러한 합금의 고온 산화 거동에 대한 연구가 필요하지만 아직까지 미비한 실정이다. 따라서 내화 중엔트로피 합금의 상온 특성과 항복 거동 및 고온 산화 거동을 이해하는 것이 내화 중엔트로피 합금 연구에 있어서 중요하다. 본 연구에서는 합금의 밀도를 낮추고 주조 편석을 완화하기 위해 Ti의 함량을 높인 TiHfNb 중엔트로피 합금을 설계하였으며, 지르코늄(Zr) 및 바나듐(V)의 첨가가 TiHfNb 중엔트로피 합금의 고용 강화, 상온 항복 거동 및 고온 산화 거동에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

[P2-13]

In-situ TiC 강화형 NbTaVTi 고엔트로피 합금의 강화기구 및 기계적 특성: 최혁재, 손도상, 유형규, 이진규* (공주대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금 , 기계적 합금화, 방전 플라즈마 소결법, in-situ TiC

내열 고엔트로피 합금은 고온에서 우수한 기계적 특성을 발휘하여 항공우주 산업에서 큰 주목을 받고 있는 재료이다. 최근 기계적 합금화 및 방전 플라즈마 소결법을 이용한 내열 고엔트로피 합금 제조에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이들 합금은 미세한 결정립과 균일한 미세조직을 형성하여 뛰어난 기계적 특성을 나타내고 있다. 본 연구에서는 in-situ TiC 강화형 NbTaVTi 고엔트로피 합금을 기계적 합금화 및 방전 플라즈마 소결법을 통해 제조하였으며, 제조된 합금의 미세조직과 기계적 특성을 분석하고, in-situ TiC 입자의 형성과정을 고찰하였다. 제조된 in-situ TiC 강화형 NbTaVTi 고엔트로피 합금의 미세조직은 1 μm 이하의 미세 결정립을 가진 BCC 기지와 나노 크기의 FCC 결정구조를 가진 TiC 상으로 구성되었다. 합금의 기계적 특성은 기존의 동일 조성 합금보다 우수하였으며, 상온에서의 항복강도는 약 2150 MPa, 800ºC에서의 항복강도는 약 1570 MPa를 나타내었다. 이러한 우수한 기계적 특성은 균일한 미세조직, 미세 결정립 강화효과, 탄소 유입에 의한 침입형 강화효과, 그리고 나노크기 TiC 입자 강화 효과에 기인한 것으로 판단된다.

[P2-14]

$Fe(CoCrMnNi)_{100-x}$ 다성분계 합금에서 Fe 함량 변화가 마르텐사이트 형성 및 파괴 인성에 미치는 영향: 정혜지 (국민대학교), 박상은 (두산에너빌리티), 박노근 (영남대학교), 설재복, 성효경* (국민대학교)

Keywords: Complex composition alloy, Fracture toughness, Transformation-induced plasticity, Twinning-induced plasticity

다성분계 합금(Complex Composition Alloy)은 조성의 다양성을 활용하여 미세조직과 기계적 성질을 조정할 수 있어 차세대 소재로 주목받고 있다. 기존 단일 조성 합금과 달리 설계 유연성이 높아, 강도와 연성을 균형 있게 조절할 수 있다는 강점이 있다. 그러나 일부 합금은 Co, Ni 등 희귀 금속을 포함하고 있어 원가 부담이 크며, 이로 인해 산업적 적용이 제한되는 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Fe 함량을 증가시켜 경제성을 높이면서도 기계적 특성을 유지할 수 있는 Fe 기반 다성분계 합금이 새로운 대안으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 Fex(CoCrMnNi)100-x 고엔트로피 합금의 J-적분 파괴인성 시험을 평면응력 조건에서 수행하여 상온 및 극저온에서의 균열 전파 거동을 비교·분석하였다. 실험 결과, 상온에서는 주로 쌍정 변형이 발생하였으며, 극저온에서는 쌍정과 함께 ε-마르텐사이트가 형성되었다. 그러나 균열은 쌍정계 및 ε-마르텐사이트를 따라 전파되어 균열 성장 저항에는 크게 기여하지 못하였다. 반면, 미세한 α′-마르텐사이트는 균열 전파를 효과적으로 저지하여 J-R 저항을 증가시키는 역할을 하였다. 특히 극저온에서는 사전에 형성된 α′-마르텐사이트가 균열 무딤(crack blunting)을 유도하여 균열 진행을 억제하는 것으로 나타났다. 또한, 균열 전방에서 형성된 α′-마르텐사이트는 국부적인 압축 응력을 발생시켜 균열 무딤 거동을 더욱 향상시키는 데 기여하였다. 본 연구는 극저온 환경에서 Fe 포함 고엔트로피 합금의 파괴 인성과 균열 저항 메커니즘을 규명하였으며, 향후 저온용 소재로서의 적용 가능성을 제시하는 데 기여할 것으로 기대된다.

[P2-15]

Sustainable Manufacturing and Mechanical Properties of $FeCrCoMnNiC_x$ High-Entropy Alloy (HEA) Using Ferroalloys Feedstock: Yao Su, JinSeob Kim, JinKyung Kim, and JooHyun Park* (Hanyang University)

Keywords: High entropy alloy, Ferroalloys, Microstructure, Mechanical properties, Sustainability

Ferroalloys play an indispensable role in the materials world, especially in the steelmaking process. In the current study, commercial ferroalloys, such as high-carbon ferromanganese (HCFeMn), low-carbon ferrochromium (LCFeCr) and ferronickel (FeNi), are utilized in the manufacturing of the ultra-clean FeCrCoMnNi-based high-entropy alloy (HEA) in view of the cost-effectiveness and the sustainability of manufacturing process. However, elemental impurities such as carbon, oxygen, sulfur and other trace elements in ferroalloys can affect the mechanical and corrosion properties of HEA. The present study explores the deoxidation and desulfurization behaviors of FeCrCoMnNi HEA with varying carbon content (0.3, 0.7, and 1.8 at%) using a $CaO-Al_2O_3-MgO$ slag in an induction melting furnace at 1773 K. The results indicate that different carbon levels significantly affect the grain size, nano twinning, and carbide size, as observed through EBSD and SEM analyses. These microstructural changes influence mechanical properties, including yield strength, ultimate tensile strength, and elongation, as revealed by tensile testing. The microstructure development and strengthening mechanisms also discussed with the effects of carbon content in HEAs alloy in this study.

[P2-16]

내열 고엔트로피 합금의 격자 왜곡에 따른 전위 거동의 상관 관계 분석: 이강진, 박강현, 정윤종 (공주대학교, 첨단분말소재부품센터), 한준희 (한국생산기술연구원), Peter K. Liaw (The University of Tennessee), 이찬호 (The University of Auburn), 송기안* (공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

Keywords: Refractory High Entropy alloys, Lattice distortion, Dislocation dynamics, Mechanical Properties, Deformation behaviors

내열 고엔트로피합금 (Refractory High-Entropy Alloys, RHEAs)이란, 우수한 상·고온 기계적 물성을 지니어 고온의 환경에서 적용될 수 있는 잠재력을 지니고 있는 합금으로, 대부분의 합금들이 단상의 BCC 구조를 이루고 있다. 내열 고엔트로피 합금에 주로 사용되는 원소들의 큰 원자 크기 차이는 극심한 격자 왜곡을 유발시키며 전위와의 상호 작용을 통해 기계적 물성에 크게 영향을 미치는 요소로 알려져 있다. 그러나 격자 왜곡이 합금의 기계적 물성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 아직 부족하며, 일부 연구에서는 격자 왜곡과 기계적 물성간 직접적인 상관 관계가 명확하지 않다고 보고되었다. 최근, 모델링 및 시뮬레이션을 통한 이론

적 연구에서 RHEAs의 격자 왜곡이 Edge 전위와 강하게 상호작용하여, Edge 전위도 BCC 합금의 강도에 영향을 끼칠 수 있음을 제시하였으며, 이는 합금의 기계적 물성을 이해하기 위해선 격자 왜곡이라는 미세 조직적 특징뿐만 아니라 전위 거동에 대한 분석까지 필요하다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 내열 고엔트로피 합금에서 격자 왜곡과 전위 거동이 합금의 강도 및 변형 거동에 미치는 영향을 이해하기 위해, 격자 왜곡을 제어하여 체계적으로 BCC 단상의 내열 고엔트로피합금을 설계하였다. EBSD, SEM을 통해 미세조직을 분석하고 압축 시험을 통해 기계적 물성 평가를 실시하였으며, In-situ 중성자 회절 시험 및 line-profile 모델링을 통해 합금의 전위 거동에 대하여 분석하였다. This work was supported by National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(MIST, Korea) (RS-2023-00281671). This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009). This work was supported by “Human Resources Program in Energy Technology” of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (No. RS-2024-00402102)

[P2-17]

CrMnFeCoNi계 고엔트로피합금의 Ni 함량 조절에 따른 형상기억특성 제어: 임진수랑, 정휘윤, 이제인* (부산대학교)
Keywords: High-entropy alloy, Shape memory alloy, Martensitic transformation

FCC 구조의 CrMnFeCoNi계 고엔트로피합금 (High-entropy alloys, HEAs)은 우수한 극저온 물성을 보여주며 HEAs 중 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. CrMnFeCoNi HEAs의 우수한 극저온 물성은 낮은 적층결함에너지 (Stacking fault energy, SFE)에 기인하며, 이후 원소비를 제어해 SFE를 더욱 낮춘 CrMnFeCoNi HEAs가 다수 보고되었다. 변태유기소성 (TRIP)을 보이는 HEAs는 더욱 향상된 물성을 보여주는데, 이러한 TRIP-HEAs는 FCC 안정화 원소인 Ni이 대체로 10 at.% 미만의 소량만 첨가된다. 또한, Ni이 적은 $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{40}$, $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$ (at.%) 합금에서는 형상기억특성이 발현되며, 이는 가역적인 FCC/HCP 마르텐사이트 변태에 의해 나타난다. 따라서, CrMnFeCoNi HEAs의 TRIP, 그리고 형상기억특성은 HEAs 내 Ni 함량에 크게 좌우된다. 다만, 연구가 활발히 진행된 TRIP과 달리, CrMnFeCoNi HEAs 내 Ni 함량이 형상기억특성에 미치는 효과에 대한 연구가 미미하다. 따라서, 형상기억특성이 더욱 향상된 CrMnFeCoNi HEAs를 개발하기 위해선 Ni 함량이 초기 미세조직, FCC 상안정성 그리고 형상기억특성에 미치는 효과에 대한 심층적인 이해가 수반되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 Ni 함량을 세밀하게 제어하면서 나타나는 미세조직, FCC/HCP 마르텐사이트 변태, 형상기억특성 변화를 체계적으로 분석하였다. 본 연구에서는 $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{40-x}Ni_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8 at. %)에서 Ni 함량이 소량 증가해도 열유기 HCP 분율, 상변태 온도가 급격히 감소했으며, Ni = 6 at. %의 합금에서 가장 우수한 형상기억특성이 나타나는 걸 확인했다. 이후, 변형 전/후 그리고 회복 열처리 후 미세조직 관찰을 통해 Ni 함량에 따른 초기 미세조직, 상변태 거동 차이가 형상기억특성에 미치는 효과에 대해 분석했다. 본 연구를 통해 CrMnFeCoNi HEAs의 형상기억특성을 높이기 위한 조성비, 초기 미세조직 조건을 제시할 수 있으며, 이는 형상기억특성을 향상시키기 위한 신합금 개발 연구에 토대가 될 것으로 기대된다.

[P2-18]

Cr 및 Al 첨가에 따른 내열 고엔트로피 합금의 내산화성 및 기계적물성 영향 연구: 신승환, 이강진 (공주대학교, 첨단분말소재부품센터), 이찬호 (The University of Auburn), 송기안* (공주대학교, 첨단분말소재부품센터)
Keywords: Refractory High Entropy Alloys, Oxidation resistance, High temperature

내열 고엔트로피 합금은 용융온도가 높은 내열 원소로 이루어진 합금으로, 고온에서의 강도와 크리프와 같은 기계적특성이 우수하여 내열 소재로서 주목받고 있다. 하지만 내열 고엔트로피 합금은 고온 환경에서 제한적인 산화저항성을 나타내며, 이로 인해 고온에서 상 안정성 및 강도가 저하되는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 개선하기 위해, 최근 Ta-Mo-Ti 및 Nb-Mo-Ti 내열고엔트로피 합금에 Al, Cr과 Si 와 같은 원소를 첨가하여 Al2O3, Cr2O3, SiO2, CrTaO4 산화물과 같은 보호 피막 형성을 통해 내산화성을 향상시킨 연구가 보고되고 있다. 추가로 PVD와 CVD 같은 코팅 공정을 통해 내열 합금의 표층에 Al, Cr과 Si를 확산시켜 Al2O3, Cr2O3, SiO2층을 내열 합금 표면에 형성함으로서 산화 특성을 향상시킬 수 있다는 연구가 보고되었다.
따라서 본 연구팀에서 개발한 고온 물성이 우수한 내열 고엔트로피 합금에 Al 및 Cr을 첨가하여 내산화성을 향상시키고자 하였으며, Al 및 Cr 함량에 따른 기계적 특성 및 내산화성에 미치는 영향을 연구하였다. 합금의 산화 거동은 고온 대기중에서 일정시간 유지 후 질량 변화를 통해 분석하였으며, 주사전자현미경(SEM), X-선 회절 분석기(XRD)를 통해 합금의 미세조직을 분석하였으며, 압축 및 인장 시험을 통해 합금의 기계적 물성을 평가하였다. This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009). This work was supported by “Human Resources Program in Energy Technology” of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (No. RS-2024-00402102) This work was supported by National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(MIST, Korea) (RS-2023-00281671) This work was supported by Korea Planning & Evaluation of Industrial Technology (KEIT) funded by Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE, Korea) (RS-2024-00436523)

[P2-19]

Cr 함량 제어에 따른 $Al_{0.5}CoCr_{(1-X)}Fe_{(1+X)}NiTi_{0.1}$ 고엔트로피 합금의 부식 특성 및 기계적 특성 변화 연구: 최순원, 박강현, 이정민, 권민철, 문종언, 송기안* (공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

Keywords: high-entropy alloys, mechanical properties, precipitates, corrosion resistance

발전소 터빈, 해양 발전소에 사용되는 금속 재료는 고온·고압 및 부식성이 높은 해양 환경과 같은 극한 조건에 노출되기 때문에 높은 내식성과 기계적 강도가 필수적으로 요구된다. 해당 산업에서 주로 사용하고 있는 재료인 스테인리스 강이나 니켈 기반 초합금은 내식성이 우수하지만 각각 고온·고압 환경에서 성능 저하 및 제조 비용 증가와 같은 한계를 가지고 있다. 최근 고엔트로피 합금(HEAs)은 우수한 기계적 특성뿐 만 아니라 내식성까지 확보할 수 있는 차세대 소재로 주목받고 있다. 최근에는 석출 강화 메커니즘을 적용하여 극한 환경에서의 기계적 특성을 향상한 HEAs가 활발하게 연구되고 있다. 예를 들어 Al0.5CoCrFeNiTi0.1 합금은 FCC기지에 B2 혹은 L21 석출상을 형성해 상온, 극저온 및 고온에서의 기계적 성능을 개선한 결과가 보고되었다. 본 합금에서 열처리 시 열처리시 Cr을 다량 포함하는 σ-phase와 같은 금속간 화합물을 형성되며, 이러한 금속간 화합물(σ-phase)은 Cr 고갈 지역을 발생시켜 입계 부식 및 피팅 부식의 촉진을 야기하고, 상온 / 고온 기계적 물성을 저하시킬 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 Al0.5CoCrFeNiTi0.1 합금에서 Cr을 일정 비율로 제어함으로 제조비용을 낮추며 기계적 특성 및 부식 특성을 최적화 하고자 하였다. 구체적으로 X-선 회절 패턴 분석기(XRD), 주사전자현미경(SEM), 만능시험기(UTM), 전기화학계측기(Potentiostat) 등을 활용하여 상 및 미세조직 분석, 기계적 물성, 부식 저항성 평가를 통해 연구하고자 한다. This work was supported by “Human Resources Program in Energy Technology” of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (No. RS-2024-00402102), This work was supported by National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(MIST, Korea) (RS-2023-00281671), This work was partly supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE, korea)(P0022331), This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009).

[P2-20]

Ti-Zr-Hf-Ta-Mo 준안정 내열 고엔트로피 합금의 온도변화에 따른 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향: 허민아, 정윤종, 이강진 (공주대학교, 첨단분말소재부품센터), 이찬호 (The University of Auburn), 송기안* (공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

Keywords: Metastable Refractory High-Entropy Alloys, High Temperature, Microstructure, Mechanical Properties

준안정 내열 고엔트로피 합금은 고융점 원소로 구성된 내열 고엔트로피 합금에서 상 안정도를 제어하여 변형유기상변태 및 변형쌍정이 발생하는 합금으로, 단상 내열 고엔트로피 합금의 제한적인 연성을 개선하는 새로운 합금 설계 방법으로 제시되었다. 최근, 이에 관한 연구는 대부분 상온에서의 기계적 물성을 중점으로 진행되고 있으며, 고온에서의 기계적 물성 및 변형 거동에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이에 따라서, 준안정 내열 고엔트로피 합금의 온도 변화에 따른 미세구조 및 기계적 특성을 분석하여 변형 메커니즘을 규명하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는, 변형유기상변태가 발생하는 TiZrHfTa 합금에서 격자 왜곡 효과로 인한 강도 향상을 위해 Ta보다 상대적으로 원자 크기가 작은 Mo를 첨가함으로써 TiZrHfTaMo 합금을 설계하였다. 두 합금의 상온/고온에서 미세조직 및 기계적 거동 변화에 대해 체계적인 연구를 위해, 주사전자현미경(SEM), X-선 회절 분석(XRD), 후방 산란 전자회절패턴 분석(EBSD), 상온 및 고온 압축 시험을 진행하였다. This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy(P0018009). This work was supported by National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(MIST, Korea) (RS-2023-00281671). This work was supported by “Human Resources Program in Energy Technology” of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (No. RS-2024-00402102).

[P2-21]

AlTiVCr 고엔트로피 합금의 Al-Ti 조성 변화에 따른 미세구조 및 변형 메커니즘 연구: 홍동성, Yusupov Dilshodbbek, 하준수, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, Kiran Shinde, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, 기계적 물성, AlTiVCr 합금 설계

고엔트로피 합금(High-Entropy Alloy, HEA)은 다수의 금속 원소가 5~35 at.% 비율로 혼합된 새로운 개념의 합금으로, 기존의 전통적인 합금 설계 방식과 차별화된다. 일반적으로 대부분의 합금은 특정 주원소에 소량의 합금 원소를 첨가하는 형태를 띠지만, HEA는 여러 주요 원소가 유사한 비율로 포함되어 독특한 미세조직과 물성을 형성한다. 특히, BCC 구조를 갖는 HEA는 탁월한 강도를 제공하여 초고강도 소재가 요구되는 항공기 착륙 장치, 고속 기계 부품, 방탄 소재 등의 응용에 적합하다. 그러나 높은 강도와 달리 상대적으로 낮은 연성으로 인해 가공성과 연성 확보가 중요한 기술적 과제로 남아 있으며, 이를 극복하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 BCC 구조를 기반으로 초경량 원소를 활용한 합금을 설계하여, 강도와 변형 특성이 균형을 이루는 최적의 조성을 탐색하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 합금 조성을 설계하는 과정에서 미세조직 변화를 실험적으로 분석하고, 균일한 미세조직을 형성함으로써 기계적 물성을 향상시키는 데 초점을 맞추었다. 특히, 원자 반경 차이가 적은 Ti, V, Cr을 합금 원소와 초경량 소재로 널리 활용되는 Al을 선정하여 취성을 완화할 수 있는 AlTiVCr 기반의 고엔트로피 합금을 개발하고자 하였다. 또한, Al과 Ti의 조성 비율 변화에 따른 금속간 화합물 형성 여부를 실험적으로 분석하고, 이에 따른 기계적 물성을 평가하였다. 해당 Al-Ti 비율에 따른 변형 메커니즘을 확인하기 위하여 상온 압축을 진행한 후 SEM으로 변형 메커니즘 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 AlxTi80-xV15Cr5 (x = 35, 40, 45 at.%) 조성을 적용하여 아크 용해법과 흡입 주조법을 이용해 직경 3 mm, 길이 50mm의 봉상형 시편을 제작하였다. 제작된 시편의 미세조직과 상 분석은 전자주사현미경(SEM: JEOL JSM-6390)과 X선 회절분석(XRD: Panalytical)을 활용하여 수행하였으며, 화학 조성은 투과전자현미경(TEM: JEM-ARM200F, Jeol)과 에너지분산형분광분석

(EDS)을 통해 분석하였다. 기계적 물성 평가는 만능시험기(UTM, Universal Testing Machine)를 이용한 상온 압축 시험을 통해 진행하였으며, 실험 데이터를 바탕으로 SEM을 활용하여 미세조직과 기계적 물성 간의 상관관계를 정밀하게 분석하였다.

[P2-22]

Effect of Hydrogen-Reduced CoCrFeNi Nano Particle Addition on the Densification Behavior of Gas-Atomized CoCrFeNi High Entropy Alloy Powder for Free Furnace Sintering Process: Nelson Bayi, Minjong Kim, Taehyeob Im, Gertrude Mugwe Mongella, and Caroline Sunyong Lee* (Hanyang Univ.)

Keywords: Powder Metallurgy, Hydrogen Reduction, High Entropy Alloy, Furnace Sintering, Densification and Nanoparticle.

High entropy alloys (HEAs) have gained increasing research interest due to their exceptional mechanical and thermal properties. The development of CoCrFeNi powder via Powder Metallurgy (PM) routes offer several advantages over conventional casting process by avoiding elemental segregation and refining grain size. The PM route requires a sintering step for fabricating the final component. However, the shape accommodation of the HEA powder is challenging during cold pressing due to its high yield strength making it difficult to obtain the desired density during furnace sintering process. Therefore, most of the research uses pressure-assisted sintering such as spark plasma sintering to achieve full densification of the HEA powder. This study used CoCrFeNi HEA powder due to its potential applications in the aerospace and energy industry. The study investigated the influence of nanoparticle (NP) addition on densification behavior of the micro sized CoCrFeNi HEA powder during furnace sintering. For that, the NP agglomerates were fabricated by high-energy milling, spray-drying and hydrogen reduction. The NP agglomerate fills in the void space among the micro-sized powder thus increasing the initial green density and enhancing particle contact which facilitates mass transport, atomic diffusion, and overall sintering efficiency. To assess the impact of NP addition, different powder blends containing 10%-30% NP agglomerates were prepared and cylindrical components were prepared by cold press then later sintered. In this study, the optimal NP concentration was found to be 20% NP, which resulted in the highest sintered density. After sintering, the 20% NP sample achieved a sintered density of 92.12% while the raw gas atomized sample achieved a sintering density of 86.1%, thus NP addition improved densification process during sintering.

[P2-23]

Ti 및 C 첨가가 FeCrNiMnCo 주조합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향: 장성혁, 박성현, 이상화, 정재길* (전북대학교)

Keywords: high entropy alloy, vacuum induction melting, microstructure, hardness, transmission electron microscopy

고엔트로피 합금(high entropy alloy, HEA)은 5가지 이상의 원소를 동일하거나 비슷한 원자 비율로 혼합하여 만들어진 합금이다. 다종의 주요 원소로 인한 높은 배열 엔트로피로 인해 금속간화합물이나 석출상을 생성하지 않고 단일 고용체 형태로 형성되는 특징이 있으며 고강도, 열적 안정성, 내부식성, 내마모성과 같은 우수한 기계적 특징을 보인다. 고엔트로피 합금은 아크용해, 레이저 클래딩, 진공유도용해 등 다양한 공정을 통해 제조되고 있다. 본 연구에서는 고엔트로피 합금(HEA) 중FCC계열인 FeCrNiMnCo 합금, 일명 Cantor 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 Ti과 C 첨가 영향을 조사하였다. FeCrNiMnCo 합금과 Ti/C 첨가 FeCrNiMnCo 합금을 진공유도용해를 통해 균일한 주조재를 제조하였고, 탄화물 석출을 위해 800ºC 조건에서 열처리를 실시하였다. 열역학 계산 프로그램을 이용하여 온도별 평형상을 조사하였으며, OM, EBSD, SEM, XRD, TEM 등을 활용하여 미세조직을 관찰하였다. 상기 미세조직의 변화가 주조재 및 열처리재의 비커스경도에 미치는 영향을 고찰하였다.

[P2-24]

Effect of Loading Conditions and Geometric Factors on Martensitic Transformation Tendency in Complex concentrated alloys (CCAs): 예정원, 민현기, 김동환, 이명규*, 박은수* (서울대학교)

Keywords: Complex concentrated alloys (CCAs), Transformation-induced plasticity, Formability, Loading condition, Schmid factors

Complex concentrated alloys (CCAs)는 다수의 원소로 이루어진 합금으로 격자 비틀림 효과와 그에 따른 solid solution strengthening 효과로 인해 높은 강도와 인성 등의 우수한 기계적 특성을 보인다. 이러한 특성으로 인해 CCAs는 차세대 구조재료로서 주목을 받고 있지만, CCAs가 구조재료로서 상용화되어 사용되기 위해서는 일축 응력 상태에서의 소성 변형능(plasticity) 뿐만 아니라 이축 응력 상태를 가지는 성형 환경에서의 성형성 평가가 필수적이다. 이때 성형 환경에서는 재료의 변형 기구와 초기 미세구조 등에 따라 일축 응력 조건과는 다른 소성 변형능이 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는, 변형 기구에 영향을 미친다고 알려진 적측 결함에너지와 상관 관계가 있는 $\Delta G^{hcp\text{-}fcc}$ 값을 제어하여 전위 활주, 쌍정 유기 소성, 변태 유기 소성을 주요 변형 기구로 갖는 CCAs를 선정하였다. 이후, 선정된 CCAs에 대해 Limit Dome Height(LDH) 실험을 실시하여 이축 응력 상태에서의 소성 변형능을 평가하였다. 그 결과, 변태 유기 소성이 주요 변형 기작인 CCAs의 소성 변형능이 일축 응력 조건에서의 소성 변형능에 비해 크게 저하되는 것을 확인하였다. 이러한 원인을 규명하기 위해, 재료의 결정학적 방위에 따라 슬립 시스템의 활성화 가능성을 평가할 수 있는 Schmid factor분석을 수행하였다. 우선, 압연 방향에 따른 일축 인장 실험(RD(0º), TD(90º), DD(45º))을 통해 재료가 무작위 결정학적 orientation을 갖는 것을 확인하였다. 이후, 일축 응력 상태 및 이축 응력 상태 각각에서 무작위 orientation에 대해 전위 활주시의 최대 Schmid factor와 변태 유기 소성시의 최대 Schmid factor 값을 비교 분석하였다. 그 결과, 일축 응력 상태에서는 변태 유기 소성이 유리한 결정학적 orientation의 분포가 이축 응력 상태보다 많다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해. LDH 실험(이축 응력 상태)에서 변태 유기소성을 주요 변형 기구로 갖는 CCA의 소성 변형능이 감소하는 원인을 규명할 수 있었다.

[P2-25]

FCC 컴플렉스 고용 합금계의 조성-온도-결정립-강도 상관관계 구축: 김동환, 안혜상 (서울대학교), 류욱하 (국립금오공과대학교), 정휘윤, 이제인 (부산대학교), 박은수* (서울대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, 기계적 물성, 항복 강도, 전기음성도, 비선형 회귀

금속계에 컴플렉스 고용 합금이라는 새로운 개념이 도입된 이래로, 그 기계적 물성에 대한 연구가 다양한 방면에서 진행되어 왔다. 예를 들어 여러 종류의 4주기 전이 금속 원소들이 혼입된 FCC 컴플렉스 고용 합금계는 극저온 조건에서 우수한 항복 강도와 파괴 인성을 나타낼 수 있음이 보고되기도 하였다. 그러나 특정한 주요 원소와 미량의 첨가 원소로 구성된 전통적인 합금에 비해 정해진 주요 원소가 없는 컴플렉스 고용 합금은 선택할 수 있는 조성 범위가 훨씬 넓어 자유도가 너무 높기 때문에, 원하는 수준의 특성을 지닌 신합금을 설계하기 위해 훨씬 더 많은 시간과 노력을 들여야 한다는 어려움이 있다. 이러한 노력의 범위를 줄이고 컴플렉스 고용 합금을 구조 재료로써 더 효율적으로 활용하기 위해서는, 이러한 미지 합금계의 물성을 실험 없이도 간접적으로 예측할 수 있는 수단이 필요할 것이다. 본 연구에서는 합금계 조성의 전기음성도 차이 값을 활용하여 컴플렉스 고용 합금의 기계적 물성을 예측하고자 하였다. 우선 Ni-Fe-Cr 컴플렉스 고용 합금계를 선택하였고, 다양한 조성을 가진 fcc 단상 합금 시편들을 제작하였다. 여러 가지 결정립 크기와 온도 조건에서의 인장 시험을 통해 그 항복 강도를 확보하여 전기음성도 차이와의 상관관계를 분석하였고, 나아가 파이썬 모듈을 통한 비선형 회귀를 활용하여 조성-온도-결정립에 따른 항복 강도의 일반적인 관계식을 도출하였다. 또한 이 일반식을 사용하여 FCC 단상의 컴플렉스 고용합금이 조성, 온도 및 결정립이 제어된 환경에서 1GPa에 준하는 항복 강도를 나타낼 수 있음을 예측하기도 하였다. 본 연구를 통해 미지조성 합금의 기계적 물성을 간접적으로 예측하고, 원하는 수준의 특성을 지닌 새로운 합금계의 개발을 위한 최적 조성을 선정하는 데 도움을 줄 수 있으리라고 기대한다.

[P2-26]

다중 공형 압연된 $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$ 합금의 열처리에 따른 미세구조 변화: 최지환, 임진수랑, 정휘윤, 이제인* (부산대학교)

Keywords: High-entropy alloys, Caliber rolling, Microstructure, Texture

다수의 구성원소가 동등하거나 유사한 분율로 혼합된 고엔트로피 합금 (High-entropy alloy, HEA)의 개발 연구에서 기존의 상용 합금과는 다른 독특한 특성을 갖는 사례가 다수 보고되고 있다. 그 중에서 그 중에서 cantor 합금(CrMnFeCoNi 합금)을 기준으로 Co/Ni 조성비의 조절을 통해 개발된 $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$ 고엔트로피 합금은 fcc 및 hcp 상간의 가역적인 상변태에 의해 형상기억 특성이 나타남이 보고됨에 따라, 이를 활용한 후속연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 다중공형압연 및 후속 열처리에 따른 두 CrMnFeCoNi 합금($Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$, $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{20}Ni_{20}$)의 미세구조와 집합조직의 변화를 확인해보고자 한다. 다중공형압연은 다양한 크기와 모양의 구경에 재료를 삽입하여 높은 중복 변형을 가하는 소성 가공 공정으로 기존의 선재 제조 공정과 비교하여 높은 결정립 미세화 효과를 지니며 독특한 집합조직 형성 및 변형 분포를 나타내는 것으로 알려져 있어 이에 따른 차이가 있을 것으로 기대된다. 진공유도용해로(Vacuum Induction Melting, VIM)를 통해 제조된 합금을 673 K에서 다중공형압연을 통해 가공 후 1시간 동안 다양한 온도에서 열처리하였다. 생성된 미세구조를 주사전자현미경(SEM), X-선 분광법(XRD) 및 전자후방산란 회절(EBSD)을 사용하여 분석하여 경도 측정 결과와의 상관 관계를 분석한다. 본 연구에서는 합금의 다중공형압연 및 열처리 이후 집합조직의 변화와 회복, 재결정, 결정립 성장 거동을 확인하고자 하였다.

P3 : 소프트소재
Room 3층 로비, 4월 23일

[P3-1]
Rewritable Dual-Mode Optical Encryption Using Photoluminescence and Structural Color Modulation: Jong Gun Jung, Hyowon Han, Jin Woo Oh, Jiwon Kim, Gwanho Kim, Woojoong Kim, Minji Kwon, and Cheolmin Park* (Yonsei Univ.)
Keywords: Structural Color, Photoluminescence, Perovskite, Fluorescence, Encryption, Photonic Crystal, Block Copolymer

Optical encryption technologies that integrate photoluminescence (PL) and structural color (SC) enable advanced data protection with intuitive visual decoding. However, independent tunability of SC and PL remains a challenge due to their intrinsic interdependence. Here, we present a rewritable dual-mode optical encryption system based on a block copolymer (BCP) photonic crystal (PC) incorporating selectively assembled perovskite nanocrystals. The SC is dynamically modulated by controlling perovskite precursor infiltration, while PL emission is precisely programmed through perovskite crystallization within the polymer matrix. This strategy allows independent encoding of SC and PL information, enabling multi-layered optical security. The encrypted information is fully erasable and rewritable, enhancing its reusability for dynamic security applications. Demonstrated through a dual-responsive Morse code system, this method achieves a high-security level by requiring specific SC-PL pairings for successful decryption. The developed platform paves the way for next-generation optical encryption with enhanced anti-counterfeiting capabilities and information concealment strategies.

[P3-2]
Light Emitting Tactile Visual Synapse Enabling Rehabilitation Monitoring: Woojoong Kim, Kyuho lee, Gwanho Kim, Minji Kwon, Jong Gun Jung, Jiwon Kim, and Cheolmin Park* (Yonsei University)
Keywords: Light emitting synapse, Organic electrochemical transistor, Electrochemiluminescence, ion gel transistor synapse

Light emitting tactile visual synapses integrate tactile artificial synapse functionality with real-time visualization, offering an intuitive approach for in-situ monitoring of finger rehabilitation. In this study, we present a tactile visual synapse capable of monitoring finger rehabilitation exercises. By utilizing an integrated electrical and optical feedback algorithm, repetitive finger movements and various arrhythmias can be effectively tracked and visually guided. The light emitting tactile visual synapse is designed as an electrochemical transistor, incorporating an elastomeric top gate that functions as a tactile receptor and an electrochemiluminescent ion gel serving as a light-emitting layer, which is stacked on a polymeric semiconductor layer to form an electrical synaptic channel between the source and drain electrodes. This low-power (~34 μW) visualization of tactile synaptic activity linked to repetitive finger motions and heartbeats paves the way for a more efficient and user-friendly approach to personalized finger rehabilitation.

[P3-3]
MXene Aerogel-Based Moisture-Driven Energy Generator for Sustainable Power Production and Wearable Sensing: Minji Kwon, Kaiying Zhao, Gwanho Kim, Woojoong Kim, Jong Gun Jung, Jiwon Kim, and Cheolmin Park* (Yonsei Univ.)
Keywords: Moisture-Driven Energy Generator, MXene Aerogel, Organohydrogel

Soft and flexible moisture-driven energy generators (MEGs) hold great potential for sustainable energy harvesting in wearable electronics and human-machine interfaces. However, most MEGs suffer from performance degradation due to humidity variations, limiting their practical applications. In this study, we develop a soft material-based MEG comprising a bilayer structure of a hydrophilic, negatively charged MXene ($Ti_3C_2T_x$) aerogel and a polyacrylamide (PAM) organohydrogel, enabling stable and continuous power generation across a wide humidity range (20–95% RH). The highly porous MXene aerogel facilitates ion transport and selective charge separation, resulting in enhanced electrical output. Additionally, the incorporation of an organohydrogel improves water retention and mechanical durability, allowing for long-term energy harvesting for over 15 days even under extreme temperatures (−20 to 80ºC). Furthermore, the proposed soft and stretchable MEG functions as a self-powered wearable sensor capable of detecting biomechanical deformations such as finger bending and facial expressions. This study presents a soft material-based platform for next-generation flexible energy harvesters and multifunctional wearable electronics.

[P3-4]
Thermo-Adaptive Structural Color Display with an Artificial Synapse Based on MXene/PEDOT:PSS Transistor: Gwanho Kim, Seokyeong Lee, Woojoong Kim, Jiwon Kim, Jong Gun Jung, MInji Kwon, and Cheolmin Park* (Yonsei University)
Keywords: Neuro-actuating photonic skin, Temperature adaptive display, Neuromorphic transistor, MXene/PEDOT:PSS semiconducting channel, Structural color

While there has been considerable progress in developing artificial synapses to mimic the human nervous system for bio-signal transmission, synapses with thermo-adaptive coloration and temperature-driven soft actuators are rarely reported. In this work, we

introduce a photonic neuro-actuating synaptic skin that enables temperature-responsive synaptic signal transmission, color change, and actuation. We first developed a thermoresponsive structural color display synapse using a 3-terminal ion-gel transistor, which incorporates an ion channel composed of two-dimensional (2D) titanium carbide (Ti3C2Tx) MXene mixed with poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) and a thermo-adaptive one-dimensional (1D) block copolymer (BCP) photonic crystal (PC) gate insulator. The transistor exhibits temperature-dependent synaptic behavior accompanied by corresponding structural color changes, resulting in a thermo-adaptive display synapse. A 3 × 3 array of these synapses integrated with Joule heaters demonstrates control of each pixel through thermoresponsive structural colors and synaptic outputs. The synaptic output current generated from the MXene/PEDOT:PSS based ion-gel transistor can be converted and amplified into a voltage signal, which powers a soft actuator linked to our device, thereby enabling temperature-dependent actuation linked to the synaptic performance. This study presents a thermo-adaptive photonic neuro-actuating artificial skin, mimicking muscle-combined neuronal human skin with visualization capabilities.

[P3-5]

Triboelectric-Driven Structural Color Display for Finger-Motion Detection Enabled by Humidity-Responsive Photonic Crystal: Jiwon Kim, Taebin Kim, Jong Gun Jung, Gwanho Kim, Minji Kwon, Woojoong Kim, and Cheolmin Park* (Yonsei Univ.)

Keywords: Triboelectric Nanogenerator, Photonic crystal, Block copolymer, Ion gel

A self-powered motion-sensing display that visually represents human information acquired through sensors has attracted significant attention in next-generation human-machine interface (HMI) technology, which is based on efficient energy consumption. In this study, we propose a self-powered motion-sensing display capable of detecting finger movements and simultaneously visualizing them. The proposed device is based on a one-dimensional photonic crystal composed of an interpenetrated hydrogel network block copolymer (IHN-BCP), with a structure featuring lamellar layers of absorbent and non-absorbent materials arranged in a cross-coupled pattern. This device can generate charges through triboelectrification in the humidity range of 30% to 80%. Moreover, the structural color of the photonic crystal changes with humidity, enabling the direct visualization of humidity across the entire visible spectrum. Furthermore, utilizing the humidity-responsive triboelectrification and structural color changes of the IHN-BCP photonic crystal, we implemented a self-powered finger motion sensing display. This allows for the quantitative recognition of various finger movements (e.g., vertical motion, sliding actions) based on the natural moisture of the fingers, with real-time visualization in both contact mode and non-contact mode.

[P3-6]

Unsorted Carbon Nanotube-Based Synaptic Transistor with Ion-Gel: Donghee Shin and Beomjin Jeong* (Pusan National Univ.)

Keywords: Carbon nanotube, Sorting, Depletion-mode transistor, neuromorphic

Carbon nanotubes (CNTs) are widely recognized for their exceptional charge mobility, mechanical flexibility, and optical transparency, making them key materials in next-generation electronic devices such as transistors, sensors, and memory. Due to their inherent ability to exhibit both metallic and semiconducting properties, CNTs are typically sorted through methods like density gradient centrifugation before device fabrication, but the process is complex and time-consuming. Here, we fabricated a depletion-mode transistor using unsorted CNTs as channel material. By incorporating ionic liquids and ferroelectric materials as dielectric layers, we successfully modulated channel conductivity. We can also demonstrate synaptic behaviors, including linear and stable long-term potentiation and depression. The device also exhibited short-term plasticity, highlighting its potential for neuromorphic computing applications such as signal filtering, temporary working memory, etc.

[P3-7]

Block Copolymer-Assisted Liquid Metal-Elastomer Composite Electrode Heater: Chanwoo Park and Beomjin Jeong* (Pusan National Univ.)

Keywords: liquid metals, heaters, elatomers, stretchable electrodes, polymer composites

Ga-based liquid metals (LM) have been widely reported as conductive materials for stretchable electronics due to their superior conductivity and fluidity at room temperature. Stretchable electrodes with LM have been developed for various applications such as thermal therapy, wearable electronics and soft robotics. However, the LM with native oxide skins easily dispersed in polar solvents, while most rubber elastomers are soluble in non-polar solvents. To overcome this limitation with respect to dispersibility, block copolymers (BCP) can be an ideal solution for LM-elastomer composite. Here, we suggest that LM-(styrene-butadiene-styrene) (SBS) composite electrode with polystyrene-polyethylene oxide (PS-b-PEO) BCPs as dispersant. The PEO block acts as anchoring groups for oxide skins of LM and increases the dispersibility in non-polar solvents. Owing to stable interaction between LM-PEO block and SBS-PS block, LM-SBS-BCP composite electrode showed excellent stretchability and elastic modulus. Furthermore, the composite electrode exhibited joule-heating performance and actuation with bending or twisting by attachment of thermal actuators.

[P3-8]

Nanoparticle-Embedded Microstructured Surface for Transparent Capacitive Pressure Sensing: Janghoon Choi and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Keywords: Capacitive Sensor, nanoparticles, Transparent sensor

Highly sensitive and transparent pressure sensors are important for engineering the electronic skin that perceives mechanical stimuli. Recent advances reveal routes to exploit the micropatterned dielectrics so as to control compression behavior and thereby enhance the sensing performance of the devices, but generally are opaque and haze due to light scattering at the microstructured surfaces. In this study, we propose a new, fundamentally simple approach to fabricating nanoparticle-embedded pressure sensors that contains dielectric layers with transparent SiO2 nanoparticles making the surface rough, but reducing the haze at optimum particle sizes, thus providing high sensitivity and transparency.

[P3-9]

Pressure Sensor Using Conducting Polymer with Transparency and Tunable Plasma Frequency as an Organic Electrode: Jaehyeok Choi and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Keywords: conducting polymer, transparent, tunable plasma frequency, pressure sensor

When an electromagnetic wave impinges on a conductor, most of the incident wave is reflected, which makes metals and transparent conducting oxides (TCOs), such as tin-doped indium oxide (ITO), opaque to visible light (429–750 THz) and far-infrared (FIR) (< 20 THz). This incompatibility between optical transparency and electrical conductivity is well-defined fundamental material properties, but this is often not easy to enhance both simultaneously. Opacity due to electrical conductivity is more pronounced in the lower frequency range. This fundamental incompatibility creates a barrier for the realization of enhanced user-interface and device integration. We present a design strategy for preparing megahertz-range transparent conductor and a concept towards 'device-to-device integration' enabled by electromagnetic wave transmittance. The approach to the properties of conductors is verified using a conducting polymer, Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS), whose microstructure is effectively controlled by solution process. The use of a transparent conducting polymer as an electrode enables the fabrication of a fully functional touch-controlled display device and magnetic resonance imaging (MRI)-compatible biomedical monitoring device, which would open up a new paradigm for transparent conductors.

[P3-10]

Soft Tip Arrays for High-Throughput Scanning Probe Microscopy: Donghoon Oh and Wooyoung Shim* (Yonsei Univ.)

Keywords: SPM, Binary state, Soft tip, High-throughput, Nanoscale

Scanning probe microscopy techniques enable to reveal nanoscale topography with an exquisite resolution, which has significantly contributed to the development of nanoscience and -technology. These imaging techniques, however, have narrow field-of-view and slow scanning speed limited due to single tip measurement. Here, we introduce binary-state scanning probe microscopy (BSPM) which is an SPM methodology inherently designed for parallel measurement using scalable cantilever-free elastomeric tip array. In BSPM, each tip detects the surface as binary state: contacted or non-contacted with surface. Binary signals from multiple tip array are combined with the distance information of shared piezo stage, resulting high-resolution topography image. This measurement architecture allows simple fabrication process based on cantilever-free tips and eliminates the complex detecting system for multiple-tip operation. BSPM measurement enables high-throughput topography measurement to scan a 1-mm^2 area with 10^6 pixels in less than 10 min using 100-tip array.

[P3-11]

Enhancing Capacitive Pressure Sensors via Surface Roughness Control: Bokyeong Kim and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Keywords: pressure sensor, capacitive pressure sensor, paper, roughness

Fabrication strategies that pursue "simplicity" for the production process and "functionality" for a device, in general, are mutually exclusive. One of these competing demands is usually met by compromising the other, and therefore, strategies that are less expensive, less equipment-intensive, and consequently, more accessible to researchers for the highly functional device, are required. Here, we present a conceptually different approach, which utilizes the surface roughness of paper to realize a capacitive pressure sensor with high performance compared with sensors produced by costly microfabrication processes. In this study, we utilize a writing activity with a pencil and paper, which enables the construction of a fundamental capacitor that can be used as a flexible capacitive pressure sensor with high pressure sensitivity and short response time and that it can be inexpensively fabricated over large areas. Unlike previous studies, all three parameters in the context of a capacitor (i.e., electrode area, electrode separation and dielectric constant) are simultaneously controlled by utilizing surface curl and roughness, which maximizes the sensing capabilities. Furthermore, we successfully integrated the capacitor elements into a fully functional 3D touch-pad device acting as a pressure sensor-based peripheral input device, which is a step toward the realization of advanced paper electronics that achieves a high simplicity and functionality.

[P3-12]

A Syringe-Type Hydrogel for Emergency Hemostasis and Rapid Adhesion in Sutureless Wound Repair: Kayoung Son, Tae Young Kim, and Jungmok Seo* (Yonsei University)

Keywords: Hemostasis in seconds, Injectable sutureless wound closure, Rapid adhesion, Self-healable, dopamine-grafted sodium alginate (SA-DOPA)

Massive hemorrhage accounts for over 30% of trauma-related deaths worldwide, underscoring the need for rapid and effective bleeding control. Failure to promptly manage bleeding can lead to bacterial infections at the wound site, resulting in severe health complications and potentially life-threatening conditions. Conventional methods, such as sutures and staples, while effective, are time-consuming, require surgical expertise, and may cause secondary tissue damage and inflammation. Various adhesives are clinically employed to tackle this issue, among which hydrogels are widely utilized due to their biocompatibility and mechanical properties resembling those of human tissues. However, hydrogels have inherent limitations, including weak adhesion in moist environments, prolonged adhesion times, and a lack of antibacterial properties. Wound sites are generally in a moist environment, where conventional hydrogels frequently fail to achieve adequate tissue adhesion, rendering effective hemostasis difficult. Additionally, most hydrogels lack intrinsic antibacterial properties, necessitating additional functionalities to mitigate infection risks. Furthermore, prolonged adhesion times limit their immediate hemostatic effectiveness in emergency situations. In this study, we developed hydrogel adhesives for wound healing with strong and rapid tissue adhesion, high mechanical strength, self-healability (< 10 seconds), and antibacterial properties. The hydrogel was synthesized using polyvinyl alcohol (PVA), dopamine-grafted sodium alginate (SA-DOPA), and tannic acid (TA), with borax as a crosslinking agent. Notably, SA-DOPA, known for its strong adhesion in moist environments, was incorporated into the hydrogel matrix to significantly enhance its tissue adhesion. As a result, the developed hydrogel achieved a shear strength of approximately 275 kPa, exhibiting markedly superior adhesion compared to conventional hydrogels. These features allow for rapid tissue closure within seconds in emergency situations and facilitate straightforward wound sealing through syringe-type hydrogel application. Additionally, TA incorporated within the hydrogel played a crucial role in providing antibacterial properties and facilitating rapid hemostasis (< 5 seconds), making it advantageous for wound repair. TA, characterized by its strong polyphenol structure, exhibits potent antibacterial and anti-inflammatory effects while facilitating rapid blood coagulation by enhancing platelet aggregation. Experimental results indicated that the developed hydrogel achieved rapid hemostasis within 5 seconds, underscoring its potential as a medical material capable of immediate bleeding control in emergency situations while simultaneously reducing the risk of infection. The hemostatic ability and tissue adhesion of the hydrogel were evaluated through a series of in vitro and in vivo experiments. The in vitro experiments confirmed that the hydrogel effectively promoted blood coagulation and maintained strong adhesion even in moist environments. Additionally, in vivo animal model experiments were conducted to assess the hydrogel's hemostatic performance in actual bleeding sites. In the mouse model, the hydrogel was applied in a patch form to evaluate its hemostatic ability, while a syringe-type hydrogel was used for wound closure experiments. The results indicated that the hydrogel facilitated rapid and stable wound closure without requiring traditional suturing methods, displaying superior hemostatic efficiency and tissue adhesion compared to conventional bioadhesives.

[P3-13]

Hydrogel-based Anisotropic Conductive Film for Highly Integrated Packaging in Soft Electronics: Yurim Lee, Yejin Jo, and Jungmok Seo* (Yonsei Univ.)

Keywords: Electronic packaging, soft electronics, fine pitch, anisotropic conductive film (ACF), non-conductive film (NCF)

Electronic packaging, which involves attaching electronic components to substrates and interconnecting circuits, has evolved from soldering to an adhesive film, such as non-conductive film (NCF) and anisotropic conductive film (ACF). These polymer-based adhesive films offer high mechanical strength and bonding properties while preventing short circuits between adjacent circuits. Additionally, they enable more concentrated electrical connections compared to the previous packaging technologies. However, conventional adhesive films have limitations in interconnecting elastic materials, an issue that has become more prominent as soft electronics gain attention as interfaces for integrating electronic devices with the human body. This issue is particularly critical because advanced functionalities require reliable electrical connections between integrated circuits (ICs) on flexible printed circuit boards (FPCBs) and soft electronic components. Therefore, further research has been required to develop advanced interconnection methods that can electrically integrate diverse materials In this study, a hydrogel-based anisotropic conductive film (H-ACF) is designed for material-independent interconnection between electronic parts. H-ACF is fabricated by stacking poly (vinyl alcohol) (PVA) and tannic acid (TA) layers. By incorporating an optimized amount of conductive particles within the PVA layer, H-ACF facilitates electrical conduction in the vertical direction. Through the moisture absorption and drying process, the polymer chain entanglement of PVA enables adhesion to various substrates such as IC chips, and elastomers. The abundant hydroxyl groups in TA further improve adhesion strength and mechanical properties by crosslinking PVA. Moreover, the biocompatibility of both PVA and TA makes H-ACF suitable for biomedical applications. With these features, H-ACF enables rapid bonding (<1 min) and strong adhesion (>7 MPa) between various materials, ensuring stable connections even under mechanical stress. Compared to commercial adhesives such as ACF, conductive paste, and carbon tape, soft materials bonded using H-ACF maintain superior mechanical stretchability. Furthermore, H-ACF demonstrates

electrical performance comparable to conventional ACF, exhibiting low connection resistance (<0.06Ω at 0.25 mm^2) and ensuring no short circuits even at fine pitches (<20 μm). S-parameter (S21) measurements confirmed that AC signal transmission is possible at frequencies below 5 GHz. These results highlight H-ACF as a promising solution for overcoming the limitations of conventional adhesives in soft electronics integration.

[P3-14]
Highly Deformable Aluminum-air batteries with High Voltage Output: Hong Choi and Wooyoung Shim* (Yonsei University)
Keywords: Deformable, Aluminum-air battery, high output voltage, polymorphic metal-air battery, shape-reconfigurability

The battery shape is critical limiting factor affecting foreseeable energy storage applications. In particular, deformable metal–air battery systems could offer a low cost, low flammability, and high capacity, but the fabrication of such metal–air batteries remain challenging. Here, we show that a shape-reconfigurable materials approach, in which the deformable components composed of micro- and nanoscale composites are assembled, is suitable for constructing polymorphic metal–air batteries. We adopt an aluminum–air battery cell as an ideal platform, which involves three-electron transfer during charging reactions; as a result, it provides a specific capacity that rivals that of a single-electron lithium-ion battery. This cell is a great platform to test a shape-reconfigurable design because of easier handling, greater safety, and lower reactivity. This architecture is simple, scalable and addresses the fundamental limitations of aluminum–air batteries by allowing the use of deformable packing designs to increase the performance output. Further, this approach is technologically unique in that it a method that enables the realization of a 3D shape change, which has never been observed for aluminum–air batteries. This significant deformability results in a specific capacity of 128 mA·h/g per cell; calculated from the total mass of anode (496 mA·h/g per cell; based on the mass of consumed aluminum), and a high output voltage (10.3 V) with 16-unit battery cells connected in series. The resulting battery can endure significant geometrical distortion such as three-dimensional stretching and twisting while the electrochemical performance is preserved. This work represents an advancement in deformable aluminum–air batteries using the shape-reconfigurable materials concept, thus establishing a paradigm for shape-reconfigurable batteries with exceptional mechanical functionalities.

[P3-15]
Enhanced Insulation for Biometric Signal Monitoring Devices Using PDMS Vapor-Enhanced Deposition: SoYeon Kim* and ChaeYeon Moon* (Korea University of Technology and Education), and Jinhwan Kim (Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: stretchable, pdms

In bio-implantable devices for monitoring biological signals, patterned metal sensors are connected to measurement instruments to detect signals. However, insulation between the biological signal detection area and the measurement instruments is essential. Existing methods using PI (Polyimide) or Parylene face challenges such as high-temperature processing, low adhesion, and the need for expensive equipment. In this study, we successfully formed an insulating film with excellent uniformity and high adhesion using the PDMS (Polydimethylsiloxane) Vapor-Enhanced Deposition method. This approach is expected to enhance the performance of biological signal monitoring devices and simplify the manufacturing process.

[P3-16]
The Effect of PDMS-Curing Agent Ratio on the Performance of PDMS Stamps in Contact Printing: Soyeonkim* and Chaeyeonmoon* (Korea University of Technology and Education)
Keywords: PDMS, contact printing, curing agent ratio, surface properties, pattern propagation

PDMS (Polydimethylsiloxane) plays a crucial role in contact printing through the use of stamps. PDMS stamps are useful for patterning microstructures by modifying surface properties. Specifically, the ratio of PDMS to curing agent affects the thickness, deformability, and ultimately the quality of the patterns formed. In this study, the influence of the PDMS-curing agent ratio on the material properties of PDMS stamps and their performance in contact printing was investigated. Since the deformability and thickness ratio of PDMS stamps can impact the printing process, the study examined how the mixing ratio alters the stamp's characteristics and contact time. The results confirmed that the PDMS-curing agent ratio significantly influences the contact angle of the PDMS stamp and pattern propagation during contact printing. This provided a clearer understanding of how PDMS stamps function in contact printing applications.

[P3-17]
Development of Stretchable Metal Thin-Film Electrodes on PDMS for Wearable and Biomedical Applications: Mincheol Kim* and SooSang Chae* (Korea University of Technology and Education)
Keywords: PDMS, Deposition

Recently, there has been a significant increase in interest in stretchable devices within the fields of biomedical and wearable technology. However, conventional rigid substrates and electrodes formed on them lack flexibility, leading to substantial changes in electrical properties when applied to stretchable devices due to deformation or breakage. Consequently, the need for flexible and

cost-effective stretchable electrodes has been emphasized. This study aims to develop stretchable metal thin-film electrodes based on polydimethylsiloxane (PDMS). The mixing ratio, curing temperature, and curing time of the PDMS substrate are critical factors influencing the properties of PDMS. Additionally, the deposition thickness of silver (Ag) plays a crucial role in securing initial conductivity and maintaining electrical properties under stretching. In this research, we experimentally determined the optimal PDMS curing conditions suitable for stretchable metal electrodes. Based on these findings, we identified the optimal thickness that maintains electrical properties even when used as a TFT bottom gate under stretching. As a result, we fabricated stretchable electrodes that maintain a conductivity of 10^4 S/cm even at 100% elongation. The results of this study can serve as foundational research for developing flexible and stretchable electrodes in the biomedical and wearable device sectors. Furthermore, these findings are expected to be widely applicable in realizing various next-generation stretchable electronic devices based on durability and high performance.

[P3-18]

Human-Muscle-Inspired Fibre Actuator with Reversible Graphene Percolation: Sehwan Shin, Inho Kim, and Sangouk Kim* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: Soft materials, Soft robotics, Artificial muscle, Liquid crystal elasomer, Graphene

Artificial muscles are indispensable componenets for next-generation robotics. However, an optimal combination of actuation parameters, including strain, stress, energy density and high mechanical strength, is required for their practical applications. In this work, artificial muscle with large and strong contractive actuation is reported by using exfoliated graphene fillers within a uniaxial liquid crystalline matrix enabling photothermal actuation with large work capacity and rapid response. Moreover, the reversible percolation graphene fillers induced by the thermodynamic conformational transition of mesoscale structures can be in situ monitored by electrical switching. Such a dynamic percolation behavior effectively strenthens the mechanical properties of the actuator fibres, particularly in the contracted actuation state, enabling mammalian-muscle-like reliable reversible actuation. Taking advantage of a mechanically compliant fibre structure, smart actuators are readily integrated into strong bundles as well as high-power soft robotics with light-driven remote control.

[P3-19]

Scalable 3D Graphene Hydrogel Fabrication via Interfacial Gelation of Graphene Oxide: Wonchul Choi (KAIST), Uday Narayan Matti (Indian Institute of Technology), and Sang Ouk Kim* (KAIST)

Keywords: Graphene, Hydrogel, Supercapacitor

The development of macroscopic graphene-based materials with tailored architectures is critical for advancing energy storage applications. Here, we present a novel interfacial gelation strategy for three-dimensional shape-engineered graphene hydrogels. This process enables spontaneous gel formation on Zn surfaces upon immersion in a graphene oxide (GO) dispersion, facilitating precise control over the structure and morphology of the resulting gel. The fabricated graphene hydrogels exhibit high electrical conductivity (103.3 S/m) and a large surface area (614.9 m^2/g), making them ideal candidates for supercapacitor electrodes. By optimizing the three-dimensional porous structure, our method successfully addresses the long-standing challenge of achieving high areal capacitance without compromising charge-discharge rate capability. The developed supercapacitor electrodes demonstrate exceptional rate performance, retaining a capacitance of 26.4 mF/cm^2 even at ultra-fast charge/discharge rates of 100 mA/cm^2. Furthermore, they exhibit remarkable cycling stability, maintaining 97.8% of their initial capacitance over 4000 cycles. This scalable, cost-effective, and versatile gelation approach opens new possibilities for the large-scale production of advanced graphene-based materials for next-generation energy storage devices.

[P3-20]

Reconfiguring Polymer Network Topology via Photo-Tunable Crosslinkers: Sihwan Lee, Yong Eun Cho, Ho-Young Kim*, and Jeong-Yun Sun* (Seoul National University)

Keywords: Elastomer, Crosslinker, Mechanical property modulation, selenosulfide, phototuning

The mechanical properties of network polymers, such as elastomers and gels, depend on their intrinsic polymer network topology, which is challenging to modify. To achieve on-demand control of their mechanical properties, we synthesized dynamic covalent crosslinkers that undergo photo-metathesis for reversible and gradual topological reconfiguration. The polymer network includes consistent main chains and crosslinkers that break under ultraviolet light and reform under visible light. This reconfiguration enables changes in the strength and stretchability of network polymers while maintaining their toughness and elasticity. These photo-tunable crosslinkers allow the creation of various photo-tunable elastomers and gels by integrating them with different polymer networks. Furthermore, light-induced network modulation facilitates localized mechanical property adjustments, generating transformable multi-material structures and enhancing fracture resistance. Our photo-tunable crosslinkers present a strategy to control macroscopic properties through molecular-level reconfiguration, providing next-generation tunable materials.

[P3-21]
Edge-Guided Directed Self-Assembly of Block Copolymers on 2D Flakes: Kyu Lim Kim, Jang Hwan Kim, and Sang Ouk Kim* (KAIST)
Keywords: Directed Self-Assembly, 2D Materials, Block Copolymer, Nanopatterning, Graphene Nanoribbon

Nanoscale shape engineering is necessary to practical use of 2D materials, aiming at precisely optimize and customize structures and properties. Block copolymer (BCP) nanolithography is a promising strategy that offers a highly periodic ultrafine pattern dimensions down to the sub-5-nm level. Among these approaches, the direct BCP self-assembly makes synergistic effect on orientational and positional ordering of nanodomains with conventional lithography. However, the unavoidable pattern roughness of the guide pattern prepared using typical photolithography commonly results in a deteriorated quality of BCP self-assembled nanopatterns. In this study, sub-10-nm-scale BCP self-assembled nanopatterns finely aligned along the atomic edge of 2D flakes, including graphene, MoS_2, and h-BN, are exploited for reliable nanopatterning of 2D materials. The fundamental alignment mechanism is clarified based on the wetting layer alternation of the BCP film in the presence of intermediate 2D flakes. The resultant highly aligned nanocylinder templates with remarkably low levels of line edge roughness (LER) and line-width roughness (LWR) yield a sub-10-nm-wide graphene nanoribbon (GNR) array with noticeable switching characteristics.

[P3-22]
Wearable SERS-based Hydrogel Sweat Patch for Sensitive Biomarker Detection: Jiwoo Lim and Yeon Sik Jung* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)
Keywords: Wearable sensor, Sweat analysis, Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS), Hydrogel patch

The detection of biomarkers in sweat provides a real-time, painless, and privacy-friendly alternative to conventional blood sampling methods. Wearable sweat analysis enables continuous, non-invasive monitoring, making it a valuable tool for drug abuse detection, medication adherence assessment, and broader healthcare applications. However, traditional fluorescence and electrochemical-based sweat analysis methods suffer from limited sensitivity and challenges in multiplexed detection. To address these limitations, we propose a novel wearable sensing platform incorporating a biocompatible hydrogel matrix and nanostructure. The flexible hydrogel adheres to the skin and continuously absorbs sweat while enriching target molecules. The Raman signal of the collected targets is enhanced through the interaction with the nanostructure. The proposed wearable surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS)-based sensor platform demonstrates outstanding sensitivity, reliable detection performance, and robust multiplexing capabilities. Our innovative platform holds great potential for advancing drug abuse monitoring, forensic investigations, and public safety.

[P3-23]
Thermally Triggered Microbial Biodegradation for Sustainable Electronic Devices: Seokjun Cha and Yeon Sik Jung* (Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))
Keywords: Biodegradable substrate, triggering, transient electronics, bio-composite

Ensuring long-term reliability and high performance is a key engineering objective for electronic devices. However, their design leads to significant environmental and economic challenges at the end of their lifecycle. To address this issue, devices with a predefined lifespan have recently gained attention, with stimuli-responsive biodegradation emerging as a promising solution. However, existing approaches often demand excessive energy or involve toxic chemicals, limiting their practical application. This study proposes a novel approach using thermal stimulation to induce microbial-based biodegradation. While fungi are key agents in natural biodegradation, their integration into biodegradable electronics remains underexplored. Here, Aspergillus niger, a representative biodegradable fungus, is incorporated into the material, with its growth controlled via polycaprolactone (PCL) encapsulation. Inspired by fungal spore germination, the structure modulates water permeability and triggers fungal activation in response to thermal stimuli, allowing controlled initiation of biodegradation. Once triggered, the fungus utilizes the substrate as an energy source, facilitating self-sustained device degradation under mild conditions without additional energy input. This work presents a sustainable strategy for biodegradable electronics, addressing e-waste challenges while maintaining device reliability. The proposed approach offers new insights into the development of environmentally friendly electronic devices.

[P3-24]
Multi-Layered Photonic Displays for Extremely High Fill Factors: 김마가 (서울대학교), 공임보 (포항공과대학교), 김도윤, 선정윤* (서울대학교)
Keywords: Photonic crystal display, Fill factor, Soft materials, Electroactive, High voltage driver

Displays have evolved significantly over the past century, becoming indispensable output devices in everyday life. The fill factor, defined as the ratio of the active area within a pixel, plays a crucial role in determining color quality and display lifespan. However, the conventional use of subpixels reduces color purity and lowers the fill factor, usually to as little as 25-50%. Overcoming these limitations, we demonstrate an electroactive photonic display for an extremely high fill factor. Inspired by cephalopods, the multi-layer design of colloidal photonic crystal gel pixels could reach up to 100 % fill factor, the theoretical upper limit, without the need for

individual subpixels. Furthermore, the dielectric elastomer actuator (DEA) achieved versatile modulation of photonic pixels with fine color tunability, with an average FWHM of 38nm for three primary colors and 80% reflectance. Mechano-optical interference between pixels was precisely controlled and multi-layered tessellation significantly improved the fill factor. A photonic crystal display was driven by a high voltage (HV) circuit, demonstrating applications such as writing digits, words, and producing acoustic signal.

P4 : 재료강도
Room 3층 로비, 4월 23일

[P4-1]
우수한 강도와 성형성을 위한 레이저 처리 합금의 국부적 오스테나이트화를 통한 표면 헤테로 구조 형성: 최주미, 김래언, 구강희, 이정아, 최연택, 박효진, 김재훈, 김형섭* (포항공과대학교)
Keywords: Surface heterostructuring, bendability, austenitization, formability
고강도 재료는 구조 산업에서 필수적이지만, 낮은 성형성으로 인해 산업적 활용이 제한된다. 본 연구에서는 레이저 표면 처리를 통해 합금의 국부적인 오스테나이트화를 유도함으로써 강도와 성형성을 동시에 개선하는 새로운 방법론을 제안한다. 이는 기존의 전면적 열처리 방식과 달리, 필요한 부분만 선택적으로 변형하여 강도와 성형성의 균형을 최적화하는 전략이다. 레이저 처리를 통한 표면 헤테로 구조 형성은 압연된 마르텐사이트계 스테인리스 강에서 국부적인 오스테나이트화를 유도한다. 이를 통해 성형성이 필요한 특정 영역만 연화하여 전체 강도 저하 없이 성형성을 향상시킬 수 있다. 냉간 압연된 316L 스테인리스 강에 레이저 표면 처리를 적용한 결과, 표면에는 국부적 오스테나이트화가 이루어져 연화된 층이 형성되었고, 중심부는 마르텐사이트 구조를 유지하여 강도를 보존할 수 있었다. 그 결과, 굽힘 성형성이 크게 향상되어 약 180°까지 굽힘이 가능해졌으며, 1GPa 이상의 높은 인장 강도를 유지할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 표면 헤테로 구조화 방법은 미세구조 최적화를 통해 강도와 성형성의 우수한 조합을 달성하는 효과적인 전략이다. 이를 통해 향후 강도와 성형성 조합의 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대한다.

[P4-2]
SLM 공정으로 제조한 Ti–6Al–4V 합금의 β-stabilizer의 확산에 기반한 후열처리 조건 최적화: 이아름, 한재연 (국립창원대학교), 김치원 (한국재료연구원), 이지원, 최용혁 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)
Keywords: Ti–6Al–4V, Selective Laser Melting (SLM), α‘ martensite, α+β lamellar, Post heat treatment, Tensile properties
Ti–6Al–4V 합금은 우수한 비강도 및 인성으로 다양한 산업 분야에서 활용되며, 최근에는 Ti 합금의 비싼 비용 절감을 위해 선택적 레이저 용융 (Selective laser melting, SLM) 방식 등과 같은 적층제조 공정이 접목되고 있다. 그러나 적층제조 공정의 높은 냉각속도로 인해 β-stabilizer가 확산하지 못하고 과포화 되면서, 적층제조된 Ti–6Al–4V 합금은 미세한 α‘ martensite 구조를 나타낸다. 해당 α' 마르텐사이트 구조는 높은 강도와 달리, 매우 열위한 연성으로 인해 인성이 매우 낮아 산업적으로 활용되기 위해선 후열처리를 통한 연성 향상 및 인성 확보가 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 SLM 공정으로 적층제조된 Ti–6Al–4V 합금의 온도 및 시간을 변수로 두어 후열처리 조건에 따른 미세조직의 변화 거동 및 상온 인장 특성에 대해 조사하였다. As-built 합금은 SLM 공정의 높은 냉각속도로 인해 prior columnar β 결정립 내에 미세한 α' 마르텐사이트 구조와 함께, β-stabilizer 원소(V, Fe)들은 α' lath 경계에 과포화상태로 고용되었다. Stress-relief HT (593°C/2 h/AC)는 α' 마르텐사이트 구조를 유지하며 동시에 α' lath 경계에 나노 사이즈의 미세한 β 입자의 석출을 촉진시켜 경도를 미세하게 증가시켰다(~20 HV). 800–950°C에서의 고온 열처리 이후 β-stabilizer의 확산을 통해 기존 α' 구조는 α+β lamellar 구조로 분해되었고, 고온 열처리를 적용한 Ti–6Al–4V 합금에서의 미세조직 및 인장 특성에 Stress-relief HT의 영향은 미비함을 확인하였다. 후열처리 온도 및 시간이 증가함에 따라 α+β lamellar 구조의 폭은 증가하였으며, 이에 따라 연성이 향상되었다. As-built 상태의 Ti–6Al–4V 합금을 950°C 1시간 열처리 후, α' 마르텐사이트 구조는 α+β lamellar 구조로 완전히 분해되었으며, lamellar 구조의 폭은 약 1.8 μm, 경도는 약 375 Hv 값으로, 우수한 강도 및 연성(Yield strength: 920 MPa, fracture Elongation: 15%)이 나타났다.

[P4-3]
기계적 모델링 기반의 능동전개형 생체 삽입 전자소자 설계: 조지현 (UNIST), 황경석 (Harvard University), 배재영, 강승균 (서울대학교), 김주영* (UNIST)
Keywords: 기계적 모델링, 능동전개, 생체분해, 전자소자, 미세침습
체내에서 신호를 실시간으로 측정하고 모니터링 할 수 있는 생체 삽입형 전자소자에 관한 연구가 활발히 이어지고 있다. 체내에서 소자가 원활하게 작동하기 위해서는 소자의 재료들이 생체 적합 해야 하며, 기계적·전기적으로 안정해야 한다. 체내에서 넓은 영역의 신호를 측정하기 위해서는 크기가 큰 전자소자를 체내에 삽입해야 하는데, 이는 큰 영역을 절개하여 수술해야 한다는 한계가 있다. 하지만 미세 침습 수술로 체온에 의해서 자가적으로 전개 가능한 전자소자를 생체에 삽입하는 방법은 수술 절개 범위를 줄이고, 상처 회복 시간을 줄일 수 있는 효과적인 방법이다. 또한 체내에 삽입한 전자소자의 역할이 다 하게 되면 제거하는 과정이 필수적이지만, 생체분해성 특성을 가지는 재료들을 이용하여 전자소자를 제작함으로써 체액에 의해 자연적으로 분해 가능하다. 본 연구에서는 능동전개가 가능하며 생체 분해성 특성을 가지는 미세 침습 전자소자 개발을 위해서, 형상기억 고분자와 생체분해성 금속, 세라믹을 활용하였다. 능동전개형 전자 소자의 신뢰성을 높이기 위하여 기계적 모델링을 바탕으로 소자의 거동을 해석하였다. 기계적 물성을 측정한 후, 좁은 공간에 전자 소자를 삽입하고, 미세 침습 방법으로 넓은 면적으로 자가 전개되는 과정을 유한요소법을 이용하여 분석하였다. 3D 유한요소법을 이용하여 모델링을 진행함으로써 전자 소자의 구조에 따라 발생하게 되는 변형률을 최적화하여 신뢰성을 높였다. 따라서 좁은 공간에 삽입되고, 능동적으로 넓은 면적으로 펼쳐지며 신호를 실시간으로 측정 가능한 능동전개형 생체분해성 전자소자를 설계하였다.

[P4-4]

열처리를 통한 (111) 단결정 구리 박막 형성 메커니즘 분석: 김수정, 곽지윤, 심영주, 김동현, 김주영* (UNIST)

Keywords: (111) 구리, 단결정 구리 박막, 비정상 결정립 성장, 열처리

단결정 구리는 다결정 구리와 달리 결정립계가 없어 전기 저항이 낮고 우수한 물리적 특성을 가지며, 특히 구리 (111) 결정면의 경우 그래핀과의 격자 불일치(lattice mismatch)가 현저히 낮아 그래핀 에피택시 성장(epitaxial growth)에 이상적인 기판으로 활용된다. 따라서 (111) 단결정 구리 기판 제조에 대한 관심이 높으며, 현재 단결정 구리 기판의 제조는 주로 벌크 크리스탈 성장 방식이나 고온 재결정화와 같은 방법에 의존하고 있다. 그러나 이러한 공정들은 기판 크기 제한, 공정의 복잡성 및 높은 생산 비용과 같은 한계를 가질 뿐만 아니라 균일한 단결정을 얻기 어렵다는 문제가 있다. 따라서 대면적 초평탄 단결정 구리 박막을 보다 효율적이고 경제적으로 제조할 수 있는 새로운 방법이 요구되고 있다. 따라서 스퍼터링을 통해 수백 나노미터 ~ 수 마이크로미터 두께로 증착한 구리 박막에 대해 온도 및 환경 조건을 제어한 열처리를 실시하여 비정상 결정 성장(abnormal grain growth)을 일으킴으로써 (111) 단결정 구리 박막을 형성하는 연구를 수행하고 있으며, 본 연구에서는 이러한 결정 성장의 메커니즘에 대해 분석하였다.

[P4-5]

층상 미세구조 형성을 통한 9 wt% 니켈 강의 초저온 충격 인성 향상: 홍석원, 김영훈, 이소현, 김주영* (UNIST)

Keywords: 니켈 강, 임계 간 열처리, 샤르피 충격 시험, 나노인덴테이션, 층상 미세구조, 충격 인성

9 wt% 니켈(Ni) 강은 우수한 극저온 충격 인성을 바탕으로 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas) 저장 탱크를 포함한 극저온 환경에서 널리 사용되고 있다. 니켈 강은 오스테나이트 상을 안정화하여 극저온에서도 충격 인성이 확보되지만, 니켈은 높은 원가와 낮은 생산성으로 인해 경제성이 낮다. 이에 따라 니켈 함량을 줄이면서도 기존 9 wt% 니켈 강과 동등한 기계적 성질을 유지할 수 있는 방안이 요구된다. 이를 해결하기 위한 연구로 합금 설계를 통한 충격 인성 향상이 시도되고 있지만, 망가니즈(Mn)와 같은 오스테나이트 안정화 원소는 결정립계를 약화시키거나 예상치 못한 기계적 성질 변화를 유발할 가능성이 있으며, 산업 적용성이 낮다. 임계 간 열처리(Intercritical annealing, L)는 마르텐사이트(Martensite)와 페라이트(Ferrite)가 교대로 배열된 층상 미세구조(Lamellar microstructure)를 형성시킨다. 층상 미세구조는 크랙 전파를 방해하는데 효과적으로 작용하여 재료의 충격 인성을 높일 것으로 기대된다. 본 연구는 이에 착안하여, 임계 간 열처리를 기반으로 QLT 공정(Quenching-Intercritical annealing-Tempering, QLT)을 적용하여 9 wt% 니켈 강의 극저온 충격 인성을 향상시키고자 하였다. 열처리 단계별로 시편을 제작한 후, 샤르피(Charpy) 충격 시험을 수행하여 극저온 충격 인성을 평가하고, 미세조직과 파면 분석을 통해 충격 인성 변화의 원인을 파악하였다. 또한, 나노인덴테이션(Nanoindentation) 시험을 통해 미세조직별 기계적 물성이 충격 인성에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 바탕으로 열처리 공정만으로도 극저온 환경에서 우수한 충격 인성을 확보할 수 있는 미세조직 설계 방안을 제시하고자 하였다.

[P4-6]

9%Ni강의 용접부 위치별 극저온 물성 평가: 이근형, 송민지 (충남대학교), 김유섭 (한국원자력연구원), 이수열* (충남대학교)

Keywords: 금속, 니켈강, 극저온, 용접

9% Ni강은 온도에 따라 기계적 물성이 민감하게 변화하는 BCC 기지를 가지는 강재이다. BCC 구조는 온도가 감소함에 따라 높은 Peierls stress와 높은 Ductile-Brittle-Transition-Temperature(DBTT)에 의하여 온도의 감소는 기계적 물성의 열화를 야기한다. 본 연구에서는 LNG 산업에서 활용되고 있는 소재인 Gas-Tungsten-Arc-Welding을 적용한 9%Ni강을 사용하여 77 K 보다 더 가혹한 조건인 15 K 온도에서의 용접부 위치별 기계적 물성을 평가하였다. 용접 단면을 확인하여 모재, 열영향부, 용접부를 명확히 규명하였고, 각 위치에서의 가공된 시편을 이용하여 기계적 물성을 평가하였다. 상온, 극저온 serration band 안/밖의 조직 관찰을 위하여 SEM, ECCI, EBSD를 활용하여 미세조직 분석을 수행하였고, 각 위치 별 파단면 분석을 통해 변형/파괴 기구를 고찰하였다.

[P4-7]

QST 공정으로 생산된 H 형강의 계장화 압입시험을 이용한 소성 쌓임과 기계적 물성의 상관관계 분석을 통한 잔류응력 측정: 이소현, 김영훈, 전지헌, 김주영* (UNIST)

Keywords: 잔류응력, 소성쌓임, QST 공정, 압입시험, H 형강

H 형강은 H 형상의 철강 재료로 고온압연(hot-rolling), 급냉(quenching)과 자기템퍼링(self-tempering) (QST) 공정을 통해 생산되어 강도와 인성이 높은 재료이다. 이러한 장점으로 인해 화재와 같은 고온 환경 및 해양과 같은 저온 환경 등 다양한 환경에서 건축 구조물 및 선박 등의 구조용 재료로 사용되고 있다. 하지만 생산 공정 중 재료 내부에 발생하는 온도 및 압력구배로 인한 국부적 부피 변화로 잔류응력이 발생한다. 재료 내부에 잔류응력이 존재하면, 외부 하중과 더불어 잔류응력이 더해지기 때문에 예상된 재료의 항복 강도보다 낮은 하중에서도 항복이 일어날 수 있다. 따라서 구조용 재료의 신뢰성을 확보하기 위해서 잔류응력을 정확하게 측정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 비파괴적 측정 방법인 계장화 압입시험을 이용하여 QST 공정을 통해 생산된 H 형강의 소성쌓임을 측정하고 잔류응력과 물성 평가를 통해 위치에 따른 소성쌓임, 물성과 잔류응력의 상관관계를 분석하였다. 또한 위치에 따른 소성쌓임, 물성 및 잔류응력의 변화를 분석하여 QST 공정으로 생산된 H 형강의 불균일한 미세구조 분포를 평가하였다.

[P4-8]

Characteristics of Negative Creep and Effect of Boron on the Creep Properties of IN617 Superalloy: Duhyun Kim, Gyeung-Ho Kim, Ehsan Norouzi* (Korea Institute of Science and Technology), Seok Su Sohn* (Korea University), Dong-Ik Kim, Jae-Hyeok Shim, Woo-Sang Jung, and Jin-Yoo Suh* (Korea Institute of Science and Technology)

Keywords: Creep, Superalloy, IN617, Boron, Negative creep

A minor addition of boron is known to increase the creep resistance of Ni-based superalloys, and its underlying mechanism has been the subject of a number of research activities. In this study, we conducted creep experiments on Inconel 617 alloys with different boron contents. The experiments were conducted using conventional commercial creep testing machines at 973 K and custom-made equipment at 1273 K. Under two different temperature conditions, the addition of a small amount of boron demonstrated superior resistance to creep. However, it was observed that at 1273 K, the effect of boron addition turned out not to be as effective as in the case of 973 K, which has also been reported in other reports. Moreover, we found that strain data exhibited deformation in the compressive direction, indicating negative creep, regardless of the boron content during the first creep stage in both temperature conditions. Lattice contraction was observed and quantitatively measured by using the Nelson-Riley function from XRD data. Changes in lattice constants are considered the primary cause of the negative creep phenomenon. EBSD-EDS was conducted for microstructural analysis, and it was found that variations in the phase fraction of chromium precipitates within and between grains were not the dominant contributing factor for the negative creep behavior. Nevertheless, numerous regions exhibiting locally varying inter-atomic distances were identified through HAADF-STEM imaging. Such atomic-scale distortions may induce mechanical short-range ordering (SRO), which could consequently lead to a reduction in the lattice constant.

[P4-9]

내화/내진 H형강재의 지진/화재 모사 시험시 나타나는 석출물과 클러스터 거동 고찰: 박정현, 한재연, 양철혁 (국립창원대학교), 이봉호 (대구경북과학기술원), 이창훈 (한국재료연구원), 정준호 (현대제철), 홍현욱* (국립창원대학교)

Keywords: Seismic property, Fire property, Bainite, MX precipitates, Low Cycle Fatigue

최근 건축물의 대형, 고층화 경향에 따라 지진, 화재 등 재난 발생 시 안전 확보를 위해 전 세계적으로 건축물의 내진/내화 요구를 강화하고 있다. 또한 국내에서의 지진 발생 빈도 및 피해는 증가하는 추세로 그에 따른 지진 후 화재(Post-Earthquake Fire, PEF)의 위험성이 강조되고 있다. 지난 연구 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 경화능 향상 원소인 Mo, Nb 및 MX석출물 형성에 용이한 Ti, V을 첨가한 베이나이트 강재(0.13Mo-0.05Nb-0.01Ti-0.06V)에 대한 반복 지진/화재 상황에서의 강재의 내화/내진 특성과 미세조직 분석에 따른 열화 거동을 고찰하고자 하였다. H형강재의 초기 미세조직 관찰 결과, 베이나이트 기지에 TiN 및 NbC 석출물이 관찰되었다. 상온 및 600ºC에서 인장 시험을 통해 내진/내화 특성을 평가한 결과, 베이나이트 강재는 낮은 항복비와 상온 대비 600ºC 항복강도의 적은 감소 폭으로 인해 내진/내화강 기준을 모두 만족하는 것으로 확인되었다. 추가적으로 건축구조용 H형강의 반복 지진/화재 이후 강재의 재사용 및 유지보수 관점에서의 건전성을 평가하기 위해 상온 저주기 피로 시험(지진 상황 모사)과 600ºC/2 hr 열간노출(지진 후 화재 상황 모사)의 조합을 1회 실시한 뒤 파단까지 상온 저주기 피로 시험을 진행하였다. 그 결과 전위 회복 및 재배열에 인한 연화 과정이 지배적으로 나타난 상온 저주가 피로시험재와 달리 복합 피로-열노출 시험재는 열간노출 이후 첫 번째 cycle에서 강도가 증가하였으며, 이후 피로 변형이 진행됨에 따라 급격한 연화 과정이 나타났다. 또한, 열화 과정을 겪었음에도 단순 상온 저주기 피로 시험의 피로 수명과 유사한 수명이 확인되었다. APT 분석 및 피로 Cycle 별 TEM 관찰을 통해 원인을 분석한 결과, 열간노출 동안 미세한 cluster 및 MX석출물이 기지 내부에 추가적으로 생성되었고 저주기 피로 시험이 재개됨에 따라 석출물과 전위 사이 상호 작용으로 강도가 증가한 것으로 확인되었다. 이후 피로 변형에 의해 조직 내부 전위 회복이 나타나 전위 소멸에 의한 전위 밀도의 감소가 강도 감소의 주된 원인으로 확인되었다. 유사한 피로 수명이 나타난 원인에 대해 분석하고자 피로 파단이 발생한 시편의 미세조직을 비교하였다. 그 결과 복합 피로-열노출 시험재는 상온 저주기 피로시험재 대비 cell structure의 형성이 뚜렷하지 않고 다소 높은 전위 밀도와 넓은 striation 간격을 가진 것으로 확인되었다. 또한 파면 분석 과정에서 개재물에 의한 파단은 확인되지 않았다. 이러한 결과들은 열노출로 인한 기지 내부 균일한 MX석출물의 추가 형성이 저주기 피로 시험 과정에서 피로 변형을 지연시켜 유사한 피로 수명을 나타나게 한 것으로 판단된다. 상기 연구 결과를 통해 Mo, Nb, Ti, V 첨가로 형성된 베이나이트 강재가 내진/내화 특성을 모두 만족하는 동시에 재사용 및 유지보수 측면의 건전성 평가에서도 효과적인 것을 확인하였다.

[P4-10]

Ex situ 및 In-situ 전기화학적 수소 주입방식에 따른 API X70 라인파이프강의 수소취화 거동 비교: 곽윤서, 오동규 (서울과학기술대학교 신소재공학과), 유용재, 김규태 (현대제철 연구개발본부), 황병철* (서울과학기술대학교 신소재공학과)

Keywords: Linepipe steel, Hydrogen embrittlement, Electrochemical charging, Slow strain-rate test

최근 수소 에너지가 친환경적인 에너지원으로 주목받으면서 수소의 운송과 저장을 용이하게 하기 위해 고압수소용 라인파이프강에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 라인파이프강과 같은 금속 재료가 수소 환경에 노출되면 수소 원자가 표면에서 내부로 침투하여 미세조직 내 다양한 결함들과 상호작용하여 기계적 특성이 저하되는 수소취성이 발생할 수 있다. 이러한 수소취성을 보다 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 실제 사용 환경과 동일한 고압수소 가스 환경 하에서의 실험이 필요하지만 이와 유사한 전기화학적 수소주입으로도 수소환경을 묘사하기도 한다. 이러한 전기화학적 수소취성 평가 방법은 수소를 주입하는 방식에 따라 시험 전 시편에 수소를 사전 주입하는 ex-situ 방법과 시험 중 시편에 수소를 연속적으로 주입하는 in-situ 방법으로 구분된다. 이와 같이 수소주입 방식을 달리하여 모사할 경우 수소의 흡착 및 확산 거동이 다르기 때문에 수소주입 방식에 따른 수소취화 거동의 차이에 대해 이해가 필요하다. 본 연구에서는 베이나이트계 미세조직에 일부 펄라이트를 포함하는 API X70 라인파이프강에 대하여 전기화학적 ex-situ 및 in-situ 방식으로 수소를 주입하고 저속변형률시험 (SSRT, slow strain-rate test)을 수행한 후 상대단면적감소율 (RRA, relative reduction of area)로 수소취성 저항성을 평가하였다. 이후 파단된 시편의 파면 및 파단면 분석과 TDA (thermal desorption analysis)를 통해 수소주입 방식에 따른 수소취화 거동을 비교 고찰하였다.

[P4-11]

화학조성과 냉각속도 변화에 따른 오스테나이트계 경량철강의 석출거동 및 인장특성 변화에 대한 연구: 권민지, 문준오* (국립창원대학교), 박성준 (한국재료연구원)

Keywords: 경량철강, 냉각속도, κ-carbide, 용체화열처리, 인장특성

본 연구에서는 오스테나이트계 Fe-Mn-Al-C 경량철강에 대해 화학조성 및 용체화 열처리 후 냉각 패턴의 변화에 따른 κ-carbide의 석출거동 및 이에 따른 인장특성 변화에 대하여 고찰하였다. 이를 위해 Al, C, Mo, Cr의 함량이 다른 경량철강을 제작하였으며, 냉각 패턴은 수냉, 공냉, 로냉으로 나누어 실시하였다. 수냉의 경우 빠른 냉각속도에 따라 미세한 κ-carbide가 입내에 석출되었다. 반면에 공냉과 로냉의 경우, 냉각속도가 감소함에 따라 입내와 입계에 조대한 κ-carbide가 석출되었으며 이로 인해 경량철강의 강도는 증가하였으나 연성이 크게 감소하였다. 이와 같은 냉각속도 감소에 따른 연성의 급격한 하락을 개선하고자 Mo과 Cr을 첨가하였다. 즉, Mo와 Cr을 첨가함에 따라 공랭 및 로냉 시 κ-carbide의 입계 석출이 억제되어 강도가 다소 감소하였으나 반면에 연성이 크게 증가하였다. 미세조직의 경우, OM, SEM, EBSD, APT, TEM을 이용하여 분석하였으며, 기계적 성질의 경우, 비커스 경도시험, 충격시험 인장시험을 통해 평가하였다. 특히 본 연구에서는 κ-carbide 석출거동 변화에 따른 인장변형거동 변화에 대해 변형조직에 대한 TEM 분석 등을 통해 집중적으로 고찰하였다.

[P4-12]

고강도 원자로용기강 후판 전자빔용접재의 미세조직 및 인장특성 평가: 김민철, 현세미, 홍석민, 김종민 (한국원자력연구원)

Keywords: SMR, SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강, 전자빔용접, 기계적 특성

전세계적으로 소형모듈형원자로(Small Modular Reactor, SMR) 개발이 진행되고 있으며, 국내에서도 전기출력 170MW급의 혁신형 SMR 개발이 진행되고 있다. 혁신형 SMR은 원자로 핵심 기기를 하나의 용기에 집약시킨 일체형 원자로로써, 원자로압력용기의 크기가 한국표준원전보다 규모가 더 클 것으로 예상된다. 따라서 혁신형 SMR에는 기존 원자로압력용기 소재보다 강도가 높은 고강도 저합금강을 적용하는 방향으로 설계가 진행되고 있다. 또한 전체적인 제작기간 단축을 통한 경제성 향상을 위하여 기존 SAW(Submerged Arc Welding)공정 대신 전자빔용접 공정을 적용하여 대형 원자로압력용기를 제작하고자 한다. 이를 위해, 현재 250 mm 이상의 두꺼운 소재를 한번에 용접할 수 있는 초대형 전자빔용접 시스템이 개발되고 있다. 본 연구에서는 현재 개발중인 초대형 전자빔용접 시스템을 이용하여 두께 200 mm의 고강도 SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강 소재의 전자빔용접부 시제품을 제작하고, 용접후열처리 수행 후 용접부의 미세조직과 기계적특성을 평가하였다. 제작된 시제품은 상용소재의 용접후열처리 공정을 따라 615ºC에서 40시간의 후열처리를 수행하였다. 광학현미경(OM)과 주사전자현미형(SEM)을 활용하여 용접부 및 열영향부의 미세조직을 관찰하였다. 또한 마이크로 비커스 경도시험을 통해, 모재/열영향부/용접부 위치에 따른 경도변화를 확인하였다. 상온 및 혁신형 SMR 가동온도에서의 인장특성을 평가하고, -120ºC ~ 150ºC 온도범위에서 Charpy 충격시험을 수행하여 모재, 용접부, 열영향부의 충격천이 특성을 비교 평가하였다.

[P4-13]

저압터빈 블레이드용 Fe-Mn-Al-C 경량철강의 저주기 피로 변형 거동과 κ-carbide의 상관관계 고찰: 김시연 (국립창원대학교), 고의석 (현대스틸파이프), 김치원, 박성준 (한국재료연구원), 홍현욱* (국립창원대학교)

Keywords: Lightweight steel, Low cycle fatigue, Cyclic hardening, Dynamic Strain Aging

에너지 발전산업의 효율향상과 온실가스 저감이라는 사회적, 경제적 요구에 발맞춰 고비강도 소재에 대한 연구개발이 진행되고 있으며, 후보 소재로 FeMnAlC 합금계의 경량철강이 고려되고 있다. 발전용 저압터빈 블레이드의 적용 환경을 고려할 때, 피로 특성은 필수적으로 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 발전용 저압터빈 블레이드 적용을 위한 FeMnAlC 경량철강소재의 저주기 피로 거동을 해석하고자 하였다. 본 연구의 합금은 오스테나이트계 경량철강 Fe-22Mn-8Al-0.9C이며, 용체화 처리 후 550ºC/6시간 시효 처리하여 경량 철강의 주요 강화 인자인 κ-carbide의 석출을 유도하였다. 그 결과 미세조직은 오스테나이트 기지에 약 10 nm 수준의 미세하게 석출된 κ-carbide로 구성되었다. 상온 인장 특성은 항복점 (818 MPa) 이후 인장강도 1051 MPa로 우수한 가공경화뿐만 아니라 46%의 높은 연신율을 나타내었다. TEM을 통한 파단부 미세조직 관찰 결과 Shear-band Induced Plasticity 변형 기구가 지배적인 것으로 확인되었다. 다음으로 핵심 요구 특성인 상온/200ºC 저주기 실험 결과 (total strain range, $\Delta\varepsilon t$ = 0.8~2.0%), 상온에서는 Cyclic softening이 지배적으로 발생하고, 200ºC에서는 Cyclic hardening이 발생하였다. 또한 상온과 달리 200ºC에서는 Hysteresis loop에 serrated flow가 관측되었다. DSA의 따른 Cyclic hardening을 규명하기위해 추가적으로 여러 온도에서 (RT~400ºC) 저주기 피로 시험을 진행하였고, Cyclic softening을 규명하기 위해 상온에서 저주기 피로 수명이 5,000 Cycles인 total strain range, $\Delta\varepsilon t$ = 1.4% 조건에서 1,000 cycles, 3,000 cycles 시편과 피로 파단된 5,000 cycles 시편의 전위 거동을 관측하여 본 연구 합금의 저주기 피로 변형 동안 전위 evolution과 Cyclic softening 및 Cyclic hardening 상관성에 대해 고찰하였다.

[P4-14]

가공 공정의 재결정을 고려한 STS 주름관의 응력 개선 설계 및 피로수명 도출: 박재현, 최윤석* (부산대학교), 김민규, 배성원 (LG전자)

Keywords: 주름관, 피로수명, 응력 집중, 형상 및 열처리 조건

본 연구는 주름 형상을 가진 배관의 피로수명 도출 및 공정 개선을 통해 피로수명이 얼마나 향상되는지를 분석하였다. 주름 형상은 직관 형태에 비해 진동 분산에 유리하지만 소성 변형에 의한 가공경화로 인해 주름부에서 응력집중이 발생할 가능성이 있다. 이에 회전 굽힘 피로시험을 통해 주름관의 피로수명을 도출하고 첫 번째 주름산에서 크랙 또는 파단이 발생함을 확인하였다. 이후, 형상 및 열처리 조건에 따른 피로수명 및 경도 변화를 비교하였다. 형상 조건의 경우 주름 높이 감소 및 곡면 부위 곡률 증가를 통

해 완만한 형태를 가지게 했으며 피로수명이 증가하는 것을 확인하였다. 열처리 조건의 경우 열처리를 하지 않은 경우, 16분, 38분, 60분 네 경우에 대해 비교한 결과, 38분까지는 피로수명이 증가하다 60분에서 급격히 감소하였다. 또한 16분, 38분 두 열처리 조건에 대해 경도 측정을 진행하였으며 열처리 시간의 증가에 따라 경도가 감소하는 경향을 보였다. 추후 열처리 조건의 영향을 검증하기 위해 미세조직 분석을 진행할 예정이다.

[P4-15]

TRC로 제조된 AZMX1100 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 열처리의 영향: 박태연, 최인철* (국립금오공과대학교)

Keywords: Magnesium alloy, Hot rolling, Heat treatment, Microstructure, Mechanical properties

AZMX1100 마그네슘 합금은 알루미늄(Al), 아연(Zn), 망간(Mn), 칼슘(Ca)을 주요 합금 원소로 포함하며, 우수한 롤 성형성과 약한 집합조직을 형성하여 높은 연신율을 갖는 판재 적합성이 뛰어난 소재로 알려져 있다. 본 연구에서는 AZMX1100 합금을 연속 주조 공정 중 하나인 이중 롤 주조(Twin Roll Casting, TRC) 방법을 이용하여 제조하였으며, 열간 압연 및 열처리에 따른 미세조직과 기계적 물성 변화를 분석하였다. 초기 TRC 공정을 거친 AZMX1100 판재(HR 0PASS)는 평균 결정립 크기가 131.3 ± 80.68 μm로 관찰되었으며, 열간 압연을 통해 동적 재결정(Dynamic Recrystallization, DRX)이 활성화되면서 결정립 크기가 8.58 ± 4.89 μm까지 감소하였다. 이 과정에서 집합조직 강도가 약화되었으며, 열처리 후 압연 중 축적된 높은 변형 에너지로 인해 재결정이 진행되면서 결정립 크기가 두 배 이상 증가하였다. 인장 시험 및 비커스 경도 시험 결과, HR(8PASS) 시편은 가공 경화와 결정립 미세화로 인해 기계적 강도가 향상되었으나, 연신율은 감소하는 경향을 보였다. 시효 열처리를 적용한 HR(8PASS)-T6 시편은 인장 강도(UTS) 268.3 ± 3.7 MPa, 항복 강도(YS) 184.3 ± 2.2 MPa를 기록하며 우수한 기계적 성질을 나타냈다. 또한, HR(8PASS)-N 시편은 가장 높은 연신율을 보였으며, 이는 균질화 열처리 후 집합조직이 횡방향(Transverse Direction, TD)과 압연 방향(Rolling Direction, RD)으로 넓게 분산되면서 인장 변형 중 발생할 수 있는 이방성의 감소와 관련되어 있다.

[P4-16]

열교환기용 Ti 관의 온도 변화에 따른 화합물 및 균열 생성 메커니즘: 김정우, 이홍구, 이아영 (울산대학교), 고광우, 박상환, 이채동, 방준영, 손병인 (울산소방본부), 신상용* (울산대학교)

Keywords: 열교환기, Ti 관, 화합물, 균열 생성, 냉각 속도

열교환기는 효과적인 열전달을 위해 사용하는 장치로 석유화학, 발전소, 항공 우주, 자동차 산업 등 다양한 분야에서 널리 사용된다. 열교환기의 기본 원리는 고온 유체에서 저온 유체로 열이 이동하는 것이며, 열전달 방식에는 전도, 대류, 복사가 있다. 열교환기는 고온 환경에서 작동하는 경우가 많기 때문에 내식성, 내열성, 고온 내산화성 등의 특성을 고려해야 한다. 이러한 특성을 만족하는 재료로 Ti 관이 많이 사용된다. 하지만 고온으로 가열된 금속이 물과 반응하면 수소가 생성될 수 있으며, 이는 폭발 위험을 초래할 수 있다. 따라서 화재 발생 시 냉각 방식에 따른 화합물과 균열의 변화를 분석하여 위험성을 줄이는 것이 중요하다. 본 연구에서는 열교환기용 Ti 관의 냉각 방식이 시편 내부의 화합물 형성과 균열 생성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험에서는 산소 절단기를 이용해 Ti 시편을 1000ºC로 가열한 후, 공냉, 수냉, 그리고 3% 수성막포 소화약제를 이용하여 냉각을 진행하였다. 이후 SEM을 이용해 미세조직을 분석한 결과 공냉, 수냉 시편과 비교했을 때 냉각 속도가 가장 빠른 3% 수성막포 소화약제를 사용한 시편에서 얇은 균열이 가장 많이 발생했으며, 표면이 비늘 형태로 일어나는 현상이 관찰되었다. 또한, Point EDS 분석을 통해 시편 내부의 화합물을 비교한 결과, 공냉보다 수냉과 수성막포 소화약제를 사용한 시편에서 화합물 생성량이 더 많았으며 수성막포를 사용한 시편에서는 침상 형태의 수화물이 확인되었다. 추가적으로, 냉각 속도가 더 빠른 금속 화재용 D급 소화제를 사용한 시편을 분석할 예정이다. 시편을 수직 절단한 후, SE(Secondary Electron) 및 BSE(Back Scattered Electron) 이미지를 통해 균열 길이와 폭을 측정하고, Line EDS 분석으로 Ti 표면에서 관찰된 비늘 형태의 구조 변화를 정밀하게 분석할 계획이다. 이번 연구를 통해 열교환기용 Ti 관의 냉각 방식이 미세조직과 균열 형성 및 화합물 생성에 미치는 영향을 규명하고, 화재 시 적절한 소화제 선택 및 대응 방안을 마련하고자 한다.

[P4-17]

Fe-Mn-Ni-Al계 합금의 상온 및 극저온 기계적 특성: 윤성준, 오선근, 나영상*, 김영균* (한국재료연구원)

Keywords: 극저온, 미세조직, Fe 합금, 기계적 특성

지구 온난화에 대한 우려가 커짐에 따라 친환경 에너지원으로서 액체 수소(H_2)의 사용이 증가하고 있다. 이에 따라 상온 뿐만 아니라 극저온 온도 환경에서도 안정적인 기계적 성질을 유지할 수 있는 구조 재료의 개발이 필수적이다. 따라서, 오스테나이트계 스테인리스강 및 고엔트로피 합금과 같은 면심 입방 구조 (FCC) 기반 재료는 극저온 온도에서 우수한 강도-연신율 조합을 갖고 있어 극저온 응용 분야에서 적합한 후보로 간주되고 있다. 본 연구에서는 FCC 구조를 갖는 $Fe_{(70-X)}$-Mn_{15}-Ni_{15}-Al_x (x=0,3,5,6,7 at%) 합금의 미세조직 및 상온-극저온 (298 K 및 77 K)에서 기계적 특성을 조사하였다. 또한, 변형 미세조직 및 파단면 분석을 통해 Fe-Mn-Ni-Al 합금의 상온 및 극저온 인장 변형 거동을 고찰하였다. 분석 결과를 바탕으로 Fe-Mn-Ni-Al계 합금이 극저온 환경에서 신뢰성 있는 구조 재료로 활용될 가능성에 대해 논의하였다.

[P4-18]

Al_3Zr 석출상의 결정구조에 따른 A356 합금의 피로 균열 성장 분석: 우두현 (동국대학교), 송태웅 (HYUNDAI SUNGWOO), 박찬우, 윤영준, 조창훈, 정창열* (동국대학교)

Keywords: A356, Cu, Zr, Al_3Zr, Fatigue Fracture

환경 규제 강화에 따라 모빌리티 산업에서 경량화가 중요시되고 있으며, 이에 따라 A356 합금의 기계적 특성을 향상시키기 위한 전이원소 첨가 및 열처리 조건의 최적화에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 Zr이 첨가된 Al-Si계 합금에서 Zr은 수지상 간격 및 결정립 크기를 감소시키고 열처리 조건에 따라 Zr 석출상이 형성되어 고온 특성이 개선된다고 보고되고 있으나, Al_3Zr 석출상이 피로 균열 성장에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Zr 첨가에 따라 형성된 석출상이 피로 균열 성장 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과 피로균열 근처에서는 $L1_2$결정구조를 갖는 석출상이 관찰되었으며 균열 경로를 변경시키는 다중 균열 분기 현상을 유발하는 것으로 관찰되었다. 이는 구형 Al_3Zr 석출상이 균열의 전파 방향을 변화시키고 응력 집중을 완화하여 피로 균열 성장 저항성을 증가시키는 주요 원인으로 작용할 수 있음을 나타낸다. 또한 Al_3Zr 석출상의 형상과 크기는 첨가 원소에 따라 구형 또는 타원형으로 변화를 보였으며, 이러한 크기와 형상의 차이가 피로 균열 진전에 미치는 영향을 다방면으로 비교분석하였다. 이에 따라 주사전자현미경(SEM)과 EDS를 이용하여 첨가 원소에 따른 결정구조 변화와 피로 균열 성장 특성을 정량적으로 비교분석 하였으며, 피로 균열 전파 거동과 기계적 특성 간의 상관관계를 평가하였다. 이를 통해 Zr 첨가에 따른 석출상의 미세구조가 피로 균열 전파 거동과 기계적 특성에 미치는 영향을 정량적으로 나타내었다.

[P4-19]

바나듐 첨가 고망간강의 항복강도 예측 모델 정밀화: <u>송호정</u> (동아대학교), 박시욱, 김용진 (국방과학연구소), 박건우 (울산과학기술원), 이동호 (포스코 기술연구원), 장재훈 (한국재료연구원), 전종배* (동아대학교)

Keywords: 고망간강, 항복강도 예측, 강화기구

고망간강 (High-Mn Steel)은 STS316 대비 낮은 소재 원가, 높은 항복 및 인장강도, 우수한 극저온인성 및 상자성 발현 특성으로 자동차 차체용 강판, 극저온 액체 저장탱크 등 다양한 분야에서 이용 가능성이 높다. 고망간강의 산업적 활용도를 높이기 위해 항복강도를 향상시키는 것이 필수적이며, 특히 열연재의 항복강도 향상에 대한 연구가 최근 주목받고 있다. 하지만 다양한 공정 조건 및 조성 변화에 따른 항복강도를 측정하기 위해서는 많은 시간과 자원이 소모되므로 항복강도 예측모델 적용으로 고망간강의 항복강도를 예측하는 연구 또한 활발하게 진행중이다. 이에 본 연구에서는 바나듐 첨가 고망간강의 정밀한 항복강도 예측모델 개발 및 적용에 대한 연구를 진행하였다. 정밀한 모델 적용을 위해 오스테나이트 강의 항복강도 향상에 기인하는 마찰응력, 결정립계 강화, 고용강화, 전위강화, 석출강화를 모두 고려하여 모델링하였다. 평균 결정립 크기 분석을 위해 electron backscattered diffraction (EBSD) 분석을 진행하여 결정립계 강화에 적용하였다. 고용강화 분석을 위해 X-ray diffraction (XRD), electron probe micro analysis (EPMA) 및 열역학 시뮬레이션으로 오스테나이트 내 각 원소의 고용도를 추정하였으며, 두 결과를 비교 분석하였다. Rietveld method로 정밀한 전위밀도를 분석하였으며 선행연구에서 적용하던 방법으로 산출한 전위밀도와 비교하여 전위강화를 추산하였다. 석출물의 분율 및 크기 분석을 위해 transmission electron microscope (TEM) 분석을 진행하였으며 VC의 크기에 따라 dislocation looping mechanism과 dislocation shearing mechanism으로 나누어 석출강화를 분석하였다. 위의 방법들을 적용하여 항복강도를 예측한 결과, 선행연구에서 적용된 방법보다 실험값과의 오차가 줄어들었다. 본 연구를 통해 고망간강의 정밀한 항복강도 예측 모델의 적용을 시도하였으며, 예측 모델 적용 신뢰성 향상의 가능성을 제시하였다.

[P4-20]

Al-Si-Mg-(Cu)-(Zr) 합금의 초고주기 피로 파단 양상: <u>조창훈</u>, 박찬우, 우두현, 윤영준, 정창열* (동국대학교)

Keywords: A356, Cu, Zr, Very-high-cycle Fatigue, Fracture Morphology

최근 자동차 배기가스 저감을 위한 차량 경량화에 따라 A356 합금 개량에 대한 연구가 많이 진행되는 추세이다. 실제 제품 작동 수명을 고려하였을 때 108 cycle 이상의 초고주기 피로는 정확한 부품 피로 수명을 평가할 수 있으나, 장시간이 소요되어 연구결과가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 A356 합금을 기준으로 Cu 및 Cu + Zr 첨가에 따른 초고주기 피로 특성과 파단면의 양상을 분석하였다. Cu 및 Cu + Zr 첨가 합금에 대한 일반적인 고주기 피로를 진행하였을 경우 10^7 cycle 에서 파단이 발생하지 않는 피로한 응력이 상온에서는 각각 110 MPa 과 120 MPa, 고온에서는 70 MPa 과 75 MPa 으로 나타났다. 그러나 해당 피로한 응력 조건에서 초고주기 피로를 진행한 결과, 108 cycle 부터 109 cycle 까지의 다양한 피로 수명이 나타났다. 피로 파단면을 분석한 결과, 피로 수명이 증가함에 따라 균열 시작 면적이 증가하였으나, 슬립면은 감소하였고 총 균열 진전 면적은 일정한 것을 확인하였다. 두 합금의 균열 시작 부위를 비교했을 경우, Cu + Zr 첨가 합금이 Cu 첨가 합금 대비 더 높은 면적 증가 비율을 나타냈다. 이로부터 Cu 및 Cu + Zr 첨가 합금에 대해 일반적인 고주기 피로한 이하의 다양한 응력 조건에서 피로 특성을 평가하여 초고주기 피로에 대한 피로 수명과 파단 양상과의 연관성을 도출하고자 하였다.

본 연구는 정부의 재원으로 한국에너지기술평가원 [20214000000010]과 한국연구재단 [LINC 3.0 1345370693]의 지원을 받아 수행된 연구임.

[P4-21]

Pure Ta 소재의 수소 장입 온도에 따른 수소화물 형성 및 미세구조 분석에 관한 연구: <u>김민호</u> (국립한밭대학교), 조민철, 이근호, 박이주 (국방과학연구소), 이상엽, 조훈휘* (국립한밭대학교)

Keywords: Ta, Hydride, Hydrogen charging, Microstructure, Mechanical properties

본 연구에서는 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 Pure Ta 소재에서의 수소 장입 온도에 따른 수소화물 형성 및 미세조직을 분석한다. Pure Ta는 진공 분위기에서 목표온도(400 ~ 1000ºC)까지 가열한 후, 10 torr 수소 분위기에서 1시간동안 유지하고, 이후 Ar 분위기에서 실온까지 냉각한다. 먼저, 수소 장입 온도에 따른 소재 표면에서의 경도를 측정하기 위

해 비커스(Vickers) 경도 시험을 이용한다. 소재의 경도는 600ºC 유지온도까지 증가하며, 700ºC 유지온도부터 점차 감소한다. 동일한 열처리 조건의 진공 분위기와 비교했을 때, 수소 분위기에서 더 높은 경도 값이 나타난다. 또한, X-선 회절분석기(X-ray Diffractometer)를 사용하여 수소 장입 온도에 따른 X-선 회절 패턴 변화를 비교한다. 추가적으로, 투과전자현미경(Transmission electron microscopy)을 사용하여 수소 장입에 따른 수소화물 형성을 확인한다. 수소화물 형성 및 미세조직 변화가 Pure Ta 소재의 기계적 강도에 미치는 영향을 분석한다.

[P4-22]

Mn-Mo-N계 저합금강 전자빔용접부의 파괴인성에 미치는 후열처리공정 영향 평가: 현세미 (한국원자력연구원), 이승욱 ((주)동아특수금속), 홍석민, 김종민, 김민철* (한국원자력연구원)

Keywords: SA508 Gr.3 저합금강, 원자로압력용기, 전자빔용접, 후열처리공정

국내 원자로압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV) 제작에는 서브머지드 아크 용접(Submerged Arc Welding, SAW)이 적용되어 왔으나, 다중 패스 용접 방식으로 인해 장시간이 소요된다. 소형모듈형원자로(Small Modular Reactor, SMR) 개발과 함께 제작기간을 단축할 수 있는 전자빔 용접(Electron Beam Welding, EBW)의 적용이 고려되고 있다. EBW는 원패스 용접이 가능해 기존 SAW 대비 제작 기간을 90% 이상 단축할 수 있지만, 높은 잔류응력으로 인해 용접후열처리(Post-Weld Heat Treatment, PWHT)가 필수적이다. 그러나 EBW 용접부의 후열처리 연구는 아직 부족하다. 따라서 본 연구에서는 SA508 Gr.3 저합금강에 EBW를 적용한 후, 다양한 후열처리 조건에서 미세조직과 파괴인성 변화를 분석하였다. 610ºC, 630ºC에서 30시간 동안 후열처리를 수행하였으며, 추가적으로 품질열처리(Quality Heat Treatment, QHT)를 적용하였다. OM, SEM, EBSD를 활용하여 미세조직을 분석하였으며, 후열처리 조건에 따른 석출물 변화를 정량화하였다. 상온 및 288ºC에서 용접부의 인장특성을 평가하고, Charpy 충격시험 및 ASTM E1921에 따른 파괴인성 시험을 통하여 충격천이특성 및 천이영역 파괴인성을 평가하였다. 이를 통해 후열처리 조건 변화에 따른 결정립 및 석출물의 변화가 EBW 용접부의 파괴인성에 미치는 영향을 고찰하였다.

[P4-23]

잠수함용 고강도강의 폭파변형 특성: 김용진*, 함진희, 박시욱, 양성호 (국방과학연구소)

Keywords: 잠수함, 고강도강, 폭파변형특성, 내충격성

잠수함은 수중에서 작전 수행이 가능한 함정으로 은닉성이 가장 높은 무기체계 중 하나이며, 생존성 및 운용능력 증대를 위해 압력선체에 적용되는 강재에 대한 고강도화 기술 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 개발된 강재를 잠수함용 압력선체 구조물로 활용하기 위해서는 판재의 준정적 기계적 성질 외 폭압에 대한 저항성 평가가 필수적으로 요구된다. 이를 평가하기 위하여 미국에서는 미해군규격에 따라 대기 중에서 폭파변형 특성을 평가하고 있으며, 독일에서는 선급 규정에 따라 수중에서의 폭파변형 특성을 평가하고 있다. 본 연구에서는 국내 실정을 고려하여 대기 중에서 폭파변형시험을 실시하였고, 시험대상재인 고강도강 압연 판재에 대하여 폭파변형 특성을 고찰하고자 하였다. 규격 내 폭파변형시험의 목표 대상재는 용접부 구조물 시편이지만, 본 연구에서는 용접부에 대한 평가 전 시험 절차에 대한 검증 및 압연 판재의 특성을 먼저 이해하고자 하였다.

[P4-24]

SA372 소재의 수소 취성 EX-SITU 시험법 연구: 신봉근 (한국건설생활환경시험연구원, 인하대학교), 김승욱, 손예지, 김효민, 정대용* (인하대학교)

Keywords: SA372, 수소 취성, EX-SITU 시험법, Kth, NACE TM 0284

수소 산업의 성장과 함께 고압 수소 저장 용기의 안전성 확보가 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 특히, 수소 환경에서의 재료 물성 저하를 평가하기 위한 IN-SITU 시험법은 높은 시험 비용과 인프라 부족, 시험 과정의 위험성으로 인해 적용이 제한적이다. 이에 따라, 본 연구에서는 SA372 소재의 EX-SITU 수소 취성 평가 방법을 개발하고, 기존 IN-SITU 시험법과의 비교를 통해 대체 가능성을 검토하고자 하였다. 본 연구에서는 NACE TM 0284 표준을 기반으로 시험편을 황화수소 용액에 침지하여 수소를 장입하는 조건(온도, 침지시간)을 설정하고, TDS(Thermal Desorption Spectroscopy) 시험을 통해 시험편 내 수소 함량을 분석하였다. 또한, KGS AC111 기준에 따라 수소한계응력확대계수(Kth) 값을 측정하여 수소 취성을 평가하였다. 시험 결과, 수소 미장입 시험편의 Kth 값은 각각 9.031, 8.563, 8.215 MPa·m^0.5로 나타났으며, 20ºC에서 96시간 동안 수소를 장입한 시험편에서는 각각 8.011, 7.527, 7.341 MPa·m^0.5로 측정되었다. 또한, TDS 분석 결과, 장입된 수소량은 평균 6.8 ppm으로 확인되었다. 본 연구를 통해 SA372 소재에 대한 EX-SITU 시험법의 적용 가능성을 검토한 결과, 수소 장입 시험편에 아연도금 코팅을 적용하여 확산을 방지한 상태에서 Kth 값을 측정하면, 미장입 시험편 대비 낮은 Kth 값을 보이며 수소 취성이 반영됨을 확인할 수 있었다. 또한, 시험의 재현성은 확보되었으나, 본 연구에서는 IN-SITU 시험과의 직접적인 비교가 이루어지지 않아, 해당 시험법의 적절성을 완전히 검증하기 어려웠다. 따라서, EX-SITU 시험법을 대체 시험법으로 활용하기 위해서는 황화수소 침지 조건을 변경하여 추가적인 수소 장입량과 Kth 분석을 수행하고, IN-SITU 시험법과의 상관성을 검토할 필요가 있다. 향후 연구를 통해 보다 신뢰성 있는 EX-SITU 시험 조건을 확립하고, 수소 취성 평가의 표준화 가능성을 높이는 것이 중요할 것이다.

P5 : 수소재료
Room 3층 로비, 4월 23일

[P5-1]
탄소 첨가에 의한 TiFe계 수소저장합금의 초기수소화 성능 개선: 황규빈 (한국과학기술연구원, 성균관대학교), 하태준 (한국생산기술연구원), 김윤석 (한국과학기술연구원, 성균관대학교), 이영수 (한국과학기술연구원), 심재혁* (한국과학기술연구원, 성균관대학교)
Keywords: 수소저장소재, SEM, EPMA

안전하고 효율적인 수소저장방식은 수소경제 실현을 위해 필수적으로 해결되어야 할 과제이다. 그 중 TiFe 합금은 높은 부피저장밀도, 낮은 작동압력, 높은 경제성으로 가장 유망한 차세대 수소저장합금이지만, 표면에 형성되는 치밀한 산화층으로 인해 별도의 고온 공정이 요구된다. 이에따라 TiFe 합금에 다른 금속 원소나 희토류 원소를 첨가하여 상온 부근에서의 초기수소화를 성능을 개선하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 TiFe 합금에 스크랩철과 타이타늄합금철 등의 저순도 원료에 포함된 탄소를 첨가하여 TiC 입자를 형성시켰고, 상온 부근의 초기수소화 거동과 장기 수소화 사이클 영향을 연구하였다. TiC를 각각 2, 5, 6 at% 포함하는 TiFe 합금은 50ºC에서 최대 1.6 wt%까지 초기수소화 되었으며, 100회의 장기 사이클 실험에도 그 용량이 유지되었다. 또한, 초기수소화에 따른 합금 표면의 미세조직변화를 관찰한 결과 TiC 입자의 존재가 TiFe matrix의 크랙 형성에 기여하는 것을 확인할 수 있었다. 수소 저장 특성 평가를 위해서 초기수소화 직후, 사이클 중, 후의 PCI(Pressure-Composition-Isotherm) curve를 측정하였고, 결정구조와 미세조직 분석을 위해 X선 회절실험, SEM, EPMA를 활용하였다. 본 연구는 저가 원료 첨가를 통해 TiFe 합금의 수소 저장 특성을 개선하는 방법을 제시하며, 이는 TiFe 기반 수소 저장 합금의 대량 생산과 상용화에 중요한 기술적 기여를 할 것으로 기대된다.

[P5-2]
고압수소배관 제조 시 316L 스테인리스강의 인장 물성 및 내수소취성 변화: 고재훈 (영남대학교), 홍성모 ((주)세창스틸), 강지현* (영남대학교)
Keywords: Austenitic Stainless Steel 316L, High-Pressure Hydrogen Tube, Hydrogen Embrittlement (HE), Slow Strain Rate Tensile Test (SSRT), Tensile Properties

최근 탄소중립 정책의 추진에 따라 수소에너지의 수요가 급증하고 있으며, 이에 따라 수소 배관용 소재의 수소취성(Hydrogen Embrittlement, HE)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 핫 피어싱 및 냉간 필거를 통해 상용 316L 스테인리스강 수소배관을 제조할 때 각 공정이 미세조직, 기계적 물성, 및 내수소취성에 미치는 영향을 분석하였다. 우선 핫 피어싱, 필거링, 열처리 후의 결정립 크기, 변형 쌍정 등의 미세조직의 차이를 분석하고, Kernel Average Misorientation (KAM) 값을 이용하여 시편에 가해지는 변형의 정도를 평가하였다. 이후, 각 공정에서 제조된 시편에 전기화학적 방식으로 수소를 장입한 후 저속 인장 시험을 수행하였으며, 이를 통해 수소 장입 여부에 따른 인장 물성 변화를 비교 분석하였다. 그 결과, 시편에 가해진 변형이 클수록 항복 강도 및 인장 강도가 증가하는 반면 연신율은 감소하는 경향을 보였다. 또한, 저속 인장시험 후 Relative Elongation Loss (REL)를 분석한 결과, 배관 제조공정이 진행됨에 따라 점점 수소취성 정도가 증가하는 것으로 나타났다.

[P5-3]
수소 주입 방식과 온도 변화가 BCC 및 FCC 금속의 파괴 특성에 미치는 영향: 최수환, 신승혁, 오동규, 황병철* (서울과학기술대학교)
Keywords: hydrogen embrittlement, slow strain-rate test, hydrogen charging method, temperature effect

수소취성은 금속이 수소 환경에 노출될 때 기계적 성질이 심각하게 저하되는 현상으로, 수소의 저장과 운반에 사용되는 금속 재료의 안정성을 위협하는 주요 요인이다. 이를 방지하고 수소취성 저항성을 확보하기 위해서는 수소의 흡착, 침투, 확산 및 포집과 같은 금속 내에서의 상호작용을 명확히 이해하는 것이 중요하다. 일반적으로 이러한 과정들은 수소 주입 방식과 온도의 영향을 크게 받으므로 이를 고려한 연구가 필요하다. 그러나 기존 연구들은 수소 주입 방식과 온도 변화가 수소취성에 미치는 영향을 개별적으로 다루는 데 그쳐, 두 요인의 복합적인 영향을 비교한 연구는 많지 않다. 또한, BCC (body-centered cubic) 금속과 FCC (face-centered cubic) 금속은 서로 다른 결정구조적 특성을 가져 수소취성 거동이 상이함에도 불구하고 다양한 주입 방식과 온도 조건에서 두 금속의 수소취성 저항성을 체계적으로 평가한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 BCC금속과 FCC 금속의 대표적인 예로 저탄소 라인파이프강과 316 스테인리스강을 선정하고 다양한 수소 주입 방식과 온도 변화가 수소취성 저항성에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 이를 위해 저속변형률시험을 활용하여 상온에서 60ºC까지의 온도 범위에서 사전 주입(pre-charging), 연속 주입(in-situ charging) 그리고 두 방식을 결합한 조건에서 각 강재의 노치 인장 특성을 평가하고, 파괴된 시편의 파면과 파단면을 체계적으로 분석하였다.

[P5-4]
Mg-Ni 수소저장합금의 미세구조 특성과 초기 활성화 메커니즘에 대한 연구: 정소진 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 이다혜 (한국생산기술연구원), 서병찬, 김영민 (한국재료연구원), 곽륜호 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 하태준 (한국생산기술연구원), 손석수* (고려대학교), 박형기* (한국생산기술연구원)
Keywords: Mg_2Ni Alloy, Hydrogen storage alloy, First hydrogenation kinetics, Solid-gas reaction model

Mg계 수소저장합금은 부피저장밀도가 높으며 7.6wt%에 달하는 높은 수소 저장 용량을 갖추고 있다. 따라서 이동형뿐만 아니라

고정형 시스템에서도 안전하고 경제적인 수소 저장 기술로 주목 받고 있다. Mg계 수소저장합금의 특성은 수소와 강하게 반응하여 열역학적으로 매우 안정적인 MgH_2 상을 형성한다. 그러나 이러한 안정성은 수소 흡수-방출 속도를 저하시키고 높은 작동 온도를 요구한다는 단점이 있다. 작동 한계를 개선하기 위해 Mg과 전이 금속의 합금화를 통한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구는 과공정 조성의 Mg-15at%Ni 수소저장합금의 미세구조를 확인하여 수소 흡수 메커니즘을 분석한다. Ni을 첨가하면 Mg_2Ni 금속간 화합물을 형성하는데, 고체-가스 반응 모델을 이용하여 첫 번째 수소화 반응 속도론을 적용하여 수소 흡수 특성을 조사하였다. 모델은 각 접선이 만나는 곳을 기준으로 세 부분으로 나뉘며 섹션 I(초기 수소 흡수)에서는 JMA3D모델이 가장 우세하였고, 섹션 II는 CV3D, 섹션 II에서는 lamellar 구조의 1차 $Mg_2NiH_{0.3}$ 상은 GB3D 모델에 따라 Mg_2NiH4 상으로 전환되었다. $Mg_2NiH_{0.3}$ 상과 Mg_2NiH_4 상 사이의 계면 속도는 Mg와 MgH_2 상의 계면 속도보다 훨씬 느리다.

[P5-5]

Direct energy deposition (DED) 기반 metal repairing 후 austenitic stainless steel의 수소 취성 저항성 평가: 정차희, 양대철 (고려대학교), 사공만재 (포항공과대학교), 백주현 (고려대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 손석수* (고려대학교)

Keywords: 금속 repair, 수소 취성, 적층 제조, 직접 증착 방식

오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성과 기계적 특성으로 인해 해양 구조물, 수소 저장 탱크 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용된다. 그러나 사용 중 손상된 부품을 수리하기 위한 기존의 용접, 브레이징 등의 방법은 미세조직 내에 결함 혹은 기공을 유발하고 TRIP (Transformation Induced Plasticity) 변태를 활성화시켜 수소 취성에 취약할 가능성이 있다. 뿐만 아니라, 이러한 문제들은 수소 환경에서 극심한 취성을 유발할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 적층 제조 기술 중 하나인 Directed Energy Deposition (DED) 공정을 이용하여 repairing을 진행하고, 수소 취성 저항성을 평가하였다. SSRT 결과를 통해, HE index 기준으로 repair 이후 수소 취성 저항성이 크게 향상됨을 알 수 있었다. 또한, DED 공정 후 높은 전위 밀도로 인해 오스테나이트 안정성이 향상되었으며, TRIP 변태가 효과적으로 억제됨을 확인하였다. 이에 따라, BCC 마르텐사이트 형성이 감소하면서 수소 확산이 제한되고, 균열 전파가 지연되는 현상이 관찰되었다. 반면, 비교재에서는 TRIP 변태가 활발하게 발생하며 BCC 마르텐사이트를 따라 균열이 전파되는 양상이 나타났다. 또한, 수소 투과 시험 및 열 탈착 분석을 통해, repaired 시편이 비교재에서 보다 더 많은 수소 고용량을 가지지만, 수소 확산 속도는 감소함을 확인하였다. 이러한 결과는 DED 공정을 통한 repairing이 수소 취성 저항성을 향상시키며, 해양 구조물 및 수소 연료 저장 장치와 같은 가혹 환경에서도 높은 신뢰성을 가질 수 있음을 시사한다.

[P5-6]

First-Principles Study on the Thermodynamic Analysis of Hydrogen Storage Alloys: Min Seok Yoon and Won-Seok Ko* (Inha Univ.)

Keywords: Hydrogen storage, Hydrogenation enthalpy, Density functional theory, VASP

The performance of hydrogen storage alloys is largely governed by their pressure-composition-temperature (PCT) characteristics, which are highly composition-dependent and play a crucial role in determining hydrogen absorption capacity and desorption kinetics. A systematic investigation of these materials is essential for elucidating their thermodynamic properties and optimizing their hydrogen storage performance. In this context, first-principles density functional theory (DFT) calculations provide a robust framework for assessing the thermodynamic stability and hydrogenation behavior of candidate materials, enabling reliable predictions. In this study, DFT calculations using VASP and WIEN2k are conducted to analyze the hydrogenation enthalpy and thermodynamic stability of hydrogen storage alloys. This study examines how alloying elements influence the plateau pressure in PCT curves, a critical parameter governing hydrogen desorption. Additionally, structural stability and volumetric expansion associated with hydrogenation reactions are examined to provide supplementary insights into the selection of optimal alloy compositions. The insights obtained from this study will contribute to a comprehensive theoretical understanding of the thermodynamic behavior of hydrogen storage alloys and serve as a foundation for the rational design of next-generation materials with enhanced performance.

[P5-7]

STS316L과 STS316LN 강의 수소 환경 내구성 및 냉간 인발가공의 영향 분석: 천하은, 홍성규, 손재한, 표수민 (리녹스 주식회사), 김성환 (한국생산기술연구원), 이경훈 (국립한국해양대학교), 이욱진* (부산대학교)

Keywords: 수소취성, 스테인리스강, 냉간가공

수소 충전소의 안정적인 운영을 위해서는 핵심 부품인 고압 피팅류의 내구성과 안전성 확보가 필수적이다. 하지만, 현재 사용되는 대부분의 부품은 수입에 의존하고 있어 국산화가 시급한 실정이다. 수소 충전소용 고압 피팅류는 육각 형상을 제작하기 위해 여러 단계의 냉간 인발가공 공정이 적용되며, 고압의 수소 환경에서 장기간 사용되므로 수소 취성에 대한 저항성이 핵심 성능으로 요구된다. 본 연구에서는 상용 STS316L 소재와 0.2 wt% 질소 함량을 가지는 STS316LN 소재를 통해, 가공 수준에 따른 잔류응력 변화 및 미세조직 특성의 변화를 관찰하고, 최종적으로 기계적 물성 및 수소 취성 저항성을 정량적으로 평가하였다. 특히, 가속 시험을 위해 수소 가스를 직접 이용하는 오토클레이브를 적용하여 100bar, 60ºC의 분위기에서 30일 동안 수소 장입을 진행하였다. 인장시험 결과, 질소 함량이 높은 STS316LN 소재는 상용 STS316L 대비 항복강도가 100 MPa 이상 높았으며, 연신율은 유사한 수준으로 나타났다. -53ºC에서 SSRT(Slow Strain Rate Test)를 통해 수소 취성을 평가한 결과, 본 실험에 사용된 상용 STS316L 및 STS316LN 모두 0.95 이상의 우수한 내수소취성 특성이 나타났다. 또한, 액화수소 온도인 20K에서의 샤르피 충격시험 결과, 수소 장입에 따른 인성 저하가 20J 미만으로 미미하게 나타났다. 열탈착 분광법(TDS) 분석을 통해 수소 장입 직후의 확산성 수소량을

평가한 결과, 질소 함량이 높은 STS316LN 강 내부로 확산한 수소량이 상대적으로 적은 것을 확인하였다. 이는 질소 첨가가 표면에 부동태 피막 형성을 촉진함과 동시에, 오스테나이트 안정화 원소인 질소로 인해 냉간 인발가공 시 발생하는 가공유기 마르텐사이트 변태가 억제되었기 때문일 것으로 판단된다. 본 연구에서는 고압 수소 피팅 소재에 대한 가속시험 평가 결과를 통해 최적의 강도-내수소취성 조합을 가지는 새로운 오스테나이트계 스테인리스강을 개발하는 데 유용한 참고자료를 제공한다.

[P5-8]

In-situ SSRT (Slow Strain Rate Testing)를 이용한 고강도강의 수소 취성 평가 시 장입 전류 밀도가 그 결과에 미치는 영향

: 이승한 (영남대학교), 김형섭 (현대제철), 강지현* (영남대학교)

Keywords: linepipe steel, Electrochemical hydrogen charging, Hydrogen embrittlement, Slow strain-rate test

최근 탄소 중립 및 친환경 에너지로의 전환이 가속화됨에 따라 수소 에너지가 핵심적인 대안으로 부각되고 있다. 특히, 수소의 운송을 위한 배관 소재의 안정성과 신뢰성 확보가 중요한 이슈로 대두되고 있다. 본 연구에서는 수소배관용 고강도강을 대상으로 In-situ Slow Strain Rate Testing (SSRT)을 통해 수소 취성을 평가하였다. 노치 시편에 대해 인장 시험 중 NaCl 전해질 환경에서 다양한 전류 밀도 조건을 적용하여 전기화학적으로 수소를 장입하였다. SSRT 후 시편의 파면을 관찰하여 취성 파면 분율을 정량적으로 구하고, Thermal Desorption Analysis(TDA) 분석을 통해 수소 장입량을 확인하여 이들을 Relative Notch Tensile Strength (RNTS)와 연관 지어 보았다.

[P5-9]

Development of an Ultra-Sensitive Resistive Sonication-Assisted Palladium Nanogap Hydrogen Sensor for Sub-ppm Detection in Breath Analysis: Jiwoo Hong, Sangkil Lee, Joonho Lee, Hyun-Sook Lee*, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

Keywords: Palladium nanogap, Hydrogen sensor, Sonication, Limit of detection, Breath hydrogen analyzers

Palladium (Pd) nanogap-based hydrogen sensors offer high selectivity, fast response, and room-temperature operation, making them ideal for breath analysis. This study presents a Resistive Sonication-Assisted Palladium Nanogap (R-SANG) hydrogen sensor, fabricated by depositing a Pd thin film (12 nm) on a PDMS/Si substrate and applying controlled sonication to form densely distributed 10 nm nanogaps. The optimized sensor achieves a limit of detection (LOD) of 0.5 ppm, the lowest reported for Pd nanogap sensors. Compared to conventional fabrication methods, R-SANG improves nanogap uniformity and sensitivity. Sonication duration is critical: 30 seconds produces the smallest, most stable gaps, while shorter or excessive sonication degrades performance (LOD > 5000 ppm or 1%). The sensor demonstrated long-term stability over 100 cycles at 100 ppm hydrogen, confirming its durability. Operating at room temperature with a simple resistive mechanism, R-SANG enables sub-ppm hydrogen detection, making it highly suitable for non-invasive breath hydrogen analysis in gastrointestinal disease diagnosis. Its superior sensitivity and stability also open possibilities for broader industrial and environmental hydrogen sensing applications

[P5-10]

In-situ 기반 API 5L X70의 수소취성 평가: 신희철 (한국재료연구원, 영남대학교), 박준호, 김태용, 이병주, 이승건* (한국재료연구원), 박노근 (영남대학교)

Keywords: API 5L X70, Hydrogen Embrittlement, High pressure gas charging, In-situ

국내외적으로 수소 활용에 대한 관심이 높아짐에 따라, 배관을 이용한 수소 이송 및 공급에 대한 연구가 진행되고 있다. 하지만 수소는 금속 배관 소재에 수소취성을 발생시킬 수 있기 때문에 수소취성에 대한 적합성 평가가 매우 중요하다. 수소취성을 평가하기 위해선 고압 수소 환경에서 in-situ 시험이 필요하나, 고압 수소 환경에서 in-situ 시험평가는 여러 가지 사정에 의해 쉽지 않은 실정이다. 이에 본 연구에선 in-situ 평가가 가능한 2가지 시험평가 방법(U-Bending, Constant loading)을 제시하고, 해당 시험평가 방법을 활용하여 수소가스 배관으로 사용 가능성이 높은 API 5L X70에 대해 수소취성 평가를 수행하였다. 본 연구 결과, 제안된 시험평가 방법을 통해 API 5L X70 소재의 수소취성 민감성 여부를 확인할 수 있었고, 시험편에 대한 미세조직 분석을 통해 수소취성 기구에 대한 분석도 가능하였다. 향후 다양한 소재에 대해 본 실험 방법들을 적용하여, 제안된 시험평가 방법의 수소취성 평가 적절성을 입증할 예정이다

[P5-11]

Boron 함량에 따른 Ti-TiB 합금의 수소 취성 및 초극저온 거동 변화: 정현, 정지윤, 이동현* (충남대학교)

Keywords: Ti, Ti alloys, Hydrogen embrittlement, TiB

타이타늄(Ti) 및 Ti 합금은 높은 기계적 강도, 우수한 내부식성 및 내산화성을 갖추어 항공우주, 해양, 원자력, 화학 산업 등 다양한 분야에서 널리 활용된다. 특히, 이러한 특성 덕분에 극저온 환경에서 액화 수소를 보관 및 운반하는 용기의 재료로 많이 사용된다. 그러나 Ti 합금이 수소와 접촉하면 δ-hydride가 형성되며, 이는 국부적인 소성 변형을 유발하고 δ-hydride 상에서 취성 균열이 발생하여 기계적 강도와 피로 특성을 저하시킨다. 또한, 20 K 이하 극저온 환경에서는 변형 경화(strain hardening)에 의한 서레이션(serration) 거동이 관찰되며, 이로 인해 저온 취성이 나타날 수 있다. 최근 연구에서는 보론(B) 첨가를 통해 순수 Ti의 미세조직을 미세화하고, 입계 및 입내에 형성된 TiB 입자가 기계적 강도와 피로 파괴 저항성을 향상시키는 것으로 보고되었다. 그러나 이러한 미세조직 변화가 수소취성 및 초극저온 환경에서의 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 Ti와 AlB_2를 볼밀링하여 Ti-TiB 합금을 제조함으로써 보론 함량을 제어하였다. 제조된 합금의 미세조직을 분석하여 보론 함량

에 따른 TiB 입자의 입계 및 입내 분율을 측정하였으며, 상온, 실시간 수소 환경, 초극저온(15 K)에서 인장 시험을 수행하여 수소취화 및 초극저온 거동을 평가하였다. 또한, 파단된 인장 시편의 파단면 및 균열 말단을 SEM과 EBSD로 분석하여 보론 함량에 따른 수소취성과 초극저온 취성의 경향성을 파악하였다. 마지막으로, TiB 석출물의 분포, 슬립 밴드 및 전위 밀도, 쌍정 형성 등 미세조직적 변화를 분석하여 수소취성과 초극저온 취성의 메커니즘을 규명하고자 하였다.

[P5-12]

고항복강도 고엔트로피 합금 설계 및 수소취성 저항성 평가: 정휘윤, 이제인* (부산대학교)

Keywords: Hydrogen embrittlement, High-entropy alloys, Stacking fault energy, Solid-solution strengthening

FCC계 스테인리스강은 낮은 수소 확산도로 인해 수소연료 저장탱크 및 수소 배관 강재로 적합하다는 다수의 보고가 있다. 하지만, 항복강도가 170~300 MPa로 낮고, STS304L과 같이 Ni 함량이 낮은 FCC계 스테인리스강은 수소취성을 야기하는 변형 유기 마르텐사이트가 형성되는 문제가 있다. FCC계 고엔트로피 합금은 수소저장환경인 233 K 이하에서 우수한 기계적 물성이 나타나는 것으로 보고됨에 따라 수소산업에서의 활용 가능성이 제시되고 있다. 특히, 적층결함에너지 제어를 통해 쌍정유기소성(TWIP) 또는 변태유기소성(TRIP)를 구현하는 경우, 수소 주입에 따라 발생하는 취성을 극복할 수 있다는 연구가 최근 보고된 바 있다. 본 연구에서는 고항복강도를 갖는 FCC계 고엔트로피 합금의 소성변형거동에 따른 수소취성을 평가하고자 한다. 구체적으로는 칸토계 고엔트로피 합금의 전기음성도 변수를 제어를 통해 고항복응력을 갖는 영역을 효과적으로 찾고, CALPHAD를 통해 FCC-HCP 상간의 자유에너지 차이를 계산하여 나노쌍정 및 입실론 마르텐사이트가 발생하는 준안정 합금을, 설계하고자 한다. 이후, SSRT (Slow strain rate test)를 통해 수소취성 저항성을 확인하고, 변형 후 파단면을 XRD, SEM, EBSD를 통해 각 상이 수소취성 거동에 미치는 영향을 확인하였다.

[P5-13]

FCC 재질의 수소 압력에 따른 나노 압입 후 ECCI 관찰을 통한 전위 거동 분석: 김대현, 한성희, 정세은, 김병창, 김보규, 신중호* (국립강릉원주대학교), 윤희수, 백운봉 (한국표준과학연구원)

Keywords: 수소 취성, 고압 수소, 나노 압입 시험, Electron channeling contrast imaging(ECCI), Thermal desorption spectroscopy(TDS)

금속 내부에서 수소는 lath, 균열과 같은 결함과 결정구조의 침입형 자리 등 여러 Trap site에 침입하여 전위의 이동에 영향을 준다. 이에 결함을 제거하고, 수소 취성에 상대적으로 안정적인 Stacking Fault Energy(SFE)가 높은 재질이 내수소취성 재질로 평가받는다. 하지만 최근 고압(50 MPa)의 수소 분위기에서 SFE가 높은 재질에 수소 취성이 발생한 연구가 발표되며 저압과 고압의 수소 환경에 대한 파괴 거동 연구가 필요하다. 본 연구에서는 고압의 수소 환경에서 금속 내부로의 수소 농도가 증가하며 전위의 이동에 영향을 주는 응력장에 변화가 발생하였을 것으로 예상하여, FCC 재질의 결정내부로 충분히 장입이 가능한 열적 수소 가스 선장입 방식을 통해 250ºC 조건에서 10 MPa, 50 MPa의 다른 압력 조건으로 수소를 선 장입 후, Thermal desorption spectroscopy(TDS)를 통해 수소 농도를 확인한다. 다음으로 정확한 변위통제가 가능한 MEMS기반 나노 압입기를 통해 nm 단위로 압입하여 변형을 가한 뒤 Electron channeling contrast imaging(ECCI) 기법을 통해 전위의 거동을 분석하여 수소에 의한 응력장 변화를 연구하였다.

[P5-14]

Highly Sensitive and Selective CO Sensing Performance of SnO_2 Nanorod Array Sensor with Bimetallic Catalyst Application: Sanghyun Park, Hyun-Sook Lee, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

Keywords: Carbon monoxide gas sensor, SnO_2 NPs structure, Bi-metallic, response, low power consumption

Carbon monoxide (CO) is a colorless, odorless, and highly toxic gas that is difficult to detect, posing significant health and safety risks. As environmental regulations become more stringent, CO gas sensors have become essential in industries, residential areas, transportation, and smart cities, with further advancements expected through AI and IoT integration. Among various CO sensing technologies, metal oxide semiconductor (MOS)-based sensors have been widely studied due to their high sensitivity, miniaturization potential, and low cost. However, conventional MOS sensors typically require high operating temperatures above 350ºC, leading to significant power consumption and poor selectivity. In this study, we present a high-performance CO gas sensor based on a SnO_2 nanorod (NR) array functionalized with bimetallic catalysts, including Pt-Pd, Pt-Au, Au-Pd, and Au-Pt. Among these combinations, the Au-Pd-coated SnO_2 NRs demonstrated the highest sensing response (~791 to 100 ppm CO), the lowest operating temperature (150ºC), and an ultra-low detection limit in the hundred ppb range. Notably, the CO sensing properties of Au-Pd-coated SnO_2 NRs surpass those of previously reported MOS-based CO sensors. Furthermore, the Au-Pd-coated SnO_2 NR sensor exhibited excellent selectivity, effectively detecting 100 ppm of CO in the presence of other mixed gases. Our work demonstrated high sensitivity to CO gas while addressing issues of selectivity and power consumption, which are crucial for advancing CO gas sensing technology in environmental and industrial applications.

[P5-15]

초극저온/수소환경모사 고망간강의 열피로 특성 연구: 윤하은 (한국원자력연구원), 이태호, 이수열* (충남대학교)

Keywords: 고망간강, 초극저온, 수소취성, 열피로, 균열 메커니즘

최근 탄소 중립 실현을 위한 방안으로 수소에너지 연구가 주목받고 있으며, 특히 액체수소는 안전성과 운송 효율 측면에서 우수한 특성을 갖추어 기존의 고압 기체수소에 대한 대안으로 떠오르고 있다. 따라서 초극저온 환경에서의 피로 및 균열 전파 거동 연구를

통한 액체수소 산업용 금속소재의 물성 평가와 안전성에 대한 확보가 필수적이다. 또한 액체수소 용기가 초극저온 및 수소 환경에 지속적으로 노출되므로, 수소 취성에 대한 영향도 함께 고려해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 초극저온/수소 환경에서의 열피로 특성을 고찰하고자 한다. 본 연구에서는 극저온 인성이 우수한 고망간강을 사용하였으며, 열피로 시험은 상온에서 시작하여 최저 15 K까지 도달하는 온도변화 구간을 1 주기 조건으로 수행되었다. 산업용 소재에서 균열 발생 시, 열응력에 의한 균열 전파 거동을 분석하기 위해 노치, 초기 응력, 사전 피로균열을 추가하여 더 극한 환경을 조성하였다. 열피로에 따른 미세조직을 분석하기 위해 SEM/EBSD를 사용하여 열피로 시험 전후의 미세조직 변화를 비교하였다. 나아가, 고망간강에 전기화학적으로 수소를 주입하여 초극저온 열피로 환경에서 수소가 소재의 미세조직과 균열 전파 거동에 미치는 영향을 고찰하였고, 얻어진 연구결과는 액체수소 저장용 금속 소재의 신뢰성 확보를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대한다.

[P5-16]

초극저온 산업 응용 316L 스테인리스 용접 강판의 수소 취성 평가: 강태욱, 김유섭 (한국원자력연구원), 이수열* (충남대학교)

Keywords: 스테인리스316L, 용접, 수소취성, 초극저온, 초극저온 변형

수소 에너지는 친환경적이고 재생 가능한 에너지원으로 주목받고 있으며, 수소 저장 및 운송 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있습니다. 특히 액체 수소는 높은 에너지 밀도를 자랑하는 효과적인 에너지 운반체로 널리 알려져 있습니다. 하지만 액체 수소를 안전하게 사용하기 위해서는 초극저온 환경(-253ºC 이하, 20 K 이하)에서도 높은 수소 취성 저항성을 유지하면서 우수한 기계적 특성을 나타내는 재료가 필수적입니다. 오스테나이트계 스테인리스강 316L (SS316L)는 뛰어난 강도, 파괴 인성, 부식 저항성 및 수소 취성 저항성을 갖추고 있어 극저온 액체 수소 저장 탱크에 적합한 재료로 평가받고 있습니다. 하지만 SS316L의 수소 취성 거동, 특히 용접 부위의 극저온 수소 취성 특성에 대한 연구는 아직 미흡한 실정입니다. 본 연구에서는 15 K의 극저온 환경에서 SS316L 용접부의 수소 취성 저항성을 평가하고자 합니다. 용접부의 모재부, 열영향부, 용접부를 포함한 다양한 영역의 수소 취성 특성을 분석하여 액체 수소 저장 및 운송 분야에서 SS316L의 신뢰성을 향상시키는 데 기여하고자 합니다. 본 연구 결과는 수소 에너지 기술 발전에 중요한 역할을 할 것으로 기대됩니다.

[P5-17]

AB2계 C14 Laves 상 합금의 저온 수소 흡장 및 탈장 특성에 치환 원소가 미치는 영향: 이도성 (한국과학기술연구원), 황규빈 (한국과학기술연구원, 성균관대학교), 조영환 (한국과학기술연구원), 심재혁 (한국과학기술연구원, 성균관대학교), 이영수* (한국과학기술연구원)

Keywords: 수소저장합금, 수소압축기, C14 Laves 상, 저온 수소 흡탈장 거동, 치환원소

수소 경제 실현을 위한 핵심 기술로서 수소저장합금은 높은 저장 밀도와 가역적 흡탈장 특성으로 주목받고 있다. 뿐만 아니라, 수소저장합금의 온도 의존적 평탄압 특성은 기존 기계식 압축기를 대체할 수 있는 열화학적 수소 압축기로서의 가능성을 제시한다. 이러한 저장과 압축의 이중 기능은 수소 인프라의 효율성과 신뢰성 향상에 크게 기여할 수 있다. 금속간화합물계의 수소저장합금들 중, AB2계 C14 Laves 상 합금은 용이한 활성화, 준수한 수소 저장 용량, 그리고 A 및 B 원자 사이트에서의 광범위한 원소 치환을 통한 조성 제어의 용이성으로 인해 이중 기능 구현에 적합하다. 한편, 최근 액화 수소 충전소의 도입으로 수소저장합금의 저온 작동 환경을 조성할 수 있게 되었다. 저온에서는 열역학적으로 수소 흡장 반응이 자발적으로 일어나기 쉬워지며 수소 흡장량이 증가하고, 압축비를 포함한 수소 압축 효율 향상을 가능케 한다. 그러나 AB2계 C14 Laves 상 합금의 저온 수소 흡탈장 특성에 대한 치환 원소의 영향의 체계적인 연구는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구는 AB2계 C14 Laves 상 합금의 상온 부근부터 약 203K의 저온 온도 범위까지 수소 흡장 및 탈장 거동을 특성화하고, 이를 통해 열역학적 인자, 압축비를 결정하여, 최종적으로 치환 원소의 영향을 이해하는 것을 목표로 한다. Ti-Zr-Cr-Mn-Fe 합금계로부터 C14 Laves 상 합금을 설계했다. 수소의 흡탈장 특성은 Sieverts 타입 장치를 활용하여 평가하였다. AB2형 C14 Laves 상 합금의 저온 수소 저장 및 압축 성능 향상을 위한 합금 설계 지침을 제공할 것으로 기대된다. 이는 향후 액화 수소 충전소 등 저온 환경에서의 수소 저장 및 압축 시스템 개발에 기여할 수 있을 것이다.

[P5-18]

머신러닝을 이용한 AB_2계 수소저장합금의 PCT 곡선 예측: 진시원 (한국과학기술연구원, 연세대학교), 이영국 (연세대학교), 심재혁* (한국과학기술연구원)

Keywords: 수소저장 합금, 압력-조성-등온 곡선, 머신러닝, 딥러닝

다양한 청정 에너지원인 수소를 저장하는 방법 중 하나인 AB2계 수소저장합금은 상온에서 가역적으로 수소를 저장할 수 있어 잠수함이나 지게차의 연료전지에 수소를 공급하는 용도로 사용되고 있다. 본 연구에서는 머신러닝을 활용하여 수소저장 합금의 수소저장 특성을 나타내는 PCT 곡선을 예측하고자 한다. 약 100여 개의 10-15g 합금 시료들이 아크 버튼 멜팅을 이용하여 합성되었으며, SEM-EDS 정량 분석을 통해 일관된 조성 데이터를 확보하였다. 또한, Sivert-type 장비를 이용하여 수소 저장 특성 데이터를 확보하였다. 확보된 데이터는 여러 머신러닝 및 딥러닝 모델을 사용하여 학습시켰으며, 이를 통해 PCT 곡선을 예측하였다.

[P5-19]

Cr-Mo계 저합금강으로 제작된 고압 수소용기의 위치별 수소취성 영향: 배동화, 김학현, 이영광, 정수진 (포항산업과학연구원(RIST)), 조수미 (포항금속소재산업진흥원(POMIA)), 이창희, 오윤석, 이정훈* (포항산업과학연구원(RIST))

Keywords: 탄소강, 수소취성, 템퍼드 마르텐사이트, 압력용기

Cr-Mo계 저합금강은 적절한 온도의 칭 및 템퍼링을 통해 상온에서 높은 강도와 인성을 바탕으로 고압 수소 용기로 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 합금은 오스테나이트계 합금과 비교하였을 때 낮은 수소 고용도 및 높은 수소 확산속도로 인해 수소 환경

에서 장시간 사용 시 수소 취성에 민감하고 영향을 받기 쉽다. 특히, 단조를 통해 제작된 압력용기는 열처리 이후 압력용기의 외부와 내부의 냉각속도 구배로 인해 미세조직적 차이를 나타내기에 고압 수소가스가 직접적으로 닿는 압력용기 내부의 기계적 특성을 외부와 구분하여 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 Cr-Mo계 저합금강으로 제작된 고압 수소 용기의 외부, 중앙부, 내부에서 추출한 시편을 통해 위치별 인장, 충격, 파괴인성을 평가하였으며, 72시간 동안 전기화학적 수소 주입 후 열화되는 기계적 특성을 위치별 상이한 미세조직적 상관관계로 규명하였다.

[P5-20]

Effect of Alloying Pd-Based Single and Bimetallic Catalysts on Hydrogen Sensing Properties of SnO_2 Nanorod Arrays: 임태원, 이우영*, 이현숙 (연세대학교)

Keywords: Hydrogen gas sensor, SnO2 nanorods, Bimetal, Noble metal, Catalytic effect

We present the effect of the type and stacking order of catalysts, such as Pd-M (M = Pt, Ag, and Au), on the hydrogen sensing performance of SnO_2 nanorod arrays. By applying various catalyst structures and conducting post-heat treatment at 200ºC for 2 hours, we optimized the activation of the catalysts and the sensing characteristics of the sensors. The results showed that the multilayer catalyst structure enhanced the sensor's response to changes in hydrogen concentration, especially in structures based on Pd. This improvement in performance suggests that the chemical state changes on the surface of the sensing material may play a significant role, indicating that the selection and arrangement of catalysts critically influence the efficiency of hydrogen sensor.

[P5-21]

Mg-Ni계 수소저장소재의 실시간 수소 흡착/탈착 거동 관찰 연구: 유한준 (한국과학기술연구원, 연세대학교), 배지환 (한국과학기술연구원), 김영민, 서병찬 (한국재료연구원), 천동원* (포항공과대학교)

Keywords: 수소저장합금, In situ TEM, Mg-Ni

수소저장합금은 낮은 저장 압력 및 주변 조건에서 관리 가능한 특성으로 인해 높은 안전 수준을 제공할 수 있는 잠재력을 가지고 있음. 그 중에서 MgH2는 약 300ºC 에서 7.6 wt% 수소를 가역적으로 저장할 수 있어 유망한 소재로 여겨짐. 하지만 수소 흡착/탈착을 위해 높은 온도(400도 이상)가 필요하며 고체 수소저장시스템으로 사용하기 위해선 여전히 많은 노력이 요구됨. Mg-Ni 수소저장소재는 우수한 수소이동도를 갖고 있어 타 소재에 비해 상대적으로 낮은 온도에서 수소 흡착/탈착이 가능하고, 이는 저비용/고효율 고체 수소저장 시스템 제작이 가능함을 의미함. 하지만, 상대적으로 낮은 무게저장밀도를 갖고 있어 (3.6 wt%) 이에 대한 개선이 필요함. 따라서 낮은 공정온도 및 무게저장밀도 향상을 위한 최적의 Mg-Ni 소재개발이 필요하고 이를 위해서는 수소 흡착/탈착 과정에 따른 Mg 및 Mg-Ni 두 상의 수소이동도를 개별적으로 정량화하여 최적의 Ni 함유량 조건을 확립하는 것이 필수적임.

P6 : 비철금속
Room 3층 로비, 4월 23일

[P6-1]

전해도금법을 통한 CFTS 박막태양전지 형성에 관한 연구: 금동일, 정윤화, 김선정* (울산대학교)

Keywords: CFTS(Cu_2FeSnS_4), Thin film solar cell, Electrochemical co-deposition, Complexing agent, Sulfurization processes

최근 전 세계적으로 에너지 소비량이 급증함에 따라서 발생하는 에너지 고갈, 온실가스에 의한 지구 온난화, 화석 연료에 의한 환경 오염에 관한 문제가 대두되고 있는 가운데, 이에 대한 근본적인 해결책인 신재생 에너지의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서도 태양광 발전을 가능하게 하는 박막태양전지는 적은 비용으로도 유지 보수가 가능하며, 제조 공정에서 사용되는 재료의 소비량이 적기 때문에 보다 경제적으로 에너지를 생산할 수 있다는 장점이 존재한다. 본 연구에서는 박막태양전지의 경제적인 이점을 극대화하기 위해 흡수층으로 CFTS(Cu_2FeSnS_4; 구리-철-주석-황)층을 채택하였고, 전해도금을 통한 공전착으로 CFT(구리-철-주석) 전구체를 형성한 후, 황화 처리하여 CFTS(Cu_2FeSnS_4; 구리-철-주석-황) 흡수층을 형성하였다. CFT(구리-철-주석) 전구체를 형성하기 위한 착화제로는 TSC(trisodium citrate)와 EDTA(ethylene-diamine-tetraacetic acid)를 사용하였고, 이를 통해 각 금속 이온의 환원 전위 차이를 최소화하여 형성되는 박막의 조성과 형상을 제어하고자 하였다. 또한 형성된 흡수층의 형상과 조성을 확인하고, 광 흡수율과 밴드갭을 측정하였다.

[P6-2]

사용 후 폐 배터리로부터 회수된 블랙 파우더에서 리튬 금속 직접회수: 주신형, 최우석, 이종현* (충남대학교)

Keywords: 폐배터리, 전해질, 전해제련, 블랙파우더, 리튬 금속

리튬이온 배터리는 전기차 및 에너지 저장 장치(ESS) 시장의 급격한 성장과 함께 세계적으로 사용량이 증가하고 있다. 이에 따라 2018년 10.3억 달러였던 세계 폐배터리 재활용 시장 규모는 2024년 3618억 달러로 급성장하였으며, 이는 폐배터리 배출량 증가 및 자원 순환 경제 활성화에 대한 세계적인 관심을 반영한다. 특히, 차세대 배터리 기술로 주목받는 전고체 배터리 및 무음극 배터리(anode-free battery)는 리튬 금속 배터리의 활용 가능성을 높이고 있으며, 기존 리튬이온 배터리 대비 높은 에너지 밀도와 안전성을 제공할 수 있어 금속 리튬에 관한 관심이 높아지고 있다. 한편, 배터리 공급망의 불안정성과 급격한 시장 변화로 인해 최근 "배터리 캐즘(battery chasm)" 현상이 보고되었으나, 여러 연구에서는 이러한 현상이 일시적이며, 지속적인 기술 개발과 폐배터리 재활용 확대를 예상한다. 본 연구에서는 폐배터리로부터 제조된 블랙파우더에 대한 분석을 진행하였으며, 추가로 블랙파우더에서 리튬 금속의 직접 회수를 위한 공정에 대해 연구를 진행하였다. 블랙파우더에서 리튬 금속 회수를 위해 Cyclic Voltammetry, Linear Sweep Voltammetry를 통해 Onset potential을 측정하였으며 리튬 용출 거동 향상을 위한 전처리별 특성을 확인하기 위해 저항 및 회수 리튬의 순도를 ICP-AES를 통해 분석하였다.

[P6-3]

$CaMg_2$ 환원제를 이용한 TiO_2 금속열환원법을 통한 고순도 Ti 분말 제조: 임규석, Hayk Nersisyan, 이종현* (충남대학교)

Keywords: 타이타늄,금속,열환원

현재 타이타늄 스펀지는 주로 Kroll 법에 의해 생산되고 있다. 염화 공정의 복잡성 및 위험성에도 불구하고 Kroll 법을 대체하기 위한 상업적 공정은 아직까지 보고되지 않았다. 본 연구는 염화 공정 없이 $CaMg_2$ 환원제를 사용하여 TiO_2를 직접 환원시켜 고순도 Ti 분말을 제조하고자 하였다. TiO_2 + $kCaMg_2$ (k=2, 3, 4)의 조성에서 800~1000ºC의 온도에서 환원 후 잔여 CaMg은 진공증류를 이용하여 제거하였다. 증류 후 남아 있는 CaO는 HCl 용액으로 침출하여 제거한 뒤 건조하여 고순도 Ti 분말을 제조하였다. 분말의 형태와 입자 크기 분포, 산소 농도는 FE-SEM을 이용하여 분석하였다. 입도 분석기로 Ti 분말의 입도 분포를 도출하였다. 아크 용해법(Arc melting)을 이용하여 용해 후 잉곳을 제조하였으며, 비커스 경도기를 이용하여 경도를 비교하였다.

[P6-4]

$MgCl_2$를 활용한 마그네슘 전해제련을 위한 기초전기화학연구 및 음극 재료 선별: 이동희, Hayk Hacob Nersisyan, 이종현* (충남대학교)

Keywords: 마그네슘 제련공정, 무수 $MgCl_2$, 다양한음극재료(W, Mo, Fe), Cyclic voltammetry, Chronopotentiometry

최근 탄소 배출 규제 강화로 인해 친환경 마그네슘(Mg) 제련 공정 개발이 주목받고 있다. 마그네슘 생산 공정은 주로 열환원법과 전해 제련법으로 분류되며, 전해 제련법은 무수 염화마그네슘($MgCl_2$)을, 열환원법은 산화마그네슘(MgO)을 원료로 사용한다. 무수 $MgCl_2$를 원료로 사용하는 용융염 전해 공정은 전해질 내 높은 용해도와 염소(Cl_2) 가스의 재활용을 통해 높은 생산성을 달성할 수 있다. 또한, 이 방법은 열환원법에 비해 CO_2 배출량이 현저히 적어 탄소 중립 공정으로의 가능성을 갖는다. 그러나 원료 처리 비용 증가 및 음극 재료에서 기인한 철(Fe) 함량 상승과 같은 문제점이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 Fe-Ni 슬래그에서 유래한 $MgCl_2$를 원료로 활용하는 개념을 도입하였으며, 이를 기반으로 기초 개념을 확립하기 위한 예비 연구를 수행하였다. 상업용 전해 전지 운영을 위한 기초 연구로서 다양한 음극 재료(W, Mo, Fe)를 사용한 실험을 진행하였다. 전해 실험은 NaCl–$CaCl_2$ 전해질을 사용하여 1023 K에서 수행되었으며, 무수 $MgCl_2$를 원료로 마그네슘 금속을 생산하기 위한 기초 전기화학적 실험(Cyclic voltammetry & chronopotentiometry)을 수행하였다. 또한, 안정적인 Cl_2 가스 재활용 공정을 확립하였다. 전기화학적 당량을 기반으로 전력 소비량과 전류 효율을 계산하였다.

[P6-5]

중성염 수용액 전해질에서 Fe_3O_4로 코팅된 STS304 배관의 전해제염: 최우석, 박성현, 네르시시얀하이크, 이종현* (충남대학교)

Keywords: 전해제염, 중성염, Fe3O4, 제염

원자력 발전소가 운영됨에 따라 원자력 발전소 내 냉각수 배관 등 여러 배관에 CRUD로 통칭되는 방사화 산화막을 형성하며 냉각 효율을 감소시키는 문제가 발생하기 때문에 주기적인 제거 및 교체가 요구된다. 또한 세계적으로 209기의 원자력 발전소가 연구정지되었으며 해체 및 제염이 요구된다. 원자력 시설의 제염 방법은 주로 grit blasting과 같은 물리적 제염 혹은 강산이나 강염기를 사용하는 화학적 제염이 사용된다. 원자력 시설의 제염 시 냉각수 배관의 경우 CRUD가 형성되는 배관의 내부를 제염해야 한다. 배관 내부를 제염하기 위해 초음파를 이용하여 CRUD를 물리적으로 제거하는 방법이 연구되고 있지만 고착화된 CRUD의 제거는 어려우며 크랙을 통해 내부 오염된 방사화 물질의 제거가 어렵기 때문에 제염계수가 낮다는 단점이 있으며 화학적 제염은 주기적으로 제염 용액을 교체해야하기 때문에 대량의 2차 폐기물이 발생한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 CRUD와 모재를 제염하기 위해 전해제염 방법을 선정하였다. 하지만 배관 내부의 제염을 위해서는 배관(양극) 내부로 음극이 삽입되어야 하며 이로 인해 전극간 contact를 방지하기 위한 음극의 개발이 요구된다. STS304 배관의 전해제염을 위해 Na_2SO_4 수용액 전해질에서 STS304의 전해제염 공정변수(온도, 전류밀도 등)를 연구하였으며 배관류 방사화 폐기물의 제염을 위한 전극을 개발하여 배관류 폐기물의 전해제염을 연구하였다.

[P6-6]

Cu-Ti-X 합금의 경도 변화에 미치는 첨가원소와 열처리 조건의 영향: 최재훈, 김연서, 정동습, 송지용, 이소영 (울산대학교), 김정기, 박성수 (울산과학기술원), 이정구* (울산대학교)

Keywords: Cu-Ti계 합금, 진공아크멜팅, 석출 경화, 경도

동합금은 자동차, 전기·전자 소재부품에 사용되는 필수 핵심 소재이며 최근 소재부품의 소형화 요구가 심화됨에 따라 기가급 고강도 동합금의 요구가 증가하고 있다. 현재 대표적인 기가급 동합금으로 Cu-Be 합금이 사용되고 있으나, Cu-Be 합금의 경우 제조 시 인체에 유해한 Be 흄을 발생시키는 이유로 환경 규제가 지속적으로 강화되고 있어 대체 합금의 개발이 시급한 실정이다. 대체 합금으로는 Cu-Ti계 합금이 주목을 받고 있으며, Cu-Ti계 합금 박판의 강도와 굽힘가공성 등과 같이 서로 상반된 기계적 특성을 동시에 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Cu-Ti계 합금은 석출경화형 합금으로써 첨가원소와 석출 열처리 조건에 따라 달라지는 석출물의 형성이 기계적 특성에 큰 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 기가급 고기능성 Cu-Ti계 합금 박판 개발을 위한 선행연구로 Cu-Ti-X 합금에 대하여 첨가원소(X)와 석출 열처리 조건을 달리하여 석출경화 거동을 분석하였다. 합금원소(X)를 달리하여 진공아크멜팅 공정으로 Cu-Ti-X 합금 주조재를 제조하였으며 석출 열처리 조건을 달리하여 석출경화에 의한 경도 변화를 분석하였다. 석출 거동 변화에 따른 미세조직을 주사전자현미경을 이용하여 관찰하고 X-ray 회절을 이용하여 석출물 형성 거동을 분석하였다. 또한 마이크로 비커스 경도를 측정하여 합금의 미세조직과 경도 간의 상관관계를 분석하여 Cu-Ti-X 합금의 석출경화 거동을 해석하고자 하였다. * 본 연구는 산업통상자원부(한국산업기술기획평가원)의 소재부품기술개발사업(과제번호 : RS-2024-00433560)의 지원으로 이루어졌음.

[P6-7]

Cu-Al-Zn-Sn 합금의 기계적 특성 거동 분석을 위한 적층 결함 에너지 제어 기반 미세조직 변형 연구: 강결찬, 조가은, 장성문, 손정호, 박혜진, 홍성환 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범* (세종대학교)

Keywords: 적층 결함 에너지, 소성변형, Deformation Twin, Annealing Twin, 재결정화

Cu-Al-Zn-Sn 합금은 원소의 함량을 조정함으로써 합금 자체적으로 금색을 띠도록 할 수 있으며, 현재 유로화에 사용되고 있는 대표적인 상용 합금으로 알려져 있다. 그러나 해당 합금의 기계적 특성은 화폐 이외의 다양한 산업 분야에서 활용되기에는 한계가 존재하며, 이러한 한계를 극복하기 위해 Cu-계 합금의 기계적 성질 개선을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, Cu-계 합금은 첨가 원소(X = Al, Zn, Sn, Ni 등)의 조성을 설계함으로써 적층 결함 에너지(SFE)를 효과적으로 조절할 수 있다고 보고된 바 있다. SFE가 낮아질수록 변형 메커니즘이 변형 쌍정(Deformation Twin)으로 전환되는데, 이는 SFE 감소에 따라 부분 전위 간 거리가 증가하여 합금이 보다 안정적인 에너지 상태를 유지하게 되고, 크로스 슬립(Cross Slip)이 억제됨에 따라 소성 변형 중 변형 쌍정 형성이 촉진되기 때문이다. 이러한 특성을 갖는 합금은 소성 변형 후 열처리 과정에서 재결정화가 일어나면서 어닐링 쌍정(Annealing Twin)이 형성되며, 이를 통해 기계적 특성을 효과적으로 제어할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 Cu-계 합금의 적층 결함 에너지를 조절하여 소성 변형과 열처리를 통해 미세조직과 기계적 특성을 변화시키는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 Cu-Al-Zn-Sn 합금의 설계를 기반으로 Al과 Zn 첨가 원소의 함량을 조절하여 합금의 특성 변화를 분석하였다. 적층 결함 에너지 감소에 큰 영향을 미치는 Al의 함량을 증가시키고, 상대적으로 영향이 적은 Zn의 함량을 감소시킴으로써 SFE를 조정하였다. 이후 소성 변형 및 열처리를 진행하며, 이에 따른 미세조직의 변화와 기계적 특성의 거동을 연구하였다. 또한, 미세조직 분석과 인장 실험을 통해 적층 결함 에너지가 합금의 기계적 특성에 미치는 영향과 변형 매커니즘을 규명하고자 하였다.

[P6-8]

Cu-Ga-Si 합금의 Ga, Si 함량 제어 기반 기계적·광학적 특성 거동에 관한 연구: 조가은, 김기범*, 홍성환, 박혜진 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 강결찬, 장성문 (세종대학교)

Keywords: 컬러 합금, CIE Lab* 색 공간, 단상 합금, 내산화성, 기계적 물성

재료의 고유한 색상을 가지는 컬러 합금 중, Cu-계 단상 컬러 합금은 구리에 용질 원소를 첨가하여 전이 에너지를 변화시킴으로

써 색상 및 기계적 물성을 제어할 수 있다. 선행 연구에서는 용해 한도 이하 함량의 Ga을 용질 원소로서 구리에 고용시킴으로써 색도 변화 및 강도 향상을 유도하였다. 기존 연구에서 Cu-Ga 합금은 5at.% 이하의 Ga을 첨가하여 a*값(적색도)을 감소시키고 b*값(황색도)을 증가시키는 색상범위 확대의 가능성이 확인되었으나, 낮은 Ga 함량으로 인해 색상 변화 범위 및 기계적 물성 향상이 제한적이었다. 본 연구에서는 기존 이원계 Cu 합금의 한계를 극복하고, 더욱 효율적인 색상 조절과 기계적 물성 향상을 위해 Cu-Ga-Si 삼원계 합금을 설계하였다. Ga은 기존 연구된 원소들보다 높은 고용한도를 가지며, 이를 통해 더욱 넓은 단상 영역에서 색상 조절이 가능하여 색상 변화 범위를 효과적으로 확장할 수 있다. 본 연구에서는 Ga(1-19 at.%)을 첨가하여 색상 조절 범위를 넓히고, Si(1-5 at.%)을 추가하여 기계적 물성을 향상시키고자 하였다. 특히, Si의 첨가는 Cu의 강도를 증가시키면서도 SiO_2 보호막 형성을 유도하여 내산화성을 강화하는 역할을 할 것으로 기대된다. 합금 시편은 유도가열 주조법(Induction melting)을 이용하여 제작되었으며, 700ºC에서 30분 동안 균질화 열처리 후 2ºC의 얼음물에 급랭하였다. 미세구조 및 상 분석을 위해 X-선 회절분석기(XRD)와 주사전자현미경(SEM)을 사용하였고, 기계적 물성은 비커스 경도 시험을 통해 평가하였다. 또한, 분광 측색계를 이용하여 CIE Lab* 색 공간에서 광학적 특성을 분석하고, 면저항 측정을 통해 전기적 특성을 평가하였다. 연구 결과, Cu-Ga-Si 삼원계 합금은 기존 Cu 기반 컬러 합금 대비 넓은 단상 유지 범위를 가지며, Ga 함량 조절을 통해 색상 변화를 정밀하게 제어할 수 있음을 확인하였다. 또한, Si 첨가를 통해 기계적 물성 및 내산화성이 향상됨을 검증하였다. 본 연구는 차세대 컬러 합금 설계 및 산업적 응용 가능성을 확장하는 데 기여할 것으로 기대된다.

[P6-9]

$CaCl_2$–NaCl–CaO 계 용융염에서 도핑 된 $YCrO_3$ 기반 불활성 양극 소재의 고온 부식거동 연구: 김완배, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

Keywords: 불활성양극, 전해환원, 페로브스카이트, 용융염, 부식

금속 산업으로 인한 온실가스 배출은 지구 온난화의 주요 원인 중 하나이다. 온실가스를 저감하기 위해 알루미늄, 구리, 아연 등을 포함한 비철 금속 산업에서는 기존의 소모성 탄소 양극을 대체할 수 있는 불활성 양극 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이를 통해 용융염 내 금속 산화물의 전기분해 과정에서 탄소 물질이 아닌 산소 가스가 생성되어 온실 가스 배출이 없는 친환경 공정으로 전환될 수 있다. 현재 알루미늄 산업에 적용되는 불화물 기반 용융염에 대한 양극 소재 연구는 상당한 진전이 이루어졌으나, 염화물계 용융염에서 적용 가능한 불용성 양극 개발 및 다른 비철 금속에 대한 연구는 부족한 상황이다. 이에 본 연구에서는 염화물계 용융염에서 화학적 안정성을 지니는 $YCrO_{33}$ 기반 페로브스카이트(perovskite)계 소재를 도입하고, 전기전도도 향상을 위해 Ca 및 전이금속을 도핑하였다. 도핑에 따른 구조 및 전기화학적 특성 변화를 평가하기 위해 전기전도도 측정 및 전해환원 실험을 수행하였으며, 전해환원 전후의 양극 표면 및 내부 열화거동을 파악하기 위해 SEM/EDS 및 XRD 분석을 실시하여, 양극 원소 용출 및 화학적 변성 여부를 평가하였다. 이를 통해 열화율을 계산하여 도핑 된 $YCrO_3$ 기반 불활성 양극 소재의 염화물계 용융염 환경에서의 상업적 적용 가능성을 검토하였다.

[P6-10]

습식 화학 공정으로부터 환원제와 첨가제 제어를 통한 니켈 나노 분말 제조 연구: 이기혁 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 이용관, 유용연 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 허성규, 이미혜, 온지선, 심재진* (한국생산기술연구원)

Keywords: 니켈 나노 분말, 습식 화학 공정, 염화니켈, 환원제, 분산제

니켈 나노 분말은 우수한 전기 전도성과 산화 저항성으로 인해 전자 및 에너지 저장 산업에서 필수적인 소재로 활용하고 있다. 특히, MLCC(적층 세라믹 커패시터)의 내부 전극 재료로서 고용량화 및 소형화를 가능하게 하는 핵심 요소이다. 니켈 나노 분말을 제조하는 기존의 PVD 및 CVD 공정은 고순도 니켈 분말을 생산할 수 있으나, 광범위한 입자 크기 분포와 높은 생산 비용이라는 단점을 가지고 있다. 하지만, 습식 화학 공정은 입자 크기를 정밀하게 조절하고 응집을 최소화할 수 있는 비용 효율적인 대안으로 주목받고 있다. 따라서, 본 연구에서는 환원제 종류, 분산제 등, 주요 공정 변수를 조정하여 입자 크기 및 형상, 순도에 미치는 영향을 분석하였다. 합성된 나노 분말은 SEM, DLS, XRD 및 C/S등 다양한 기초물성 장비를 활용하여 특성을 평가하였으며, 그 결과 MLCC 적용에 적합한 나노 입자 크기를 가진 니켈 분말의 생산 가능성을 확인할 수 있었다.

[P6-11]

Development and Characterization of a Solid Electrolyte-Based Electrochemical System to Enhance Lithium Ion Extraction Efficiency: Seung-Hwan Lee, So Hyun Baek (Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang University), Hyun-Woo Lee, Yongbum Kwon, Kanghyuk Lee, Kee-Ryung Park, Yoseb Song, Bum Sung Kim, Yong-Ho Choa, and Da-Woon Jeong* (Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: lithium selective membrane, lithium lanthanum titanium oxide, nano-channel

Lithium ions extraction from seawater is highly attractive methods to secure the supply of lithium ions. Seawater contains a much larger amount of lithium than is found on land, thus providing almost unlimited lithium resources to meet the rapid increase in demand. However, high concentration of sodium, magnesium and calcium in the seawater are a great challenge in lithium ions extraction. We extract lithium ions using a lithium lanthanum titanium oxide (LLTO) membrane currently being studied in solid electrolytes. The crystal structure of LLTO is a perovskite structure with abundant vacancies (> 1.18 Å). The size of lithium ion (1.18 Å) is slightly bigger, thus can pass through the membrane. Other ions present in seawater (sodium, magnesium, etc.) are much larger than lithium ion, which requires a much higher energy barrier to transport. In addition, we fabricated an extraction system separated

into three parts using an anion exchange membrane (AEM). This is because extraction efficiency was increased while maintaining electrochemical neutrality of the intermediate module injected with seawater using AEM. The cathode and anodes used in the system were Pt plate electrodes, and a constant voltage of 3.7 V was applied. In this study, the manufacture of 14 ml of 2150 ppm lithium ion concentrated solution was verified when a continuous circulation process of an aqueous solution in which 694 ppm of lithium ions were dissolved. In addition, when the process was performed for 24 hours under the feed solution conditions (Na^+:25,300, Mg^{2+}:27.9, Li^+:7.3 ppm), ions dissolved in the aqueous concentration module solution were extracted at Na^+:16.3, Mg^{2+}:1.07, and Li^+:3.29 ppm. The following experimental results may prove that the developed system could remove sodium ions dissolved in seawater and selectively extract only lithium ions. This study is expected to serve as the basis for solving the problem of unstable supply of lithium resources in the future.

[P6-12]

용융염 전해질을 이용한 모의 방사화 Ni 합금의 전해 제염 및 전해질 재활용 가능성 평가: 박성현, 최우석, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

Keywords: 용융염, 모의 방사화, Ni합금, 전해제염, 전해질 재활용

많은 국가들이 원자력 발전소를 해체하는 과정에 있다. 이러한 발전소에는 표면만 오염된 경우가 많은 인코넬 합금과 같은 귀중한 금속이 포함되어 있다. 금속은 일반적으로 레이저 절삭을 통해 오염을 제거하지만, 전해질을 이용한 오염 제거가 더 간단하고 비용 효율적인 해결책이 될 수 있다. 본 연구는 재활용 및 재사용을 위한 기준 수준으로 오염된 인코넬 합금을 전해질을 이용해 제염하는 방법을 개발하는 것을 목표로 했다. 본 연구는 방사능에 오염된 재료의 모의 방사화 물질로 선정한 Ni-0.2 wt.% Co 합금의 전해질을 통한 제염에 중점을 두었다. 실험에서는 용융 LiCl-KCl-$NiCl_2$-$CoCl_2$ (500°C)를 전해질로 사용했으며, 사용된 전해질의 재활용 가능성도 조사했다. 사용된 전해질의 재활용 가능성에 대한 조사 결과, 진공 증류 후 형성된 산화물은 LiCl, KCl 및 Co 산화물과 소량의 Ni 산화물로 구성되어 있음을 확인했다. 진공 증류 후 수집된 LiCl 및 KCl에 대한 ICP 분석에서 Co 농도는 0.1 ppm 미만으로 나타나, 사용된 전해질이 재활용될 수 있음을 확인했다.

[P6-13]

Strategies for Fe-Rich Precipitate Morphology Control via Unveiling the Solidification Behavior of Cu-Fe-Si Alloys: Jae Kwon Kim* (Seoul National University), Yagnesh Shadangi (Indian Institute of Technology Bhilai), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

Keywords: Cu-Fe-Si alloy, Fe-rich precipitate, Liquid-Liquid phase separation, Solidification behavior, Morphology control.

Cu-Fe-Si alloys attracted attention for next-generation electronic devices due to their balanced excellent electromagnetic and mechanical properties. Previous studies indicate that the morphology and size of Fe-rich precipitates formed during solidification are strongly affected by the Si content, significantly impacting alloy performance. In this study, thermodynamic calculations and experimental thermal analysis were employed to investigate the effect of 1.0–2.3 wt% Si on the Fe rich precipitation behavior in a Cu-10 wt% Fe alloy. The results reveal that adding 1.4 wt% Si stabilizes the Liquid-Liquid Phase Separation (LLPS) region, forming spherical Fe-rich droplets. Furthermore, when the temperature difference between the LLPS onset and Fe precipitation onset (ΔT_{LL-Fe}) is sufficiently small, uniform spherical Fe-rich precipitates are obtained. In contrast, higher Si content increases ΔT_{LL-Fe}, causing hydrodynamic interactions such as Brownian motion and Ostwald ripening, leading to bimodal or trimodal precipitate distributions. Consequently ΔT_{LL-Fe} as a key parameter for controlling precipitate morphology and proposes a threshold of $\Delta T_{LL-Fe} \leq 86$ °C to achieve uniform distributions. This criterion provides a design guideline for precisely controlling the size and morphology of Fe-rich precipitates in Cu-Fe-Si alloys. Moreover, the thermodynamic and hydrodynamic approaches proposed here is based on fundamental physical and chemical principles. Consequently, it is expected that this approach can extend to other immiscible alloy systems.

[P6-14]

Zr합금과의 브레이징용 Al합금의 미세조직 및 부식특성: 이준하, 김정민* (한밭대학교)

Keywords: aluminum, zirconium, brazing, microstructure, corrosion

Zr합금은 원자력 산업에서 널리 사용되고 있으며 기계적 성질 및 내식성도 우수하므로 다른 산업에서의 활용 가능성도 높은 소재이다. 한편, 복합성능이 요구되는 부품들에 대한 수요가 최근 들어 증가함에 따라 이종 금속재료간의 접합기술 연구 필요성도 높아지고 있으며, 만약 경량 알루미늄합금과 건전한 접합이 가능하다면 지르코늄합금의 활용범위가 확대될 것으로 기대된다. 상대재료인 알루미늄합금의 경우 융점이 상대적으로 많이 낮기 때문에 브레이징용 Al합금은 가능한 저융점을 가지면서도 안정적인 접합을 형성하는 것이 필수적이다. 또한 상대적으로 noble한 Zr합금과의 갈바닉 부식을 감소시키기 위해서는 filler Al합금의 부식전위도 높은 것이 바람직하다. 본 연구에서는 Zr합금으로는 Zircaloy-4, filler Al합금으로는 Al-Si-Mg 및 Al-Si-Mg-Cu를 선정하였으며 미세조직, 응고특성 및 부식특성을 조사하였다. filler 합금 중 Cu가 첨가된 경우 고상선 온도 및 약 10% 고상율에서의 온도가 상대적으로 낮으므로 Zr합금과 접합이 용이하지만 합금원소의 양이 많아 더 많은 화합물들이 형성되는 경향을 보였다. 부식특성의 경우 2가지 Al합금에서의 차이가 크지는 않았는데, 상대적으로 Cu가 첨가된 Al합금의 부식전위가 더 낮지만 산화막 안정성은 더 큰 것으로 조사되었다.

[P6-15]

Extraction and Characterization of Copper Using Ceramic Catalyst Reactions: HyoSang Yoo* (Korea Institute of Industrial Technology) and HuiMan Beom (ASIA T&C)

Keywords: Ceramic, Catalyst, Copper, Recycling

The depletion of metallic resources and environmental concerns have emerged as critical global issues. Metals are essential in various industrial sectors; however, their extraction leads to increased environmental pollution and energy consumption. Consequently, metal recycling is considered a fundamental strategy for sustainable resource utilization and environmental protection. Among these metals, copper is widely used in electronics, power infrastructure, and the automotive industry due to its excellent electrical conductivity. As demand for copper continues to rise, effective recycling methods are increasingly required. Copper recycling not only reduces the need for natural resource extraction and minimizes energy consumption but also provides an efficient solution for processing industrial copper waste. Particularly, recycling technologies that incorporate catalytic reactions have gained attention as they enable high-purity metal recovery and improve energy efficiency. Catalyst-assisted processes contribute to impurity removal and enhance the quality of recycled metals through chemical reactions. The advancement of such technologies is expected to improve the efficiency of copper recycling processes and contribute to the establishment of a sustainable metal circulation system. In this study, copper extraction and characterization were investigated using ceramic catalyst reactions. The catalyst was prepared by uniformly mixing components such as silicates and fluorides under optimized temperature and time conditions to maximize decomposition efficiency. The microstructure of the extracted copper, separated through a multi-stage process, was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). Additionally, the changes in its properties after rolling were evaluated.

[P6-16]

바이폴라막 전기투석을 이용하여 친환경 망초(Na_2SO_4)폐수 처리에 관한 연구: 안재우*, 이영재, 서민혁, 김준희, 장재혁, 김주희, 박혜인 (대진대학교)

Keywords: 바이폴라막 전기투석, 정전류, 황산, 가성소다

최근 선진국을 중심으로 탄소 배출 저감을 위해 글로벌 자동차 환경 규제가 본격화되면서 폐리튬이차전지(Waste LIBs) 재활용 시장이 급격한 성장을 보이고 있다. 글로벌 재활용 시장이 성장하면서 리튬(Li), 니켈(Ni), 코발트(Co) 등의 유가금속 습식 회수 공정 시에 다량의 망초(Na2SO4)폐수의 발생이 예상되고 있다. 그러나 현재는 이러한 망초 폐수 처리에 대한 적절한 처리 방법이 없어 여러 가지 환경적인 문제를 초래하고 있는 상황이다. 본 연구에서는 이러한 망초 폐수를 바이폴라 전기투석 기술을 적용하여 황산 및 가성소다로 회수하고 이러한 산 및 염기를 침출, 침전, 중화처리 등의 폐리튬이차전지 재활용 공정에 직접 재투입하여 사용할 수 있는 친환경 폐수무방류 공정 개발에 대한 기초 연구를 수행하였다. 3액실 정전류 방법을 사용하여 전류효율, 에너지소비량 및 황산 및 가성소다 회수율 등에 영향을 미칠 수 있는 여러 인자들의 영향을 고찰하여 최적 공정 설계의 기초를 마련하고자 하였다.

[P6-17]

CRDM 노즐용 Alloy 690 단조재의 열처리 조건 제어가 균일한 결정립 미세조직 확보에 미치는 영향: 김동욱, 최재영* ((주)에이치브이엠)

Keywords: Alloy 690 , CRDM 노즐, 열처리, 결정립 균일도, M23C6

Alloy690은 고온 고압 환경에서 우수한 내식성과 기계적 특성을 제공하는 니켈계 초합금(Ni-Cr-Fe)으로, 원자력 발전소 1차 계통의 핵심 부품인 증기발생기 전열관 및 원자로 헤드 CRDM 노즐 등에 광범위하게 사용된다. 특히 원자로에 적용되는 CRDM 노즐은 중공형 구조의 특성상, 운전 중 발생하는 복잡한 응력 분포에 더욱 취약하므로 높은 수준의 기계적 물성 확보가 필수적이다. 더불어, 재료 내부에 불균일한 결정립이 존재할 경우 특정 영역에 응력 집중이 발생하여 조기 파손을 야기할 수 있다. 따라서 CRDM 노즐의 신뢰성 확보를 위해서는 기계적 물성뿐만 아니라, 균일한 결정립을 갖는 미세조직 제어가 매우 중요하다. 본 연구에서는 원자력 발전 설비의 안전성과 직결되는 CRDM 노즐의 재료적 신뢰성을 확보하고자 Alloy 690 단조재에 대한 균일한 결정립 미세조직 제어 방안을 연구하였다. 구체적으로, 열처리 조건 변화가 Alloy 690 단조재의 결정립 균일도에 미치는 영향을 분석하고, 균일한 결정립을 얻기 위한 최적 열처리 조건을 평가하였다. 합금 잉곳은 진공 유도 용해(VIM) 방식으로 제조되었으며, 열간 자유단조를 통해 원형 빌렛을 제작하였다. Alloy 690 빌렛의 열처리 조건이 결정립 크기 분포 및 석출상(M23C6) 분포에 미치는 영향을 분석하여, 결정립 균일도를 정량적으로 평가하고 기계적 물성과의 상관관계를 확인했다.

[P6-18]

황산리튬의 탄소열환원법을 이용한 황화리튬 제조 시 탄소 원료가 미치는 영향: 송영주, 맹은석, 김병민, 한동진, 장건희, 강정신* (서울대학교)

Keywords: lithium sulfide, lithium sulfate, carbothermic reduction, all-solid-state batteries, sulfide solid electrolyte

전고체전지는 고 에너지 밀도와 높은 안정성으로 인해 차세대 이차전지로 가장 주목받고 있으며, 황화리튬 (Li_2S)은 황화물계 고체전해질을 사용하는 전고체전지의 핵심 원료 물질이다. 현재 전세계적으로 배터리급 고순도 Li_2S의 대량생산을 위한 연구가 진행 중이며, 주로 탄소열환원법 또는 황화수소 (H_2S)를 이용한 방법이 활용되고 있다. 본 연구에서는 황산리튬 (Li_2SO_4)의 탄소열환원 반응 시 다양한 탄소 (C) 원료가 Li_2S 제조에 미치는 영향에 대해 조사하였다. C를 이용한 Li_2SO_4의 환원 반응은 1100 K의 아르곤 (Ar) 가스 분위기에서 진행되었으며, 반응 생성물은 무수에탄올에 용해한 후 여과액을 열처리하였다. 실험결과, 사용한 모든 C 원료에서 Li_2S가 생성되었으나, C 원료 별 함유된 불순물로 인해 리튬 화합물이 형성되어 무수에탄올 침출·여과 시 분리되었다. 본 연구결과로부터 다양한 C 원료를 활용한 열환원법과 후처리를 통해 Li_2SO_4로부터 Li_2S가 제조될 수 있음을 확인하였다.

[P6-19]

페스크랩을 활용한 Al-8Mg-6Si 주조 합금의 T6열처리 특성: 김유경 ((주)피레타), 김정석* (조선대학교)

Keywords: Al-Mg-Si, Primary Mg_2Si, Eutectic Si, T6 heat treatment

자동차 부품 제조공정 중 발생하는 탄소 배출량을 최소화하기 위하여 리사이클링 소재를 적용한다. 내연기관용 엔진 피스톤에 사용되는 Al-8Mg-6Si를 폐스크랩을 활용해 주조하여 열처리 공정에 따른 미세조직과 기계적 특성 변화에 대해 연구했다. 실험에 사용된 합금을 서로 다른 열처리 온도, 시간에 따른 Primary Mg_2Si상의 크기 변화, Eutectic Si상, Eutectic Mg_2Si상의 형태 변화를 광학 현미경과 주사전자현미경을 통해 관찰했으며, 이 외의 다른 상의 확인하기 위해 XRD를 통해 확인하였다. Primary Mg_2Si상의 내마모성을 알아보기 위해 용체화 처리 후 선형 왕복 마모 시험을 통해 평가했으며 이는 상의 크기와 형태와 관계가 있다고 판단되었다. 기계적 물성 평가를 위해 Vickers 경도 시험을 진행한 결과, 인공시효 후 최대 42%까지 증가했다. 인장시험에서도 시효 열처리 시 합금의 항복강도가 시간이 길어짐에 따라 증가하는 모습이 관찰되었으며, 이는 고온 환경에 저항하는 능력이 우수하다고 판단된다. 이 합금은 엔진 부품, 실린더 헤드 등의 고온 환경에서 작동하는 부품에 적용할 수 있다.

[P6-20]

진공증류 공정을 통한 고순도 마그네슘 제조: 소윤지 (고등기술연구원), 김호병 (고등기술연구원), 최상훈* (고등기술연구원)

Keywords: 마그네슘, 진공증류, 고순도, 회수

마그네슘(Mg)은 상업적으로 사용되는 구조용 재료 중 가벼운 금속으로 높은 비강도, 열전도성 및 가공성 등으로 인해 항공우주, 자동차 및 전자기기 등 다양한 산업에서 수요가 증가하고 있다. 현재 Mg는 열환원법(Thermal-reduction) 및 전해법(Electrolytic)이 주로 사용되어 생산되고 있으나, 각각 높은 CO_2 배출과 에너지 소비 및 독성 Cl_2 가스 발생 등 환경적 문제를 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 Mg 신제련법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 동시에 생산된 Mg 금속을 고순도로 정제할 수 있는 진공증류 공정의 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 진공증류 공정을 활용하여 Mg 금속의 불순물을 효과적으로 제거하고, 고순도 마그네슘 제조를 위한 최적의 공정 조건을 도출하였다. 이를 위해 Mg 및 불순물 원소들의 증기압 차이에 대한 열역학적 분석을 통해 Mg 증발 및 분리 가능성을 평가하였으며, 증발 온도 및 응축 온도 영역 설정에 따른 Mg 액상 응축 가능성 및 효율성을 분석하였다. 또한, Mg 회수율을 높이기 위한 유지시간 등 공정 변수를 수행하였으며, 회수된 Mg 금속의 불순물 함량 및 순도는 ICP 분석을 통해 확인하였다.

[P6-21]

석출 경화형 Cu-Ti 합금의 잉곳 건전성 평가와 열처리를 통한 시효 경화 거동: 최광수, 양현석, 정항철, 공만식* (고등기술연구원)

Keywords: 속, Cu-Ti합금, 열처리, 시효경화, 상변태

본 연구는 커넥터, 리드프레임과 같은 전자기기용 부품 소재로 적용하기 위한 석출 경화형 Cu-Ti합금의 잉곳 건정성 평가 및 열처리 요소 기술을 연구하였다. 이를 위해 진공 유도 용해 공정을 이용하여 제작된 100 kg급 잉곳의 위치별 조성 및 상 분석을 수행하여 건전성을 평가하였다. 또한, 균질화 열처리, 고온 소성 변형, 용체화 열처리의 공정을 최적화하여 첨가 원소가 고용시킨 Cu 합금을 제조하고, 시효 열처리를 수행하였다. 특히, 시효 열처리 조건에 따른 경화 거동과 미세조직 차이에 대해서 분석하였다. 본 연구에서 도출된 Cu-Ti 합금의 열처리 요소 기술은 현재 전량 수입에 의존하는 전자기기용 고강도 Cu합금의 국산화 기술 개발을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 사료된다. Acknowledgement 본 연구는 산업통상자원부/한국산업기술기획평가원의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 RS-2024-00433559)

[P6-22]

Influence of O_2 Potential on the MoS_2 Concentrate Oxidation Roasting to Produce MoO_3 in Rotary Kiln Operation: Jungho Heo (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)), Jaehong Shin (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)), Seongsoo Han, and Joobeom Seo1* (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM))

Keywords: Molybdenite concentrate oxidation, Rotary kiln, O_2 potential, Conversion rate, Phase equilibria

Molybdenite (MoS_2) 정광의 산화 로스팅 (oxidation roasting) 공정은 Technical grade 삼산화 몰리브덴을 (TG-MoO_3) 생산하는데 중요한 단위 공정이며, MoO_3 생산량과 품위에 직접적으로 영향을 미친다. MoS_2의 산화 반응을 위해 Air blowing을 실시하나, 유입되는 가스 내 산소의 농도를 (O_2 potential) 제어함으로써 MoS_2 산화 반응 구동력 및 산화 속도를 개선할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 넓은 범위의 O_2 potential을 제어함에 따른 MoS_2의 산화 거동, MoO_3 수율 및 순도, 응집 현상 (agglomeration) 및 상평형에 대한 포괄적인 이해는 여전히 부족하다. 따라서 본 연구는 넓은 범위의 O_2 농도를 제어함으로써 (Air, 50%O_2 – 50%Ar, 100%O_2) 로터리 킬른 내 MoS_2의 산화 거동을 다각적으로 평가하였다. 본 실험은 85% 순도 및 평균 입자 50 μm의 MoS_2 정광 분말 20 g을 사용하였으며, 실험실 규모의 로터리 킬른에서 산화 로스팅을 진행하였다. 온도는 600 ℃이며, 드럼 회전 속도는 5 rpm으로 고정하였다. 승온 과정 중 MoS_2 정광의 산화 방지를 위해 질소 (N_2) 가스를 지속적으로 주입했으며, 목적하는 온도에 도달한 후, O_2 농도가 제어된 가스를 1L/min의 유량으로 1시간 동안 유입하였다. 일정 시간 간격에 맞추어 (5, 10, 30, 60분) 샘플을 확보하였으며, 얻어진 샘플은 성분 분석 및 상분석을 하였으며, 응집 현상의 정량화를 위해 시간별 샘플의 응집물의 질량을 함께 평가하였다. S 제거율은 O_2 potential이 높아질수록 증가하며, 100%O_2 가스를 사용하였을 경우 30분 이내에 S 함량이 1% 이하가 됨을 확인하였다. O_2 potential이 높아질수록 MoO_3가 형성되는 시간이 짧아지고, 30~60분 후, 90~95% MoO_3가 형성됨을 확인하였다. 50% 이상의 O_2 농도에서는 MoO_4O_{11}, Mo_9O_{26}과 같은 과산화 몰리브덴 산화물이 확인되었으며, 동시에 20~30% 수준의 응집현상이 일어남을 확인하였다. Mo-S-O stability diagram을 통해 시간에 따른 안정상 평가 및 MoS_2의 oxidation pathway를 평가하였다. 결론적으로, MoS_2 산화 로스팅 공정 효율을 높이며 동시에 Mo 손실을 최소화하고 최적의 MoO_3 생산성을 얻기 위해서 적절한 O_2 potential 제어가 필요함을 확인하였다.

P7 : 가공-표면처리
Room 3층 로비, 4월 23일

[P7-1]

표면 경화된 기계 구조용 합금강의 마모 거동에 관한 연구: 한수빈 (한국생산기술연구원), 이석규 (현대자동차), 신상윤 (에스비비테크), 장진석, 조용재, 김동혁, 최창영, 정유현, 이호진, 박동용, 송혜진* (한국생산기술연구원)

Keywords: 하모닉 감속기, 숏피닝, 경도, 내마모성, 미세조직

하모닉 드라이브는 경량성, 높은 감속비 및 우수한 전송 효율성으로 인해 현재 자동차 산업, 항공, 의학, 자동 제어 및 로봇 공학 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 그 적용 범위가 지속적으로 확대되고 있다. 하모닉 드라이브는 웨이브 제너레이터 (wave generator), 플렉스 스플라인 (flexspline) 그리고 서큘러 스플라인 (circular spline)의 세 가지 주요 부품으로 구성되며, 이 중 기어 전달은 플렉스 스플라인의 주기적인 탄성 변형을 통해 이루어진다. 그러나 플렉스 스플라인은 하모닉 드라이브의 가장 취약한 요소로, 마모로 인한 고장 가능성이 높기 때문에 내마모성을 향상시키는 것이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 하모닉 드라이브의 주요 소재인 Ni-Cr-Mo 합금강의 내마모성을 개선하기 위해 다양한 조건에서 shot peening을 진행하였으며, 이로 인해 변화된 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 본 연구를 통해 Ni-Cr-Mo 합금강의 내마모성을 향상시키기 위해서는 최적의 shot peening 조건을 선정하는 것이 중요하다는 것을 확인할 수 있었다.

[P7-2]

Zn, Mg, Ca가 첨가된 핫스탬핑용 Al 기반 용융도금층의 오스테나이징 열처리 후 미세구조 및 전기화학적 특성 평가: 왕은찬, 최윤일* (한국생산기술연구원)

Keywords: 용융도금, 부식, 미세조직

핫스탬핑용 자동차 강판은 900ºC 이상의 오스테나이징 열처리를 통해 높은 인장 강도를 확보함으로써 차체 경량화에 기여한다. 그러나 이 과정에서 소재의 탈탄 및 고온 산화가 발생하는 문제가 있으며, 이를 방지하기 위해 Al 기반의 용융도금 공정이 적용되고 있다. Al 기반 도금층은 Fe-Al 간 확산 반응을 통해 금속 간 화합물이 형성됨으로써 액체금속취화(Liquid Metal Embrittlement, LME) 균열 민감도가 낮아지고 고온 산화를 방지하는 장점이 있지만, 희생방식 성능이 부족하여 내식성이 제한적이라는 단점이 있다. 본 연구에서는 Al 기반 도금층의 내식성 향상을 위해 Zn, Mg, Ca를 첨가한 새로운 용융도금 조성을 개발하였다. Zn 함량을 20~50 wt% 범위에서 10 wt%씩 증가시키며 610~640ºC에서 20초간 도금한 후 수냉 처리하였고, 이후 대기 분위기의 940ºC에서 5분간 오스테나이징 열처리를 수행한 후 공냉 처리하였다. 오스테나이징 후 도금층의 미세구조 분석 결과 전체 도금층 두께는 약 30~35 μm로 유지되었으며, 모재(Fe) 바로 위에 Fe-Al 합금화층이 형성되고 그 위로 Zn 및 Al-Zn 금속간화합물이 존재하는 다층 구조를 확인하였다. 또한, 도금층 표면에는 약 1 μm 미만의 Mg, Ca 산화물이 형성되었다. Zn 함량이 증가함에 따라 Zn 및 Al-Zn 금속간화합물층의 잔존량이 증가하고 Fe-Al 합금화층의 두께는 감소하였다. 오스테나이징 열처리한 시편의 동전위 분극시험 수행 결과 Zn 함량이 증가할수록 부식 전위가 약 -1.08 V에서 -1.19 V로 감소하였으며 모재와의 전위 차이는 약 -0.43 ~ -0.54 V 수준으로 나타나 기존 Al 기반 도금층 대비 우수한 희생방식 효과를 확인하였다. 또한, 3.5 wt% NaCl 용액에서 갈바닉 부식 평가를 진행한 결과 초기 침지 기간 동안 모든 시편이 +25 ~ +35 μA의 전류 밀도를 유지하였으며, Zn 첨가 함량이 높은 시편일수록 희생 방식 효과를 보다 장시간 지속할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 Zn, Mg, Ca가 첨가된 Al 기반 용융도금층이 기존 Al 도금층 대비 향상된 희생방식 성능과 내식성을 제공할 수 있음을 검증하였다.

[P7-3]

SPS와 Thioflavin T를 첨가한 구리 도금층의 표면 특성 및 전기화학적 거동 연구: 김나영, 안서영, 손주한, 이선호, 손인준* (경북대학교)

Keywords: electroplated copper, SPS, Thioflavin T, FE-SEM, LSV

Cu는 TSV(Through Silicon Via) 제조에서 중요한 역할을 한다. TSV 내에서 Cu 도금층의 평활도는 신호 전송, 접합 신뢰성 및 전기적 성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 균일하고 미세한 결정립을 갖는 고품질 Cu 도금층을 형성하는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 SPS(bis-(3-sulfopropyl)disulfide)와 Thioflavin T를 구리도금액에 첨가하여 함량 변화에 따라 Hull cell 테스트를 수행하였다. 실험 결과, SPS와 Thioflavin T의 병용이 결정립 미세화에 기여하며, 도금층의 표면 거칠기를 감소시키고 평활도를 향상시킴을 알 수 있었다. 이를 구체적으로 분석하기 위해 FE-SEM을 이용한 표면 관찰을 통해 도금층의 결정립 크기를 평가하고, LSV(Linear sweep Voltammetry)를 이용한 전기화학적 측정을 통해 첨가제에 의한 구리 이온 환원 반응의 변화를 분석하고자 한다. 추후 저전류에서의 광택을 한층 더 개선할 수 있도록 첨가제를 추가하여 도금층의 균일성과 물성을 더욱 향상시키는 방안을 모색할 예정이다. 이를 통해 구리 도금 공정의 최적화를 이루고, 우수한 도금 품질을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

[P7-4]

Zincate 아연-니켈 합금 도금에서 니켈 함량에 미치는 아민 착화제의 영향: 김수아, 오세빈*, 손인준 (경북대학교)

Keywords: 아연-니켈 도금, 아민착화제, 고내식성

아연-니켈 합금 도금은 우수한 내식성과 높은 내마모성을 갖추고 있어 자동차 부품, 항공기 구조재, 전자기기 등의 보호 코팅에 널리 사용된다. 특히, 아연-니켈 합금 도금에서는 니켈과 아연의 함량이 결정적인 역할을 한다. 니켈 함량이 약 10~15%일 때 가장

우수한 내식성을 나타내며, 이는 자동차 및 항공 산업에서 중요하게 요구되는 특성이다. 니켈 함량이 너무 낮으면 일반 아연 도금과 큰 차이가 없고, 너무 높으면 도금층이 경화되어 균열이 발생할 수 있어 적절한 조성이 필수적이다. 본 연구에서는 아민 착화제가 도금층의 Ni 함량과 미세구조에 미치는 영향을 분석하여 최적의 도금 조건을 도출하고자 한다. 도금층의 조성과 두께는 XRF 및 EDS를 이용하여 측정하였으며, 미세구조는 FE-SEM 및 XRD. 분석을 통해 확인하였다. 또한, 전기화학적 분석을 수행하여 아민 착화제 첨가가 도금층의 부식 저항 및 전기화학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구를 통해 아민 착화제가 아연-니켈 합금 도금층의 조성과 구조적 특성에 미치는 영향을 규명하고, 최적의 도금 조건을 확보함으로써 내식성과 내마모성이 향상된 도금 공정을 제안하고자 한다. 이를 통해 자동차 및 항공 산업을 비롯한 다양한 응용 분야에서 보다 안정적이고 신뢰성 높은 보호 코팅 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P7-5]

DC 마그네트론 스퍼터링 공정변수 제어에 따른 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 코팅의 미세조직 및 기계적 물성에 대한 연구: 이유진, 서진오, 현명우, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

Keywords: 스퍼터링 공정, 고엔트로피 합금, 다층구조 코팅, 미세조직, 기계적 물성

최근 높은 경도와 우수한 내마모성 및 내산화성을 바탕으로 한 고엔트로피 합금 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 고엔트로피 합금의 우수한 특성은 금속 코팅에 대한 연구에도 활용되고 있다. FCC 구조를 갖는 CoCrFeMnNi Cantor 합금은 우수한 연성을 지니며, 낮은 적층 결함 에너지로 인해 전위의 분해가 용이하고, 변형 과정에서 쌍정이 형성되기 쉬운 특성을 가진다. 이러한 특성으로 인해 나노쌍정이 형성되며, 이는 기계적 물성 향상에 기여할 수 있다. 이러한 특성을 기반으로 하여 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 코팅은 기존 합금 대비 높은 연성과 경도를 갖추고 있어 활발히 연구되고 있다. DC 마그네트론 스퍼터링을 이용한 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 코팅의 공정 최적화를 위한 선행연구에서 가스 유량 변화에 따라 나노 결정질에서 FCC 결정질 구조로 전이됨을 확인하였다. 이는 가스 유량이 증착 과정에서의 원자 이동과 결정 성장 속도에 영향을 미치기 때문으로 해석된다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 스퍼터링 주요 공정변수인 기판 온도 및 가스 유량을 조절하여 코팅층의 상 변화, 미세조직 및 기계적 물성을 분석하고, 각 미세조직 간의 상관관계를 규명하고자 한다. 코팅층의 결정구조 및 상 분석을 위해 X선 회절분석(XRD, X-ray Diffractometer)을 실시하였으며, 미세 구조를 분석하기 위해 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, Field Emission Scanning Electron Microscope)분석을 실시하였다. 코팅층의 화학적 조성을 분석하기 위해 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)분석을 실시하였으며, 기계적 특성을 측정하기 위해 나노압입시험(Nano-Indentation test)분석을 실시하였다

[P7-6]

PTFE 윤활제를 적용한 양극 산화 시편의 기계적 특성 향상과 그에 따른 마찰 저감 및 내마모성 개선 효과에 대한 연구: 박충효*, 이성훈*, 손인준* (경북대학교)

Keywords: AA7075 Al 합금 표면처리,양극산화,PTFE,윤활성,마찰계수

AA7075 알루미늄 합금은 항공우주, 자동차 및 정밀 기계 산업에서 널리 사용되며, 우수한 기계적 강도를 가지지만 마찰 및 마모 저항성이 부족하여 표면 개질이 필요하다. 본 연구에서는 PTFE 농도 변화에 따른 윤활 양극산화 피막의 특성을 분석하고, 최적의 공정 조건을 도출하고자 하였다. (Polytetrafluoroethylene(PTFE)는 매우 낮은 마찰계수와 넓은 온도 범위에서 안정적인 특성으로 인해 양극산화 공정에서 첨가제로 사용된다. PTFE의 마찰계수는 약 0.05~0.10으로 알려져 있으며, 사용 온도 범위는 -200ºC에서 260ºC까지 안정적이다.) 먼저, 다양한 온도와 시간 조건(5ºC 15분, 15ºC 15분, 5ºC 30분, 15ºC 30분)에서 양극산화를 진행한 결과, 15ºC에서 30분간 처리하였을 때 피막의 두께, 경도 및 광택도가 가장 우수한 특성을 나타내었으며, 이에 따라 본 연구에서는 이 조건을 기준으로 PTFE 농도를 변화시키며 실험을 수행하였다. 실험 결과, PTFE 농도가 증가할수록 피막의 경도가 증가하는 경향을 보였으며, FE-SEM을 통해 기공 크기 또한 변화하는 것이 확인되었다. 또한, PTFE 농도에 따른 광택도의 차이가 발생하는 것을 관찰하였다. EDS와 FT-IR 분석을 통해 형성된 피막 내에 PTFE가 존재함을 확인하였으며, 이를 통해 PTFE 첨가가 윤활 양극산화 피막의 구조 및 특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 본 연구는 PTFE가 포함된 윤활 양극산화 공정의 최적화를 위한 기초 연구로서, 향후 고마찰 환경에서의 적용 가능성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

[P7-7]

Ni-P 도금층의 인 함량 변화에 따른 특성 분석: 이수진*, 도쿠엉둥, 도안티엔안, 손인준* (경북대학교)

Keywords: Ni-P coating, Phosphorus content variation, Electroplating

Ni-P(니켈-인) 도금은 우수한 내식성, 내마모성 및 균일한 도금층 형성이 가능하며, 특히 반도체 산업에서 중요한 역할을 한다. Ni-P 도금은 칩 패키징, 리드 프레임, 커넥터 및 인쇄회로기판(PCB)과 같은 핵심 부품의 보호 및 성능 향상에 기여한다. 또한, 고온 및 부식 환경에서도 안정적인 성능을 유지해야 하는 부품에 적용되며, 전기적 신뢰성이 중요한 미세 회로에서도 활용된다. 본 연구에서는 Ni-P 도금의 인(P) 함량, pH, 도금 시간 등의 다양한 조건을 변수로 두어 실험을 진행하였다. 이후 SEM 및 EDS 분석을 통해 도금층의 미세구조를 관찰하였으며, 광택도 평가, XRD를 이용한 성분 분석, 비커스 경도 시험을 통한 기계적 특성 및 내식성을 평가하였다. 인 함량(0.1 g~20 g)에 따른 Ni-P 도금층의 경도 변화를 확인한 결과, 인 함량이 증가할수록 도금층의 경도가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 내식성이 향상되는 경향을 확인하였으며, 열처리 과정을 통해 기계적 특성이 개선됨을 분석하였다.

[P7-8]

에딜렌디아민을 착화제로 사용하는 Pd-Co 합금도금: 강다연, 신승희, 손인준* (경북대학교)

Keywords: Pd-Co 합금, 전기도금, 에틸렌디아민

Pd-Co 합금은 뛰어난 내부식성, 높은 기계적 강도, 그리고 우수한 전기적 특성을 지녀 반도체 리드프레임과 같은 고신뢰성 전자부품의 소재로 주목받고 있다. 기존에 상용화 된 테트라아민-팔라듐 염($Pd(NH_3)_4Cl_2$) 기반 시스템에서, 강한 암모니아 냄새와 암모니아 증발로 인한 pH 변동에 따른 도금 조성 불안정 문제가 있었다. 따라서 본 실험에서는 $Pd(en)_2SO_4$(에틸렌디아민-팔라듐) 복합체를 팔라듐 공급원으로 사용하고, Pd-Co 합금을 전기도금하여 Co 함량 변화 (0.25 g/L, 0.5 g/L, 1 g/L)에 따른 물성을 관찰하고자 한다. SEM을 이용한 표면 및 단면 구조 분석 결과, Co 농도에 따라 미세구조가 변화하며 균일한 박막이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. X선 회절분석에서는 피크 이동과 결정립 크기의 변화를 관찰하였으며, 미소경도 측정으로 Co 함량 증가에 따른 경도 증가를 확인하였다. 또한, 전기화학적 분석을 위해 3전극계를 활용하여 분극 곡선을 측정하였고, AAS 분석을 통해 이론석출량과 실제석출량을 계산하여 전류효율을 관찰하였다. 이러한 연구 결과는 $Pd(en)_2SO_4$ 기반 전해질이 안정적이고 환경 친화적인 Pd-Co 합금 전기도금욕으로 사용이 가능함을 보여준다.

[P7-9]

펄스-역펄스 전류를 사용한 Ni/Zn-Ni 다층 도금 및 후처리를 통한 고 내식성 구현: 윤소희, 신동민, 정민성 (국립부경대학교), 정태형, 이학철, 박영민 ((주)화신볼트산업), 이정훈* (국립부경대학교)

Keywords: 전기도금, Zn-Ni 합금, 내식성, 펄스-역펄스 전류

전기 아연-니켈(Zn-Ni) 합금 도금은 기존 아연 도금(Zn plating)보다 우수한 내식성을 제공하여 자동차, 해양 플랜트 산업 등 내식성이 요구되는 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. Zn-Ni 합금층에서 니켈 함량이 12~15 wt.%일 때, 순수 아연 도금보다 5~6배 높은 내식성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 특히, 해양 플랜트 산업에서 사용되는 부품은 고압, 고진동 및 염수 환경에 장기간 노출되므로, 강도 및 내부식성 확보가 필수적이다. 이러한 이유로 일반 아연 도금보다 기계적 특성과 내식성이 우수한 Zn-Ni 도금층이 주목받고 있다. 그러나, 단층 Zn-Ni 도금층만으로는 장기간 염수 및 전기화학적 부식 환경에서 충분한 내식성을 확보하기 어렵다. 이를 개선하기 위해 다층 구조의 Zn-Ni 도금층이 필요하다. 본 연구에서는 Zn-Ni 도금층의 내식성과 기계적 특성을 향상시키기 위해, 펄스-역펄스 전류 제어(Pulse-reverse current, PRC) 기법을 적용하여 동일한 도금욕에서 순수 Ni 층과 Zn-Ni 합금층을 번갈아 형성하는 다층 도금 공정을 개발하였다. 또한, 도금층의 내구성과 내식성을 극대화하기 위해 후처리 공정을 추가로 적용하였다. 다층 구조의 도금층에서는 전류밀도 제어를 통해 합금층의 니켈 함량을 조절할 수 있으며, 형성된 순수 Ni 층은 부식 환경에서 갈바닉 부식이 촉진되는 문제를 해결하는 데 기여할 것으로 기대된다. 주사전자현미경(SEM)과 에너지 분산 분광법(EDS)을 활용하여 도금욕 조성과 전류밀도에 따른 합금층 내 Ni 함량 변화를 분석하였으며, 그 결과 순수 Ni 층과 Zn-Ni 합금층이 번갈아 적층된 명확한 다층 구조가 형성됨을 확인하였다. 또한, 형성된 Zn-Ni 합금층은 내식성이 가장 우수한 것으로 알려진 γ 상(γ-NiZn)으로 구성되었으며, 동전위 분극 시험 및 염수 분무 시험을 통해 기존 단층 Zn-Ni 도금층과 내식성을 비교한 결과, 다층 도금층이 더욱 우수한 내식성을 보임을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 Ni/Zn-Ni 다층 도금 공정은 기존 단층 Zn-Ni 도금 대비 더욱 뛰어난 내식성과 기계적 안정성을 제공함을 입증하였으며, 후처리 공정을 추가함으로써 도금층의 장기적인 내구성을 유지할 수 있는 가능성을 제시하였다. 본 연구 결과는 극한 환경에서 사용되는 고내식성 부품 제조에 적용 가능하며, 친환경적이고 경제적인 도금 공정 개선을 위한 중요한 기술적 대안이 될 것으로 기대된다.

[P7-10]

기계학습을 이용한 동전위분극실험 분석: 정용주, 이주희, 장희진, 김희수* (조선대학교)

Keywords: 부식, 동전위분극실험, 분극곡선, 기계학습

동전위분극시험(potentiodynamic polarization test)은 금속 시편의 부식성을 평가하는 데 가장 널리 사용하는 기술이다. 부식전위는 기준 전극과 작업 전극 사이의 전위차로서 측정된다. 두 전극 사이에 전위차를 적용하고 이때 발생한 전류를 측정하게 된다. 이를 기록한 분극곡선으로부터, 부식전위와 부식속도, 공식전위, 부동태 현상 등을 판단할 수 있으므로, 금속 시편 표면에서 발생하는 다양한 과정을 이해하는 데 도움이 된다. 실험조건에 따른 분극곡선으로부터 산출한 부식전위와 부식속도 등은 충분한 데이터만 확보된다면 큰 어려움 없이 기계학습을 통한 예측이 가능하다. 동전위분극실험에서 얻어지는 분극곡선을 새로운 실험조건에서 고스란히 예측할 수 있다면, 훨씬 더 가치있는 데이터를 얻을 수 있을 것이라 판단하여, 본 연구에서는 분극곡선을 기계학습으로 예측하고자 시도하였다. 한 개의 분극곡선은 수백 개의 점으로 이루어져 있기 때문에, 본 연구에서의 목표는 데이터 포인트 집단의 예측이라 할 수 있다. 본 연구에서는 인공신경망(artificial neural network)의 딥러닝(deep learning)을 이용하여 숫자 데이터 포인트 집단으로서의 분극곡선을 예측하고자 하였다. 이에 분극곡선 예측의 기계학습에 대한 가능성과 한계에 대하여 고찰하였다.

[P7-11]

Ni용사 클래딩의 고온 용융염에서의 부식 특성: 윤지현*, 김채원 (한국원자력연구원)

Keywords: 용융염 원자로, 용사, Ni, 인코넬 625, Type 316H

650°C에 이르는 고온의 용융염을 냉각재로 사용하는 용융염 원자로(MSR) 의 주요 부품소재인 Type 316H 스테인리스강의 부식 문제를 해결하기 위해 효과적인 방법으로 모재의 표면에 내식성이 우수한 재료를 피복하는 공정이 국내외에서 연구되고 있다. 적합한 피복재로는 니켈(Ni) 및 인코넬 625 등의 니켈기 합금이 적합할 것으로 평가 받고 있다. 내식성 금속 코팅 기술에는 다양한 화학적, 물리적 방법이 있으나 기술의 성숙도 측면에서는 용접에 의한 오버레이(overlay)와 레이저를 이용해서 모재의 표면에 부식 저

항성 금속을 적층하는 레이저 클래딩(cladding)이 대표적이다. 그러나 용접 오버레이와 레이저 클래딩과 같은 금속 피복 공정은 공히 내식성 금속에 열적 에너지를 가해 용융시켜 주 구조재 금속에 적층하는 공정으로서 필연적으로 구조물 모재는 고열에 의해 일부 용해, 재응고, 미세구조 변화 등의 열영향을 받는 문제점이 있다. 또한, 용접이나 레이저 클래딩은 수백 um 이상의 액적을 적층하여야 하는 특성상, inner vessel이나 소구경 배관 등의 내부식 코팅에는 적합하지 않은 데 비해 용사는 수십 um 이하 두께로 적층할 수 있으므로 유용한 방식 코팅 방법이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 클래딩이 모재에 미치는 영향이 상대적으로 적으며 또한 박막으로 도포가 가능한 고속 화염 용사(HVOF, High Velocity Oxygen Fuel) 공정으로 Ni-201 및 인코넬 625를 Type 316H 스테인리스강 시편의 모든 면을 클래딩한 후 NaCl+$MgCl_2$ 용융염에서 100 시간동안 침지시험을 하여 클래딩 전후의 부식속도를 비교 평가하고 미세조직을 분석하였다.

[P7-12]

대면적 탄소섬유 부직포의 직접 연속전기도금 공정 적용 가능성 평가 연구: 진광혁, 최윤일* (한국생산기술연구원)

Keywords: Carbon Fiber Fabrics, Nickel, Electroplating process, Microstructure

탄소섬유 부직포(Carbon Fiber Fabrics)는 경량성과 높은 강도를 바탕으로 전자 기기, 자동차, 항공 등 다양한 산업 분야에서 전자파 차폐(Electromagnetic Shielding) 소재로 활용되고 있다. 그러나 탄소섬유 자체는 전기 전도성이 낮아 전자파 차폐 성능이 제한적이며, 이를 개선하기 위해 금속 도금 공정을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 공정에서는 무전해도금(Electroless Plating)과 전기도금(Electroplating)을 순차적으로 수행한 후 단섬유 형태로 절단·분산하여 부직포를 제작하는 방식이 주로 사용되었으나, 공정이 복잡하고 고비용이며 생산 효율성이 낮다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 탄소섬유 부직포를 먼저 제작한 후 무전해도금 공정을 생략한 직접 연속전기도금 기술의 적용 가능성을 제시하고자 하였다. 특히, 자체 설계한 전기도금 셀(Electroplating Cell)을 적용하여 기존 전기도금 공정에서 양극과 가까운 부분에만 집중적으로 형성되던 도금층을 탄소섬유 부직포의 두께 방향 전체적으로 균일하게 형성할 수 있는지 검증하였다. 실험은 전기도금 시간을 1분, 3분, 5분으로 설정하여 수행하였으며, FE-SEM 단면 분석 결과 도금층의 두께는 평균 1~3 μm로 균일하게 형성되었음을 확인하였다. 또한, EDS Mapping을 통해 Ni이 탄소섬유 부직포의 두께 방향 전체적으로 균일하게 분포하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 부직포 형성 후 전기도금 방식이 기존 단섬유 도금 방식 대비 공정 단순화, 기계적 강도 유지, 도금 균일성 향상 등의 장점을 가질 가능성이 높음을 검토하였다. 향후 본 기술을 더욱 최적화함으로써 대면적 탄소섬유 부직포의 연속 전기도금 공정 개발 및 실용화 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

[P7-13]

고내구성 전조 다이스 제조를 위한 하이브리드 코팅 공정 최적화에 관한 연구: 김왕렬 (한국생산기술연구원), 이학철 (화신볼트산업), 박영민 (화신하이테크), 허성보* (한국생산기술연구원)

Keywords: 전조금형, 아크이온플레이팅, 내마모, 발전볼트

볼트(Bolt)는 다양한 기계 부품 산업에서 필수적인 체결 요소 중 하나의 부품으로 산업의 고도화와 함께 볼트의 사용은 더욱 증가하여 기계적 설계와 구조적 혁신을 가능하게 한 가장 중요한 핵심 파트 중 하나로 여겨지고 있다. 최근에는 초고온, 초고압과 같은 가혹한 환경에서의 내구성 높은 볼트에 대한 요구가 증가하고 있으며 발전, 해양 시추, 항공 산업에 사용되는 볼트는 높은 압력과 온도 그리고 부식 환경 등에 견딜 수 있어야 하므로, 현대의 볼트는 단순한 체결류가 아닌 고부가가치 기계 요소 부품으로 많은 연구가 진행 중이다. 특히, 발전소 터빈 하우징(Turbine housing)에 사용되는 볼트류는 소모품임에도 불구하고 고온 내식성, 고온 경도 및 강도가 우수한 것이 특징으로 대별된다. 이러한 볼트를 만들기 위해서는 내식성과 고온 강도가 뛰어난 재료 선택, 제조 공정 등이 개선되어야 한다. 그 중 전조공정은 볼트에 나사산을 만드는 공정으로 가압을 통해 나사선을 제조하는 기법으로 작업이 간단하며 소음이 제거되어 양산에 적합한 공정이다. 또한 칩(Chip)의 발생을 억제하여 소재의 Loss를 줄일 수 있으며 정밀도가 균일한 장점이 있다. 하지만 높은 하중으로 나사를 성형하는 전조 금형은 소재 유입 과정 중 발생하는 마찰 저항에 의해 금형 표면에 소착, 긁힘, 탈락, 깨짐, 균열 등의 파손이 발생되어 진다. 이는 공정 시 제품의 불량, 생산성 저하 등의 문제가 빈번히 발생 되며 금형 수명 개선에 대한 표면처리가 필요한 부분이다. 따라서 본 연구에서는 금형의 물성 제어와 수명 향상을 위해 열표면처리와 하이브리드 코팅 기술을 응용하여 최적화 공정을 연구하고 기계적물성, 미세구조변화 등을 고찰하여 금형 수명 향상에 미치는 주요 인자에 대한 연구를 수행하고자 한다.

[P7-14]

표면특성 제어를 통한 질화물/산화물 코팅간의 기계적 물성 상관관계 고찰 :김왕렬, 박인욱, 김준호, 허성보* (한국생산기술연구원)

Keywords: 플라즈마 코팅, 표면조도, 접촉각, 밀착력

난삭재의 활용 분야는 우주항공, 자동차 및 바이오 산업 등 고강성, 고품질의 소재를 요구하는 분야에서 사용되고 있으며, 그 비중이 계속해서 증가하고 있다. 특히, 항공 및 자동차 산업에서는 연료절감을 위한 고강도 경량소재, 고장력 소재의 사용 비율이 급격히 증가하고 있으나, 이러한 첨단 소재들은 절삭가공이 어려운 고강성 및 고인성 소재로 가공성이 매우 낮은 특성이 있다. 그 동안 다성분계 질화물 코팅 및 다층구조로 경도 향상 중심의 코팅 기술이 발전해왔으나 난삭재 가공시 피삭재를 통한 열 전달이 어려워 절삭공구 표면의 과열로 인해 공정중 산소의 코팅층 내부 확산으로 표면산화가 가속화되고 질화물 및 모재의 취성 파괴가 발생하게 된다. 이에 질화물 상부에 산화물 코팅 공정을 이용하여 복합 코팅막을 형성하고 계면에서의 변화와 기계적 물성 향상을 위한 연구를 추진 하고자 한다. 특히 질화물 코팅과 산화물 코팅은 서로 결합방식이 상이하고 층간 물질이 다르기 때문에 밀착력이 떨어질 우려가 있어 이러한 원인을 제거하고 높은 밀착력을 확보하기 위한 공정을 최적화 하고자 한다. 금속 표면을 제어하고 질화막

형성 후 조도를 개선함에 따라 기계적 물성 변화를 고찰하여 계면 특성과 코팅막의 기계적 물성, 내마모도, 밀착력 변화와의 상관관계를 고찰 하고자 한다

[P7-15]

Surface Modification of Ti Doped with Hydroxyapatite Powders by Hydrothermal Process: Y.J. Jo and W.H. Lee* (Faculty of Nano-technology and Advanced Materials Engineering, Sejong University)

Keywords: hydroxyapatite, hydrothermal process, titanium, surface modification, nucleation

In this study, relatively simple process, hydrothermal treatment, was applied to the surface modification of Ti, which can coat new HAp crystals on the Ti surface. Optimum processing conditions for the hydrothermal treatment of Ti samples mechanically doped with HAp have been established for the coat of HAp on the Ti surface. It was found that the HAp doped on the Ti surface was recrystallized in the form of nano-scaled rod during hydrothermal treatment. The principle of mechanical doping process and mechanisms for the nucleation, nuclei growth, crystallization, and crystal growth of HAp have been proposed in this study.

[P7-16]

아크 이온 플레이팅을 적용한 질화물 코팅 기계적 특성 및 수명 평가: 김영석*, 정용, 신연철 (에이피스 주식회사)

Keywords: 아크 이온 플레이팅, 질화물, 표면조도

최근 다양한 산업 분야에서 핵심부품의 경량화 및 첨단화가 진행됨에 따라 난삭재 및 고정밀 가공에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히 자동차, 항공우주, 의료 등 첨단 산업 분야에서 고정밀 가공의 중요성이 부각되고 있다. 절삭공구에 적용되는 하드코팅 기술은 공구의 수명 향상과 가공 결과물의 품질에 직접적인 영향을 미치는 핵심 기술로, 아크이온 플레이팅 코팅 공법이 널리 활용되고 있다. 아크 이온 플레이팅 기술은 높은 이온화율과 이온 에너지로 인한 빠른 증착 속도, 우수한 밀착력과 고경도화에 유리, 복잡한 형상의 부품에도 균일한 코팅층 형성이 가능하여 해당 산업분야에서 가장 널리 사용 되고 있는 증착 방법이다. 하지만 방전 메카니즘으로 인해 발생되는 Drop-let이 코팅에 증착되어 막에 결함을 유발하고, 이는 부품의 수명 감소 및 가공물의 품질 저하로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 아크 이온 플레이팅 공정 변수 제어에 따른 질화물 코팅의 특성을 분석하였다. 또한, 이를 절삭공구에 적용하여 수명 테스트를 실시하였다. 실험 결과를 바탕으로 아크이온 플레이팅 공정의 최적화 방안과 이에 따른 코팅막의 특성 변화, 그리고 절삭공구의 성능 향상에 대해 논의 하고자 한다. 감사의 글 이 연구는 중소벤처기업부의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원 (RS-2024-00510381, 고정밀 절삭 가공을 위한 Arc Ion Plating용 이온 에칭 기술 및 질화물 코팅 공정 기술 고도화)에 의하여 수행 되었습니다.

[P7-17]

Ni-Cr-Mo계 금속의 전해연마 특성에 미치는 인산 계열 전해액 조성의 영향: 양현석, 정우철, 한덕현, 최광수, 공만식* (고등기술연구원)

Keywords: Ni-Cr-Mo, 전해연마, 인산 계열 전해액, 표면 거칠기, 전류-전압 특성

Ni-Cr-Mo계 합금은 우수한 내식성과 기계적 특성을 갖추어 항공, 화학, 의료 산업 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 연구에서는 Ni-Cr-Mo계 금속의 전해연마(Electropolishing, EP) 공정에서 인산 계열 전해액의 적용성을 평가하였다. 특히, 인산(Phosphoric acid) 비율을 조정한 다양한 전해액 조성을 비교하여 표면 거칠기(Ra), 전류-전압 특성(IV 곡선), 전해연마 속도 및 표면 상태를 분석하였다. 실험에는 인산:황산:물의 비율을 6:3:1, 4:5:1, 5:4:1, 7:2:1, 8:1:1로 조정한 전해액을 사용하였으며, 고정된 온도 및 시간 조건에서 전해연마를 수행하였다. 실험 결과, 7:2:1 조성의 전해액에서 높은 전해연마 속도와 균일한 표면 형상을 확보할 수 있었으며, 전해액 조성에 따른 최적 조건을 도출하였다. 또한, 전류-전압 특성 분석을 통해 전해연마 과정에서의 전기화학적 반응 메커니즘을 규명하였다. 본 연구 결과는 Ni-Cr-Mo계 금속의 고품질 표면 가공을 위한 전해연마 공정 최적화에 기여할 수 있으며, 다양한 산업 분야에서의 응용 가능성을 제시한다. [Acknowledgement] 본 연구는 산업통산자원부/한국산업기술기획평가원의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 RS-2024-00431424)

P8 : 철강-압연,강종개발,후처리
Room 3층 로비, 4월 23일

[P8-1]

붕소 함유 스테인리스강의 전자빔용접부 및 열영향부에 미치는 용접후열처리의 영향: 김중훈 (한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 한종민 (한국생산기술연구원), 전종배 (동아대학교), 김병준, 김형찬, 남대근 (한국생산기술연구원), 박성수* (울산과학기술원), 김병구* (한국생산기술연구원)

Keywords: 붕소 함유 스테인리스강, 전자빔용접, 용접후열처리, 미세조직, 보라이드

붕소는 넓은 에너지 범위에서 높은 중성자 흡수 단면적을 가져 원자력 발전소의 제어봉이나 냉각수에 용해되어 중성자 속도를 조절하는 용도로 널리 사용된다. 또한, 사용후핵연료 습식 보관용 랙 및 건식 저장용 캐스크의 바스켓에 붕소가 함유된 복합소재를 부착해서 핵분열을 억제하는 역할을 하고 있다. 하지만 이러한 붕소 함유 복합소재들은 강도와 인성이 낮아 구조용 소재로는 적합하지 않다. 이러한 한계를 극복하기 위해 borated stainless steel (BSS)가 개발되었다. BSS는 스테인리스강에 붕소를 첨가한 소재로 붕소의 우수한 중성자 흡수능과 스테인리스강의 뛰어난 기계적 특성을 동시에 갖추고 있어서 사용후핵연료 저장 용기 및 구조물의 핵심 소재로 주목받고 있다. 특히, BSS를 사용해 자체적인 구조물을 제작한다면 기존의 중성자 흡수체를 부착하는 공간이 필요하지 않아 동일 면적 대비 더 많은 사용후핵연료를 저장할 수 있기 때문에 저장 효율을 크게 향상시킬 수 있다. 기존에는 BSS를 리벳이나 볼트를 사용해 구조물에 부착하는 방식이 주로 사용되었으나, 이는 수작업에 의존하기 때문에 제작 기간이 길고 자동화가 어렵다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 용접 기술이 필수적으로 요구되며, 특히 BSS 용접 시 발생하는 Fe-B 저융점 공정상과 열영향부의 액화 균열 문제를 해결하는 것이 중요하다. 이러한 문제를 최소화하기 위해 고에너지 저입열 용접 기술의 적용과 관련된 연구가 진행되고 있으며, 그 중 전자빔용접은 에너지 밀도가 높아 열영향부를 최소화할 수 있는 유망한 기술로 평가된다. 또한, 용접후열처리는 용접부의 잔류응력 제거, 응력집중 완화 및 미세조직 안정화를 통해 기계적 특성을 향상시키는 가장 효율적인 방법이다. 그러나 BSS에 전자빔용접을 적용한 연구는 부족하며, 용접후열처리 조건에 따른 용접부 및 열영향부의 미세조직 변화를 심층적으로 분석한 연구는 존재하지 않는다. 본 연구는 BSS에 전자빔용접을 적용하고 용접후열처리 조건에 따라 용접부와 열영향부의 미세조직에 미치는 영향을 체계적으로 분석하는 것을 목표로 한다. ASTM A887의 304B3급 BSS에 전자빔용접을 수행한 후 다양한 온도(400ºC, 800ºC, 1200ºC)와 시간 (1, 4, 24, 100, 200 h)에서 용접후열처리를 적용하였다. 그 후 용접후열처리를 적용하지 않은 시편 (As-welded)과 비교해 유의미한 결과를 도출해냈다. Macrostructure에서는 모든 조건에서 열영향부는 관찰되지 않았다. 400ºC, 800ºC 조건에서는 열처리에 따른 조직 변화가 관찰되지 않았으나, 1200ºC 조건에서는 열처리 시간이 길어질수록 용접부가 점차 희미해지며 모재와의 명암차가 줄어드는 현상이 관찰되었다. OM 관찰은 열영향부를 중심으로 모재와 용접부를 함께 분석했다. 400ºC, 800ºC 조건의 모재에서는 오스테나이트 기지상 전체에 걸쳐 광범위하게 보라이드가 분포되어 있었으며, 열영향부에는 boride를 감싸고 있는 γ-boirde 공정상이 관찰되었다. 용접부는 dendrite arm 사이에 γ-boride 공정상이 형성되어 있었다. 1200ºC 조건에서는 열영향부가 사라짐과 동시에 용접부의 dendrite가 파괴되고 boride가 구상화되기 시작하였다. 열처리 시간이 길어짐에 따라 boride의 크기가 커지는 조대화 현상이 관찰되었고, 100시간 이후부터는 모재와 용접부의 boride 크기가 동일해져 구분이 불가능했다. SEM-EDS를 통해 400ºC, 800ºC 조건의 열영향부에서 관찰된 boride를 감싸고 있는 γ-boride 공정상과 1200ºC 조건의 열처리 시간에 따른 용접부 boride의 구상화 및 조대화 현상을 이해하고자 노력했다. 400ºC, 800ºC 조건의 열영향부에서 관찰되는 boride를 감싸고 있는 γ-boride 공정상은 용접열에 의한 영향이 공정점보다는 높지만, 고상선보다는 낮은 온도를 가질 때 국부적인 액화가 일어나는 constitutional liquation 현상으로 설명이 가능하며, 1200ºC 조건의 용접부에서 열처리 시간이 증가할수록 boride의 구상화 및 조대화 현상은 Gibbs-Thomson effect로 설명이 가능했다.

[P8-2]

원자로 격납용기 소재의 열처리 후 carbide 크기 변화에 따른 충격 인성 분석: 박동준, 유진영, 천세호, 이성호, 송종한, 이승엽, 이정훈 (부산대학교), 이진모, 이채훈 ((주) 태웅), 이태경* (부산대학교)

Keywords: ex) 철강, 탄소강, 열처리, 탄화물, 충격인성

원자력은 비용 효율성, 청정성 및 지속 가능성으로 인해 전 세계 에너지 산업에서 지속적으로 주목받고 있으며, 이에 따라 효과적인 방사성 폐기물 처리가 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히, 원자력 발전소에서 발생하는 사용 후 연료는 긴 반감기와 높은 방사선 강도를 가지므로 신중한 처리가 요구된다. 원자로 격납용기에 사용되는 SA350LF3 강재는 저온에서의 충격 인성을 확보하기 위해 열처리가 적용된다. 열처리는 고온에서 가열한 후 급속 냉각하는 quenching과, 이후 특정 온도로 재가열하는 tempering으로 구성된다. Quenching을 통해 강도가 증가하지만 동시에 취성도 함께 증가하므로, tempering을 통해 잔류 응력을 완화하고 미세조직을 안정화하는 과정이 필요하다. 그러나 이 과정에서 carbide가 임계 크기를 초과하여 석출될 경우, 조직 내 취약한 경계가 형성되어 취성이 증가하고 충격 인성이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 quenching 횟수와 시간의 변화가 탄화물의 크기와 분율에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위하여 SA350LF3 강재에 대해 quenching 횟수와 시간을 조절하여 세 가지 열처리 조건을 설정하고, 저온에서의 drop weight test를 통해 각 열처리 조건에서의 파단 여부를 온도에 따라 평가하였다. 또한, scanning electron microscopy(SEM) 및 electron backscatter diffraction(EBSD) 분석을 수행하여 열처리된 시편의 미세조직을 정량적으로 평가하였다. 이러한 결과를 선행 연구에서 수행된 통계적 분석, drop weight test, tensile test 및 nanoindentation 결과와 연계하여, 열처리 조건에 따른 carbide 크기와 분율이 충격 인성에 미치는 영향을 규명하였다.

[P8-3]

고압수소 및 전기화학적 수소주입에 따른 고강도 API X80 라인파이프강의 수소취성 비교: 오동규 (서울과학기술대학교), 박재영 (한국표준과학기술연구원), 유용재, 김규태 (현대제철), 황병철* (서울과학기술대학교)

Keywords: API X80 linepipe steel, Gaseous hydrogen, Electrochemical hydrogen, Hydrogen embrittlement, Notch tensile strength

최근 탄소배출로 인한 환경문제를 해결하기 위해 수소에너지가 대체 에너지로 주목받으면서 수소의 저장 및 운송 인프라 구축에 대한 프로젝트가 국내외적으로 진행되고 있다. 유럽의 EHB (Europe hydrogen backbone) 프로젝트와 국내 수소배관망 구축 계획이 대표적이며, 이와 같이 대량의 수소를 장거리 운송이 가능한 고압수소용 라인파이프강 적용이 큰 관심을 받고 있다. 그러나 라인파이프강이 수소환경에 노출될 경우 연성이나 파괴인성, 피로특성이 감소함으로써 조기파단이 발생하는 수소취성이 일어날 수 있다. 수소는 주입원, 주입온도, 전류밀도 등 주입 조건에 따라 흡착 및 내부로의 확산 거동이 다르게 나타나기 때문에 다른 수소취성 양상을 보일 수 있다. 따라서 적용하고자 하는 다양한 환경에 대해 정확한 수소취성 저항성 지표 (hydrogen environment embrittlement index, HEE index)를 얻기 위해서는 수소주입 조건에 따른 수소취성 양상 변화를 명확히 이해하고 실험을 설계하여야 한다. 본 연구에서는 고강도 API X80 라인파이프강에 대하여 다양한 온도 및 전류밀도 조건에서 수소를 전기화학적으로 주입하거나 고압수소가스 환경에서 저속 변형률 시험 (slow strain-rate test, SSRT)을 수행하여 노치인장강도비 (relative notch tensile strength, RNTS)로 수소취성을 평가하였다. 또한 다양한 수소환경에서 시험된 시편의 파면 및 파단면을 비교 분석하여 수소 주입원에 따른 수소취성 변화를 고찰하였다.

[P8-4]

초고강도 단조 마르텐사이트계 경량철강에서의 페라이트 제어를 통한 미세조직-물성 상관관계 분석: 정현, 이상원 (고려대학교), 고석우, 황선욱 (세아베스틸), Alireza Zargaran (포항공과대학교 (GIFT)), 손석수* (고려대학교)

Keywords: 경량철강, 단조강, 마르텐사이트, 변형거동

마르텐사이트 기반의 미세조직을 갖는 경량철강은 높은 강도와 더불어 알루미늄의 경량 효과로 높은 비강도를 확보할 수 있다. 그러나 알루미늄은 소재의 밀도를 효과적으로 감소시키는 반면, 조대한 페라이트 형성과 오스테나이트-페라이트 이상 온도 범위를 확장시킨다. 더 높은 경량화를 위해 알루미늄 함량을 증가시키면 페라이트 형성은 피하기 어려우며 추가적인 강화가 저해된다. 따라서, 마르텐사이트 기반 미세조직에 페라이트를 포함하면서도 높은 강도와 연성을 확보하기 위해서는 페라이트의 분율, 크기, 그리고 분포가 기계적 특성과 변형 거동에 미치는 영향에 대해 파악하는 것이 중요하다. 특히, 상간 상호작용을 이해하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 어닐링 온도를 제어하여 마르텐사이트, 페라이트, 잔류 오스테나이트로 구성된 미세조직을 구현하였다. 마르텐사이트 기지는 초고강도 수준인 1.8 GPa 의 인장강도를 보유할 수 있게 해주며, 균일하게 분포된 미세 페라이트(~17%)는 자체적인 소성변형에 더해 마르텐사이트의 유효변형률을 낮춰 잔류 오스테나이트의 변형유기변태 현상을 늦추며 가공 경화 능력을 향상시킨다. 이러한 전략은 페라이트의 존재를 적극적으로 활용하여 초고강도와 충분한 연성을 확보할 수 있는 이점을 제공할 수 있다.

[P8-5]

Mo과 V이 첨가된 템퍼드 마르텐사이트강의 수소취성에 미치는 오스테나이트화 온도의 영향: 이유진, 김상규 (서울과학기술대학교), 김용우, 정환교 (포스코), 황병철* (서울과학기술대학교)

Keywords: Hydrogen embrittlement, Tempered martensitic steels, Austenitizing temperature, Undissolved carbide

템퍼드 마르텐사이트강은 높은 강도와 인성을 갖춘 구조용 소재로 널리 활용되지만, 수소취성에 취약할 수 있어 이에 대한 연구가 지속적으로 이어지고 있다. 특히, 오스테나이트화 온도는 결정립 성장 및 미용해 탄화물의 형성과 분포를 조절하는 중요한 공정 변수로, 이는 미세조직의 안정성과 수소 확산 및 트랩 거동에 직접적인 영향을 미친다. 이로 인해 미용해 MC 탄화물의 경우 입자 크기에 따른 기지와의 계면 관계에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 미용해 탄화물과 수소의 상호작용에 대한 연구는 아직 미흡하므로 이에 대한 체계적인 분석이 요구된다. 본 연구에서는 Mo과 V이 첨가된 템퍼드 마르텐사이트강에 대하여 오스테나이트화 온도를 890ºC~950ºC로 조절하여 시편을 제조한 후 미세조직 및 석출 거동을 비교 분석하였다. 또한 오스테나이징 온도 변화에 따른 미용해 탄화물의 형성 및 분포를 SEM, TEM 및 EBSD를 통해 평가하였으며, 전기화학적 수소 주입 후 저속변형률시험을 통해 수소취성에 미치는 오스테나이트화 온도의 영향을 체계적으로 분석하였다.

[P8-6]

S31803 듀플렉스 스테인리스강의 어닐링 온도에 따른 수소 취성 민감도 변화: 권동영, 강지현* (영남대학교)

Keywords: Duplex stainless steels, Annealing temperature, Microstructure, Tensile properties, Hydrogen embrittlement

듀플렉스 스테인리스강 (DSS)은 오스테나이트와 페라이트 2상 조직으로 구성되어 오스테나이트계 스테인리스강 대비 항복 강도와 내부식성이 우수하며, 페라이트계와 오스테나이트계 스테인리스강 사이의 인성을 나타낸다. 이러한 우수한 특성을 바탕으로 선박, 담수화 설비, 석유 화학 산업, 원자력 발전소 및 열교환기 등의 가혹한 환경에서 주로 사용된다. 그러나 이와 같은 환경에서는 수소취성 (hydrogen embrittlement, HE)과 이에 따른 수소 유기 균열 (hydrogen-induced cracking, HIC)에 의해 연신율 및 인성의 감소와 예기치 않은 조기 파단을 초래할 수 있다. 따라서, 활용처에서의 안전성을 확보하기 위해 DSS의 수소 취성에 미치는 미세조직의 영향에 대한 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 S31803을 네 가지 온도에서 어닐링하여 미세조직에 차이를 주었다. 미세조직 분석 후, 3% NaCl + 0.3% NH4SCN + H2O 용액을 사용하여 in-situ 저속 인장 시험 (SSRT)을 통해 수소 취성을 평가하고, 열탈착 분석 (TDA)을 통해 시편 내 수소 함량을 정량화 하였다. 이를 통해 DSS의 미세조직과 수소 취성 간의 연관성을 고찰하였다.

[P8-7]

바나듐 첨가 고망간강의 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화: 양승우, 송호정 (동아대학교), 박시욱, 김용진 (국방과학연구소), 박건우 (울산과학기술원), 이동호 (포스코 기술연구원), 장재훈 (한국재료연구원), 전종배* (동아대학교)

Keywords: 고망간강, 탄소, 바나듐, 기계적 물성, 열처리 효과

고망간강 (High-Mn Steel)은 높은 항복 및 인장강도와 내마모성을 갖추고 있어 건설, 조선 및 자동차 산업 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 또한 고망간강의 기계적 물성을 향상시켜 더 많은 산업 분야에 적용하려는 많은 연구들이 진행되고 있고, 특히 후물재 및 열연재의 기계적 성질 개선에 대한 연구가 최근 주목받고 있다. 이에 본 연구에서는 0.4 및 0.5 wt.%V이 첨가된 고망간강의 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화를 분석하였다. 미세조직 분석을 위해 OM, XRD를 사용하여 미세조직 및 안정상 형성 거동을 분석하였으며, EBSD를 사용하여 결정립의 방위, 형상 및 크기 등을 분석하였다. 인장시험을 통해 항복강도, 인장강도, 연신율을 분석하였으며, 충격시험을 통해 충격인성을 분석하였다. 파면과 파단면은 SEM을 이용하여 분석을 진행해 파괴기구를 해석하였다. 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 열처리 온도에 따른 탄소 및 바나듐이 첨가된 고망간강의 미세조직 및 기계적 물성의 변화에 대해 고찰하였다.

[P8-8]

Study of Corrosion Resistance of Cold Forged 316 Stainless Steel in Molten FLiNaK Salt: MinSung Hong (Korea Atomic Energy Research Institute, University of California at Berkeley), Shmuel Samuha, and Peter Hosemann* (University of California at Berkeley)

Keywords: Molten Salt, Corrosion, Cold Forge, Intergranular Corrosion, FLiNaK

This study investigated the influence of cold forging (CF) on the corrosion behavior of 316 stainless steel (SS) in molten FLiNaK salt at 700ºC during 48 hours. Corrosion was observed in two distinct regions on the CF samples: one near the surface and another characterized by intergranular corrosion (IGC). Lower CF levels (5–30%) exhibited more pronounced IGC, whereas the 50% CF sample showed reduced IGC and the shallowest overall corrosion depth. These differences were attributed to the increased density of grain boundaries, which served as potential initiation sites for corrosion, with certain grain boundaries facilitating chromium dissolution and intensifying IGC.

[P8-9]

슈퍼 듀플렉스 내식강의 부식특성에 미치는 미소원소의 영향: 한윤기, 김정민* (한밭대학교)

Keywords: duplex stainless steel, corrosion, electrochemical, elements

슈퍼 듀플렉스 내식강은 기존 듀플렉스 내식강에 비해 불균일 저항성 등이 개선된 소재로서 해양산업 등에서의 수요가 증가하고 있으나 다량의 원소들이 첨가되어 있다는 특성으로 인하여 시그마상과 같은 석출상의 형성이 용이하다. 이러한 석출상은 내식강의 기계적 성질 및 내식성을 크게 저해할 수 있으므로 화학조성과 열처리 공정을 최적화하는 것이 중요하다. 저자들은 S32750 슈퍼 듀플렉스 내식강에 다양한 합금원소를 첨가하여 부식특성에 미치는 연구를 수행하고 있으며, 본 연구에서는 Ti+Cu 및 Ti+Cu+Ce 미소합금원소 복합첨가로 인한 조직과 부식특성의 차이를 조사하는데 중점을 두었다. 기본적인 제조공정의 경우 1100 oC 고용화 열처리 후 압연을 수행하고, 추가적으로 850 또는 950 oC에서 최종 열처리하는 조건이며, 기본 합금조성 대비 0.2%Ti 첨가를 통해 부식특성이 확실히 개선되는 결과가 관찰되었다. 이것은 표면산화막에 대한 XPS분석 결과 Ti첨가로 인하여 피막의 두께 및 Cr농도가 증가하였기 때문으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 반복적인 진공 재용해 공정으로 인해 Ni의 함량이 크게 변화될 수 있음을 확인할 수 있었다.

[P8-10]

극저탄소강의 항복 거동에 미치는 Nb와 Ti의 영향에 대한 연구: 원정훈, Tram T. T. Trang (포항공과대학교친환경소재대학원), 조재영 (포스코), 서인식 (H2 Corporation), 허윤욱* (포항공과대학교친환경소재대학원)

Keywords: Damper steel, Scavenging, Continuous yielding

항복 댐퍼 (Yielding dampers)는 항복 에너지를 분산시키는 금속 장치로, 소성 변형을 통해 에너지를 분산시켜 구조물에 가해지는 손상을 줄여준다. 이를 위해서는 낮은 항복강도, 높은 연신율, 연속 항복 현상이 요구된다. 한편 상업적으로는 순수한 철을 주조하는데 한계가 있어서 탄질화물을 형성시켜 강 중에 잔존하는 침입형 원소들(C,N)을 제거하는 방식이 사용되어 지고 있다. 본 연구에서는 Nb 과 Ti 첨가가 극저탄소강의 항복거동에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 특히, Nb과 Ti가 강의 미세조직, 기계적 특성 및 항복거동에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 강의 연속항복은 주로 조대한 결정립에서 발생하기 때문에, 첨가원소 첨가에 따른 불연속에서 연속항복으로의 전이가 나타나는 임계 결정립 크기를 알아보는 실험을 진행하였다. 또한, 미세조직 분석을 통해 강 중에 형성된 석출물의 크기와 분율을 조사하여 석출물로 소비된 탄소 및 질소 함량을 계산하였다. 결정립계의 편석 거동은 Atom Probe Tomography를 통해 해석하였다. 확보된 정보를 바탕으로 Nb과 Ti첨가가 극저탄소강의 항복거동이 미치는 영향을 이해하고자 하였다.

[P8-11]

첨단 분말야금 기술로 탄생한 고성능 압연롤 - 개재물 제어가 핵심: 정휘근, 성기창, 길희진, 정야호, 김한수*, 이원혁* ((주)코나솔)

Keywords: 분말야금, 압연롤, 개재물, 철강

철강산업에 사용되는 압연롤은 크게 주조압연롤과 분말야금압연롤로 대별된다. 제조비용의 경제적인 잇점 때문에 주조압연롤이 범

용으로 사용되고 있지만, 내마모성, 내피로성, 고강도가 요구되는 심가공 압연공정에는 분말야금 압연롤이 선택적으로 사용되고 있다. 분말압연롤 제조에 사용되는 철강기지복합재는 대기가스아토마이저를 사용하여 제조하는데, 이러한 제조공정 과정에서 생성된 개재물이 압연롤의 내피로특성에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 개재물의 성분을 제어하여 제조한 제품의 특성을 조사한 결과 개재물의 함량은 비슷하더라도 개재물의 융점이 높을수록 피로물성이 취약함을 확인하였다. 이를 바탕으로 합금 조성에 따른 적절한 개재물 제어를 통해 피로도를 크게 향상시켜 분말압연롤의 품질과 수명을 연장함으로써 철강산업의 경쟁력을 높이는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

[P8-12]

VC 석출 강화 분말야금압연롤 - 미래 금속 산업을 선도하는 혁신 솔루션: 정야호, 성기창, 길희진, 정휘근, 김한수, 이원혁* ((주)코나솔)

Keywords: 압연롤, 특수강, 분말야금, canning-HIP, 내마모

최근 기가스틸 및 초고장력강과 같은 초고강도 철강 소재의 개발과 생산량 증가로 인해 기존 하이스강 기반 주조 압연롤은 내마모성 한계를 가지고 있고, 초경 소재는 내마모성은 우수 하지만 가공이 어려운 문제점이 있다. VC 석출 강화 분말야금 압연롤용 소재는 금속-세라믹 복합소재를 통해 미세조직 제어 및 균일성 확보가 가능하여 높은 인성과 내마모성을 동시에 얻을 수 있어 이러한 문제를 해결할 수 있다. 본 연구에서는 높은 내마모성을 갖는 Fe-VC계 합금 소재 개발과 탄화물의 균일한 석출을 통한 VC 함량 증가를 통해 내마모성을 향상시켰다. 자체 개발된 압연모사 내마모 평가 장비를 이용한 개발 소재의 내마모 평가와 소재의 기계적 물성 평가를 통해 기가급 철강 소재에 적용 가능한 분말야금 압연롤 소재의 특성을 확인하였다. 분말야금 공정을 기반으로 대형 부품 제조가 가능한 HIP 설비 및 Canning-HIP 공정을 최적화하여 기존 주조 압연롤 대비 소재 균일성 및 내구성이 향상된 대형 분말야금 압연롤 제조 가능성을 확인하였다. 본 연구 결과를 통해 철강 제조 생산성 향상에 기여할 수 있는 압연롤 제조 기술을 확보하였으며, 분말의 합금 설계와 미세조직 제어를 통해 차세대 압연 기술에 적용 가능한 압연롤 제조 기술을 확보하였다.

[P8-13]

혁신적인 마모 저항성 조압연롤 - 차세대 금속가공의 핵심 솔루션: 길희진, 성기창, 정휘근, 정야호, 김한수*, 이원혁* ((주)코나솔)

Keywords: 금속, 조압연롤, DCVI

DCI(Ductile Cast Iron, 이하 DCI)는 고온강도, 고연성, 고온윤활성을 지닌 소재로, 고온에 서 강압하가 요구되는 조압연롤에 널리 적용되어 왔다. 사회적, 생태적, 기술적 환경의 변화에 따라, 초고강도 소재의 수요와 생산이 빠르게 증가되고 있으나, DCI는 초고강도 소재의 조압 연에 물성의 한계를 보이고 있다. 이로인해 압연교체 주기가 짧아지며, 생산성의 저하로 이 어져, 초고강도 소재 제조 경쟁력을 심각하게 저해하는 요인으로 작용하고 있다. 본 연구에서 는 전산열역학 모델링 기반의 신규 합금 설계를 통해, 기존의 DCI의 미세조직에 VC를 석출상 으로 새로이 도입함으로써 내마모성을 크게 향상시켰다. 특히, 펄라이트 기지에 흑연과 VC 석 출비 최적화를 통해, DCI를 뛰어넘는 윤활성과 내마모성을 동시에 구현할 수 있었다. 본 연구 결과는 열간 조압연의 교체 주기를 연장함으로써 생산성을 증가시키고 공정 비용을 절감할 수 있으며, 이는 철강산업 및 첨단소재산업의 지속 가능한 성장과 경쟁력 확보에 기여할 것으 로 기대된다.

P9 : 가공-용접 및 접합
Room 3층 로비, 4월 23일

[P9-1]

입내 MX 석출에 따른 저방사화강 용접부의 고온 기계적 특성 비교: 박정현, 한재연, 조윤환 (국립창원대학교), 김치원, 이창훈 (한국재료연구원), 정승진 (조선선재 기술연구소), 홍현욱* (국립창원대학교)

Keywords: Reduced-Activation Ferritic/Martensite (RAFM) steel, EBW, GTAW, Heat-Affected-Zone (HAZ), Thermal stability, MX precipitate

핵융합 발전은 환경오염 물질 발생이 없고, 자원 고갈 위험이 없어 미래 청정에너지원으로 주목받고 있다. 핵융합로 운용 환경은 높은 중성자속 및 열속의 극한 환경으로, 저방사화강(Reduced activation ferritic/martensitic steel)이 유력한 후보 소재로 고려되고 있다. 그러나 저방사화강 용접부는 높은 변형 불일치도, 준안정 석출물 조대화 및 유해상 석출 등의 열화 저항성이 우려되는 실정이다. 본 연구에서는 MX 석출물 분율 증가를 위해 Ti을 첨가하였고 높은 전위 밀도를 위해 낮은 tempering 온도(730ºC)를 적용하였다. 또한 열영향부(Heat-affected-zone) 폭을 줄이기 위해 EBW 공정을 적용하였고 특성 평가를 위한 비교재는 GTAW 공정을 적용하였다. 모재 미세조직 분석 결과, 0.013 wt% Ti 첨가는 MX 석출물의 분율을 증가시켰고(2.0 → 4.6 %), 또한 $M_{23}C_6$ 석출물의 평균 크기를 감소시켰다(148.9 → 119.3 nm). 저방사화강 용접부 550ºC 인장시험 결과, Ti 첨가 저방사화강 및 EBW 적용재가 우수한 인장 특성을 나타내었고, 이는 MX 석출물 분율 증가 및 높은 전위 밀도, 좁은 HAZ폭에 기인한 것으로 판단된다. 핵융합로 운용 온도(550ºC) 500시간 열간 노출 후 경도 측정 결과, Ti 첨가 저방사화강 및 EBW 적용재의 열간 노출 후 경도 감소폭이 비교재 대비 더 작은 것이 확인되었다. 해당 결과에 대한 미세조직 해석을 위해 각 저방사화강의 경도가 가장 낮은 ICHAZ에서 FIB(Focused Ion beam)를 통해 시편을 채취하여 TEM을 통해 미세조직을 분석하였다. 열간 노출 후 Ti 미첨가 저방사화강 및 GTAW 적용재는 lath폭 증가 및 전위 밀도 감소를 보인 반면, TI 첨가 및 EBW 적용재는 상대적으로 좁은 lath폭 및 높은 전위 밀도를 나타내었다. 열간 노출 후 550ºC 인장시험 결과, 모든 조건에서 약간의 강도 감소가 나타났지만, 경도 측정 및 미세조직 분석 결과와는 달리 강도 감소 폭의 차이는 크게 나타나지 않았다. 그러나, 미세조직 결과를 고려하였을 때, 더 오랜 시간 열간 노출 후 인장시험 시, Ti 첨가 및 EBW 적용재에서 가장 적은 강도 저하가 나타날 것으로 예상된다. 상기 연구결과들을 통해 핵융합로 구조용 저방사화강에 대한 Ti 첨가 및 EBW 공정은 열화 저항성 향상에 기여하는 것으로 판단된다

[P9-2]

석출물 형성원소 첨가에 따른 고망간강 용접부의 기계적 특성변화: 박정빈 (부산대학교), 한일욱 (포항특수용접봉), 강남현* (부산대학교)

Keywords: 고망간강 용접부, 석출물 형성원소, 석출물, 결정립 미세화, 항복강도

전 세계적으로 에너지 수요가 급증하면서 환경오염 문제가 주요한 이슈로 부각되고 있다. 이에 따라, 친환경적인 대체 에너지원으로서 액화천연가스(LNG)의 사용이 늘어나고 있으며, LNG는 -196ºC의 초저온 상태에서 액화되어 저장 및 운송이 된다. 이러한 특성으로 인해 LNG 저장탱크는 특정한 재료로만 제작이 가능하며, 주로 사용되는 재료로는 오스테나이트계 스테인리스강, 9% 니켈강, Al 5083 합금, Invar 합금 그리고 고망간강이 있다. 특히 고망간강은 가격이 상대적으로 저렴한 망간(Mn)을 약 10~30% 정도로 대량 첨가하여 비용적인 측면에서 장점을 보인다. 최근 고망간강을 이용한 LNG 압력 탱크에 대한 수요가 증가하고 있는 추세를 보이며, 이에 따른 용접 공정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 고망간강의 판재와 달리 용접부는 FCC 계열 합금으로서 낮은 항복강도를 보이는 문제가 있으며, 이를 해결하기 위한 연구가 필요하다. 용접부의 기계적 성질을 향상시키기 위한 노력은 지속되고 있지만, 후처리 공정의 제한으로 인해 용접부의 결정립 미세화가 강화 방법 중 하나로 주목받고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 오스테나이이트 단상계 고망간강 용접부의 항복강도 향상을 위해서는 결정립 미세화가 필요하다. 이를 위해서는 용접재료 합금 설계 과정에서 석출물 형성 원소를 첨가하고, 그에 따른 석출물을 형성시켜 조직의 미세화를 유도해야될 필요가 있다. 이를 위해서는 석출물의 종류, 크기, 분포에 대한 분석이 중요한 요소이다. 또한, 첨가한 성분에 대한 기지의 SFE 및 오스테나이트 상 안정도에 대한 평가도 필요하다. 따라서 해당 연구에서는 고망간강 용접부의 우수한 인성과 높은 항복강도를 확보하기 위해 석출물 형성원소(Cr, Mo, V)를 첨가하고, 이에 따라 형성되는 석출물의 종류, 크기 및 분포를 확인하여 오스테나이트 결정립의 미세화와 기계적 특성 향상에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 위해, 열역학적 시뮬레이션, 인장 및 충격 시험, 경도, LOM, SEM-EBSD 등을 통한 미세조직 관찰을 수행하였다.

[P9-3]

폭발 압접으로 클래드된 Ta-10W/steel 튜브 계면의 미세조직 및 고온 열화 저항성: 김시연, 김태경 (국립창원대학교), 장성진 (나노종합기술원), 김동훈, 양성호 (국방과학연구소), 홍현욱* (국립창원대학교)

Keywords: Explosive welding, Ta/steel dissimilar metal, Interface, Microstructure, Thermal cycles

탄탈륨 (Ta) 합금은 융점이 3,000 ºC 이상 매우 높고, 내마모성과 부식 저항성이 뛰어나 고온 산화/부식 분위기에 운용되는 구조용 강재들을 보호하는 클래드 (clad) 소재로서 발전, 우주항공, 석유화학, 국방 분야 등에 주로 사용된다. Fe계 철강 소재의 파이프의 내면에 고내식성 소재인 Ta 합금을 클래딩하는 double layer 파이프를 제작하기 위해서는 Fe 대비 Ta의 녹는점이 3,000ºC 이상으로 매우 높아 용융 접합이 어렵기 때문에 폭발에 의한 고속 충격에너지를 이용하여 고상 접합하는 폭발 압접으로 접합할 수 있다. 폭발 압접 시 공정변수에 따른 폭발 정도에 따라 Ta/Fe 접합 계면의 미세조직 및 기계적 건전성이 달라지기 때문에 반복 열싸

이클에 의해 파이프의 내구성이 달라지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 Ta/Steel 이종재료 폭발 압접 계면부의 미세조직 및 기계적 건전성에 대해 고찰하고, start-up/shut-down을 모사한 반복 열싸이클에 따른 접합 계면의 미세조직 변화에 대해 고찰하고자 하였다. 주사전자현미경을 통한 공정변수별 접합계면 관찰 결과, 폭발이 약한 조건에서는 폭발 압력 및 충돌에너지가 미흡하여 vortex가 생기지 않고 낮은 진폭의 파형 계면과 inter-mixed zone (IMZ)이 형성된 반면, 폭발이 강한 조건에서는 Ta/Fe의 교반에 의한 vortex 및 높은 진폭의 파형 계면이 나타났다. 약한 폭발에 의해 형성된 IMZ의 경우 금속간 화합물 (Intermetallic Compound, IMC) 취성에 따른 종방향 균열이 발생하였다. 한편, 강한 폭발에 의해 형성된 파형 계면에서는 vortex 내부에 vortex melted zone (VMZ)이 관찰되었는데, 투과전자현미경을 통한 분석 결과, VMZ는 환형 diffraction pattern을 보이는 비정질 (amorphous)로 확인되었다. VMZ는 고속 충격 에너지에 의한 열과 shear force로 Fe와 Ta이 50:50으로 mixing되어 순간 melting되고, 주변을 에워싸는 차가운 Ta 합금에 의해 매우 빠르게 냉각되어 비정질로 형성된다. Ta과 steel은 열팽창계수의 차이가 크기 때문에 반복 열싸이클 시험시 vortex의 모양과 VMZ 분포가 매우 중요한 인자임을 확인하였으며, 상변태 거동과 연계하여 고찰하고자 한다.

[P9-4]

듀플렉스 스테인리스강의 마찰교반가공 처리 유무에 따른 전자빔 용접부 CISCC 개선: 백종민, 이아름 (국립창원대학교), 하종문 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)

Keywords: Duplex stainless steel, Electron Beam Welding, Friction Stir Processing, U-bend, CISCC

듀플렉스 스테인리스강(duplex stainless steel)은 페라이트계 및 오스테나이트계 스테인리스강보다 우수한 기계적 특성 및 내식성의 조합으로 인해 해양 구조물에 널리 사용된다. 이러한 해양 구조물들은 보통 해안가에 위치하기 때문에 염분으로 인한 염화물 응력부식 균열(Chloride Induced Stress Corrosion Cracking, CISCC)이 발생할 가능성이 있다. 따라서 CISCC에 대한 저항성이 매우 중요한데 CISCC는 보통 용접부의 열영향부(Heat-affected-zone)에서 탄화물(carbide)이나 시그마(σ) 상이 생겨 Cr이 고갈되어 발생하게 된다. 본 연구에서는 canister의 전자빔 용접부(EBW) 표면이 마찰교반가공(FSP)에 의해 미세조직이 어떻게 개선되는지, 그리고 CISCC에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 모재의 미세조직은 페라이트와 오스테나이트의 상분율이 동일하게 확인되었고, 전자빔 용접부의 미세조직은 페라이트, grainboundary austenite(GBA), intra-granular austenite(IGA), Widmanstatten austenite(WA)로 구성되었다. 용접부의 상분율은 페라이트 58.4 %, 오스테나이트 41.6 %로 확인되었다. 이에 대해 FSP 처리 후, 상분율은 오스테나이트 70.0 %, 페라이트 29.9 %, 시그마상 0.1 %로 확인되었다. 그리고 표면부의 미세조직은 동적재결정에 의해 결정립이 미세화(base metal≒17.3 μm, weld metal≒51.9 μm, FSP 영역≒2.6 μm) 되고 높은 strain이 분포함을 확인할 수 있었다. 미세화로 인해 Cr이 입내에서 입계로 확산되는 거리가 짧아져 입계를 따라 표면으로 확산되기 쉬워 표면에 보다 두꺼운 passive film을 형성해 CISCC 저항성을 향상시켜줄 것이라 판단된다. 또한, FSP tool의 마모에 의해 FSP 영역에서 텅스텐에 의한 강화효과도 확인되었다. 이후, FSP 처리를 통한 결정립 미세화가 실제로 CISCC 저항성을 향상시키는지를 평가하기 위해 U-bend 염수 분무 시험을 수행하였다. EBW WM의 표면에서는 다수의 pitting corrosions과 EDS 분석 결과(Cr 증가 & Fe 감소) 미세 CISCC도 확인되었다. 하지만 FSP 처리된 표면에서는 부식으로 인한 pitting이나 CISCC가 관찰되지 않았다. 이러한 결과를 바탕으로, FSP 처리를 통해 미세조직을 제어하여 CISCC 저항성을 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

[P9-5]

적외선 카메라를 이용한 Haynes 282 레이저 용접부의 미세조직 및 기계적 물성 분석: 양희평, 전종배* (동아대학교)

Keywords: Haynes 282, Laser welding, Infrared image, Monitoring

환경규제 강화와 CO_2 감축 의무화에 따라 화력발전의 효율을 향상시키기 위해 터빈을 구동하는 증기 온도와 압력이 각각 700ºC와 35 MPa 이상인 극초임계압(A-USC) 화력발전기술을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존에 사용되고 있는 페라이트계 내열강은 최고 사용온도가 620ºC로 A-USC 화력발전소에는 적용할 수 없어 고온 강도와 산화 저항성이 우수한 Ni기 초내열합금Haynes282(HY282)가 적용되고 있다. HY282 합금이 A-USC 화력발전소 부품에 사용됨에 있어 용접부의 미세조직 및 기계적 물성은 중요하다. 용접부의 미세조직은 용접 시 용융풀의 온도에 따라 큰 영향을 받으며, 이는 최종적인 기계적 물성에 결정적인 역할을 한다. 용융풀의 온도는 용접 모니터링을 활용하여 실시간으로 측정할 수 있다. 용접 모니터링은 용접 공정 중 발생하는 음향 방출 신호, 광학 신호, 열 신호 등을 감지하고 분석하여 이를 통해 용접 품질을 제어하고 공정을 최적화하는 것이다. 본 연구에서는 적외선 카메라를 활용하여 레이저 용접 중 용융풀 표면에서 방출되는 적외선을 통해 용융풀 표면 온도를 실시간으로 모니터링하였다. 실시간 온도 데이터를 바탕으로, 용융풀 표면의 온도 구배, 시간에 따른 온도 변화 및 냉각속도 등 용접부 응고거동 해석을 수행하였다. 용접부의 형상과 크기는 실체현미경으로 확인하였으며, 미세조직은 SEM과 EBSD를 이용하여 분석하였다. 용접부의 기계적 물성은 인장시험을 통해 평가하였다. 분석결과를 바탕으로 용접부 응고거동 차이에 의한 미세조직 발현 및 기계적 물성 간의 상관관계에 대해 고찰하였다.

[P9-6]

M-A 상 및 미세조직 제어를 통한 ERW 강관 용접부의 저온 충격 인성 향상: 백종민, 이찬희 (국립창원대학교), 곽진섭, 전동현 (현대스틸파이프), 홍현욱* (국립창원대학교)

Keywords: API X70, ERW, Low temperature toughness, M-A phase, Gleeble

본 연구에서는 API X70급 전기저항용접(ERW) 강관의 용접부에 대한 Post-Seam Annealing (PSA) 온도가 미세조직 및 저온 충격 인성에 미치는 영향을 평가하였다. ERW 용접 이후, 용접부는 급열과 급냉 의해 베이나이트 등의 저온 변태상이 형성되므로, 페라이트-펄라이트 구조로 안정화시키기 위해 PSA 공정이 필수적이다. PSA 온도는 low,medium,high 세 가지 조건으로 수행되었다.

세 가지 PSA 온도 조건에서 전위 밀도와 MX 석출물 분율에는 큰 차이가 없었으나, PSA high 조건에서는 가장 큰 결정립과 높은 펄라이트 분율이 관찰되었으며, 가장 열위한 충격 인성을 나타내었다. TEM 분석, 경도 측정 및 Lepera 에칭 결과, 용접과 PSA 공정 도중에 M-A 상이 형성됨을 확인하였다. PSA low 및 medium 조건의 차이는 이러한 M-A 상과 elongated 미세조직의 분포에서 기인하는 것으로 분석되었다. PSA 공정을 최적화하기 위해 Gleeble 장비를 이용한 열처리 모사를 수행하였으며, 열처리 조건은 M-A 상이 저온 충격 인성에 미치는 부정적 영향을 고려하여 설계하였습니다. PSA 저온 조건에서 느린 냉각을 적용한 결과, 더 미세한 결정립을 형성하고 M-A 상의 분율을 낮출 수 있어 저온 충격 인성이 향상되었습니다. 또한, 균열 전파에 도움을 주어 저온 충격 인성에 부정적인 영향을 미치는 Bondline에서 관찰된 elongated 펄라이트 및 M-A 상도 저감되었습니다. 결론적으로, PSA 공정에서 열처리 조건을 최적화하여 미세조직을 제어함으로써 ERW 강관 용접부의 저온 충격 인성 향상 방안에 대해 제시하였습니다.

[P9-7]

Effect of Welding Position and Heat Input on the microstructure and mechanical properties of SMAW welds of 9%Ni steel: Sanghyun BAE*, Yongchul Kim (KISWEL LTD.), and Stephen Liu (Colorado School of Mines)

Keywords: 9%Ni steel, LNG tank, SMAW for 9%Ni steel, Heat input, NiCrFe-9

Due to increasing environmental regulations, the design and construction of LNG storage tanks using 9% nickel steel, which is characterized by high strength, excellent low-temperature toughness and excellent welding performance, has increased. The welding materials in the fabrication of LNG storage tank for 9% Ni steel are mostly Inconel (ENiCrFe-4, 9) or Hastelloy (ENiCrMo-3,6), using mainly SMAW and SAW processes. The SMAW welding process is used in various welding positions such as flat, vertical-up, and overhead, and with different heat inputs. Depending on the welding position, the weld joints will exhibit different mechanical properties. Unlike ordinary carbon steels, the weldment of ENiCrFe-9 showed an increase in both strength and impact absorption energy with increasing heat input. The tensile strength of welds prepared in 3G welding position was approximately 100 MPa higher than those made in 1G position. The 3G welds also exhibited higher impact toughness than the 1G welds by 20-30J at -196°C. It has been demonstrated that welding using high nickel alloy consumables in 3G position resulted in enhanced strength and impact toughness. The thermal history in the reheated zones resulted in microstructural refinement and precipitation responsible for the mechanical properties enhancement.

[P9-8]

하나로핵연료 봉단마개 용접 현황 및 용접부 불량 저감에 관한 고찰: 소원재*, 도정민, 신진건, 김종환, 김기남, 정용진 (한국원자력연구원)

Keywords: 핵연료, 전자빔용접, 봉단마개, 용접불량

한국원자력연구원에서는 다목적 연구용 원자로인 하나로의 구동핵연료를 제조하고 있다. 하나로핵연료는 봉형 핵연료로써 U_3Si 합금분말을 알루미늄 분말과 혼합한 후 압출하여 핵연료 심을 제조하고, 양 끝단에 봉단마개를 삽입한 후 알루미늄 피복하여 핵연료봉을 완성한다. 봉단마개 용접은 전자빔용접을 이용하여 정밀하게 수행되며, 용접부의 실시간 방사선 투과검사를 이용하여 건전성을 평가한다. 전자빔용접에서 발생하는 불량은 전체 핵연료 제조공정에서 발생하는 불량 중 많은 부분을 차지하므로 본 공정의 불량률을 감소를 통하여 핵연료 제조 생산성을 향상시킬 수 있다. 따라서, 최근의 전자빔용접 공정 이력 및 생산 현황을 분석하고 용접부 불량 현상에 따른 개선 방향의 고찰을 통하여 핵연료 제조 생산성 향상에 기여하고자 한다.

[P9-9]

Ta-10W 합금의 미세조직 변화 및 상온 인장 거동에 미치는 폭발 압접의 영향: 강태훈 (인하대학교), 황유진 (인하대학교, 현대제철(주)), 박정효, 김규식 (국방과학연구소), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Ta-10W alloy, explosive bonding, microstructure, tensile property

본 연구는 Ta-10W 합금의 변형, 미세조직 및 상온 인장 특성에 대한 폭발 접합의 영향을 조사하였다. 폭발 접합 공정은 플레이트와 폭약 간의 간격을 설정하고 수행하였다. 기폭 후 Ta-10W 합금의 두께는 원래 플레이트 대비 4.3% 감소한 2.44 mm로 나타났다. 폭발 압접된 소재의 초기 미세조직 분석 결과, Ta와 W가 균일하게 분포하였으며, ND 및 RD 면 모두 높은 substructure 분율을 보였고, 특히 RD 면에서 더 두드러졌다. 폭발 압접 수행 전 소재(압연 소재)의 상온 인장 시험 결과, 변형 경화가 나타났으며, 항복 강도(YS)는 626.3 ± 15.0 MPa, 인장 강도(UTS)는 709.7 ± 7.1 MPa, 연신율은 32.4 ± 0.5%로 측정되었다. 폭발 압접 후 소재의 YS는 765.0 ± 6.6 MPa, UTS는 840.7 ± 13.1 MPa로 증가하였으며, 연신율은 17.4 ± 2.4%로 감소하였다. 인장 변형된 미세조직 분석 결과, 폭발 압접 전 시편에서는 모든 영역에서 결정 방향의 misorientation이 증가한 것으로 나타났다. 반면, 폭발 압접 후 시편은 결정립 내 슬립 밴드 형성과 더불어 딤플 크기의 감소가 관찰되었다. 상기 결과들을 바탕으로 Ta-10W 합금의 인장 변형 기구와 폭발 압접 공정의 응용 가능성에 대하여 함께 논의하였다.

[P9-10]

1 GPa 급 고강도 리벳의 경도에 따른 접합 특성 연구: 윤병현* (충남대학교)

Keywords: 고강도강, 경도, 다종소재 접합, 리벳, 기계적 물성

전기차와 같은 미래형 자동차는 환경규제와 안전을 위해 차량 경량화와 고강도를 동시에 요구받음에 따라 다종소재를 이용한 부품화 기술이 필수적이다. 최근 자동차용 차체부품은 초고강도강을 기반으로 알루미늄의 확대 적용과 CFRP 사용량이 증가되고 있으므

로 이들 소재에 대한 전략적 용접/접합기술 개발이 필요하다. 해외 선진 자동차사의 경우 접합기술 개발을 통하여 양산화 설비를 도입하는 등의 수준으로 개발이 이루어 지고 있으나 국내에서는 아직 용접 접합 분야의 원천 핵심기술 및 이에 따른 장비의 국산화율은 매우 부족 한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다종소재 접합공정중에 리벳공정에 적합한 고강도의 리벳을 개발하고자 냉간압조용강을 이용, 열처리를 통한 기계적 강도 변화를 관찰하고, 경도가 상이한 리벳을 제조하여 Steel-Al 및 Steel-CFRP 다종 소재 대상으로 E-SPR(전자기 리벳팅) 리벳 접합 실험을 통하여 리벳 특성을 평가하였다.

[P9-11]

자동차용 GA강판과 알루미늄의 마찰교반 점용접 공정 최적화: 장경현*, 천창근, 김성욱 (포항산업과학연구원(RIST)), 김동권, 서종덕 ((주)신영)

Keywords: 마찰교반점용접, 이종접합, 알루미늄, 아연도금강판

탄소 중립 실현을 위한 경량화 요구가 증가함에 따라 자동차 산업에서는 이종 소재 접합 기술의 중요성이 부각되고 있다. 특히, 자동차 차체의 경량화를 위해 아연도금 강판(GA강판)과 알루미늄 합금의 접합이 시도되고 있으나, 기존의 용융 용접 방식에서는 Fe-Al 금속간화합물(IMC) 층의 형성으로 인해 접합부의 기계적 특성이 저하되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위한 대안으로 마찰교반 점용접(Friction Stir Spot Welding, FSSW)이 주목받고 있다. FSSW는 소재의 용융 없이 고상 상태에서 접합을 수행하여 변형이 적고, 에너지 효율이 높으며, 흄 발생이 적은 장점을 가진다. 그러나 현재까지 FSSW에 대한 연구는 제한적이며, 특히 자동차용 GA강판과 알루미늄 합금의 이종소재 접합에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 FSSW 공정의 최적화를 위해 툴 숄더의 각도를 양각 2도, 0도, 음각 3도로 설계한 세 가지 툴을 제작하였다. 각 툴에 대해 삽입 깊이와 용접 유지 시간을 변수로 설정하여 GA강판과 알루미늄 합금의 접합 실험을 수행하였다. 실험 결과, 삽입 깊이가 깊어질수록 용접부 주변에 형성되는 버(burr)의 형상이 달라졌으며, 접합되는 영역의 면적이 증가하여 접합 강도가 향상되는 경향을 보였다. 또한, 선용접과는 달리 IMC 층의 영향은 상대적으로 미미한 것으로 나타났다. 단면의 미세조직 분석과 인장 시험을 통해 이러한 결과를 확인하였으며, 이를 통해 FSSW 공정에서 툴 숄더 각도, 삽입 깊이, 용접 유지 시간 등의 변수가 접합부의 품질과 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하였다. 본 연구를 통해 자동차 차체 제조에서 GA강판과 알루미늄 합금의 효율적인 접합을 위한 FSSW 공정의 최적화에 기여할 것으로 기대된다. 후기: 본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가원(KEIT)의 연구비 지원('20014618')을 받아 수행되었음.

[P9-12]

고강도 SEN6 Mg 합금의 GTAW 용접 특성 연구: 윤병현* (충남대학교)

Keywords: Mobility, IT, Light Metal, Magnesium alloy, GTAW, A-TI

자동차 및 IT 부품에 사용되고 있는 대표적인 경량 금속은 Al, Mg 이나, 플라스틱 대비 비중이 커서 플라스틱 동등 수준의 비중을 가지고 자원 순환이 용이한 초경량 금속 소재의 요구 및 수요가 증가하고 있다. 이동성과 편리성을 추구하는 도심 운송수단의 증가 추세에 의해 미래형 모빌리티 시장이 급성장하고 있으며 이에 따라 경량화 및 고성능화를 통한 주행거리 증가 및 배터리 수명 연장을 위해 초경량 금속인 마그네슘 합금의 적용 확대와 핵심 성능의 향상에 대한 요구가 증가하고 있다. 높은 발화성과 부식성은 마그네슘 합금의 상용화를 제한하는 주된 원인으로 알려져 있으나 최근 한국재료연구원에서 개발한 난연·고내식 마그네슘 합금은 발화 특성을 제어하고 화재 안정성을 확보하며 부식 저항성이 개선되어 경량화가 요구되는 분야에서 구조부품으로 적용성 확대가 기대되고 있다. 본 연구에서는 한국재료연구원에서 개발된 고강도 마그네슘 합금인 SEN6 합금에 대한 용접성을 평가하고자 하였으며, 기존 GTAW 용접과 A-TIG 용접과의 특성 비교를 위하여 용접부 물성 및 미세조직 분석을 실시하였다.

[P9-13]

Si_3N_4/Cu 이종 접합 방열 기판 개발 및 특성 평가: 권홍기 (포항소재산업진흥원), 김준태, 이경훈 (주식회사 코웰), 박상원* (포항소재산업진흥원)

Keywords: 방열기판, AMB(Active Metal Brazing), Si_3N_4, Cu

전 세계적으로 수송기기의 하이브리드화 및 전기모터화가 빠르게 확산됨에 따라 전기전자 및 반도체 등 전자소자 시장이 급속도로 성장하고 있다. 조사 결과에 따르면, 전자 소자의 주요 고장 원인 중 55% 이상이 과열로 인해 발생하며, 이에 따라 전자 소자의 효과적인 열 방출이 제품의 정상적인 작동 수명과 안정성에 결정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 높은 전기 절연성과 열전도율을 갖춘 세라믹 소재는 디바이스에서 발생하는 열을 신속하게 전달 및 확산시키는 열매체로서의 기능이 우수하다. 이러한 특성으로 인해 세라믹 소재는 수송기기용 전자 디바이스 및 기판 소재, 고집적 전자회로용 기판 소재 등으로 각광받고 있다. 다양한 세라믹 소재 중에서도 질화규소(Si_3N_4)는 우수한 기계적 강도와 높은 열전도성을 보유하고 있어, 전기자동차를 비롯한 첨단 산업에서 안정성과 내구성을 확보하는 핵심 소재로 주목받고 있다. 그러나 현재 질화규소(Si_3N_4) 소재의 생산 및 공급은 일본이 주도하고 있으며, 국내에서는 연구개발 단계에 머물러 있는 상황이다. 본 연구에서는 고강도 및 고열전도성을 갖춘 질화규소(Si_3N_4) 세라믹 소재를 개발하여 국내 산업의 경쟁력을 강화하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 질화규소 기판 제작을 위한 원료의 최적 조성과 합성 공정을 최적화하였으며, AMB(Active Metal Brazing) 공정을 활용하여 Cu와의 이종 접합을 통한 Si_3N_4/Cu 방열 기판을 제작하였다. 또한, 다양한 접합 조건에서 제조된 소재의 미세구조 및 기계적·열적 특성을 평가하여 최적의 공정을 도출하였다. 본 연구를 통해 개발된 질화규소 세라믹 소재는 수송기기 및 전력 반도체 패키징 기판 등 고열 환경에서 요구되는 전자소자 응용 분야에서의 활용 가능성을 제시할 것으로 기대된다

P10 : 열전
Room 3층 로비, 4월 23일

[P10-1]
하카이트 화합물의 상변화 및 열전특성에 미치는 전하보상 효과: 박상준, 오현식, 김일호* (국립한국교통대학교)
Keywords: thermoelectric, hakite, charge compensation

하카이트(hakite, $Cu_{12}Sb_4Se_{13}$)의 상안정과 전하평형을 위해 Zn, Ni, Fe를 전하보상하여 상변화 및 열전특성을 조사하였다. $Zn_xCu_{12-x}Sb_4Se_{13}$ (x = 0.5–2)에서는 $Cu_{12}Sb_4Se_{13}$은 퍼밍기어타이트(permingeatite, Cu_3SbSe_4)와 바이티자이트(bytizite, Cu_3SbSe_3)만 포함하고 있었으나, Zn 함량이 증가함에 따라 매트릭스 상이 하카이트로 변태하였다. Zn 농도가 증가할수록 전기전도도는 향상되었으나, 하카이트 상에서 전하보상으로 인해 PF = 0.22 $mWm^{-1}K^{-2}$ 및 ZT = 0.31을 얻었다. $Ni_xCu_{12-x}Sb_4Se_{13}$ (x = 0.5–2)에서는 Ni 도핑에 따라 바이티자이트, 퍼밍기어타이트, 프리브라마이트(pribramite, $CuSbSe_2$) 상이 형성되었으며, $Ni_{0.5}Cu_{11.5}Sb_4Se_{13}$ 시편에서 623 K에서 PF = 0.09 $mWm^{-1}K^{-2}$ 및 ZT = 0.18을 기록하였다. $Fe_xCu_{12-x}Sb_4Se_{13}$ (x = 0.5–2)에서는 Fe 농도가 증가할수록 프리브라마이트 상이 생성되었고, Fe 농도가 높을수록 하카이트 상의 합성이 어려워졌다. $FeCu_{11}Sb_4Se_{13}$은 623 K에서 PF = 0.08 $mWm^{-1}K^{-2}$ 및 ZT = 0.14의 열전 성능을 기록하였다. This study was supported by the Small-Medium Enterprise Innovation Growth Support Project of the Korea RIC Association and the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P10-2]
도핑된 에스케보르나이트 화합물의 열전특성: 오혜민, 류재종, 최세현, 박상준, 김일호* (한국교통대학교)
Keywords: thermoelectric, eskebornite, doping

에스케보르나이트(eskebornite, $CuFeSe_2$)는 I-III-VI_2 계열의 정방정계 반도체로, 칼코파이라이트(chalcopyrite, $CuFeS_2$)와 유사한 결정 구조를 가지면서도 독특한 전기적 및 자기적 특성을 보인다. $CuFeSe_2$는 친환경 원소로 구성되어 열전재료로 주목받고 있으나, 이에 대한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 기계적 합금화와 열간 압축 공정을 통해 도핑되지 않은 $CuFeSe_2$와 Zn^{2+} 및 Ni^{2+}가 도핑된 $Cu_{1-x}Zn_xFeSe_2$ (x = 0.02–0.08)와 $Cu_{1-x}Ni_xFeSe_2$ (x = 0.02–0.06)를 합성하여 열전특성을 조사하였다. 도핑되지 않은 $CuFeSe_2$는 비축퇴 p형 반도체 특성을 보이며, 523 K에서 $ZT_p = 0.37 \times 10^{-3}$을 기록하였다. Zn 도핑 시 출력인자와 ZT 값이 온도에 따라 향상되었으며, $Cu_{0.98}Zn_{0.02}FeSe_2$는 423 K에서 출력인자 1.12 $\mu Wm^{-1}K^{-2}$과 473 K에서 $ZT_p = 0.25 \times 10^{-3}$을 나타냈다. Ni 도핑 시 일부 펜로우자이트(penroseite, $NiSe_2$) 2차상이 형성되었으며, 전기 전도 형태가 p형에서 n형으로 전환되는 p-n 전이 현상이 관찰되었다. 특히, $Cu_{0.94}Ni_{0.06}FeSe_2$는 623 K에서 $ZT_n = 0.55 \times 10^{-3}$을 달성하였다. This study was supported by the Small-Medium Enterprise Innovation Growth Support Project of the Korea RIC Association and the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P10-3]
N형 칼코파이라이트 반도체의 열전특성: 이승민, 권혁민, 김진솔, 박상준, 김일호* (한국교통대학교)
Keywords: thermoelectric, chalcopyrite, doping

칼코파이라이트(chalcopyrite, $CuFeS_2$)는 n형 반도체로서 도핑에 따라 캐리어 농도 조절이 가능해 열전재료로서 주목받고 있다. 본 연구에서는 기계적 합금화와 열간 압축 소결 공정을 활용하여 순수한 칼코파이라이트 및 Zn^{2+}와 Ni^{2+}가 도핑된 $Cu_{1-x}Zn_xFeS_2$ (x = 0.02–0.08)와 $Cu_{1-x}Ni_xFeS_2$ (x = 0.02–0.08)를 합성하여 열전특성을 평가하였다. 순수한 칼코파이라이트는 523 K에서 최대 출력인자(PF) 0.81 $mWm^{-1}K^{-2}$ 및 723 K에서 무차원 성능지수(ZT) 0.32를 기록하였다. Zn 도핑 시 결정구조는 안정적으로 유지되었으며, 전기전도도는 증가하고 제벡계수는 감소하여 열전성능 개선 효과는 미미하였다. 반면 Ni 도핑은 격자상수 감소를 통해 Cu 자리에 Ni이 효과적으로 치환되었음을 확인하였으며, 캐리어 농도와 전기전도도 증가로 $Cu_{0.92}Ni_{0.08}FeS_2$는 723 K에서 최고 전기전도도 2.5×10^4 Sm^{-1}를 나타냈다. 하지만 제벡계수 감소로 인해 $Cu_{0.96}Ni_{0.04}FeS_2$가 623 K에서 PF = 0.50 $mWm^{-1}K^{-2}$ 및 ZT = 0.18 를 기록하였다. This study was supported by the Small-Medium Enterprise Innovation Growth Support Project of the Korea RIC Association and the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P10-4]
Bornite Cu_5FeS_4의 고상합성과 열전특성: 오현식, 박상준, 김일호* (국립한국교통대학교)
Keywords: thermoelectric, bornite, mechanical alloying, hot pressing

구리 황화물 기반 열전 소재는 친환경적이며 풍부한 원소로 구성되어 있어 차세대 열전 재료로 주목받고 있다. 특히, p형 반도체인 보르나이트(bornite, Cu_5FeS_4)는 본질적으로 낮은 열전도도를 가지며, 중온(300–700 K) 열전 응용에 유망한 후보 물질로 평가된다. 본 연구에서는 순수한 보르나이트 상을 합성하고 소결하기 위해 기계적 합금화(MA, mechanical alloying) 및 열간 압축 소결

(HP, hot pressing) 공정의 최적 조건을 조사하였다. Ar 분위기에서 350 rpm의 회전 속도로 3–12시간 동안 MA를 진행하였으며, 합성된 보르나이트 분말을 진공 환경에서 70 MPa의 압력 하에 573–723 K에서 2시간 동안 HP 소결하였다. 제조된 HP 시편의 상 변화 및 안정성을 평가하기 위해 XRD 및 TG-DSC 분석을 수행하였으며, 미세조직 관찰과 원소 분석을 통해 조성 균일성을 확인하였다. 또한, HP 온도에 따른 열전 특성을 측정하여 보르나이트 열전 소재의 응용 가능성을 평가하였다. This study was supported by the Small-Medium Enterprise Innovation Growth Support Project of the Korea RIC Association and the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P10-5]

Emplectite $CuBiS_2$**의 고상합성과 열전특성**: 권혁민, 박상준, 김일호* (국립한국교통대학교)

Keywords: thermoelectric, emplectite, mechanical alloying, hot pressing

엠플렉타이트($CuBiS_2$)는 p형 반도체로서 0.37–1.65 eV의 밴드갭을 가지며, orthorhombic 결정구조를 갖는다. 또한, Bi가 3가로 결합하여 고립 전자쌍(lone-pair electrons)이 존재해서 본질적으로 매우 낮은 열전도도가 가능하므로 고효율 열전재료로서의 잠재력을 지닌다. 본 연구에서는 순수한 $CuBiS_2$ 상을 합성하고 소결하기 위해 화학양론적 조성비에 따라 Cu, Bi 그리고 S 원료 분말을 준비한 후, 기계적 합금화(MA; mechanical alloying) 및 열간 압축 소결(HP; hot pressing) 공정을 수행하였다. Ar 분위기에서 350 rpm의 회전 속도로 3–12시간 동안 MA를 진행하였으며, 합성된 분말을 진공 환경에서 70 MPa의 압력 하에 573–723 K에서 2시간 동안 HP 소결하였다. 제조된 MA-HP 시편의 상분석, 열분석 및 미세조직 관찰을 수행하였으며, 전기전도도, 열전도도, 제벡 계수, 출력 인자, 그리고 무차원 성능지수(ZT)를 측정하여 엠플렉타이트의 열전 성능을 정량적으로 분석하였다. This study was supported by the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P10-6]

Grundmannite $CuBiSe_2$**의 고상합성 및 열전특성**: 류재종, 박상준, 김일호* (국립한국교통대학교)

Keywords: thermoelectric, grundmannite, mechanical alloying, hot pressing

$CuXQ_2$ (M = Sb, Bi 및 Q = S, Se) 화합물은 층상 구조를 가지며, 좁은 밴드갭을 갖는 반도체로서 열전 응용에 적합한 특성을 보인다. 특히, $CuBiSe_2$ (grundmannite)는 정방정계(orthorhombic) 결정 구조(공간군 Pnma)를 가지며, Bi 원자는 $BiSe_3$ 삼각뿔을, Cu 원자는 $CuSe_4$ 사면체를 형성한다. 이러한 결정 구조는 반 데르 발스 갭을 포함하는 자연 초격자(natural superlattice) 형태의 2차원 물질로 해석될 수 있다. Grundmannite의 독특한 결정학적 특성 중 하나는 Bi^{3+}의 $6s^2$ 고립 전자쌍(lone-pair electrons)이 반 데르 발스 갭을 향하고 있어, 격자 내 강한 비조화성(anharmonicity)을 유발한다는 점이다. 이는 포논 산란을 증가시켜 열전도도를 본질적으로 낮추는 요인으로 작용하며, grundmannite를 낮은 열전도도를 갖는 신개념 열전 재료 설계를 위한 이상적인 템플릿(template)으로 활용할 가능성을 제시한다. 그러나 현재까지 grundmannite의 고상 합성 및 열전 특성에 대한 실험적 연구는 거의 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 기계적 합금화(mechanical alloying)를 통해 grundmannite를 합성하고, 열간 압축 소결(hot pressing)을 통해 고밀도 소결체를 제작하였다. 이후, 미세구조 분석, 상변화 평가 및 열전 특성 측정을 수행하여 grundmannite의 열전 소재로서의 가능성을 검토하였다. This study was supported by the Small-Medium Enterprise Innovation Growth Support Project of the Korea RIC Association and the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P10-7]

나노카본 첨가를 통한 α-Cu_2Se의 열전 특성 향상: 김현아 (한국세라믹기술원, 국립부경대학교), 강민지, Cao Xuan Truong, 김우현, 조중영 (한국세라믹기술원), 임영수 (국립부경대학교), 남우현* (한국세라믹기술원)

Keywords: Chalcogenide, Cu_2Se, Charge transport, Graphene, Thermoelectric

Cu_2Se는 약 400 K 부근에서 상전이를 나타내는 물질로, 상온에서 상전이 온도까지는 단사정계 α-Cu_2Se상으로 존재하며, 상전이 온도 이상에서는 입방정계 β-Cu_2Se상으로 전이된다. 특히, 고온상인 β-Cu_2Se는 초이온전도성에 기인한 낮은 열전도도로 우수한 열전성능을 나타내지만, Cu 이온 이동에 따른 화학적 불안정성은 응용에 제약을 주는 단점으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 저온상인 α-Cu_2Se의 열전특성 향상을 목표로, 나노카본과의 복합화를 통한 열전성능 개선 전략을 제시하고 그 결과를 보고한다. 유도용해공정을 통해 합성한 Cu_2Se 분말과 나노카본(Carbon black, 0.05~0.2 wt%)을 고에너지 볼 밀링 공정을 통해 혼합한 후, 열간가압소결(823 K, 60 MPa, 60 분)을 통해 Cu_2Se-나노카본 복합체를 제작하였다. XRD 분석 결과, 나노카본은 Cu_2Se의 미세구조에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, TEM 분석을 통해 나노카본이 Cu_2Se 매트릭스에 균일하게 분포함을 확인하였다. 또한, 나노카본 함량 변화에 따른 전하 전송 및 포논 산란 특성 제어로 열전성능이 개선되는 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 상용 Bi-Te계 소재를 대체할 수 있는 저온용 열전소재 개발에 기여할 것으로 기대된다.

[P10-8]

Effect of Cu Contents on the Thermoelectric Properties of P-Type $Sn_{0.98}Na_{0.02}Cu_xSe$: Van Tuan Nguyen (Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Changwon National University), Vu Binh Nguyen (Korea Institute of Ceramic Engineering

& Technology), Min Su Heo (University of Seoul), Woo Hyun Nam (Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology), Soonil Lee (Changwon National University), Hyun Sik Kim (University of Seoul), and Jung Young Cho* (Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology)

Keywords: SnSe, Thermoelectric materials, Electrical conductivity, Seebeck coefficient, Thermal conductivity.

Tin selenide (SnSe) and its related thermoelectric materials have attracted significant attention as promising candidates for next-generation thermoelectric materials due to their ultralow thermal conductivity and high power factor. In this study, SnSe was doped with 2 at.% Sodium (Na), followed by the controlled addition of Copper (Cu) to synthesize $Sn_{0.98}Na_{0.02}Cu_xSe$ (x = 0.005, 0.010, 0.015, and 0.020). The raw materials were loaded into carbon-coated quartz tubes, sealed under vacuum, and annealed at 1273 K for 10 days. After annealing, the ingot was ground into fine powder and subsequently consolidated via spark plasma sintering (SPS) at 773 K for 10 min under the pressure of 60 MPa in a vacuum. The charge and phonon transport properties in $Sn_{0.98}Na_{0.02}Cu_xSe$ were successfully controlled by Cu incorporation. Notably, the sample containing 1.5% Cu exhibits the highest power factor of 7.62 $x10^{-4}$ W/mK^2 with a thermal conductivity is 0.451 W/mK, leading to the highest ZT value of 0.79 at 470 K.

[P10-9]

열전발전용 CoSb 금속간 화합물 개발: 강민지 (한국세라믹기술원, 연세대학교), Cao Xuan Truong, 김우현, 김현아, 조중영 (한국세라믹기술원), 이규형 (연세대학교), 남우현* (한국세라믹기술원)

Keywords: 열전, CoSb, Co-Sb계 금속간 화합물

열전발전은 폐열을 전기에너지로 회수할 수 있는 친환경 에너지 변환 기술로, 열원의 온도 조건에 따라 다양한 소재가 적용된다. Co-Sb계 금속간 화합물(CoSb, $CoSb_2$, $CoSb_3$) 중에서도 특히 $CoSb_3$(skutterudite)는 PGEC(Phonon-Glass Electron-Crystal) 기술의 구현을 통해 중온 영역에서 우수한 열전성능을 나타내는 소재로 주목받고 있다. 반면, $CoSb_3$를 제외한 Co-Sb계 금속간 화합물은 이차전지 전극이나 촉매로 활용된 사례는 있으나, 열전발전용 소재로의 적용은 보고된 바 없다. 본 연구에서는 CoSb 1:1상에 대한 열전성능을 평가하기 위해 CoSb 합성 공정을 개발하였다. 우선 유도용해 공정을 통해 잉곳을 제작한 후, 열처리 공정의 온도 조건을 최적화하여 단일상 형성 조건을 확보하였다. 이후 방전 플라즈마 소결을 통해 CoSb 소결체를 제작하였으며, 소결체의 전기적 특성 및 열적 특성 평가를 통해 CoSb의 기본 특성을 확인하였다. 마지막으로, Co 및 Sb 자리에 불순물을 도입하여 전하 수송 특성을 제어함으로써 CoSb의 열전성능을 개선하였다.

[P10-10]

Investigation of Optimized Ca Filling Fraction in Alkaline Earth Filled P-Type Skutterudites: Xuan Truong Cao (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Changwon National University), Min Ji Kang, Woo Hyun Kim, Hyun A Kim, Jung Young Cho (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology), Soonil Lee (Changwon National University), and Woo Hyun Nam* (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology)

Keywords: p-type skutterudite, rare-earth free skutterudite, alkaline earth, melt spinning, spark plasma sintering

Skutterudites have received considerable concerns from researchers due to their high thermoelectric properties, which is vital for thermoelectric power generation modules. Due to the high cost and scarcity of rare earth fillers, more abundant and cost-effective alternatives are being explored. Calcium has proven to be a promising filler because of its abundance, low cost, and suitable electronegativity. In this work, we successfully synthesized the p-type skutterudites with the composition of $Ca_xFe_{3.5}Co_{0.5}Sb_{12}$ (x=0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2) by the combination of melt spinning and spark plasma sintering (SPS) methods. The thermal conductivity of the samples decreased up to x=1.0 and then increased with further filler addition, which resulted from the fluctuation of lattice thermal conductivity. Moreover, it also witnessed the same phenomena with the power factor because of the formation of impurity phases with excess filler. The carrier concentration was optimized at x=1.0, which corresponds to the maximum power factor. Ultimately, the highest ZT value of 0.77 was obtained at 820K for $Ca_{1.0}Fe_{3.5}Co_{0.5}Sb_{12}$.

[P10-11]

이중 충진 원자 조성 조절을 통한 p형 Skutterudite의 열전 특성 향상: 김우현, 강민지, Cao Xuan Truong, 김현아 (한국세라믹기술원), 이순일 (국립창원대학교), 조중영, 남우현* (한국세라믹기술원)

Keywords: 열전, p형 Skutterudite, 캐리어 농도, 포논 산란, 열전성능지수

본 연구는 Nd, Yb 이중 충진 원자의 조성 조절을 통한 p형 Nd-Yb-Fe-Co-Sb계 Skutterudite 합금의 열전 특성 향상에 대해 보고한다. 유도 용해 및 급속 응고법을 통해 분말을 제작한 후 방전 플라즈마 소결법(903 K, 50 MPa, 15 min)으로 $Nd_{0.9-x}Yb_xFe_{3.25}Co_{0.75}Sb_{12.2}$ (x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8)소결체를 합성하였다. 모든 소결체의 XRD 분석을 통해 Skutterudite상이 형성된 것을 확인하였으며, TEM 분석을 통해 결정립계에 이차상 $YbSb_2$가 존재하는 것을 확인하였다. Yb의 함량의 증가에 따른 캐리어 농도 증가는 전기전도도의 증가와 제벡계수가 감소하는 결과를 보여주었으며, 캐리어 농도 최적화에 따라 x=0.4의 샘플에서 최대출력인자(30 x 10^{-4} W/mK^2 @763 K)를 얻었다. 또한, 격자 열전도도는 이중 충진에 의한 포논 산란의 향상으로 x=0.4 샘플에서 낮은 값을 가졌으나 전체 열전도도는 Yb분율의 증가에 따라 증가 하였다. 결과적으로 이중 충진 원자의 조성 조절을 통해 p형 Skutterudite 소재의 전기적·열적 특성을 동시에 제어하여 열전 성능이 향상되는 것을 확인하였으며, $Nd_{0.5}Yb_{0.4}Fe_{3.25}Co_{0.75}Sb_{12.2}$ 샘플에서 1.11(@ 767 K)의 최대 열전성능지수를 보였다.

P11 : 생체재료
Room 3층 로비, 4월 23일

[P11-1]
GelMA-Based Electronic Plant Arrows for Natural and Long-Term Physiological Monitoring of Plant Organs: Geonho Lee and Junmin Lee* (Pohang University of Science and Technology)
Keywords: Plant physiology monitoring, Substrate-free electrode, Gelatin methacryloyl hydrogel, Long-term monitoring, Smart agriculture

Precise monitoring of plant physiology is vital for optimizing health, predicting crop yields in smart agriculture, and preserving vegetables and fruits. Existing plant-attached sensors often disrupt the plant's structure, balance, and interactions with the environment, restricting their use to short-term applications and specific species. Their rigidity and mechanical invasiveness can alter growth, maturation, and homeostasis, underscoring the need for long-term, minimally disruptive monitoring solutions. To address these challenges, an electronic plant arrow (EPA) is introduced—a substrate-free, arrow-shaped injectable electrode made from photo-crosslinked gelatin methacryloyl (GelMA). GelMA provides shape adaptability, biocompatibility, mechanical strength variations upon swelling, and low electrical impedance, making it suitable for plant monitoring. In its dry state, the EPA is rigid, facilitating insertion into diverse plant tissues and accommodating complex surface geometries. Upon insertion, it absorbs moisture, swells, and softens, reducing tissue damage while enabling stable, long-term bioimpedance monitoring. The arrowhead shape enhances adhesion and electrical contact, while the substrate-free design minimizes interference with plant growth. This system enables precise, continuous monitoring of plant physiology across various organs, such as leaves, stems, and fruits, tracking growth and ripening processes. Real-time, organ-specific data collection preserves plant health and significantly advances smart agriculture and precision crop management.

[P11-2]
Highly Stretchable and Biodegradable Molybdenum/Polybutylene Adipate Terephthalate Conductive Paste Composite Materials for Various Biodegradable Electronics: Junseok Shim, Kyung-Sub Kim, and Seung-Kyun Kang* (Seoul National Univ.)
Keywords: Green electronics, Conductive paste, Biodegradable electronics, Flexible electronics

With the rapid advancement of personalized medical devices, the increase in electronic waste (E-waste) is expected, particularly in patch-type electronic devices with multilayer thin film structures, where the separation and recycling of raw materials are challenging. Biodegradable electronic devices that degrade into environmentally benign byproducts after use have thus emerged as a promising solution. In this study, we develop a biodegradable conductive paste composed of biodegradable molybdenum metal nanoparticles and highly flexible Polybutylene Adipate Terephthalate (PBAT) polymer matrices, which can be used in the production of various biodegradable electronic devices. The paste can be produced through a solution process for large-area, low-cost manufacturing, while overcoming the issues of conventional biodegradable conductive pastes, such as low stretchability and short lifespan. We evaluated the mechanical stability and flexibility of conductive pastes with various mixing ratios through uniaxial tensile and cyclic tests. Also we optimized the formulation by incorporating a biodegradable lubricant, tetraglycol, to promote uniform dispersion of the metal particles, thereby enhancing conductivity and stretchability. Moreover, biodegradability and degradation mechanisms were validated in phosphate-buffered saline (PBS), confirming that the lifespan of the device can be controlled. This biodegradable conductive paste can be applied to various highly stretchable electronic devices, such as electrodes, strain and temperature sensors, strip heaters, and wireless frequency (RF) coils, offering the potential for alleviating the electronic waste problem in wearable medical devices and skin-adhering devices as a next-generation sustainable technology.

[P11-3]
Bi-Directional Cyclic Mechanical Stimulation Regulates Metastatic Behavior and Apoptosis in Melanoma Cells via Mechanotransduction Pathways: JunMin Lee* and TaeHoon Lee (POSTECH)
Keywords: PDMS, mechanical stimulation, apoptosis, metastasis

Understanding the metastatic behavior of cancer cells is crucial for advancing cancer research and treatment. Previous studies have shown that mechanical stimuli can affect cell morphology, phenotype, and apoptosis, but the effects on cancer cell metastasis have not been thoroughly explored. In this study, we developed a polydimethylsiloxane (PDMS)-based bioreactor platform that applies cyclic mechanical stimulation to cells in bi-directions. Melanoma cells subjected to bi-directional cyclic stretch at 0.5Hz and approximately 10% strain for 6 hours aligned perpendicularly to the direction of stimulation. This mechanical stimulation also increased the nuclear expression of mechanotransduction markers, such as megakaryoblastic leukemia 1 (MKL1) and yes-associated protein 1 (YAP), with these effects being dependent on metastatic potential of the melanoma cells. In addition, we discovered that the overexpression of MKL1 was driven by the formation of actin filaments extending from the cytoplasm to the nucleus. Cyclic mechanical stimulation also influenced cancer cell apoptosis, with low-metastatic cells being more susceptible to apoptosis induced by mechanical stimulation. Co-

culture experiments revealed that cancer cells with varying degrees of metastatic potential responded differently to mechanical stimulation, indicating the potential for selective cancer cell therapy. The PCR experiment results confirmed that the highly metastatic cells that received mechanical stimulation had a much lower expression level of BCL2 Associated X(BAX) than the control group. In addition, the inhibition test confirmed that the apoptosis pathway related to BAX affected the regulation of apoptosis by mechanical stimulation. Together, our results suggest that highly metastatic cancer cells exhibit a rapid and robust response to external mechanical stimuli, enhancing their ability to evade cell death. We believe that our findings and the developed platform will significantly advance metastasis-based cancer diagnosis and treatment strategies.

[P11-4]

Advanced Whitlockite Synthesis Using IPL-Induced Carbothermal Shock Technique: Minjung Kim, Hyung-Seop Han* (Korea Institute of Science and Technology), and Seung-Kyun Kang* (Seoul national University)

Keywords: Whitlockite, Calcium phosphate, Magnesium, IPL, Carbothermal shock

Magnesium (Mg) and calcium phosphate (CaP) both play essential roles in bone regeneration; Mg enhances angiogenesis and osteoblast activity, while CaP materials provide biocompatibility and osteoconductivity. Among CaP-based bioceramics, Whitlockite—the second most abundant in human bone—stands out due to its magnesium content, which further promotes bone healing. However, its synthesis requires demanding conditions, making high-quality production challenging. As a result, unlike other calcium phosphate compounds, Whitlockite has not yet been widely commercialized [1,2]. To address these challenges, we propose a novel Whitlockite synthesis method using an Intense Pulsed Light (IPL)-induced carbothermal shock process, which simultaneously synthesizes and in situ coats Whitlockite onto substrates. IPL synthesis enables rapid energy absorption and conversion from light to heat, facilitating the formation and sintering of target particles without damaging the substrate. Compared to conventional synthesis methods, IPL-based Whitlockite synthesis is faster, more straightforward, allows for repeated processing steps, and eliminates the need for additional heat treatment. Furthermore, the coating process enables integration with various materials and facilitates surface modifications, expanding its potential for biomedical applications. In this study, we used calcium phosphate and $Mg(OH)_2$ powders as precursors for Whitlockite synthesis. By optimizing the pulse time and shot number of IPL, we successfully synthesized Whitlockite. X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy with fast Fourier transform (TEM-FFT) analysis confirmed the formation of the Whitlockite phase. Additionally, energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) in TEM analysis verified that the elemental composition corresponded to Whitlockite. Scanning electron microscopy (SEM) further demonstrated the presence of Whitlockite particles on the surface of carbon fibers. The result from this study demonstrates that Whitlockite can be successfully synthesized using the IPL-induced carbothermal shock method. Furthermore, the ability to coat Whitlockite onto surfaces such as carbon fibers highlights its potential for surface modification of implant materials and the development of composite materials for bone regeneration.

[P11-5]

Ultra-Sensitive Crack-Based Strain Sensor for Cortex Cerebral Dynamics: Do-Hoon Kwon, Jae-Hwan Lee, Yoon-Nam Kim (Seoul National Univ.), Jun-Sang Lee (Purdue Univ.), and Seung-Kyun Kang* (Seoul National Univ.)

Keywords: Ultra-sensitive Strain Sensor, Cerebral Dynamics, Biodegradable sensor, Biomechanical Signal Mapping

This research introduces an ultra-sensitive strain sensor employing crack-based mechanisms to achieve high precision in monitoring cortical dynamics. Inspired by the structural adaptation of spider legs, the sensor features a flexible meta-material substrate with a negative Poisson's ratio, significantly improving strain sensitivity in extremely low ranges. The sensor demonstrates gauge factors above 1,000 at strains as small as 10^-4 and achieves a resolution of 10^-5, surpassing the limitations of existing technologies. In vivo experiments highlight its capability to detect cerebral cortical microvascular dynamics, including subtle pulsatile patterns and blood flow. The sensor's conformal and adaptive design, combined with its biodegradability, ensures safe short-term monitoring without the need for surgical removal, making it particularly suitable for applications like traumatic brain injury diagnosis. These advancements further facilitate accurate mapping of biomechanical signals on complex biological structures, offering transformative potential for neurodiagnostics and healthcare.

[P11-6]

Polydopamine Coating on the Porous Ti for Sustained Release of Bone Morphogenetic Protein2: Wonhee Lee and W.H. Lee* (Sejong University)

Keywords: titanium, porous materials, sintering, bone morphogenetic protein, sintering, drug delivery

Polydopamine coating process was employed to modify the Ti surface. Polydopamine was used as a adhesion material for increasing bonding force between Ti and bone morphogenetic protein 2 (BMP2) to sustain release of BMP2. Porous Ti compacts which are BMP carriers were fabricated by high vacuum sintering, and were soaked in dopamine solution at room temperature for 3hrs to coat the polydopamine through out the pores. After then BMP2(312.5 μg/mL) was embedded into the polydopamine-coated porous Ti compacts and non-coated Ti compacts. The released BMP2 amounts were measured with Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) at 450 nm. The release period of BMP2 was increased by polydopamine coating. Furthermore, with polydopamine coating, the hydrophilicity

of Ti could be increased, making a enhancement of bioactivity. It can be concluded that the polydopamine coating process is a simple and efficient surface modification method for the application of Ti dug delivery system. The porous Ti can be also expected to enhance the bioactivity with the combination process of powder sintering and polydopamine coating, making a reduction of healing period in the implantation system.

[P11-7]

Bone Morphogenetic Protein Releasing Behavior by Micropores Characteristics of Porous Ti: Y.H. Cho and W.H. Lee* (Sejong University)

Keywords: titanium, porous materials, sintering, bone morphogenetic protein, sintering, drug delivery

In this study, we have manufactured porous titanium (Ti) compacts to make a fully open pore structure and embedded bioactive materials into the pores of porous Ti compacts. Porous Ti compacts were first fabricated by the sintering process using spherical Ti powders in a high vacuum furnace. The tensile strength of porous Ti compacts made using Ti powders with below 100 μm diameter was higher than human cortical bone and the modulus of elasticity value of porous Ti compacts was similar that of human bone. There is a tendency increase of average pore sizes and porosity of porous Ti compacts with an increasing of Ti powder size. Porous Ti compacts soaked in bone morphogenetic protein-2 (BMP-2) solution and then the released BMP-2 amounts were measured with enzyme-linked immunoassay(ELISA)reader. The release rate of BMP-2 increased as the pore sizes and porosities of porous Ti compacts increased. It was thus concluded that the release rate of bioactive substance from porous Ti compacts can be controlled by pore size and porosity.

[P11-8]

Stable and Miniatured In-Ear Sensor for Continuous Cardiopulmonary Monitoring: Seongu Kim, Minjoo Lee, Hyejun Kim, Yeonjae Yang, Jeonghun Lee, and Jeonghyun Kim* (Kwangwoon Univ.)

Keywords: Wearable, Flexible, In-Ear, Biomedical

With the increasing awareness of healthcare and the impact of the COVID-19 pandemic, the demand for continuous biomedical signal monitoring has significantly risen. Biomedical signals such as electroencephalogram (EEG), electrocardiogram (ECG), heart rate (HR), and oxygen saturation (SpO_2) play a crucial role in assessing an individual's physiological and psychological state. Conventional wearable medical devices are designed to interact with specific measurement sites; however, they are often limited in adaptability due to the use of rigid PCB circuits, which constrain their flexibility and comfort. As a result, research has focused on the development of flexible circuits printed on adaptable films to improve wearability and measurement accuracy. These advancements enable better contact with various body parts, increasing user comfort and extending potential applications. Despite these efforts, existing devices still face challenges in achieving optimal measurement accuracy, as certain biomedical signals, such as EEG and ECG, require sensors to be positioned close to their respective signal sources. Therefore, the exploration of alternative wearable sites is critical to enhancing both measurement precision and user convenience. In this study, we developed a wireless in-ear plug sensor capable of real-time monitoring of oxygen saturation (SpO_2) and heart rate (HR). The proposed device is designed to provide a comfortable, customized fit while maintaining miniaturization and a lightweight structure for long-term usability. Inspired by the form factor of wireless earphones, the sensor was fabricated using platinum-catalyzed silicone (Eco-Flex), and the material properties were analyzed based on different silicone compositions to optimize comfort and durability. The flexible circuit was printed on a film and folded to create a compact and efficient structural design. The sensor integrates a reflective photoplethysmogram (PPG) module and Bluetooth Low Energy (BLE) technology, allowing for real-time transmission of biometric data with minimal latency. By positioning the sensor within the ear canal, this design minimizes motion artifacts and external interferences that commonly affect wearable biomedical devices. The results demonstrate that this novel in-ear plug sensor achieves high measurement accuracy while ensuring improved user comfort and extended wearability. This study highlights the potential of an integrated, high-precision wearable sensor platform for real-time biomedical monitoring, offering broad applicability in both medical diagnostics and personal healthcare management.

[P11-9]

Development of Magnesium Surface Modification with Hydroxyapatite for Biodegradable Mini-Plates in Maxillofacial Surgery: Seo Yeon Lee, Patrick M. Bacirhonde, Joshua Lee, and Chan Hee Park* (Jeonbuk National Univ.)

Keywords: Anticorrosion, Magnesium, Miniplates, Surface modification, Tissue engineering

The demand for mini-plates in maxillofacial fracture fixation has been rising, particularly for trauma cases and reconstructive surgeries. Titanium plates are widely used due to their superior mechanical strength and biocompatibility; however, they pose limitations such as stress shielding-induced bone resorption, permanent radiographic visibility, and the need for secondary removal surgery. Additionally, they may cause discomfort, foreign body sensation, or inflammatory responses. To overcome these challenges, biodegradable metal-based mini-plates, particularly magnesium (Mg), have gained attention due to their natural presence in the body and biodegradability. However, the rapid degradation of Mg resulted in local pH fluctuations, hydrogen gas evolution, and a loss of mechanical integrity, ultimately compromising its ability to provide structural support during the bone healing process. Therefore, surface modification is crucial to controlling the degradation rate and enhancing the performance of bone implants. This study explored

the formation of hydroxyapatite (HA) composite coatings on the surface of magnesium using an electrochemical deposition method to enhance corrosion resistance and promote cell adhesion. The uniform HA coating acted as a protective ceramic layer, preventing corrosion while facilitating tissue regeneration. To analyze the surface characteristics of the surface-modified magnesium plates, physicochemical analyses were conducted. Corrosion resistance was evaluated through electrochemical experiments, and the surface-modified magnesium plates were immersed in simulated body fluid (SBF) to assess physicochemical changes in the coating layer and mass loss during the biodegradation process.

P12 : 나노융합소재
Room 3층 로비, 4월 24일

[P12-1]
Synthesis of Two-dimensional van der Waals Material $TaOI_2$ and its Optoelectronical Properties: Yeong hyeop Kim, Jinsu Kang, and Jae-Young Choi* (Sungkyunkwan University)
Keywords: Nano material, Synthesis, Semiconductor, Optical property

Two-dimensional van der Waals materials have garnered significant attention due to their exceptional properties, including high carrier mobility, tunable bandgap, and strong light absorption. Among these materials, the MOX_2 family, including $NbOI_2$, exhibits unique optical properties such as second harmonic generation arising from their anisotropic crystal structure. Despite their promising characteristics, the synthesis and exploration of new MOX_2 compounds remain limited. To expand the understanding of this material family, we aimed to synthesize new metal oxide iodides, particularly $TaOI_2$, with the same crystal structure as $NbOI_2$ but with different transition metals, focusing on investigating their distinctive electrical and optical properties. In this work, we report the synthesis of centimeter-scale single crystals of $TaOI_2$, a novel member of the metal oxide iodide family, via chemical vapor transport method. The material shares the same crystal structure as $NbOI_2$ but incorporates different transition metal species. Devices were fabricated using mechanically exfoliated $TaOI_2$ and encapsulated with Al_2O_3. Electrical characterization revealed semiconducting behavior, while optical measurements demonstrated remarkable photo response in the near-infrared region. Notably, the devices exhibited exceptional performance with a responsivity of 186.55 A/W and a detectivity of 5.17×10^{19} Jones at 800 nm illumination.

[P12-2]
Layer-by-layer Fabrication of Graphene-Fullerene Nanostructures: Korlan Duisenova (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Sun Hwa Lee* (Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))
Keywords: Graphene, polyhydroxylated fullerene, layer-by-layer assembly, hybrid materials

One method for integrating graphene with other materials is Layer-by-Layer (LbL) assembly, which enables precise control over layered structures. We assembled graphene-polyhydroxylated fullerene (PHF) films using LbL deposition on ozone-plasma-treated Si/SiO_2 substrates. Graphene was exfoliated via ball milling with polyethyleneimine (PEI), yielding a positively charged aqueous suspension A (pH 6.50, +38.3 mV), while PHF formed a negatively charged suspension B (pH 7.79, -36.7 mV). Films were assembled using a robotic arm, with alternating 30-minute immersions in suspension A then suspension B, followed by Milli-Q water rinses. Preliminary results show a linear increase in film thickness with the number of bilayers. AFM confirms graphene deposition with PHF clusters (~2 nm) on its surface, while SEM images of thicker films (>50 bilayers) reveal a well-defined layered morphology. Since residual PEI may facilitate hydrogen bonding between PHF and graphene, heat treatment was done to remove PEI. Raman spectroscopy of treated films showed the characteristic PHF peak at 1590 cm^{-1}. Future work will focus on evaluating the mechanical and electronic properties of these films. This research is supported by IBS-R019-D1.

[P12-3]
Highly Sensitive Detection of Xylene Gas with Cauliflower-shaped Au-TiO_2 Core-Shell Nanoparticles: Eun Bi Kim, Ka Yoon Shin, Wansik Oum, Seonwoo Jang, Sungjoon Moon, and Hyoun Woo Kim* (Hanyang University)
Keywords: Xylene, Au-TiO_2, Core-shell

TiO_2 nanoparticles (NPs) and Au-TiO_2 core-shell NPs (C-S NPs) were synthesized for xylene gas detection. Morphological, phase, and chemical analysis confirmed the successful formation of Au-TiO_2 C-S NPs with a cauliflower-like structure and the desired chemical composition. The surface area of the TiO_2 NPs was measured at 8.46 m^2/g, which increased to 23.88 m^2/g for the Au-TiO_2 C-S NPs due to the development of a porous TiO_2 shell surrounding the Au core. The response of TiO_2 NPs to 50 ppm xylene was recorded at 14.19 at 500ºC, while this response rose to 165.77 at a lower temperature of 450ºC. Additionally, although the TiO_2 NPs gas sensor showed no selectivity towards xylene, the TiO_2 C-S NP gas sensor demonstrated excellent selectivity. Overall, the integration of Au into TiO_2 in a core-shell configuration enhanced the sensor's ability to detect xylene. The improved sensitivity of the TiO_2 C-S NPs towards xylene can be attributed to their high surface area, porous characteristics, oxygen vacancies, and the formation of Au-TiO_2 Schottky barriers. This study illustrates the advancement of high-performance xylene sensors through the use of Au-TiO_2 in a core-shell architecture. Acknowledgments This paper was published in Seosors & Actuator: B. Chemical [Sensors & Actuators: B. Chemical 412 (2024) 135802]

[P12-4]
One-pot Synthesis of Large area and Well-Ordered N-Doped Carbon Nanowalls (CNWs) on Cu(111) via High Temperature

Electrochemistry: Dongwoo Kim, Minhyeok Kim (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong (Institute for Basic Science (IBS)), Sun Hwa Lee*, and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: Carbon nanowalls, Cu(111) foil, electrochemistry, nitrogen doping, ordered structure

We present a scalable molten salt electrolysis approach for synthesizing large-area, well-ordered nitrogen-doped carbon nanowalls (CNWs) on Cu(111) foil at 600 ºC. Melamine served as both carbon and nitrogen source along with Li_2CO_3 as the primary carbon source. Pre-annealing under hydrogen environment is a key-step to remove copper oxides, which facilitates the growth of uniform 1-cm^2 CNW films. The resulting CNWs exhibit ~4 at.% nitrogen doping and an ordered structure. The growth is highly selective for the Cu(111) facet. Notably, unlike many CNW growth methods relying on chemical vapor deposition (CVD), our technique readily yields highly ordered, N-doped CNWs. Current efforts are directed toward optimizing N-doped CNW synthesis over 1 cm^2 and elucidating the nitrogen incorporation mechanism. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[P12-5]

Surface Ligand Engineering for High-Efficiency H_2O_2 Electrosynthesis Using Artificial Catalysts: Jeong-Gyu Lee (Dongguk university), Jae Won Choi, Jong Min Kim* (Korea Institute of Science and Technology), and Min-Jae Choi* (Dongguk university)

Keywords: Nanocrystals, Ag_2S, Oxygen reduction reaction, Surface ligands

Surface ligands have been considered detrimental to catalytic activity because they can obstruct active sites. However, their potential advantages in controlling electrochemical reactions remain largely unexplored. To address this gap, we propose a regulated ligand coverage strategy to enhance the activity of the 2-electron oxygen reduction reaction in Ag_2S nanocrystals (NCs). Supported by DFT calculations, our findings demonstrate that surface ligands can induce electron deficiency on catalytic surfaces, which enhances oxygen adsorption. Additionally, when ligand coverage exceeds 50%, it promotes end-on O_2 adsorption, leading to improved H_2O_2 selectivity. Utilizing this strategy, we loaded the regulated Ag_2S NC onto oxidized carbon nanotubes (O-CNT), achieving stable H_2O_2 electrosynthesis in a flow cell system at a current density of 300 mA cm^{-2}. This approach led to a production rate of 160.56 mg cm^{-2} h^{-1} and a faradaic efficiency (FE) exceeding 84% in neutral media.

[P12-6]

Size and Optical Property Control for the Synthesis of Highly Monodisperse Ag_2Te Colloidal Quantum Dots for SWIR Photodetectors: Ha-Neul Kim and Min-Jae Choi* (Dongguk University)

Keywords: Quantum dots (QDs), absorbance, NIR-II, optoelectronic

Silver chalcogenide quantum dots (Ag_2X, X: Se, Te, S) are emerging as highly promising nanomaterials for semiconductor and bioimaging applications, owing to their low toxicity and excellent optical properties in the NIR-II range. Compared to lead sulfide-based quantum dots, they offer significant advantages in this wavelength region. However, precisely controlling their size and bandgap during synthesis remains a major challenge. In this study, we present a novel approach that modulates precursor reactivity to achieve precise control over the size and optical properties of Ag_2Te quantum dots. This strategy not only provides valuable insights into the synthesis of Ag_2Te QDs but also highlights the potential for creating high-quality nanomaterials with tailored optoelectronic properties optimized for the NIR-II range.

[P12-7]

Synthesis of High-Quality Zeolite Templated Carbon at 20bar: Madi Arsakay (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Sun Hwa Lee, Won Kyung Seong (Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: Zeolite Y, zeolite-templated carbon, ZTC,

Extensive research has been conducted on zeolite-templated carbons (ZTCs) since the late 1990s, with various zeolite templates, carbon precursors, and synthesis parameters explored. Despite significant progress, several unresolved questions, controversies, and overlooked aspects remain. To maximize carbon infiltration into the zeolite pores, different strategies have been employed. One approach involved using nano- and micro-sized FAU particles to shorten gas precursor diffusion pathways.[1] Acetylene was used as the carbon source, with a growth temperature of 600ºC. However, the combination of high temperatures and sodium counter ions (Na^+) in the FAU zeolite resulted in excessive carbon deposition outside the zeolite particles. To minimize external surface deposition on FAU zeolite with acetylene, a reduction in synthesis temperature is necessary. One effective strategy is substituting some of the Na^+ with ions such as La^{3+} or Ca^{2+}, within the zeolite structure that catalyze the breakdown of carbon precursors.[2,3] This method has enabled ZTC synthesis at temperatures as low as 400ºC. We aimed to synthesize ZTCs using acetylene and only Na^+ counter ions with nano-FAU and micro-FAU as templates but under 20 bar pressure. Preliminary results indicate the formation of high-quality ZTCs, with carbon-to-zeolite ratios of 0.37–0.38: the highest reported to date. Additionally, we successfully achieved synthesis at temperatures as low as 300–350ºC, using a minimal and controlled amount of acetylene. Future work will focus on further characterizing the samples and evaluating their electrochemical performance. This research is supported by IBS-R019-D1 References: Boonyoung, P.; Kasukabe, T.; Hoshikawa, Y.; Berenguer-Murcia, Á.; Cazorla-Amorós, D.; Boekfa, B.; Nishihara, H.; Kyotani, T.; Nueangnoraj, K. A simple “nano-templating”

method using zeolite y toward the formation of carbon schwarzites. Frontiers in Materials 2019, 6. Kim, K.; Lee, T.; Kwon, Y.; Seo, Y.; Song, J.; Park, J. K.; Lee, H.; Park, J. Y.; Ihee, H.; Cho, S. J.; Ryoo, R. Lanthanum-catalysed synthesis of microporous 3D graphene-like carbons in a zeolite template. Nature 2016, 535 (7610), 131-135. Yang, G.; Liu, H.; Arsakay, M.; Shen, J.; Shen, Y.; Fatkhulloev, A.; Ruoff, R. S. A comprehensive parametric study of factors that influence synthesis of high-quality ZTC using Ca2+ exchanged zeolite Y as the template. Carbon 2023, 215.

[P12-8]

철강산업부산물 밀스케일 (Mill Scale) 을 활용한 나노 자성유체 합성: 박규민, 김세호* (고려대학교)

Keywords: 나노 자성입자, 철강산업부산물, 업싸이클링

철강 산업부산물 가운데 밀스케일(Mill scale)은 제강 과정에서 강재 표면이 산화되어 발생하는 산화철층으로 총 강재 생산의 2~5%를 차지한다. 대다수의 현행 밀스케일 재활용 연구는 밀스케일을 적절한 성분 및 용량의 환원제와 함께 고온에서 환원하여 철을 재수득하는 방법으로 이루어진다. 그러나 이 같은 산화철의 환원 공정 기반 밀스케일 재활용은 에너지를 대량 소모하는 고온 환경이 필수적이며, 현행 기술의 한계로 이산화탄소와 같은 온실가스 배출을 완전히 배제할 수 없다. 본 연구에서는 밀스케일이 가지는 산화철의 물성을 활용하여, 간단한 볼밀링 공정을 통해 자성을 가지는 마그네타이트 산화철 나노 입자를 수득, 적절한 용매에 분산하고 고부가가치 자성유체를 합성하는 방안을 소개한다. 밀스케일을 구성하는 산화철 가운데 마그네타이트는 스피넬 구조에 의해 페리자성 특성을 가지는 자성체로, 초상자성 특성을 가지는 자성 나노 입자를 자성이 없는 유체 내부에 분산하여 자성유체를 합성할 수 있다.

[P12-9]

Ultrasensitive Ethanol Sensor with Rapid Response: Effect of Pt catalyst for Enhanced Gas Detection: Eunsol Lee, Jae Han Chung, Zion Park, and Young-Seok shim* (Korea University of Technology and Education)

Keywords: Gas sensors, In_2O_3, Pt, Nanostructure, Ethanol

Efficient ethanol detection in exhaled breath is critical for preventing drunk driving, necessitating gas sensors with rapid response, high selectivity, and low detection limits in humid environments. In this study, we developed Pt-decorated In_2O_3 nanorods (NRs) using glancing angle deposition (GLAD) to enhance ethanol sensing performance. By systematically varying the Pt film thickness (0.5, 1, and 2 nm) and annealing to form Pt nanoparticles, we identified the optimal conditions for maximum sensor response. The optimized sensor exhibited the highest response at 450 °C, with a theoretical detection limit of 0.42 ppb in dry air and 6.1 ppb under 80% relative humidity. This remarkable performance is attributed to the expansion of the electron depletion layer via Schottky barrier formation and the spillover effect, which enhances gas adsorption and reaction. The results demonstrate the potential of Pt-functionalized In_2O_3 NRs for next-generation ignition interlock devices (IIDs), offering a promising approach for reliable ethanol detection in real-world application.

[P12-10]

High-Performance Stretchable Gasochromic Sensor with Pd-WO_3 Nanobamboos for Rapid Hydrogen Detection: Zion Park, Yun-Haeng Cho, Eunsol Lee, and Young-Seok Shim* (Korea University of Technology and Education)

Keywords: Hydrogen, Pd, WO_3, nanostructures, PDMS

Hydrogen (H_2) is a promising next-generation energy source due to its emission-free, renewable, and eco-friendly properties. However, its high combustibility above a 4% concentration in air, combined with its colorless, tasteless, and odorless nature, requires the development of highly sensitive and selective gas sensors for early detection and hazard prevention. Gasochromic sensors, which provide an eye-readable color change in response to hydrogen exposure, have gained significant attention for real-time monitoring in industrial environments. However, most gasochromic sensors based on glass or PET substrates lack sufficient stretchability, limiting their applicability to curved or dynamic surfaces such as pipelines. In this study, we fabricated highly porous Pd-decorated WO_3 nanobamboo (Pd-WO_3 BBs) structures using a glancing angle deposition technique to enhance gas diffusion and catalytic activity. The optimized Pd-WO_3 BBs achieved a 41% color change, a coloring rate of $3.5s^{-1}$, and a bleaching rate of $15.5s^{-1}$, demonstrating superior performance compared to previously reported sensors. To further improve mechanical adaptability, we first fabricated the Pd-WO_3 BBs on a glass substrate and then transferred them onto a stretchable polydimethylsiloxane (PDMS) substrate, enabling seamless wrapping around complex surfaces while maintaining excellent durability and sensing performance under mechanical deformations. Our findings highlight the potential of highly sensitive and stretchable gasochromic hydrogen sensors, paving the way for their implementation in next-generation industrial safety monitoring, smart wearables, and real-world hydrogen leak detection systems.

[P12-11]

Advanced SnO_2 Nanohelix Sensors with Polymeric Filtration for Early-Stage Thermal Runaway Detection in Lithium-Ion Batteries: Sung Woo Sohn, Junho Hwang (Yonsei University), Yun-Haeng Cho, Jae Han Chung, Baek Song (Korea University of Technology and Education), Wooyoung Lee (Yonsei University), and Young-Seok Shim* (Korea University of Technology and Education)

Keywords: Gas sensors, SnO_2, Nanohelix, Polymeric filter, Thermal runaway

Lithium-ion batteries (LIBs) are widely utilized in electric vehicles (EVs) and energy storage systems (ESS) due to their high energy

density and specific capacity. However, their inherent thermal runaway (TR) risk, triggered by uncontrolled temperature escalation, poses significant safety concerns. Conventional TR detection methods, such as temperature- and pressure-based sensors, exhibit delayed response times, limiting early intervention. To enable rapid and selective detection of TR-indicating gases, we developed a highly sensitive SnO_2 nanohelix-based gas sensor with an integrated polymeric filtration system. During TR, ethylene (C_2H_4), methane (CH_4), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO_2), and hydrogen (H_2) are released. The sensor, fabricated via glancing angle deposition (GLAD), features a 1D nanohelix architecture that enhances gas diffusion kinetics and maximizes the reaction interface, thereby improving response and response time. To achieve precise gas selectivity, polymeric filter layers (Nafion, PDMS) were applied to eliminate cross-sensitivity to interfering species, while noble metal catalysts (Pt, Pd, Au) further tailored the sensor's response to specific off-gases. Our results confirmed that the functionalized SnO_2 nanohelix sensor with polymeric filtration exhibited superior response and selectivity, providing a promising approach for early TR diagnostics and LIBs safety monitoring.

[P12-12]

High Mobility $HfSe_2$ Thin Films Synthesized by Hybrid Deposition Method with Enhanced Stability: Jungdae Lee and Sanghan Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology)

Keywords: 2D materials, Transition metal dichalcogenides, TMD, $HfSe_2$

High-mobility two-dimensional (2D) semiconductors are promising candidates for overcoming the limitations of silicon-based devices. Among them, transition metal dichalcogenides (TMDs) offer exceptional charge transport properties, with hafnium diselenide ($HfSe_2$) theoretically predicted to achieve an electron mobility of ~3,500 $cm^2/V{\cdot}s$ at room temperature. However, mechanically exfoliated flakes exhibit mobilities around 10 $cm^2/V{\cdot}s$ (nearly 1/350 of the theoretical value) due to intrinsic selenium deficiency, which increases charge scattering and oxidation susceptibility, degrading electrical performance. To accurately assess the intrinsic properties of $HfSe_2$ and mitigate defect-induced degradation, precise thin-film synthesis is essential. Here, $HfSe_2$ thin films were synthesized via a hybrid deposition method, integrating laser ablation for hafnium (Hf) and thermal evaporation for selenium (Se). Raman spectroscopy confirmed the 1T phase, while X-ray diffraction (XRD) and φ-scan analysis revealed c-oriented growth with 6-fold symmetry, indicating strong epitaxial alignment and high crystallinity. Electrical measurements showed semiconducting behavior, with resistivity increasing as the temperature decreased, and showed lower resistivity than single crystal flakes. At 300 K, the sample with a Se/Hf ratio of 14 exhibited a resistivity of 0.59 Ω·cm, which is about six times lower than a Se/Hf ratio 7 sample (3.73 Ω·cm). This indicates that reduced selenium deficiency enhanced the electrical properties. Additionally, an amorphous BN (a-BN) layer was applied for in-situ passivation on the Se/Hf ratio 7 sample. The resistivity decreased to 1.00 Ω·cm at 300 K, about 3.7 times lower, indicating improved electrical properties. Furthermore, compared to bare $HfSe_2$, the passivated sample maintained phase stability three times longer during annealing tests. Hall measurements demonstrated the importance of composition control and passivation in optimizing electrical properties. These findings establish $HfSe_2$ thin films as a high mobility 2D semiconductor, demonstrating a scalable deposition approach for improved oxidation resistance and device integration, providing insights for advanced 2D electronics and optoelectronics.

[P12-13]

Study of Mesoporous Silica Templated Carbon from Different Synthetic Routes: Bayrammuhammet Annageldyyev ((Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Madi Arsakay, Ja Hun Kwak*, and Rodney S. Ruoff* (Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Institute for Basic Science (IBS))

Keywords: mesoporous silica, porous carbon, microwave, hybrid-microwave-annealing

We synthesized ordered porous carbon using mesoporous silica templates and investigated the effects of various synthetic parameters, including template type, carbon precursors, and heat treatment methods, on the resulting carbon structures. Our aim was to evaluate the structural and physical properties of the carbon materials produced through these synthetic routes. MCM-48 and SBA-16, with pore sizes of 2.5 to 3 nm and 5 nm, respectively, were used as silica templates, while acetylene and furfuryl alcohol were used as carbon precursors. The carbon–silica composite samples were heat-treated by hybrid-microwave-annealing (HMA) and conventional furnace [1]. Incorporating Al^{3+} onto the silica surface effectively catalyzed carbon growth on the silica pore walls, resulting in higher carbon-to-silica (w/w) ratios compared to bare silica templates. Raman spectroscopy showed SBA-16-templated carbon had slightly higher I_G/I_D peak ratios than MCM-48-templated carbon, perhaps suggesting differences in structural ordering. Furfuryl alcohol-derived samples displayed a significant D_4 band shoulder peak at ~1200 cm^{-1}, indicative of amorphous carbon or impurities. This peak diminished with increasing heat-treatment temperature, suggesting improved structural ordering. Further characterization of these materials is underway, along with an evaluation of their electrochemical performance. This research is supported by IBS-R019-D1 References: 1. (1) Kim, J. H.; Jang, Y. J.; Choi, S. H.; Lee, B. J.; Lee, M. H.; Lee, J. S. Hybrid Microwave Annealing for Fabrication of More Efficient Semiconductor Photoanodes for Solar Water Splitting. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2018, 7, 944–949.

[P12-14]

Free-standing, Binder-free, High-loading Si Anode with Exceptional Stability via Formation of Interfacial Si-C bond: Junho Shin (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)),

Jungeun Lee, Sangyong Lee (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)), Ji-Yoon Song (Northwestern University (NU)), Jongwhan Park, and Jungmo Kim* (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI))
Keywords: Carbon nanotubes, Silicon, Interfacial bonding

Recently, various materials are being researched to increase the energy density of lithium-ion batteries. Among them, silicon (Si) is receiving a lot of research due to its characteristics such as high theoretical capacity (4200 mAh/g), low operating voltage, and cost-effectiveness owing to its high abundancy. However, instability of Si-based anode due to large volume expansion (400%) and low electrical conductivity limit the maximum Si content in the anode (e.g., Si-based anode in commercialized products contain only 5 wt% of Si). Various attempts have been made in order to increase the Si content; by 1) Forming SiO_x or carbon layer on Si particles, [1] 2) Alloying Si with other elements (e.g., Al, Mg, Fe, etc.,) [2], 3) Using nano Si particles, [3] 4) Incorporating highly stable binders [4], and 5) Incorporating nano carbon materials such as carbon nanotubes (CNTs) and graphene as conductive agents [5]. Such attempts are partly effective in enhancing the cyclic stability of the Si-based anode with increased Si content, yet the Si content is still limited, and result in other limitations, such as decrease in the theoretical capacity, high processing cost. Therefore, increasing the silicon content while maintaining the cyclic stability of the electrode remains a challenging issue. In this study, we demonstrate a free-standing, binder-free independent Si anode with superb rate capability and cyclic stability even at exceptionally high Si loading up to 98 wt% through formation of interfacial Si-C bond between Si and single walled CNTs (SWCNT). The free-standing binder-free electrodes are fabricated by a simple coating and lift-off process using a mixture of micro-Si (size~7 μm) and defect-free SWCNT dispersion. Afterwards, the electrode is exposed to rapid heating process, which results in a formation of direct interfacial Si-C bond between the Si and SWCNTs, as well as partial nanofication of the Si particles. The interfacial Si-C bond allows superb cyclic stability (83.17% @ 100 cycles) and rate capability (96.8% recovery after 10 A/g cycle) at high Si loading of 95 wt%. We believe the demonstrated result proves the importance of providing direct interfacial bonding between the active material and the conductive agent, which can be a core strategy in designing a high Si loading electrodes for advanced Li-ion battery with high energy density. [1] H. Wei et al., Journal of Alloys and Compounds, 969 (2023) [2] N. Umirov et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 17406–17414 (2020) [3] X. H. Liu et al., ACS Nano, 1522–1531 (2012) [4] C. Luo et al., ACS Sustainable Chem. Eng, 12621–12629 (2018) [5] W. Ten et al., Energy Storage Materials, 45 412–421 (2022)

[P12-15]

High Energy Density and Efficiency Aluminium-Air Batteries with Spark Reaction of Graphene Oxide: Geonwoo Lim and Wooyoung Shim* (Yonsei University)
Keywords: Aluminium air batteries, graphene oxide, spark reaction

There is growing interest in high-performance energy storage systems to meet the strong needs for high-energy-density and high-power devices. Metal-air battery systems could offer a low cost, environmental friendliness, and outstanding energy-storage capability. In particular, aluminum-air batteries are attractive systems due to their safe and energy-dense property. However, actual performances of them are far below the theoretical performances. Here, we show aluminum-air batteries adopting a sparked graphene oxide/silver nanoparticle cathode. The spark reaction makes the graphene oxide very porous structure that can provide a wide oxygen diffusion path. Moreover, silver nitrate is co-reduced by the reaction and becomes a silver nanoparticle which acts as a catalyst for the oxygen reduction reaction. The resultant aluminum-air cell shows very remarkable electrochemical performance and enough power to turn on 19 LEDs simultaneously when connected in series. This work represents an advancement in aluminum–air batteries using a facile one-step spark reaction concept, showing a practical applicability of aluminum-air batteries.

[P12-16]

Graphene Oxide Membrane with Cation Selectivity for Scalable Energy Generation: Seokmin Park and Wooyoung Shim* (Yonsei University)
Keywords: graphene oxide, power generation, cation selective

The global energy system faces an unprecedented need for ‘more energy’ and ‘less carbon’. Many forms of energy are considered renewable, including wind, hydro, solar, geothermal, and biofuel energy. These types of energy are relatively sustainable, abundant, clean, and inexpensive. However, recognizing the limitations of conventional renewable energy sources, there has been growing interest in the energy field due to the need for sustainable, safe, non-periodic and high-performance energy generation system. In this respect, salinity gradient energy, known as new type of renewable energy, can generate 0.8 kWh/m3 at the sea–river interface by harnessing the entropy generated during ion mixing. For example, owing to its discharge rate of 209,000 m3/s, the Amazon River can yield a theoretical power of approximately 0.8 TW. In addition, salinity gradient energy has a great advantage in that it is non-periodic and continuous, unlike conventional renewable energy, such as solar and wind power. In this research, we will present the two-dimensional materials based cation-selective membrane for salinity gradient power generation. The confined nanochannel is robust in liquids, enabling steady-state ion diffusion for hundred of hours and exhibiting ion selectivity of 95.8%, energy conversion efficiency of 41.4%, and power density of 5.26 W/m2. This fundamental understanding and rational design strategy can enable previously unrealisable applications of passive-type large-scale power generation.

[P12-17]
High-Resolution Large-Area Patterning Using Scanning Probe Nano-Lithography: Jihoon Han and Wooyoung Shim* (Yonsei University)
Keywords: Scanning Probe microscopy , Nano-lithography, High-Resolution large area

Recent, many lithography methods using scanning probe microscopy (SPM) have been reported. In particular, experiments were conducted using atomic force microscopy (AFM) software designed for lithographic purpose. These methods have led to the achievement of high resolution and low cost. However, there is still a throughput challenge due to limitation of cantilever-based scanning probe system. Additionally, the recent significant issues are miniaturization and high integration of various devices. The nano-scale materials are excellent solutions for these issues. However, the controlled assembly of nanowire is a key challenge in the development of a range of bottom-up device. Nano-scale combing assembly technique can be a solution. However, nano-scale combing technique needs electron-beam (e-beam) lithography accordingly it also causes high cost and throughput problem. Here, we present new lithographic method overcome these two issues. This method deals with the problems by combining the nano-scale combing technique with the hard-tip, soft-spring lithography method. We proceeded with lithography by attaching the hard tip arrays of a centimeter-scale to a scanning probe microscopy instead of a cantilever. High-throughput large-area patterns of nano-scale were obtained using this method. Additionally, assembly of nanowire can be achieved by combining this patterning process with nano-scale combing technique without e-beam lithography.

[P12-18]
Rapid-Response Thermochromic Display via Molecular Printing: Taeyoung Kim and Wooyoung Shim* (Yonsei University)
Keywords: thermochrmic display, molecular printing, fast thermal response

Reflective-type display using thermochromic materials offers several advantages over the conventional optoelectronic technology: a passive circuit element-driven simplified device layout, cost-effectiveness, and clear visibility. An Inherent challenge of chromic displays is slow color transition, which results from the mass-dependent characteristic of chromic inks. A large mass of the thermochormic ink has a large heat capacity requiring more energy to induce color switching. A molecular printing using polymer pen array technique that can reduce the mass of the delivered ink, may offer the ability to effectively control the switching time in a spatially controlled manner. Here, we demonstrate a method for molecular printing of a thermochromic ink with a low heat capacity, enabling an unprecedented, fast color switching without any optoelectronic elements. Molecularly printed ink is patterned on fabricated microheaters that induce transient local heat generation, facilitating local heating and cooling processes. Depending on the concentration of the thermochromic ink, i.e., the number of microcapsuled dyes in the form of a monolayer resulting in a low heat capacity, the chroma of the patterned ink could be increased. Using this technique, the thermochromic ink could be printed over centimeter scales, with CMYK (cyan-magenta-yellow-black) colors at a color-switching rate of 20–500 ms, to be integrated into the thermochromic device prototype for potential display applications.

[P12-19]
Bismuth-Assisted Wetting Control in Na- β Alumina Batteries: Junwoo Ko and Wooyoung Shim* (Yonsei University)
Keywords: Sodium, Battery, Wettability, Bismuth, Ionic conductivity

As the importance of renewable energy grows, Sodium/β”-alumina(BASE) cell has been recognized as one of the most effective energy storage device because of its high specific energy, high efficiency of charge/discharge and long cycle life. For better operation of Sodium-BASE cell, poor wettability, which is caused by moisture and impurity in the BASE such as calcium, of electrolyte on liquid sodium anode should be enhanced. However, the formation of the oxide film, which is related to moisture absorbed on the BASE surface, impedes sodium dissolution, thereby hindering an accurate determination of wetting behavior. In this study, the sessile drop technique under controlled moisture and O2environment is used as a type of an artificial Sodium-BASE cell system to study the issue of water interface formed onto the BASE. To separate water interface, BASE surface needs to be coated by metal that can form an alloy with sodium and therefore completely isolated its surface in a way that emulate the sealed and complete real cell. Bi is chosen as protect layer and sodium alloy with Bi is impervious to water yet does not interfere with sodium conductivity. By the enhanced wettability, the Sodium-BASE batteries can be operated at lower temperature with solving the safety issues and to use low cost polymeric seals.

[P12-20]
Electromagnetic Wave Suppression Enhancement through Precisely Engineered Microstructured Aluminum Sheets: Jihun Yeom and Wooyoung Shim* (Yonsei Univ.)
Keywords: Metal nanosheet, Electromagnetic wave, EMI shielding, Aluminum nanosheet

The ideal wave absorber is able to absorb all incident EM-waves, regardless of the incident wave direction, polarization, and frequency. In other words, it is an object that does not cause any reflection waves. Since the absorption and reflection must coexist due to the electrical conductivity, it is actually the ideal EM wave absorber does not exist. Herein, we present a design strategy for preparing an EM absorber, based on a shielding effectiveness of absorption controlled by the multiple internal reflections occurring on the layer

structure, with the ultimate goal of anti-reflection through gradient of intrinsic impedance. This approach is experimentally verified using aluminum nanoflakes, and the designed microstructure is spontaneously realized by particle behavior in dispersion. This method allows the exclusion of accompanying reflectivity depending on the absorption efficiency of the common shielding material. We anticipate that it will be widely used in academic and industrial productions.

[P12-21]

Nanomaterial Assembly via Nano-Cymatic Control: Gyuhyeon Cho and Wooyoung Shim* (Yonsei Univ.)

Keywords: nano-cymatics, nanomaterial assembly

Analogous to the definition of crystallographic 'lattice', symmetric and periodic points comprised of accumulated building blocks can be seen as 'lattice equivalent', resulting from the material assembly. By virtue of the tailoring ability of the system, we deliberately control the pattern size and dimensionality and understand the wave mechanics as well. This approach is technologically unique in that (i) it is a method that enables the construction of three-dimensional nanomaterial assembly, which has never before been observed in the field of cymatics, and (ii) a massively parallel method that creates arrays over macroscale areas where the total patterned area is only limited by the size of the plate surface. Periodic and symmetric patterns are easily made in the Cartesian coordination system, where liquids on the centimeter scale plate are employed as a medium. We show how transparent polymer can be used as a 'three-dimensional spacer' within nanoparticle superlattices assembled, which has never before been observed in cymatics. Consequently, we expect thins versatile strategy to be widely adopted by academic and industrial researchers for prototyping.

[P12-22]

Facile Synthesis of SWCNT-Cu Hybrid Fiber via Wet-Spinning of Charged SWCNT Dispersion: SangYong Lee (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), University of Science and Technology (UST)), Junho SHin (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Jungeun Lee (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)), and Jungmo Kim* (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), University of Science and Technology (UST))

Keywords: SWCNT, Fiber, Cu, Hybrid

As the needs for the miniaturization of electronic and electric devices grows, diverse efforts to fabricate light-weight electrical wires have been made by researchers and industries. Among various strategies, hybridization of copper (Cu) and single walled carbon nanotube (SWCNT) fiber showed advantages in ability to overcome the ampacity limitation in pure Cu wires, while providing lowered density[1]. However, the configuration of the SWCNT-Cu hybrid fiber has mostly been limited to core-shell structure because the Cu ions cannot infiltrate into the inner region of the highly packed SWCNT fibers during the conventional hybridization process. Such limitation in the configuration hinders the synergistic effect that could be expected from the hybridization, thereby requiring a new approach for the effective hybridization. In this research, SWCNT-Cu nanoparticle hybrid fiber is fabricated by using simple wet-spinning technique. The SWCNT dope used in the process is prepared by dispersing SWCNT in electron solution, resulting in negatively charged SWCNT[2]. Implementing aqueous copper sulfate solution as the coagulant result in the formation of SWCNT fiber decorated with copper oxide nanoparticles, which is reduced to Cu nanoparticles through simple annealing process. The SWCNT-Cu hybrid fiber is comprised of SWCNT bundles with diameter ranging from 20 nm to 500 nm and the voids between the bundles. We believe the SWCNT-Cu nanoparticle hybrid fiber is promising template material for the formation SWCNT-Cu hybrid wire using electrodeposition process, which will be conducted in the future.

[P12-23]

Enhancing Charge-Trap Memory Performance via Electron-Dipole Interaction in Janus MoSSe Floating Gate: Eun Bee Ko, Seon Yeon Choi (Kumoh National Institute of Technology), Min Sup Choi (Chungnam National University), and Hyun Ho Kim* (Kumoh National Institute of Technology)

Keywords: flash memory, Janus Transition Metal Dichalcogenides, field effect transistor

The rapid progress of artificial intelligence and big data technologies has significantly increased the demand for high-capacity and high-speed memory devices. To address these demands, the development of advanced memory technologies with superior performance has become a critical challenge. In this context, van der Waals heterostructure-based two-dimensional (2D) memory has emerged as a promising candidate for next-generation non-volatile memory devices. This study introduces a Janus MoSSe-based floating gate 2D flash memory and investigates its performance characteristics. The intrinsic built-in dipole of Janus MoSSe induces strong interactions between the Janus structure and the electrons, leading to more stable and reliable memory operation compared to conventional 2D materials. The proposed memory device demonstrates a high on/off ratio, exceptional long-term stability, and rapid program and erase speeds, highlighting its potential to overcome the limitations of existing 2D memory technologies. Furthermore, the non-volatility and tunable electrical properties of the Janus structure facilitate neuromorphic applications, particularly in emulating synaptic behavior. These results indicate that Janus-based 2D memory holds substantial promise for future non-volatile memory and neuromorphic computing applications.

[P12-24]
Effects of PbO_2 Nanoparticle Size on Aging Mechanisms in Lead-Acid Batteries: Sunggeun Jo and Wooyoung Shim* (Yonsei University)
Keywords: Nanoparticle, Lead-acid batteries

The cycle life of commercial lead-acid batteries could potentially be improved by suppression of the battery aging mechanism. In this context, one of the main challenges is the irreversible phase transformation from $PbSO_4$ to PbO_2 at the positive electrode upon charging. We herein report a nanoparticle strategy at tens of nanometers length scale that can enhance the reversible phase transformation from $PbSO_4$ to PbO_2 upon charging, thus potentially extending the lifetime of these batteries. Our combined theoretical and experimental studies suggest that control over the initial size of the PbO_2 nanoparticles at the positive electrode is critical to the aging mechanism, with PbO_2 nanoparticles of ~100 nm in diameter suppressing sulfation, which leads to a reversible phase transformation from $PbSO_4$ to PbO_2. In addition, PbO_2 nanoparticles (100 nm in diameter) can provide a greater robustness in the context of shedding of the active materials from the positive grid. These results suggest that lead-acid batteries can be operated with an extended lifetime partly by addressing the intrinsic aging issues associated with irreversible sulfation.

[P12-25]
Enhanced NO_2 gas sensing at room-temperature under visible light via 1D SnO_2 nanorods decorated with $CsPbBr_3$@SiO_2 core-shell photosensitizers: Yeonji Yuk, Dokyum Kim, Chang-Lyoul Lee, and Sanghan Lee* (Gwangju Institute of Science and Technology (GIST))
Keywords: Room-temperature NO_2 gas sensor, Metal halide perovskite photosensitzer

High-performance room-temperature (RT) gas sensors have attracted significant attention due to their low power consumption and potential for miniaturization. Tin dioxide (SnO_2) is widely used as a gas sensor material owing to its high stability and sensitivity. However, the adsorption and desorption of ionized oxygen species on the SnO_2 surface are not preferred at RT, requiring higher temperatures to achieve superior gas sensing properties, such as short recovery time and high response. To tackle this issue, light activation has been proposed as an effective strategy to enhance gas sensing performance at RT. Metal halide perovskites (MHPs) are promising candidate as light-activated photosensitizers due to their high absorption coefficients, tunable bandgaps, and facile synthesis via solution processing. However, MHPs suffer from phase instability, which degrades photoactivity and long-term stability, necessitating new strategies for their protection and stabilization. In this study, we introduce core-shell MHP nanocube (NC) photosensitizers to develop a novel approach for metal oxide-based RT gas sensors operating under visible light. A 1D SnO_2 nanorod (NR) structure was fabricated using glancing angle deposition (GLAD) method to maximize specific surface area. Additionally, cesium lead bromide ($CsPbBr_3$) encapsulated within a SiO_2 shell were uniformly coated onto the SnO_2 NR surface. This core-shell structure significantly enhances stability compared to pristine $CsPbBr_3$ in air. Due to the superior light absorption and enhanced durability of $CsPbBr_3$@ SiO_2, the SnO_2 NR decorated with these NCs exhibited improved sensitivity and a faster recovery time under visible light at 10 ppm NO_2 compared to pristine SnO_2 NR. Furthermore, we confirmed that the presence of the photosensitizer directly enhanced gas sensing properties via SEM, XPS, and PL analysis. This study introduces a novel strategy for enhancing RT gas sensor performance using metal oxides and non-noble metals under visible light, paving the way for broader applications of perovskite-based photosensitizers.

[P12-26]
접촉투영면적 분석을 통한 유연기판 위 금속박막의 깊이에 따른 경도 평가: 서희창, 김영천* (안동대학교)
Keywords: 기계적신뢰성, 나노압입시험, 스퍼터링, 유한요소해석, 나노경도

웨어러블 전자기기의 급속한 발전으로 유연 소자를 활용한 기술이 다양하게 확장되고 있으며, 이에 따라 기계적 신뢰성에 대한 연구의 중요성이 높아지고 있다. 일반적인 금속 박막의 탄성계수, 경도와 같은 기계적 특성은 나노압입시험법을 통해 평가하지만, 유연소자의 경우 기판의 영향으로 인해 실제보다 낮게 측정되는 경향이 있다. 본 연구에서는 유연소자에 증착된 박막의 깊이에 따른 나노경도를 분석하기 위해 접촉면적 함수를 결정하였다. 이를 위해 PI 기판 위에 1 μm 두께의 Cu 박막을 스퍼터링 공정을 통해 증착하였으며, 나노압입시험을 수행하여 최대 300 nm 깊이까지 압입 실험을 진행하였다. 또한, Si 웨이퍼 기판에 증착된 박막의 기계적 특성과 동일 하중에서의 압흔 크기가 동일하다는 가정하에 Cu/Si 시편에서 얻은 측정 결과를 바탕으로 Cu/PI 기판의 접촉면적 함수를 도출하였다. 나노경도의 깊이별 변화를 분석하여 기판의 영향을 평가하였으며, 유한요소해석을 활용하여 박막과 기판 전반에 걸쳐 형성되는 압입 하부 응력장의 분포를 확인하였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업).

[P12-27]
Preventing Plant Damage Via Real-Time Monitoring Platform with Light-Activated NO_2 Gas Sensors based on 3D TiO_2 Nanoarchitectures: Yun-Haeng Cho, Jae Han Chung, Eunsol Lee, Zion Park, and Young-Seok Shim* (Korea University of Technology and Education)
Keywords: Plant damage, Light-activated gas sensors, 3D nanoarchitectures, TiO_2, Room temperature

Nitrogen dioxide (NO_2), with its strong oxidizing properties, is one of the hazardous gases, causing plant damage such as photosynthetic inhibition and leaf necrosis [1]. To prevent these issues, NO_2 detection using a gas sensor platform plays a significant role in real-time environmental monitoring. Among various sensor types, light-activated gas sensors are considered an effective strategy owing to their advantages, including room-temperature operation and high selectivity to NO_2. However, they still face challenges such as low sensitivity and poor recovery time. A key approach to overcome these limitations is the rational design of nanoarchitectures to optimize surface reactions through geometric advances, enhancing optoelectronic properties and chemical interactions [2]. In this study, highly aligned three-dimensional TiO_2 (3D TiO_2) nanoarchitectures were fabricated using the glancing angle deposition technique with an electron beam evaporator, providing a simplified and cost-effective process. The 3D TiO_2 gas sensor demonstrated outstanding performance, including rapid recovery time of approximately 30 seconds and a high sensitivity to NO_2 with an extremely low detection limit of approximately 66.3 ppq. For real-time monitoring, a mobile application was implemented to enable the multimodal hazard notifications to users. Collectively, the synergistic effects of light scattering and a large reactive area induced 3D TiO_2 to enhance its sensitivity and selectivity for NO_2 detection at room temperature.

[P12-28]

Effect of Porosity and Morphology Balance in SnO2 Nanorod Arrays on Enhanced Hydrogen Gas Sensing Performance: Serin Choi, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee* (연세대학교)

Keywords: Hydrogen gas sensor, Pd-coated SnO2, Nanorod arrays, GLAD, Tilt angle

In metal oxide semiconductor (MOS)-based gas sensors, the nanorod array (NRA) structure plays a crucial role in enhancing response performance due to its specific reaction principles. The high surface area and unique morphology of NRAs provide more active sites for gas interactions, leading to improved sensitivity and faster response times in detecting gases. In this study, we examined the influence of distribution morphology and pore density of Pd-coated SnO_2 NRAs on their resistance in air and hydrogen (H_2) gas sensing response. To achieve diverse distributions, SnO_2 NRAs were fabricated using electron beam glancing angle deposition (GLAD), with tilt angles varied from 80° to 50°. SEM image analysis revealed that at a tilt angle of 80°, the NRs formed clusters. As the angle decreased, the clusters became more compact, and at 50°, they were so densely packed that the individual rod structures were no longer discernible. It was observed that lower tilt angles corresponded to an increase in NR length. The resistance in air (R_a) significantly decreased with lower tilt angles, likely due to the formation of multiple current paths from the densely packed rods. However, despite the increase in NR length, the responsiveness to hydrogen gas was low. The gas responsiveness was found to be more influenced by the porosity within the NRA than by the length of the NRs. Larger tilt angles resulted in higher porosity, which increased the R_a and provided more reaction sites for hydrogen gas, thereby enhancing the sensor's overall responsiveness. This study highlights that optimizing the tilt angle during the fabrication of NRAs is crucial for balancing porosity and NR length, which significantly impacts the air resistance and hydrogen gas sensing performance of MOS-based sensors.

[P12-29]

Investigation of Melting Point Depression in Spiky Au Mesoparticles with Complex Dimensions: 이지은, 박은수*, 김지영, 곽민경, 민현기 (서울대학교)

Keywords: Gold particle, Surface plasmon resonance, Spiky nanoparticle, Melting-point depression

벌크 상태의 금은 본래 황금빛을 띄지만, 미세한 입자 크기로 변하면 Surface Plasmon Resonance(SPR) 현상이 발생하여 입자의 크기와 형태에 따라 흡수 및 산란되는 파장이 달라지면서 다양한 색상이 나타난다. 이러한 금 미립자는 구형 외에도 여러 가지 형태로 존재하며, 화학적 환원 방법으로 얻은 금 분말의 경우 온도, pH, 환원제의 종류 등에 따라 입자의 크기와 모양이 변화하는 것으로 알려져 있다. 또한, 입자의 크기가 나노 스케일로 작아질수록 그 물질의 녹는점이 낮아지는 용융점 강하(melting point depression) 현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 이러한 독특한 물리·광학적 및 화학적·열적 특성 덕분에 금 미립자의 제조 방법과 입자 크기 및 형태 조절에 대한 관심이 점점 높아지고 있다. 본 연구에서는 화학적 환원 방법을 통해 금 인레이 합금으로부터 순금을 추출하였으며, 관련 화학 반응을 통해 형성되는 금 분말이 spiky branches를 가지는 shape의 독특한 형상을 가짐을 확인하였다. 이러한 형상을 가지는 콜로이드 금 메조입자의 핵 생성 및 성장 메커니즘에 대하여 고찰하였으며, 제조된 미립자를 열처리한 후 색과 형상이 변화하는 현상 및 meso-size 스케일에서의 용융점 강하 현상이 관찰되어 이에 대한 원인을 규명하고자 하였다. Differential Scanning Calorimetry와 Scanning Electron Microscopy 및 Transmission Electron Microscopy를 이용하여 열 분석 및 이미지 분석을 통해 미립자의 size에 따른 melting-point depression effect를 확인하였다. 이에, 마이크로 및 나노 스케일이 혼합된 복잡한 dimension을 가진 spiky 형태의 금 입자에서 표면 원자의 비율 증가, 결합 에너지 감소, 열역학적 효과 등에 따라 일어나는 size에 따른 melting point 간의 상관관계에 대해 이해하고자 하였다. 본 연구는 화학적 환원 방법을 통해 제조된 금 입자의 형상, 크기, 색 변화의 상관관계 및 미립자의 용융점 강하 현상 이해에 대하여 가이드 라인을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

[P12-30]

Enhanced UVC Photodetectors via Surface-Passivated Wide-Bandgap Zirconium-Oxo Clusters in Asymmetrical MSM Configurations: Maro Kim, Jae-ho Park, Min-jun Kim, and Chung Wung Bark* (Gachon Univ.)

Keywords: UVC photodetector, Zirconiumoxo clusters, Surface passivation, Asymmetrical MSM, Wide-bandgap semiconductors

This study presents high-performance UVC photodetectors fabricated using surface passivated wide-bandgap zirconium-oxo clusters (ZOCs) in an asymmetrical metal-semiconductor-metal(MSM) configuration. To enhance the performance of ZOC-based photodetectors, we employed oxygen plasma treatment to passivate surface defects and reduce trap densities within the ZOC flakes, thereby enhancing charge transport and photoresponse. The treated ZOCs were integrated with a transparent polyethylenimine(PEI) polymer matrix to form a ZOC@PEI composite film, which was then used as the active layer in the asymmetrical MSM device. This configuration further improved the device's sensitivity and efficiency due to optimized electric field distribution and charge collection. The fabricated photodetector demonstrated a significant improvement in UVC photoresponse, achieving a detectivity of 2.5×10^{12} Jones and an external quantum efficiency of 150%. These findings highlight the potential of surface-engineered ZOCs for advanced UV photodetector applications. *Keywords:* UVC photodetector, Zirconiumoxo clusters, Surface passivation, Asymmetrical MSM, Wide-bandgap semiconductors

[P12-31]

Synthesis and Dispersion of 1D Material V_2PS_{10}: Advancing Miniaturized Electronic Devices: Jeongsu Park, Jinsu Kang, Sooheon Cho, and Jae-Young Choi* (Sungkyunkwan University)

Keywords: 1D Van der Waals Material, V_2PS_{10}, Chemical Vapor Transport (CVT) Synthesis, Dispersion, Exfoliation

As electronic devices continue to be miniaturized, the nano-structuring of bulk materials has become crucial. However, this process inevitably increases the proportion of dangling bonds, which can degrade device performance. One-dimensional (1D) materials have emerged as promising candidates due to their intrinsic absence of grain boundaries and dangling bonds. In particular, 1D structures derived from two-dimensional (2D) layered semiconductors have attracted considerable research interest, among which Nb_2PS_{10} has been investigated as a representative example. However, its poor dispersibility limits its practical application in electronic devices. Thus, the development of 1D materials with enhanced dispersibility and exfoliation properties remains a critical challenge. To overcome this limitation, we synthesized V_2PS_{10} using solid-state reaction and chemical vapor transport (CVT) reaction. The solid-state reaction produced V_2PS_{10} in powder form, whereas the chemical vapor transport method facilitated the growth of millimeter-scale single-crystal wires with enhanced crystallinity. Our examination of V_2PS_{10} dispersibility in various solvents revealed strong absorbance in NMP and DMF, while its dispersion in DI water was negligible. Furthermore, we successfully isolated V_2PS_{10} nanowires through micromechanical exfoliation. The exfoliated nanowires exhibited thicknesses down to 1.2 nm, which corresponds to the molecular thickness of a single V_2PS_{10} chain. These findings highlight the strong potential of V_2PS_{10} for next-generation miniaturized electronic applications.

[P12-32]

Synthesis Of High-Density, High-Purity $Hf_{1-x}La_xO_2$(HLO) Ceramic Targets By Impurity Suppression: JaeHo Park, Yoon Same, MinJoon Kim, HyoungWook Kim, and ChungWung Bark* (Gachon University)

Keywords: Ceramic target, Sintering temperature, $La_2Hf_2O_7$ impurity, HfO_2, Physical Vapor Deposition

Recently, lanthanum (La) has gained attention as a promising doping element that significantly enhances the ferroelectric properties of HfO_2 thin films. However, there is still a lack of comprehensive research on the optimal doping concentration and the origin of ferroelectricity in La-doped HfO_2 thin films, depending on the fabrication method. In this study, $Hf_{1-x}La_xO_2$ [x = 0.05, 0.075, 0.1] (HLO) ceramic targets were synthesized by sintering via the solid-state reaction method at temperatures ranging from 1300°C to 1600°C, and the effect of La doping concentration and sintering temperature on the material properties was analyzed. The properties of HLO ceramic targets sintered at various temperatures showed changes in lattice structure according to the La doping concentration. Furthermore, as the sintering temperature increased, the target density and crystallite size improved, and $La_2Hf_2O_7$ impurity decreased. As a result, the $Hf_{0.95}La_{0.05}O_2$ ceramic target sintered at 1600°C was identified as the optimal target for forming high-quality thin films via sputtering deposition. Additionally, the high bandgap values ranging from 4.58eV to 4.79eV observed in $Hf_{1-x}La_xO_2$ [x = 0.05, 0.075, 0.10] suggest potential applications as a high-k gate dielectric material. These properties indicate its possible contribution to developing ferroelectric random-access memory (FeRAM) and ferroelectric field-effect transistor (FeFET) devices. These results provide fundamental data on the origin of ferroelectricity in La-doped HfO_2-based thin films and their applicability in high-performance memory devices.

[P12-33]

Optimization of Si-Doped β-Ga_2O_3 Ceramic Targets for High-Performance Thin Film Deposition: Minjun Kim, JaeHo Park, HyoungWook Kim, Same Yoon, and Chung Wung Bark* (Gachon Univ.)

Keywords: keyword: Caramic target, Si doping, Sintering tamperature, RF sputtering

Gallium oxide (Ga_2O_3), a material with wide bandgap properties, has recently attracted much attention as a promising semiconductor material for electronic devices. Among the various phases, β-Ga_2O_3 is characterized by its stability at high temperatures, wide bandgap (~4.9 eV), and high threshold voltage conductivity. Several research teams have carried out doping studies using Si, Sn, Ge, and other rare earth elements, and among these, silicon (Si) is considered to be a particularly favorable element for forming high-quality Si doped β-Ga_2O_3 at suitable growth temperatures. This is due to the similar melting points of SiO_2 and Ga_2O_3 and the fact that the Si^{4+} ionic

radius is almost identical to Ga^{3+} in the tetrahedral structure. These properties have the potential to significantly improve the electrical performance of β-Ga_2O_3, making Si the most optimal dopant. In this work, we developed a method for depositing high-quality Si doped Ga_2O_3 thin films to prepare ceramic bulk targets for RF sputtering. Si-doped Ga_2O_3 targets with doping concentrations of 0.5%, 1%, and 2% were fabricated by ball milling method, and the Si ratio of each target was precisely controlled. The Si-doped Ga_2O_3 powder was then calcined by high-temperature electric heat treatment at 1000ºC, followed by sintering by solid-phase reaction method at temperatures between 1300 ºC and 1500 ºC. The properties of the targets were found to vary with the doping concentration and sintering temperature, and Si(1%) doped Ga_2O_3 ceramic targets fabricated at a sintering temperature of 1500 ºC were found to be the targets with the optimal conditions for fabricating high-quality thin films by sputtering. . Furthermore, the crystal structure and size, XRD analysis, EDS analysis, surface free energy, and contact angle of Si doped β-Ga_2O_3 were analyzed to investigate its potential as a next-generation power semiconductor material. The results of this study demonstrated the feasibility of depositing high-quality Si doped Ga_2O_3 thin films that can be used in high-power electronic devices, which is expected to contribute to the performance improvement of Ga_2O_3-based electronic devices.

[P12-34]

Fluorine-Mediated Carbon Insertion Strategy for Potential Diamond Synthesis: Yang Liu, Won Kyung Seong*, Sun Hwa Lee* (Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: Diamond, Xenon difluoride, chemical vapor deposition, carbon insertion, hydrogen abstraction

We present a new approach for attempting diamond synthesis on a seed diamond substrate using a fluorine-mediated carbon atom insertion. XeF_2 dissociates CH_4, offering an alternative to methyl radical than traditional hot filament or microwave plasma methods. A home-built Joule heating system allows control of the fluorine supply and substrate temperature. SEM images show an amorphous layer on the diamond substrate that contains organic CF_2 and CF_3 groups according to XPS. Beneath this layer, the seed diamond surface is covered with uniformly distributed nanoparticles, likely resulting from etching. Ongoing research focuses on optimizing experimental conditions and investigating the carbon insertion mechanism. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[P12-35]

Controlling the Au/Cu_2O Interface for Selective Product Formation in Electrochemical CO_2 Reduction: Sanghyeok Lee, Gangbin Ryoo, and Hyosun Lee* (University of Seoul)

Keywords: electrochemical CO_2 reduction reaction, Cu_2O, Au

The electrochemical CO_2 reduction reaction (ECO_2RR) has attracted significant attention as a promising approach for capturing atmospheric carbon dioxide (CO_2) and converting it into valuable fuels and value-added products. Copper (Cu) is the only metal capable of producing C_2 and C_{2+} products.; however, its poor selectivity towards specific products remains a major challenge. In this study, we deposited Au on Cu_2O in two different forms—nanoparticles (NPs) and nanoclusters (NCs)—and further optimized by adjusting the Au wt% content to control the interface between the guest metal and host material. Additionally, we adjusted the facets of the Cu_2O and studied the effect of Au deposition on each facet, exploring how the control of facets and interfaces impacts product selectivity. We hope this study offers a new strategy for converting electrocatalytic CO_2 into C_1-C_{2+} products by precisely controlling the interface configuration.

[P12-36]

RF 열플라즈마 분말제조 공정기반 고순도 알루미늄 질화물 복합소재 제조를 통한 방열 sheet 개발: 양조화*, 박정몽*, 전경수 ((재)대구테크노파크)

Keywords: 알루미늄, 질화알루미늄, AlN, 플라즈마, 방열

전기 전자 분야의 방열시트 및 TIM(Thermal Interface Materials) 소재의 경우 절연성이 요구되며 가장 대표적으로 질화알루미늄(AlN) 소재를 사용하는 경우가 많다. 방열 효율을 증가시키기 위해 고순도화 및 나노사이즈의 입자제조가 요구된다. 그러나 AlN 소재특성상 분쇄하게 되면 대기 노출 시 수분으로 인해 가수분해가 발생하며 입자 표면에 알루미나 수화물이 형성되어 질화알루미늄의 방열 물성이 저하된다. 따라서 본 연구에서는 열 플라즈마를 공정을 이용하여 Al 분말을 base로 Sheath gas의 N2 gas 혼합비를 조절 함으로써 구형화된 고순도 질화 알루미늄 나노분말 방열 소재를 제조하고자 한다. 제조된 질화알루미늄 나노분말을 에폭시수지와 경화제 및 경화 촉매에 용해 후 페이스트를 제조하였으며, 바코터를 이용하여 PET 필름에 코팅 경화 후 방열 Sheet를 제조 하였다.

[P12-37]

Perovskite Nanosheets as Efficient Catalysts for CO_2 Electroreduction: SeungHyun Chun, Jeongyeon Kim, Hyunsik Kim*, and Hyosun Lee* (University of Seoul)

Keywords: Electrochemical CO_2 reduction reaction, 2D materials, $Ca_2Nb_3O_{10}$

The electrochemical CO_2 reduction reaction (CO_2RR) is a promising approach for converting CO_2 into renewable energy. However,

its practical application is hindered by the need for a high overpotential, resulting in low energy efficiency. Surface modification, such as depositing metal nanoparticles (NPs) onto 2D materials, has emerged as an effective strategy to enhance catalytic performance due to the large surface area and ultrathin structure of these materials. The unique properties of 2D materials provide abundant unsaturated sites, facilitating CO_2 and intermediate adsorption at active sites. In this study, we explore $Ca_2Nb_3O_{10}$ (CNO), a perovskite-based 2D metal-oxide, as a support material for CO_2 2RR catalysts. Our results demonstrate that Au catalysts supported on CNO exhibit the highest increase in current density compared to bulk counterparts such as $KCa_2Nb_3O_{10}$ (KCNO) and $HCa_2Nb_3O_{10}$ (HCNO). This significant improvement highlights the impact of 2D material characteristics on CO_2 RR efficiency, offering insights into the design of advanced catalytic systems.

[P12-38]

니켈 산화물을 사용하는 p형 투명 비정질 산화물 박막 트렌지스터: 김형욱, 박정웅*, 김민준, 박재호, 윤샘 (가천대학교)

Keywords: 니켈 옥사이드(NiO), 산화물 반도체, p형 TAOS

투명 비정질 산화물 반도체(TAOS)는 높은 이동도, 우수한 투명성 및 균일성으로 인해 디스플레이 산업에서 널리 사용되고 있습니다. 그러나 대부분의 TAOS는 n형으로, p형 TAOS의 부재가 복합 회로 응용을 제한합니다. NiO는 n형 산화물 반도체와는 달리 자연적으로 p형 특성을 나타내는 반도체로 3.6~4.0 eV의 넓은 밴드갭을 가지고 있어, p형 TAOS에 적합한 물질입니다. 이번 연구에서 RF스퍼터링 공정을 통해 p형 투명 비정질 니켈 산화물(NiO)를 제조하고, 어닐링 온도, 산소의 비율, 소스/드레인 전극 및 유전체 층의 영향을 조사했습니다. 상부 접촉 및 하부 게이트 구조의 TFT를 사용했습니다. 어닐링 온도의 영향을 알기 위해150ºC에서 500ºC까지 다양한 온도에서 어닐링을 수행하였습니다. 산소의 비율의 영향을 평가하기 위해 다양한 산소, 아르곤 가스 비율을 실험했습니다. 소스/드레인 전극의 영향을 알기 위해 Au, Ni, Al을 사용하였습니다. 최종적으로 고유전율 Al_2O_3 유전체를 사용한 NiO TFT는 우수한 이동도, 우수한 온/오프 전조 비율, 우수한 홀 수송 특성을 보였습니다. 이러한 특성은 니켈 산화물(NiO)이 저비용 p형 산화물 전자기기 및 대면적 투명 CMOS 회로에 유망한 선택이 될 수 있음을 암시합니다

[P12-39]

Intensifying the Liquid Na/BASE Interface by Applied Spark-Reducing Graphene Oxide: Sukwoo Kang and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Keywords: Na ion battery, graphene oxide

Sodium/β”-alumina (BASE) cell has been recognized as effective energy storage device because of its high specific energy, high efficiency of charge/discharge and long cycle life. However, upward temperatures are required for proper liquid Na wetting on solid electrolyte, BASE, delaying the realization of low-temperature NBBs. Herein, we report a new approach for achieving high-performance low-temperature Na-BASE cell via the incorporation of sodiophilic sparked reduced graphene oxide (rGO) layers that exhibit complete liquid-Na wetting. We insert a layered sparked rGO film sandwiched between the anode and the solid electrolyte. Spark reaction induces reduction and expanding of interlayer gaps of GO sheets. Liquid sodium can infuse into the nano and microscale gaps in sparked rGO and rapidly form the Sodium/BASE interface due to the high affinity between Na and residual oxygen-functional group of the rGO and capillary force. These characteristics give rise to stable cycling with low overpotential of Na-BASE batteries.

[P12-40]

Epitaxial Growth Of P-Type NiO Thin Films By RF Sputtering: Saem Yoon, JaeHo Park, MinJun Kim, HyoungWook Kim, and ChungWung Bark* (Gachon Univ.)

Keywords: Nickel Oxide, Thin Film, Epitaxial Growth, RF Sputtering, PVD

Nickel oxide (NiO) is a promising p-type transparent conducting oxide (TCO) due to its wide bandgap (3.6–4.0 eV), excellent optical transparency, and superior electrical, magnetic, and chemical properties. However, the high-quality epitaxial growth of NiO thin films remains a challenge due to intrinsic defects such as grain boundaries and dislocations, which significantly reduce charge carrier mobility. In this study, we report the epitaxial growth of p-type NiO thin films on (0001) sapphire substrates using RF sputtering, with deposition temperatures ranging from 300–500ºC and oxygen flow ratios of (10%, 20%, 30%, 40%, 50%). The NiO epilayers grown on the (0001) sapphire substrate exhibited a (111)-oriented double-domain structure consisting of triangular and inverted triangular grains, and no significant diffusion occurred between NiO and the sapphire substrate, even with increasing deposition temperature. The morphology of the films improved as the deposition temperature increased, leading to better crystallinity. Additionally, as the oxygen content increased, the films transitioned to smoother and more uniform surfaces, while forming distinct grain boundaries. As a result, the high-quality NiO epitaxial thin films grown by RF sputtering are expected to be applied in optoelectronic devices, transparent p–n junctions, and other electronic and optical applications.

[P12-41]

Polymorphic 2D FeAs with Tunable Stacking Symmetry and Highly Anisotropic Properties: Jongbum Won and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Keywords: Two-dimensional material, polytypism, Iron Arsenide, Interlayer coupling, Anisotropic property

In the realm of two-dimensional (2D) crystal growth, the chemical composition often determines the thermodynamically favored crystallographic structures. This relationship poses a challenge in synthesizing novel 2D crystals without altering their chemical elements, resulting in the rarity of achieving specific crystallographic symmetries or lattice parameters. We present 2D polymorphic FeAs crystals that completely differ from bulk orthorhombic FeAs (Pnma), which differ in the stacking sequence, i.e., polytypes. Preparing polytypic FeAs outline a strategy for independently controlling each symmetry operator, which includes the mirror plane for 2Q-FeAs (I4/mmm) and the glide plane for 1Q-FeAs (P4/nmm). As such, compared to bulk FeAs, polytypic 2D FeAs show highly anisotropic properties such as electrical conductivity, Young's modulus, and friction coefficient. This work represents a concept of expanding 2D crystal libraries with a given chemical composition but various crystal symmetries.

[P12-42]

Display and Pressure Sensor Coupling via Thermochromic Panel and Resistive Pressure Sensor: Gyuwon Kim and Wooyoung Shim* (Yonsei university)

Keywords: Thermochromic panel, Resistive pressure sensor, Real-time color switching, Local pressure mapping

Interactive response upon external pressure such as touching is essential for human-machine interface devices. This function is usually achieved by the combination of sensor, processor and display. This configuration, however, is bulk and expensive to be adopt tiny application such as IOT device and e-skin. Here, we introduced visually pressure-mappable touch device using thermochromic panel and resistive pressure sensor. In this study, we designed microstructured PDMS chain as resistive pressure sensor with high spatial sensitivity and the multilayer PDMS composite for display and heater made by various micro- and nano particles. By combining them, resistive response of device can be converted to visual readout by heat as medium. In order to show pressure mapping capability, we demonstrated pressure dependent dot writing and 3D force touch note that suggests potential uses as future electronics.

[P12-43]

III-V-derived van der Waals Memtransistor via Cation-Eutaxy Structure Engineering: Jihong Bae and Wooyoung Shim* (Yonsei University)

Keywords: III-V compounds, Semiconductor, Ion migration, Memtransistor

Novel two-dimensional semiconductor crystals offer diverse physical properties beyond their intrinsic semiconducting characteristics, highlighting their significance in advanced material research. Memristive behaviors, frequently observed in wide-bandgap materials, present a challenge when combined with semiconducting properties to achieve functional memtransistors. A new class of semiconducting van der Waals crystals, denoted as $H_xA_{1-x}BX$, was synthesized, exhibiting both memristive and semiconductive properties. To identify suitable materials, a systematic high-throughput screening process was employed, resulting in 44 promising III–V compounds. Among these, ten materials, including nitrides, phosphides, arsenides, and antimonides, were successfully synthesized. These compounds demonstrated unique features such as electrochemical polarization and memristive phenomena while maintaining their semiconductor functionality. Single-gate memtransistors fabricated using these materials exhibited gate-tunable synaptic and logic functions, harnessing the interplay between their semiconducting and memristive attributes. This study provides a pathway for discovering van der Waals materials with unconventional crystal symmetries and multifunctional properties.

[P12-44]

Non-conventional Wulff-Shape Silicon Nanosheets Along with High Catalytic Activity: minwoo lee and Wooyoung Shim* (Yonsei university)

Keywords: Silicon nanosheets, photocatalyst, Hydrogen evolution reaction, High index surface, Light absorption

Conventional silicon photocatalysts with equilibrium shapes limit their catalytic activity for hydrogen production. Here, we present a novel approach using nanoporous silicon nanosheets (np-SiNSs) with high-surface-energy crystal planes, which exhibit an unconventional Wulff shape. These np-SiNSs outperform traditional silicon photocatalysts, achieving an impressive apparent quantum yield of 12.1% at 400 nm. The presence of high-index planes, rarely seen in bulk silicon, optimally aligns with the required redox potential for efficient hydrogen generation. Additionally, the np-SiNSs exhibit enhanced light absorption, contributing to their exceptional photocatalytic performance. By introducing crystals with nontypical Wulff shapes, this study opens new avenues for developing highly efficient photocatalysts for hydrogen production.

[P12-45]

Fabrication of 3D Networked Isotropic Thermal Composite Using MWCNT-Based Core-Shell Hybrid Fillers: Jungeun Lee (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)), Junho Shin (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Sangyong Lee, and Jungmo Kim* (Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), University of Science and Technology (UST))

Keywords: Carbon nanotubes, Thermal composite, Isotropy, Core-shell structure

Recently, electronic devices used in the mobility and electronic fields are required to be compact, lightweight, and multifunctional. As

device integration advances, the increased heat generation within these systems can significantly impair performance and reduce operational lifespan, thereby underscoring the critical importance of efficient thermal management. Furthermore, with the rapid development of wearable technologies, material flexibility has emerged as a key characteristic. In this context, polymer-based composite materials incorporating high thermal conductive fillers have attracted considerable attention due to their mechanical flexibility and low density. Among various thermal conductive fillers, carbon-based materials have been extensively investigated due to their superior thermal conductivity and lower density compared to conventional alternatives (i.e., metal, ceramic). In particular, carbon nanotubes (CNTs) possess a well-defined hexagonal lattice structure composed of sp^2 C=C bonds and exhibit a high aspect ratio. These unique structural attributes endow CNTs with exceptional thermal and mechanical properties. However, strong van der Waals interaction between CNTs hinder their uniform dispersion within polymer matrices, posing a significant challenge in composite fabrication [1]. Even if the van der Waals forces are mitigated, enabling the uniform dispersion of CNTs within the composite, their inherently high aspect ratio presents an intrinsic limitation, inevitably inducing anisotropic thermal properties in the composite. In this study, core-shell structured fillers were fabricated by encapsulating spherical particles with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) to enhance uniform filler dispersion within the composite and to mitigate the anisotropy induced by the intrinsic structure of MWCNTs. To establish isotropic thermal properties, the fabricated fillers were incorporated into the matrix, promoting the formation of a 3D thermal conduction network. PS/MWCNT core-shell microspheres were fabricated by encapsulating polystyrene (PS) particles with non-oxidative MWCNTs through a drop coagulation process, followed by their integration into a polydimethylsiloxane (PDMS) matrix. Thermal conductivity analysis demonstrated that a hybrid composite with a PDMS:PS/MWCNT microsphere: MWCNT weight ratio of 1000:410:10 achieved an isotropic ratio of 0.86, approaching the ideal isotropic value of 1 (reference pristine MWCNT composite ratio of 2.0). This study highlights the potential of MWCNT-based hybrid fillers in enhancing the thermal transport properties of polymer composites for advanced thermal management applications. [1] Z. Han et al., Progress in Polymer Science, 36, 914-944 (2011).

[P12-46]

Three Dimensional Touch Device with Two Terminals: YoungJun Cho, Taehoon Kim, Gwangmook Kim, Hyung Wan Do, and Wooyoung Shim* (Yonsei Univ.)

Keywords: Pressure sensor, Three dimensional, Two terminals, Time difference, Gradient electrode

A crossbar array is an essential element that determines the operating position and simplifies the structure of devices. However, in the crossbar array, wiring numerous electrodes to address many positions poses significant challenges. In this study, a method is proposed that utilizes only two electrodes to determine multiple positions. The method significantly simplifies the wiring and device fabrication process. Instead of defining the node location of the crossbar, it is experimentally demonstrated that the x–y–z coordinates can be determined from i) the resistance change as a function of distance, ii) the resistance variation influenced by the electrode composition, and iii) capacitance fluctuation resulting from changes in the dielectric thickness. By employing two-terminal transparent electrodes, a fully functional 3D touch device is successfully fabricated, introducing a groundbreaking approach to simplify input device architectures.

[P12-47]

Enhanced On-Off Ratio in n-Type Vertical FETs with Defect-Engineered Bilayer $MoSe_2$ Channel: Daeun Choi (Kumoh National Institute of Technology), Hyokwang Park, Hyungyu Choi, Boseok Kang* (Sungkyunkwan University), and Hyun Ho Kim* (Kumoh National Institute of Technology)

Keywords: VFETs, on/off current ratio, defect-controlled $MoSe_2$, subthreshold voltage(V_{th}), EGR

Vertical field effect transistors (VFETs) utilizing two-dimensional (2D) materials differ from conventional planar FETs in that their channel lengths can be reduced to atomic units, effectively reaching the nanoscale. However, their performance is limited by leakage currents, which are attributed to negative threshold voltages (V_{th}), through extra gate field region (EGR). To address this issue, it is necessary to control leakage current through EGR at zero gate voltage. In this work, we demonstrate VFETs featuring significantly improved on-off ratios, approximately ~10^5, in bilayer $MoSe_2$. CVD-grown $MoSe_2$ was contacted with graphene and VSe_2, with all materials formed through van der Waals interactions. In $MoSe_2$ synthesis, the vacuum pre-annealing (VPA) synthesis method can not only minimize atomic defects to obtain high-quality thin films, but also control the V_{th}. This can significantly reduce the leakage current of the EGR. These findings provide valuable insights into charge transport mechanisms and defect suppression strategies, which can pave the way for the next generation of VFETs echnology advancements.

[P12-48]

Sub-Diffraction Near-Field Lithography on Non-Planar Surfaces Using a Mechanically Tuned Elastomeric Photomask: Dongchul Seo and Wooyoung Shim* (Yonsei university)

Keywords: photolithograhy, photomask

Photolithography continues to be the prevailing microfabrication technology as long as it continues to meet the resolution and yields demands at a cost that makes it economically viable. Among these requirements, the fundamental resolution challenge is diffraction of

light at the edge of an opaque feature on the mask as the light passes through an adjacent clear area, which has been addressed by 'optical trick' with complex optics, but eventually compromises the cost-effectiveness. Here, we present an unprecedented near-field optical printing approach that uses chromium patterns embedded in elastomer for near-field operation, which routinely generates sub-diffraction patterns using existing hardware and prevailing 400-nm light source. Conformal contact with a substrate using an elastomeric photomask overcomes the diffraction issues of light-based printing systems, and also eliminates a depth-of-focus issue, thereby enabling photolithography for non-planar substrate which is important for future wearable electronics. Our method secures high resolution, parallel-writing and cost-effective characteristics of photolithography and provides routine patterning process for non-planar substrate, which should be widely used in academic and industrial production for electronic, optical and metamaterial applications. but secures parallel-writing and cost-effective characteristics, which should be widely used in academic and industrial production for electronic, optical and metamaterial applications.

[P12-49]

SERS Analysis of Microplastics Derived from Food Packaging Wraps: Minjeong Kim and Jung-Sub Wi* (Hanbat National University)

Keywords: plasmonic, sensor, microplastic, Raman, SERS

Polyethylene and polyvinyl chloride, which are widely used as wraps in our daily lives and can be potentially ingested in the form of microplastics, show severe differences in terms of toxicities and environmental hazards. Polyvinyl chloride is classified as a carcinogen and is also known to produce toxic substances such as dioxin when disposed of, but it is still widely used due to its low price and excellent adhesive properties compared to polyethylene. In this study, polyethylene and polyvinyl chloride microplastics were detected using gold-coated filter paper. To enhance local plasmonic fields around microplastics and their Raman signals, a 20-nm thick gold film was deposited on a commercial filter paper by thermal evaporation. Experimental measurements demonstrated that the Raman spectra of polyethylene and polyvinyl chloride microplastics on the plasmonic filter paper were clearly distinguished from each other. Our results show that the proposed sensor has promising potential in identifying two common packaging materials and the microplastics derived from them.

P13 : 적층제조 및 분말
Room 3층 로비, 4월 24일

[P13-1]
헤테로구조 형성으로 Hot Isostatic Pressing 후처리된 LPBF 316L 스테인리스 강의 기계적 특성 향상: 안영조, 김래언, 정상국, 하효정, 허윤욱 (포항공과대학교), Auezhan Amanov (선문대학교, Tampere Univ.), 구강희 (포항공과대학교), 이동준 (한국재료연구원), 문종언 (공주대학교), 김형섭* (포항공과대학교)
Keywords: Laser powder bed fusion, Gradient structure, Heterogeneous materials, Ultrasonic nanocrystal surface modification, Hot isostatic pressing

최근 Laser Powder Bed Fusion (LPBF) 방식은 높은 설계 자유도와 우수한 기계적 특성으로 인해 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 일반적으로 적층 후 Hot Isostatic Pressing (HIP) 공정을 적용하여 내부 결함을 제거하고 부품 밀도를 향상시키지만, 이 과정에서 재결정화와 결정립 성장이 진행되어 기계적 특성이 오히려 저하될 수 있다. 본 연구에서는 HIP 처리한 LPBF 316L에 Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) 공정을 적용함으로써 surface heterostructure를 형성하고, 이를 통해 기계적 특성을 개선하고자 한다. 표면에서 내부로 갈수록 결정립 크기가 점진적으로 변하는 gradient microstructure 형성을 유도하여 strain partitioning을 활성화하고, hetero-deformation-induced (HDI) strengthening 효과를 극대화함으로써 기계적 특성 향상을 목표로 한다. 이를 통해 기존 HIP 공정이 가지는 기계적 특성 저하 문제를 극복하고, LPBF 부품의의 strength-ductility synergy를 극대화할 수 있는 새로운 후처리 전략을 제시하고자 한다.

[P13-2]
Toward Crack-Resistant, High-γ′ Ni-Based Superalloys: Leveraging Lattice Misfit Control for Enhanced High-Temperature Properties in Additive Manufacturing: Tae-Gyeong Kim (Changwon National University), Chan-Hee Lee (Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)), Hyun-Uk Hong* (Changwon National University), Byoung-Soo Lee, and Hae-Jin Lee (Korea Institue of Industrial Technology (KITECH))
Keywords: Ni-Based superalloys, Alloy design, Additive Manufacturing, Microstructure, Tensile Properties

Ni-based superalloys are integral to turbine blade applications due to their outstanding high-temperature strength, corrosion resistance, and oxidation resistance. The need for higher temperature capabilities has driven research into additive manufacturing (AM), which offers designs with intricate cooling channels. However, the high γ′ volume fraction required for superior temperature performance often leads to significant cracking during 3D printing. In this work, we systematically modified the composition of the reference alloy Ren´e 80 to enhance its processability in electron beam powder bed fusion (EB-PBF), also known as selective electron beam melting (SEBM). By lowering the Ti content (5→3 wt%) and adding Ta (2.5 wt%) and Hf (1.0 wt%), we attained a more spherical powder morphology and successfully eliminated cracks in SEBM-fabricated parts. The as-built microstructure showed columnar grains oriented along the build direction and a primary γ′ area fraction of 40%, with a γ′ particle size averaging 382 nm. Atom probe tomography confirmed greater partitioning of Ti, Al, and Ta to the γ′ phase, increasing lattice misfit at the γ/γ′ interface and strengthening the material via impeded dislocation motion. This mechanism, validated by first-principles calculations, contributed to superior tensile properties at 870 ºC compared to the conventional cast Ren´e 80. The results highlight that subtle compositional tuning can greatly improve the balance of printability and high-temperature strength in Ni-based superalloys.

[P13-3]
Engineering a Positive Lattice Misfit Superalloy for Additive Manufacturing: From Alloy Design to SAC Resistance: Tae-Gyeong Kim (Changwon National University), Chan-Hee Lee (Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)), Hyun-Uk Hong* (Changwon National University), and Byoung-Soo Lee (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH))
Keywords: Additive Manufacturing, Ni-Based superalloy, Lattice Misfit, Straing-Age Cracking

High γ′-fraction Ni-based superalloys (e.g., IN738LC, MAR-M247, CM247LC) are central to high-temperature aerospace and power-generation applications due to their remarkable strength and oxidation resistance. However, these alloys are highly prone to cracking when processed by additive manufacturing (AM), especially given their elevated Al + Ti content and complex phase transformations under rapid thermal cycling. In this work, we present a modified IN738LC alloy (termed 738P) specifically tailored for AM through Thermo-Calc simulations and first-principles modeling. Our design strategy focuses on achieving a robust positive γ/γ′ lattice misfit, which remains positive in the 700–1000 ºC range—conditions known to trigger strain-age cracking (SAC). By optimizing the alloy's thermal expansion coefficients, we predict that a room-temperature misfit of approximately +0.125% is needed to maintain positivity at 1000 ºC. Experimental results confirm that 738P demonstrates a +0.33% misfit at ambient temperature, substantially higher than the +0.07% measured in standard IN738LC. Extensive microstructural characterization using SEM, HR-XRD, and EBSD analyses reveals that 738P forms a bimodal γ′ distribution (primary and secondary γ′), with comparable volume fractions (~47%) to IN738LC but significantly more effective SAC resistance. Notably, the positive misfit helps induce compressive stresses in the matrix, mitigating

residual tensile stress and reducing crack formation during post-build heat treatments. Gleeble high-temperature compression tests at 850 ºC provide insights into the deformation mechanisms (stacking fault shearing and twinning). Overall, these findings underscore the promise of 738P as a high-performance, crack-resistant Ni-based superalloy for AM applications.

[P13-4]

LPBF 316L 스테인리스 강의 초기 수증기 산화 거동에 미치는 잔류 응력의 영향: 정창현 (국립순천대학교), 배기창 (한국세라믹기술원), 김도형 (영남대학교), 조의제* (국립순천대학교)

Keywords: LPBF, 316L 스테인리스, 고온 산화, 잔류응력

LPBF(Laser Powder Bed Fusion)로 제작된 316L 스테인리스 강은 크롬 함량이 높아 뛰어난 내식성, 높은 강도 등 장점으로 의료, 자동차, 에너지, 우주 항공 등 여러 산업 분야에 쓰이고 있다. 제조 공정 중 높은 온도 구배와 빠른 냉각속도에 의해, LPBF 316L 스테인리스 강은 잔류 응력을 가지게 된다. 이러한 잔류 응력은 응력 집중을 유발해, 균열 형성, 뒤틀림, 박리 등으로 부품의 수명 단축, 기계적 특성 저하와 같은 악영향을 미친다. 이뿐만 아니라, 잔류 응력에 의해 내산화성도 달라질 수 있다. 초기 형성 산화물은 후속 산화물의 성장과 모재와의 결합성 등 전체 산화 거동에 영향을 미친다. 산화물의 초기 형성 거동은 잔류 응력에 따라 변화할 것으로 예상되나, 이와 관련된 연구는 거의 전무하다. 본 연구에서는 LPBF 316L 스테인리스 강의 초기 산화 거동에 미치는 잔류 응력의 영향을 조사하였다. 400 및 600ºC에서 2시간의 열처리를 통해 잔류 응력을 조정하였으며, 800ºC에서 최대 5시간 동안 수증기 산화 실험을 실시하여, 열처리 전후의 초기 산화 거동에 대해 분석하였다. 열처리 전후의 잔류 응력 비교는 XRD를 통해 Williamson-Hall plot으로 잔류 응력 완화 정도를, 미세조직 변화는 SEM과 EBSD로 관찰 하였다. 산화물 두께 측정하여 산화 속도를 도출하고, EDS를 통해 산화물 층의 조성을 평가하였다.

[P13-5]

직접용융증착법으로 제조된 Inconel 718의 열처리 조건에 따른 미세조직 및 물성 변화: 권시은, 김정기* (경상국립대학교)

Keywords: Inconel 718, Directed energy deposition, Response surface methodology, Heat treatment

에너지 산업에서의 탄소 배출량 절감 및 전력 수급망의 안정화를 위해 가스터빈의 성능 향상을 위한 터빈 온도 증가는 필수적이다. 상기 높은 온도에서의 부품 활용을 위해 석출강화형 Ni기 초내열합금은 필수적이나, 고온 환경에서 반복적인 부하와 열응력으로 인해 손상은 필연적으로 발생한다. 이를 복구하기 위해 기존에는 용접이나 절삭 가공을 이용한 수리 공정이 주로 적용되었으나, 형상 복원 한계, 미세조직 열화 등의 한계로 인해 제한적으로 활용되었다. 이에 최근 적층제조 기술 중 하나인 직접용융증착법(DED)을 활용해 기존 공정 대비 짧은 리드 타임을 가지면서도 복잡한 형상을 가지는 부품의 접합보수를 시도하는 사례가 늘어나고 있다. 이에 본 연구에서는 Al과 Ti 함량이 상대적으로 적어 적층성이 용이한 Inconel 718을 활용한 최적 보수용접 조건을 찾기 위해 반응표면분석법에 기반한 공정 최적화를 수행했다. 아울러, 석출강화형 Ni기 초내열합금은 열처리에 따른 미세조직과 물성 변화가 극심하므로 Direct aging(DA)과 Solid solution treatment + aging(STA) 열처리를 수행했을 때, 미세조직과 상온 및 고온에서의 물성 변화를 확인하였다. 미세조직 분석 결과, 모든 조건에서 높은 열구배로 인해 columnar grain이 형성되었으며, as-built(AB)에서는 DED의 빠른 냉각속도(10^5~10^7 K/s)에 의해 셀 구조를 동반한 편석 및 Laves 상이 관찰되었다. DA 조건에서는 AB 대비 Laves 상의 용해가 확인되었으며, STA 조건에서는 Laves 상의 용해와 동시에 결정립계와 기지 내부에 δ 상이 형성됨을 관찰할 수 있었다. 상기 미세조직 변화는 물성과 높은 연관성을 가지므로, 본 연구 말미에는 이들 미세조직 변화가 Inconel 718 합금의 물성에 미치는 영향에 대해 논하고자 한다.

[P13-6]

L-DED 통해 제작한 CoCrFeMn 고엔트로피 합금의 미세조직 및 형상기억 특성에 미치는 탄소함량의 영향: 박민수, 이주영, 이욱진* (부산대학교)

Keywords: Laser direct energy deposition, 고엔트로피합금, 형상기억합금, 탄화물

Co-Cr-Fe-Mn 고엔트로피 합금은 Co-Cr-Fe-Mn-Ni 고엔트로피 합금에서 Ni을 Co로 대체한 합금으로, Face centered Cubic (FCC) 상과 Hexagonal close packed (HCP)상 사이의 마르텐사이트 동소변태에 의한 형상 기억 현상이 일어난다고 보고되고 있다. 한편 고엔트로피 합금과 유사한 FCC/HCP 상변태를 보이는 Fe-Mn-Si계 형상 기억 합금은 탄소를 첨가하면 탄소가 기지에 고용되거나 탄화물을 형성하여 형상 기억 특성을 향상한다고 알려져 있다. 본 저자들은 이전 연구에서 Co-20Fe-19Cr-18Mn (wt. %)과 Co-20Fe-19Cr-18Mn-0.6C (wt. %)를 L-DED를 통해 제작하였으며, Co-Cr-Fe-Mn 합금에서도 탄소 첨가를 통해 형상 기억 특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 탄소가 다량 첨가될 경우 탄소의 FCC 안정화 효과로 형상 기억 특성에 오히려 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 탄화물의 형상과 분포 또한 탄소 함량에 따라 달라질 수 있다. 따라서 탄소 함량에 따른 Co-Cr-Fe-Mn 합금의 미세조직 및 형상기억 특성의 변화를 분석할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 Co-20Fe-19Cr-18Mn-xC (x = 0, 0.2, 0.4, 0.6) (wt.%) 합금을 L-DED 공정을 이용하여 제조하고, 탄소 함량 변화에 따른 미세조직 및 형상기억 특성의 변화를 평가하였다

[P13-7]

직접용융증착법으로 제조된 Inconel625 / Al_2O_3 경사기능재의 단열 및 기계적 특성: 유현용 (경상국립대학교), 유진영 (부산대학교), 안성열 (포항공과대학교), 이태경 (부산대학교), 김형섭 (포항공과대학교), 김정기* (경상국립대학교)

Keywords: Thermal Barrier Coating, Functionally Graded Material, Electron Beam Physical Vapor Deposition, Directed Energy Deposition, Laser Flash Analysis

가스터빈의 열효율 향상을 위한 터빈 작동 온도의 지속적인 상승으로 인해 내열합금으로 제조된 부품 내의 냉각유로를 설계함에도

한계가 생김에 따라 모재를 보호하기 위한 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)기술이 필수적으로 요구되고 있다. TBC는 금속 모재 위에 세라믹 층을 형성하여 우수한 단열 성능을 제공하지만, 금속과 세라믹 간의 열팽창계수 차이로 인한 박리현상이 여전히 문제로 남아 있다. 따라서, 상기 문제점을 해결하기 위하여 금속과 세라믹의 조성을 점진적으로 변화시켜 열적 특성 차이를 최소화하는 경사 기능 재료(Functionally Graded Material, FGM)에 대한 연구가 활발히 진행되는 추세이다. 그러나, 기존의 용사(Thermal Spray) 및 전기빔 물리 기상 증착(Electron Beam-Physical Vapor Deposition)공정은 FGM 내 조성 변화를 정밀하게 제어하는데 한계가 있어 새로운 공정 기술의 개발이 요구된다. 이에 본 연구에서는 조성 제어가 상대적으로 용이한 직접용융증착법(Directed Energy Deposition)을 이용하여 Inconel625 / Al_2O_3 FGM 적층을 구현하였다. Laser Power, Scan Speed, Powder Feed Rate를 변화시키며 최적의 공정 조건을 도출한 결과, 분말 과열 및 박리 현상이 발생하지 않으며 접합되는 조건이 150 W, 900 mm/min, 2 g/min임을 확인하였다. 이를 바탕으로 제조된 Inconel625 / Al_2O_3 성능 확인을 위해 레이저 섬광 분석(Laser Flash Analysis) 및 굽힘 시험을 통해 열적·기계적 특성을 평가하였다.

[P13-8]

L-DED로 제작된 고망간강의 미세조직 및 기계적 특성에 Hf, Ce 첨가가 미치는 영향: 김민기, 박찬호, 박지영, 이욱진* (부산대학교)

Keywords: 적층제조, 고망간강, 결정립 미세화

적층 제조는 금속 분말을 한 층씩 쌓아 3차원 형상의 구조물을 제작하는 공정으로, 복잡한 형상의 구현이 가능하며 소재 사용량을 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다. 적층 제조 공정 중 하나인 레이저 직접 적층 제조 (Laser Direct Energy Deposition, L-DED) 는 금속 분말과 고에너지 레이저를 동시에 공급하여 재료를 적층하는 금속 적층 제조 공정 중 하나이다. 한편, 고망간강은 우수한 인장강도와 연신율을 가지며, 높은 가공 경화 특성을 보이는 합금강이다. 하지만 고망간강은 주조시 높은 망간 함량으로 인해 편석이 발생하여 고온에서의 가공성이 저하된다는 단점을 가지는데, L-DED 공정으로 고망간강 적층 시 L-DED 공정의 빠른 냉각 속도는 편석의 양을 줄여 이러한 문제점을 개선할 수 있다고 연구된 바 있다. 본 연구의 저자들은 L-DED로 24 wt.% 의 망간을 함유한 고망간강을 적층제조하여 미세구조를 연구한 바 있으며, 결함이 거의 없는 적층재를 제조할 수 있었으나 유사 소재를 압연으로 제작할 때와 비교하여 결정립 크기가 조대하여 항복강도 및 연신률이 압연재와 비교하여 다소 낮은 단점을 보인다는 점 역시 알 수 있었다. 철 또는 강의 주조 공정에서 Hf, Ce는 미세 산화물 형성을 통해 결정립 미세화를 유도하는 것으로 알려진 결정립 미세화 촉진 원소이다. 본 연구에서는 Fe-24Mn-4Cr-0.4C (wt.%) 금속 분말에 Fe-10Hf (wt.%) 및 Fe-10Ce (wt.%) 를 각각 99.5:0.5 비율로 혼합하여, 최종 적층재의 목표 조성이 Fe-24Mn-4Cr-0.4C-0.05Hf (wt.%) 및 Fe-24Mn-4Cr-0.4C-0.05Ce (wt.%) 가 되도록 하였다. 이렇게 제조한 혼합 분말을 사용하여 L-DED 공정을 통해 적층을 수행하였다. 적층제조된 샘플을 통해 Hf와 Ce 첨가에 따른 미세조직의 변화와 기계적 특성의 변화를 분석하였다.

[P13-9]

L-DED로 제조한 AISI 316L 스테인리스 합금의 Ce 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화: 박지영, 박민수, 정종욱, 이욱진* (부산대학교)

Keywords: AISI 316L, L-DED, 스테인리스

금속 적층 제조 기술 중 하나인 L-DED (Laser direct energy deposition) 공정은 모재에 분말 상태의 금속 소재를 분사함과 동시에 레이저로 용융시켜 3차원 물체를 제조하는 공정이다. L-DED 공정은 다양한 금속 적층 제조 기술 중에서도 비교적 빠른 공정 속도와 높은 분말 공급 효율을 가진다. AISI 316L 스테인리스강은 오스테나이트 계 스테인리스강으로, 우수한 부식저항성과 기계적 특성 및 뛰어난 연성, 용접성 등을 가져 적층제조가 용이해 L-DED 공정에서 활발하게 응용연구가 진행되고 있는 합금이다. 한편, 일반적인 철강재료의 주조 공정에서 Ce는 철계 합금에 소량 첨가될 경우, 응고 과정에서 미세한 산화물을 형성하여 불균일 핵생성 사이트로 작용함으로써 결정립을 미세화하고, 이에 따라 강도와 연신률 등의 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 접종 원소로 알려져 있다. 본 연구에서는 AISI 316L 분말에 Fe-10Ce (wt.%) 분말을 소량 첨가한 후 기계적 혼합을 통해 최종 합금 내 Ce 함량이 0.1 wt.%가 되도록 한 혼합분말을 사용하여 L-DED 공정으로 시편을 제작하였다. Hf, Ce 첨가 시 결정립 크기가 작아졌고 연신률이 크게 증가하는 결과를 보였다. 이와 같은 접종재 첨가에 의한 미세조직적 변화 메커니즘을 상세 분석하였다.

[P13-10]

SLM 기반 Ti-6Al-4V 다공성 추간체유합보형재의 열처리에 따른 기계적 물성 및 접촉각 특성 향상: 성지원, 유휘근, 이충현 ((주)알파녹스, 아주대학교), 이한성, 송은효, 이용건, 안병민* (아주대학교)

Keywords: selective laser melting, porous structure, hydrophilicity, solution heat treatment, aging treatment

Ti-6Al-4V 합금 추간체유합보형재의 무작위 다공성 격자구조는 척추 수술 후 골유합(osteogenesis)을 촉진하고, 이의 기계적 물성을 생체 뼈와 유사하게 설계하는 데 중요한 요소이다. 생체 재료를 적층 제조할 때, 불순물 유입을 억제하기 위해 선택적 레이저 용융(selective laser melting, SLM) 공정이 사용되며, SLM 공정에서 발생하는 반복 용융 및 열 충격(thermal stress)은 기계적 물성에 영향을 미친다. 또한 이로 인해 발생하는 표면 조도와 산화막의 변화는 젖음성(wettability)에 영향을 미치며, 추간체유합보형재의 골유합 특성을 변화시킨다. 따라서 열처리를 통해 Ti-6Al-4V의 기계적 물성과 표면 특성을 생체 소재에 맞게 최적화하고자 한다. 본 연구에서는 용체화 열처리(solution heat treatment)와 시효(aging treatment)를 통하여 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 및 표면 조도를 제어하고, 이를 통해 젖음성 및 기계적 물성을 향상하고자 한다. SLM 공정으로 Ti-6Al-4V 합금 시편을 출력하였으며, 무작위 다공성 격자구조는 선직경(strand diameter) 0.5 mm, 개구율(open area ratio) 70%로 설계하였다. 출력된 시편은 940ºC에서 1시간 용체화 열처리 후 450ºC, 525ºC, 600ºC에서 2시간 시효 처리하였다. 시편 표면 산화 특성과 α, β상의 거동을 관찰하기 위해 주사전자현미경을 이용하여 시편 단면을 관찰하였으며, 공초점 레이저 현미경으로 표면 거칠기를, 젖음성을 확인하고자 접촉각 측정기로

물(water)과의 접촉각을 분석하였다. 또한, 반복 하중 시험을 이용하여 시편의 기계적 물성을 측정하였다. 본 연구는 열처리를 통해 SLM 출력 무작위 격자구조를 갖는 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 물성 및 젖음성을 향상하고자 하였다.

[P13-11]

Sand blasting 시간에 따른 Ti-6Al-4V ELI Plate의 표면 조도 및 DLC 코팅 접합 특성 연구: 이충현, 유휘근, 성지원 ((주)알파녹스, 아주대학교), 이한성, 송은효, 이용건, 안병민* (아주대학교)

Keywords: Ti-6Al-4V ELI, diamond like carbon (DLC), surface roughness, plasma vapor deposition, sand blasting

금속 임플란트의 표면 특성은 코팅층의 접합력과 생체적합성에 중요한 영향을 미친다. Ti-6Al-4V ELI는 의료기기에 주로 사용되는 친수성(낮은 젖음각)을 가진 생체적합 소재이다. Ti-6Al-4V ELI로 제조된 trauma plate는 골절 환자 몸에 이식 후 제거되는 의료기기로, 자체의 친수성에 의해 환자 체내에 있는 동안 세포 및 조직과 붙어 이후 제거가 용이하지 않다. Diamond like carbon(DLC) 코팅은 높은 생체적합성과 소수성(높은 젖음각)을 가져 이러한 plate의 제거 용이성을 향상시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 DLC 코팅을 Ti-6Al-4V plate에 적용하고자 하며, plate의 표면 조도에 따른 DLC 코팅의 접합 특성을 평가하고자 한다. 본 연구에서는 표면 조도를 sand blasting을 통해 제어하였다. Ti-6Al-4V ELI plate 표면에 sand blasting 처리를 각각 30초, 60초, 90초 동안진행하고 산처리(wet etching)로 표면 불순물을 제거하였다. 이후 plasma vapor deposition(PVD) 방식을 통해 Ti-6Al-4V ELI plate에 0.5 μm의 DLC 코팅을 증착하였다. Sand blasting 시간에 따른 Ti-6Al-4V plate의 표면 조도는 confocal laser scanning microscope(CLSM)을 이용하여 측정하였으며, DLC 코팅층은 scanning electron microscope(SEM)으로 관찰하였다. DLC 코팅의 접합 특성은 ASTM C1624 규격에 따라 scratch test를 수행하여 분석하였다. 본 연구의 결과를 통해 DLC 코팅을 위한 Ti-6Al-4V ELI의 최적 표면 조도를 찾아내고, 이를 통해 금속 임플란트의 생체 적합성과 제거 용이성의 향상을 달성하고자 한다.

[P13-12]

선택적 레이저 용융을 통해 제조된 순수 타이타늄의 down surface 공정 변수에 대한 에너지 밀도의 영향 연구: 한승준 (한국생산기술연구원, 성균관대학교), 김원래, 김건희, 강현수, 이택우 (한국생산기술연구원), 한혁수 (성균관대학교), 김형균* (한국생산기술연구원)

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Titanium, Energy Density, Down Surface

적층 제조 공정 중 하나인 선택적 레이저 용융 공정은 레이저를 열원으로 하여 재료의 상호작용을 통해 금속 분말을 선택적으로 용융 시켜 복잡한 형상의 부품을 제조하는 특징을 갖는다. 선택적 레이저 용융 공정은 기존의 제조 기술에 비해 재료 손실이 거의 없고 적층 공정 시 높은 설계 자유도, 우수한 정밀도를 바탕으로 복잡한 형상의 부품을 단일공정을 통해 제작 가능하다는 이점이 있어 다양한 산업 분야에서 활발히 응용되고 있다. 또한, 활용되고 있는 여러 금속 소재 중 순수 타이타늄은 비강도, 생체적합성, 내식성을 갖는 특징에 따라 생물의학 및 환자 맞춤형 의료 분야 등에 관련된 부품 제조에 많이 사용되고 있다. 하지만, 환자 맞춤형 의료 분야의 제품은 치수 정밀도 및 우수한 표면 품질이 요구되고 있으며, 적층품의 품질을 개선하고자 후처리 및 공정 최적화에 대한 광범위한 연구가 진행되고 있음에도 불구하고, 원천적인 표면특성을 결정하는 down surface 공정 최적화 연구는 미흡한 실정이다. 이러한 down surface 공정 영역은 표면 거칠기 및 형상 왜곡이 발생하기 쉬우며, 이는 최종 적층품의 후처리 시간 증가뿐만 아니라 기계적 특성 및 사용 수명에 큰 영향을 미친다. 그러므로, 본 연구에서는 열역학적으로 계산된 순수 타이타늄의 완전 용융 에너지를 기준으로 레이저 파워, 주사속도 공정 조건을 매개 변수로 설정하여 다양한 에너지 밀도 조건에서 표면 거칠기, 미세조직 및 기계적 특성 분석 등을 통해 에너지 밀도 변화가 적층품의 down surface 영역에 미치는 영향을 평가하였다. 특히, down surface 최적 공정 조건을 통한 순수 타이타늄 적층품의 표면 특성 향상을 통해 후처리 시간 절감 및 품질 특성을 향상시키고자 하였다.

[P13-13]

텅스텐 산과 텅스텐 산화물의 환원 특성 비교 및 미립 텅스텐 분말 제조: 곽종민 (한국재료연구원, 부산대학교), 박민수 (한국재료연구원), 강남현* (부산대학교), 하국현* (한국재료연구원)

Keywords: Tungsten Powder, Hydrogen Reduction, Recycling, Nanoparticles

텅스텐은 높은 경도, 우수한 인성 및 내마모성을 갖추어 기계 부품, 전기·전자 부품, 내열 소재 등 다양한 산업 분야에서 널리 활용된다. 그러나 텅스텐은 매장량이 한정된 희소자원으로, 자원 편중으로 인한 수급 불안정성이 문제로 대두되고 있다. 이를 해결하기 위해 폐 초경 스크랩을 재활용하여 텅스텐 자원을 확보하는 연구가 필수적이며, 그 핵심 기술 중 하나가 텅스텐 산화물의 환원 공정을 통한 텅스텐 분말 제조이다. 초경 스크랩을 재활용하기 위해서는 폐 스크랩으로부터 제조된 텅스텐 산화물을 텅스텐 분말로 제조할 수 있는 환원 공정 기술이 필요하다. 일반적으로 환원 온도가 높을수록 환원이 용이하지만 과도한 입자 성장이 발생할 수 있어 합금을 제조 하였을 때 기계적 특성 향상에 한계가 존재한다. 따라서 낮은 온도에서 짧은 시간 내에 환원이 이루어지는 최적 공정을 개발하는 것이 중요하다. 특히, 텅스텐 분말이 많이 사용되는 초경합금과 같은 고강도 소재에서는 입자 미립화가 기계적 성능 개선에 필수적이다. 이를 위해서 본 연구에서는 미세 텅스텐 분말 제조를 위한 환원 공정 최적화에 중점을 두고, 일반적으로 사용되는 텅스텐 산화물(WO_3)과 텅스텐 산(H_2WO_4)의 환원 특성을 비교하였다. 폐 초경 스크랩을 재활용하여 얻어진 각각의 텅스텐 산화물 분말을 대상으로 밀링 시간, 환원 온도 및 수소 유량 등의 조건을 변화시켜 환원 거동 및 입자 특성을 분석하였다. 또한, X선 회절 분석(XRD), 비표면적 분석(BET), 주사전자현미경(FE-SEM) 분석을 통해 **입자의 상 변화 및 크기 변화를 비교 분석 하였다. 본 연구를 통해 환원 공정의 최적화 방안을 도출함으로써, 텅스텐 자원의 재활용 및 미립 분말 제조 기술 발전에 기여할 것으로 기대된다.

[P13-14]

열처리 조건에 따른 Alloy 718 와이어 아크 적층부의 미세조직 변화 분석: 임시은 (한국재료연구원, 부산대학교), 박기태*, 김찬규, 강용준, 오동진, 송상우 (한국재료연구원), 강남현 (부산대학교)

Keywords: Alloy 718, Wire Arc Additive Manufacturing, Heat treatment, Microstucture, Mechanical properties

석출경화형 니켈계 초내열합금인 Alloy 718은 -250 ºC에서 650 ºC까지의 넓은 온도 범위의 고압 및 고부식의 극한 환경에서도 우수한 기계적 특성을 유지하여 항공·우주, 국방, 발전 산업 등 다양한 산업에 널리 활용되고 있다. Alloy 718과 같은 고가 합금의 적층 제조는 주·단조 방식에 비해 높은 생산성과 원소재 절감 효과를 제공한다. 와이어 아크 적층 제조(WAAM)는 다양한 상용 와이어 적용이 가능하고 복잡한 형상 및 대형 부품 제작에 적합하다. 항공·우주 분야에 적용되는 Alloy 718은 SAE에서 제시한 AMS(Aerospace Material Specification) 규격에 따라 제조되지만, 현재 적층 제조용 Alloy 718의 열처리 규격은 아직 정립되지 않았다. 적층 제조된 Alloy 718은 inter-dendritic 영역에서 Nb의 편석으로 인해 Laves 상이 다량 석출되며 이는 용접 시 균열을 촉진하고, 기계적 특성을 저하시킨다. 따라서 WAAM으로 적층 제조된 Alloy 718은 Nb 편석 최소화 및 Laves 상의 제어를 위해 균질화 및 용체화 등의 단계적인 열처리가 필수적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서는 적층 제조된 Alloy 718의 최적의 균질화 열처리 조건 도출을 목적으로, 다양한 열처리 온도 및 시간에 따른 Laves 상의 용해 및 결정립 성장 거동을 고찰하였다. 적층 제조 시편은 Alloy 718 wire를 이용하여 CMT-WAAM 공정으로 제작하였다. 주사전자현미경(SEM)을 통해 석출상 형성 거동을 확인하였으며, 전자 후방 산란 회절(EBSD)을 통해 적층부 위치별 결정립 크기 및 성장 거동을 분석하였다. 기계적 특성은 비커스 경도 시험 및 상온 인장 시험을 통해 평가하였다.

[P13-15]

Effects of Aging Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of LPBF-fabricated 17-4 PH Stainless Steel: Hyeok Hwangbo* (Yonsei Univ.), Sohee An, Du-Rim Eo (Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)), Kyunsuk Choi* (Hanbat National Univ.), and Il Sohn* (Yonsei Univ.)

Keywords: Laser powder bed fusion (LPBF), 17-4 PH alloy, Aging, Mechanical properties

17-4 precipitation-hardening (PH) alloy is a martensitic stainless steel with excellent mechanical properties through precipitation of Cu. Laser powder bed fusion (LPBF) of 17-4 PH alloy become widely used for manufacturing high-load and high-durability components in aircraft engines. LPBF-fabricated 17-4 PH alloy exhibits Cu segregation and distinct microstructural characteristics compared to conventional parts, necessitating further studies on the effects of aging. In this study, various conditions of aging within temperature range of 482ºC to 621ºC were applied to LPBF-fabricated 17-4 PH alloy after solution treatment at the temperature of 1060ºC. Mechanical properties such as Vickers hardness and tensile strength were measured on aged specimens to investigate the influence of various aging conditions, and the average size and fraction of Cu precipitates was investigated using image analysis. As the aging temperature increases, hardness and strength value decrease while elongation improves, and the growth of existing Cu precipitates was promoted resulting in reduction in area fraction and an increase in average size. Additionally, formation of reverted austenite during each aging condition was compared using X-ray diffraction (XRD) patterns and electron backscatter diffraction (EBSD) phase analysis. Based on these results, the influence of microstructural changes on mechanical properties was analyzed.

[P13-16]

레이저 분말 베드 용융법으로 제작된 Hastelloy X 의 열처리에 따른 잔류응력 분석: 정종욱, 김태윤, 이욱진* (부산대학교)

Keywords: 적층제조, 유한요소해석, 잔류응력, X선 회절분석

레이저 분말 베드 용융법 (L-PBF, laser powder bed fusion) 은 금속 분말을 한 층씩 깔고 그 위에 레이저를 조사하여 3차원의 형상을 제조하는 금속 적층 제조 공정으로, 복잡한 형상의 부품을 높은 정밀도로 제조할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 레이저에 의한 국소적인 부분의 빠른 입열 및 냉각으로 인해 제조된 적층재 내 복잡한 형태의 높은 잔류 응력이 유발되는 특징을 가지고 있으며, 이는 부품의 박리 및 균열과 같은 결함을 초래할 수 있다. 따라서, 잔류응력의 형성 거동을 예측하고 제어하는 것이 중요하다. 한 편, 니켈계 시효경화형 합금 중 하나인 Hastelloy X 합금은 우수한 내식성과 내산화성으로 공업 재료로 널리 사용되는 재료이며 L-PBF 공정을 통한 복잡한 형상 제작이 가능하여 고부가가치 부품 제조에 적용이 기대되고 있다. 본 연구는 L-PBF 공정으로 제조된 Hastelloy X을 시효경화 열처리 했을 때, 적층재의 시효 열처리 유무에 따른 잔류 응력 형성 거동을 분석하고 이를 예측할 수 있는 유한 요소 해석 모델을 개발하는 것을 목표로 하였다. L-PBF 공정으로 형성되는 잔류응력을 가시적으로 확인하기 위해 캔틸레버 빔 형태의 시편을 설계하여 제작, 빔의 굽힘 변형을 구속시키며 적층하였다. 이후 제작된 시편을 800ºC 온도조건에서 서로 다른 시간으로 시효열처리 한 후, 구속된 부분을 제거하고 빔의 휘어짐을 측정하여 비교하였다. 또한 열처리에 따른 시편의 미세조직 변화를 관찰하고, 인장 시험 및 경도 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였으며, X-선 회절 분석 (XRD, X-ray diffraction) 실험을 통하여 시편의 잔류응력을 정량적으로 분석하여 유한 요소 해석 모델 결과와 비교검증 하였다.

[P13-17]

CoCr 적층 제조 합금의 격자 구조 형상에 따른 압축 거동 및 미세조직 관찰: 김려현 (국민대학교), 이경준 (가천대학교), 강성규 (경상국립대학교), 성효경* (국민대학교)

Keywords: CoCr, 적층 제조, 격자 구조, 압축 거동, 시뮬레이션

생체 재료의 활용 범위가 임플란트뿐만 아니라 뼈와 장기 등으로 확대되면서 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 생체

재료는 인체 내부에서 장시간 사용되며 응력 하중을 받으므로 경량성과 높은 변형 저항성이 동시에 요구되며, 특히 압축 및 인장 응력에 대한 변형 저항성이 필수적인 특성이다. 이에 따라, 최소한의 무게로 기계적 강도를 확보할 수 있는 격자 구조에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. CoCr 합금은 우수한 내식성과 생체 적합성을 갖추고 있어 생체 재료로서 주목받고 있으며, 격자 구조를 적용하면 경량성과 기계적 특성을 동시에 향상시킬 수 있다. 격자 구조는 벌크 소재보다 가볍지만, 인체와 접촉하는 표면적이 넓어지므로 단순한 기계적 성질 뿐 아니라 표면적 증가에 따른 생체 적합성가지 고려한 설계가 필요하다. 따라서 인장 및 압축 특성과 함께 표면적을 고려하여 강도-중량비를 향상시키는 것이 중요하다. 본 연구에서는 CoCr 합금을 활용하여 Auxetic, Tesseract, Dode-thin 세 가지 형상의 10 mm × 10 mm × 10 mm 크기의 격자를 Electron Beam Melting(EBM) 공정을 통해 적층 제조하였다. 제작된 격자의 압축 거동을 시뮬레이션을 통해 예측하고 실험을 통해 이를 검증하였다. 압축 시험 결과, 각 격자의 기둥 접합부 개수 및 배치, 응력 축과의 기둥 각도 차이에 따라 서로 다른 압축 거동과 강도가 관찰되었다. 또한, 압축 시뮬레이션을 수행하여 격자 형상별 응력 집중이 발생하는 위치를 분석하였다. Dode-thin 형상은 응력 축에 대해 대각선 방향 스트럿(strut)만을 가지므로 4.5 MPa의 비교적 낮은 강도를 나타냈으며, 응력-변형률 곡선을 분석한 결과, 압축 변형이 세 단계로 구분되는 특징을 보였다. 반면, Tesseract 형상은 수직 및 평행한 스트럿으로 구성되어 있어 응력 집중이 가장 뚜렷하게 나타났으나, 15 MPa의 높은 압축 강도를 기록하였다. Auxetic 형상의 경우, 응력 축과 평행한 기둥과 대각선 방향 스트럿이 결합된 형태로 이루어져 있어, 압축 시 구조 전체에 응력이 균일하게 분포하는 경향을 보였다. 또한, 압축 시험 전후로 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 활용하여 미세조직 변화 및 파면을 분석한 결과, 모든 형상의 파괴는 응력 집중이 발생한 부위에서 주로 나타났으며, 이는 적층 제조 과정에서 미세한 미용융 분말의 영향을 받은 것으로 해석되었다. 이번 연구는 경량성과 높은 강도가 동시에 요구되는 격자 구조 기반의 적층 제조 생체 재료 설계에 있어 구조 최적화의 방향성을 제시할 수 있으며, 시뮬레이션을 통한 압축 물성 예측 및 평가 방법은 생체 재료뿐만 아니라 다양한 구조용 소재의 설계 최적화에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P13-18]

Plasma spray 공정으로 제조된 Pure Mo 코팅층의 미세조직과 물성에 관한 연구: 원경운, 박소연 (인하대학교), 박재성 (LT메탈), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Thermal spray, Plasma spray, Pure molybdenum, Microstructure, plastic deformation

몰리브덴(Mo)은 높은 융점, 우수한 전기전도성을 가져 다양한 전자 및 첨단 산업에서 필수적인 소재로 주목받고 활용되고 있다. 일반적으로 Mo 벌크 소재는 소결 공정을 통해 제조되고 있으나, 최근 박막 증착 장비의 크기가 커지고 있어 대면적 기판에 균일한 Mo층을 형성할 수 있는 공정의 필요성이 부각되고 있다. Thermal spray (용사 코팅) 공정은 다양한 대면적 기판위에 Mo 코팅층을 형성할 수 있으며 다양한 기판 소재와 결합이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 Mo 코팅층의 대면적 제조를 위해 atmospheric plasma spraying (APS) 공정과 vacuum plasma spraying (VPS) 공정을 이용하여 Mo 코팅층을 제조하였다. APS 공정으로 제조된 코팅층의 두께는 479.7 ± 11.7 μm이며 2.9 ± 0.43%의 기공율을 나타내었고, 기판과 코팅층이 건전하게 결합되어 있었다. 다만 EPMA 관찰결과 in-flight oxidation의 영향으로 일부 산화가 발생하여 Mo 코팅층의 제조에 적절하지 않은 것으로 판단하였다. 반면에 VPS 공정으로 제조된 최적 조건 코팅층의 두께는 539.5 ± 7.6 μm이며 0.97 ± 0.55%의 기공율을 나타내었다. 특히 일부 결함 이외 코팅층 내부에서 oxygen stringer가 관찰되지 않았다. 코팅층의 vickers hardness 측정 결과 평균값은 231 ± 50.4 HV이며 압흔 주변의 미세조직을 관찰한 결과 압흔 주변 crack은 관찰되지 않았으며 droplet 영역에서 변형을 수용하며 shear band가 형성됨을 확인하였다. 상기 결과들을 바탕으로 용사 코팅 공정으로 제조된 Mo 코팅층의 최적 제조 공정 및 물성 제어 방안과 그 응용 가능성에 대하여 함께 토의하고자 하였다.

[P13-19]

A Study on the Possibility of Producing Fe-2.7Mn-6.0Al-0.45C Lightweight Steel Using Direct Energy Deposition: Kwang Kyu Ko (Kookmin University), Eun Sung Kim (Pohang University of Science and Technology (POSTECH)), Cha Hee Jung (Korea University), Haeum Park (Korea University, Korea Institute of Materials Science (KIMS)), JeongWoong Park, Dawon Kang, Hyeongin Park (Kookmin University), Jeongmin Park (Korea Institute of Materials Science (KIMS)), Hyun Joo Choi (Kookmin University), Hyoung Seop Kim (Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Graduate Institute of Ferrous & Eco Materials Technology, POSTECH), and Jae Bok Seol* (Kookmin University)

Keywords: Lightweight Steel, Direct Energy Deposition, Fe-Mn-Al-C, Low Mn

Recently, research on weight reduction of materials has been actively conducted due to problems such as reduction of CO2 emission, the trend of strengthening fuel efficiency regulations, and energy efficiency. In addition, with the advent of UAM (Urban Air Mobility) such as flying cars and drones, research on material weight reduction to increase energy efficiency is accelerating. A method of reducing thickness and size was used as an existing weight reduction strategy. However, this method has limitations in that rigidity is reduced due to the thin thickness, and vibration and noise are generated. Although many studies are being conducted on Fe-Mn-Al-C alloys along with Al alloys and Mg alloys used as existing lightweight steels, they are medium and high manganese steels with Mn content of 5 to 30 wt.% in general. Due to problems such as unit cost and formation of κ-carbide and B2 phase, the material has a limitation in which it becomes brittle. In this study, Fe-Mn-Al-C low-manganese lightweight steel was designed to solve the problem of high unit cost of Al alloy, Mg alloy, medium and high manganese steel used for weight reduction. The designed alloy was manufactured through the DED process, and experiments were conducted at 400, 500, and 600 W to check the lamination properties according to laser power. Afterwards, microstructure observation was conducted using SEM, OM, EBSD, and TEM, and mechanical properties were identified through DIC experiments.

[P13-20]

Directed Energy Deposition 공정의 급속 응고 모델 검증: 박건우 (울산과학기술원), 김대중 ((주)에이엠솔루션즈), 구용모 ((주)창성), 김성욱 (포항산업과학연구원), 이기안 (인하대학교), 김병준 (한국생산기술연구원), 박성수 (울산과학기술원), 전종배* (동아대학교)

Keywords: Directed energy deposition, Rapid solidification, Elemental partitioning, Thermodynamic calculation

Directed energy deposition (DED)는 에너지 밀도가 높은 레이저를 열원으로 사용하기 때문에 적층 과정에서 국부적으로 높은 에너지가 집중되며, 빠른 스캔 속도와 작은 용융영역으로 인해 용융풀은 높은 응고 및 냉각 속도를 보인다. 그 결과, 응고 과정에서 제한된 확산 시간으로 인해 용질 원소의 분배(elemental partitioning)가 발생하고, 고상의 화학 조성이 불균일해진다. 또한, 응고 시간이 매우 짧아 고상의 역확산이 제한되며, 이러한 용질 원소 분포는 탄소강 적층 시 설계 목표와 맞지 않는 미세조직을 형성할 수 있다. 특히, 용질 원소 편석으로 인해 냉각 과정에서 국부적인 상변태 거동 차이가 발생하여 기계적 물성이 불균일하게 나타날 수 있다. DED 공정을 이용하여 높은 강도와 경도가 요구되는 금형강을 적층할 경우, 이러한 특성이 문제가 될 수 있다. 금형강은 탄화물 석출과 마르텐사이트 형성을 통해 우수한 기계적 물성을 확보하지만, 응고 과정에서 탄소 편석이 발생하면 오스테나이트 안정성이 증가하여 잔류 오스테나이트가 형성될 가능성이 커진다. 또한, 평형 융해점이 낮아지면서 저융점 공정 탄화물이 생성될 수 있으며, 이는 고온 균열 감수성을 증가시켜 응고 균열 및 액화 균열을 유발하고, 적층성 저하와 제품의 품질 저하로 이어질 수 있다. 따라서, DED 공정을 통해 금형강을 적층하려면 용융풀의 응고 및 냉각 거동을 정확히 이해하는 것이 필수적이다. DED 적층에서는 용융풀이 매우 빠르게 응고되므로, 비평형 응고 및 냉각 조건에서 형성되는 응고상과 용질 원소 분포를 분석하고, 급속 냉각 과정에서 발생하는 변태 거동을 파악해야 한다. 그러나 이에 관한 연구는 아직 부족하며, 일부 연구에서는 여전히 평형 응고 거동을 기반으로 DDE의 응고 특성을 해석하고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 Thermo-Calc 소프트웨어를 이용하여 열역학 계산을 시행하고, 탄소강의 DED 적층 시 용융풀의 응고 거동이 평형 응고와 비평형 응고 중 어느 거동과 더 유사한지를 평가하였다. 특히, 급속 응고의 특성을 반영하는 Scheil-Gulliver 응고 모델을 적용하여 실제 DED 적층과의 유사성을 비교하였다. 또한, 냉각 과정에서 발생하는 마르텐사이트 변태를 모사하기 위해 martensite start (Ms) temperature 경험식을 적용하였다. 이를 통해 두 응고 모델 중 실제 적층부의 미세조직과 더 유사한 모델을 평가하고, DED 적층 과정에서 응고 및 냉각 거동이 미세조직 형성에 미치는 영향을 분석하였다.

[P13-21]

전산유체역학 시뮬레이션을 활용한 인코넬 718 적층재의 용융풀 거동 분석: 조덕현, 이학성, 전종배* (동아대학교)

Keywords: 적층제조, 인코넬 718, 미세조직, 전산유체역학, 용융풀

Directed energy deposition (DED) 으로 제조된 인코넬 718 적층재는 고입열로 인한 결정립 조대화가 발생하여 기계적 물성의 저하가 보고되고 있다. 본 연구진들은 이전 연구에서 DED 공정으로 제조된 인코넬 718 분말과 200 nm 크기의 지르코니아 나노입자를 2 wt.% 혼합한 적층재의 결정립 미세화 및 등축화를 통해 이방성 감소 및 경도 향상에 성공하였다. 적층제조에서 형성되는 미세조직은 공정변수에 따라 달라진다. 특히, 레이저 기반 적층제조에서는 공정변수뿐만 아니라, 열-물리적 특성도 중요한 영향을 미친다. 따라서 용융풀의 거동은 미세조직 형성의 핵심적인 요소이며, 이를 효과적으로 분석하기 위해 Computational Fluid Dynamics (CFD) 모델이 널리 활용된다. 적층제조에서 개별 공정변수의 영향을 하나씩 분석하는 것은 어렵고 비효율적이므로, 여러 변수들을 통합적으로 고려할 수 있는 해석 방법이 필요하다. 이에 본 연구진은 이전 연구에서 인코넬 718 적층재 및 인코넬 718-지르코니아 적층재의 미세조직 천이를 이해하기 위해 공정변수가 아닌 무차원 수와 차원 수를 활용하여 해석하였다. 무차원 수와 차원 수를 추산하기 위해서는 적층재의 용융풀 거동을 이해하는 것이 필수적이다. 그러나 실제 실험만으로 용융풀의 거동을 정밀하게 분석하는 데는 한계가 있으며, 열 구배 및 응고 속도 등 열-물리적 특성을 정량적으로 추산하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 CFD 기반의 FLOW-3D 시뮬레이션을 활용하여 인코넬 718 적층재 및 인코넬 718-지르코니아 적층재의 용융풀 거동을 분석하고, 열 구배 및 응고 속도 등 열-물리적 특성을 정량적으로 추산하여 미세조직과의 상관 관계를 연구하였다. 본 연구의 주요 목표는 다음과 같다. 첫째, FLOW-3D 시뮬레이션을 활용하여 인코넬 718 및 인코넬 718-지르코니아 적층재의 용융풀 거동을 분석한다. 둘째, 용융풀 내 열전달, 유체 흐름, 열 구배 및 응고 속도 등 열-물리적 특성에 따른 미세조직 형성 메커니즘을 규명한다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 통해 최적의 공정변수를 도출하여 적층제조로 제조된 인코넬 718-지르코니아 적층재의 결정립 미세화 및 등축화 효과를 극대화할 수 있는 방안을 제시한다.

[P13-22]

Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 구조 및 미세조직 변화에 따른 압축 변형 거동 분석: 차다은, 박준영, Muhammad Ishtiaq, 강성규* (경상국립대학교)

Keywords: 타이타늄 합금, 격자구조체, 적층제조, 미세조직, 기계적 특성

격자구조체는 내부 기공 채널과 규칙적인 재료의 배열 덕분에 높은 비강도와 우수한 충격흡수능을 가지고 있으며, 최근 적층 제조 기술의 발달로 복잡한 형상 제작이 가능해졌다. 이러한 격자구조체의 변형 거동 및 기계적 특성은 기하학적 형상 뿐만 아니라 재료의 미세조직에 따라 좌우된다. 격자구조체는 복잡한 형상 때문에 분말 기반 적층제조 공정으로 주로 제조되는데, 이 때 적층제조 공정의 열이력은 취성 변형 특성을 갖는 미세조직을 발달시킨다. 본 연구는 적층제조 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V (Ti64) 합금 기반 octet-truss 구조의 스트럿 두께와 미세조직을 다양화하여 압축 변형 거동을 분석하였다. 옥텟트러스 격자구조체의 단위구조체 크기는 3.3 mm로, 스트럿 두께는 좌굴 변형을 고려하여 0.4, 0.5, 0.6 mm로 각각 설정하였다. 미세조직은 적층제조 후 600도와 900도에서 열처리하여 a' 상, a 상, 그리고 b 상의 분율을 다양화하였다. 마지막으로, 압축 시험을 통해 각 격자구조체의 탄성계수, 항복강도, 압축강도, 마지막으로 변형 중 에너지 흡수능을 정량분석하였다. 본 연구를 통해 적층제조 기반 금속격자구조체의 기계적 특성 향상을 위한 전략을 제시할 수 있을 것이라 기대한다.

[P13-23]

레이저 적층제조 공정이 적용된 무산소동 코팅층내 희석거동 평가: 이영호*, 김재득, 윤석 (한국원자력연구원)

Keywords: 적층제조, 레이저, 무산소동, 희석, 처분용기

국내 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위한 심층처분은 지하 500 m 이상의 암반에 내부 주철용기와 외부 구리용기로 구성된 이중구조 처분용기를 이용하여 사용후핵연료를 인간 생활권과 완전히 격리시키기 개념이다. 따라서 사용후핵연료 처분용기는 수 만년 이상 신뢰할 수 있는 내구성을 가져야 하며 지하 처분조건에서 내부식성 확보를 위해 고순도의 무산소동 소재가 적용된다. 최근 기존 압연 및 단조 공정이 적용되는 외부 구리용기의 대안 제작공정으로 내부 주철용기 외면에 무산소동을 일정 두께로 코팅하는 적층제조 처분용기 개발연구가 진행중이며, 적층제조 공정으로 제작되는 구리 코팅층은 주철 모재에서 구리 코팅층으로 희석되는 Fe 등의 성분을 최소화하여 가급적 무산소동 소재에 가깝게 형성시켜 우수한 부식저항성을 확보해야 한다. 본 연구에서는 적층에 적용되는 구리 소재 종류(즉, 분말 및 와이어)에 따른 주철모재의 희석거동을 레이저 적층제조 공정을 적용하여 비교하였다. 워블 레이저를 이용하여 동일한 조건에서 형성된 구리 코팅층의 EDS 분석결과 분말보다는 와이어를 적용할 경우 구리 코팅층으로 희석되는 Fe의 함량이 현저히 감소함을 확인하였다. 이러한 이유는 적용되는 레이저 열원이 분말보다는 와이어에 더 많이 집중되어 생성되는 용융풀의 크기가 작고, 비산되는 분말 대비 적층 중 손실이 없는 와이어 공정 특성에 따라 코팅층 두께가 증가했기 때문이다. 무산소동 코팅층이 형성된 처분용기를 제작하기 위해서는 희석을 최소화할 수 있는 와이어 기반 레이저 적층제조로 희석 저감층을 형성한 후 공정의 효율성 확보가 가능한 대용량 아크기반 구리 적층제조 공정이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

[P13-24]

Effect of Ni content on the wear and corrosion resistance of WC-Ni cemented carbides prepared by spark plasma sintering: Namhyuk Seo, Ji-Woo Park, and Min-Su Kim* (KITECH)

Keywords: Cemented carbides, spark plasma sintering, corrosion behavior, wear behavior, microstructure

Cemented carbides are essential materials in industries requiring high wear resistance and durability, such as cutting tools, wear-resistant components, and geo-engineering instruments. These environments often impose extreme mechanical and chemical stresses, necessitating materials with high strength, wear resistance, and corrosion resistance. While conventional WC-Co cemented carbides provide excellent hardness and strength, WC-Ni cemented carbides offer superior oxidation and corrosion resistance, making them more suitable for chemically aggressive conditions. In this study, WC-Ni cemented carbides with varying Ni content (7–27 wt%) were fabricated via spark plasma sintering (SPS) to achieve a dense microstructure with minimal porosity. The effects of Ni content on microstructure, hardness, wear behavior, and corrosion resistance were experimentally investigated. Microstructural analysis was conducted using field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM), while corrosion resistance was evaluated through electrochemical testing, including polarization curve measurements. Also, the wear behavior of WC-Ni alloys was assessed using a ball-on-disc test. The relationships between Ni content, microstructural evolution, wear resistance, and corrosion performance were analyzed to elucidate the role of Ni in the performance of WC-Ni cemented carbides.

[P13-25]

Alloy 939 합금의 DED 공정 최적화 및 미세조직·기계적 특성 평가: 김범준 (주식회사 갓테크), 김영우 (경상국립대학교), 이진수, 신현승, 박기덕 (주식회사 갓테크), 김정기* (경상국립대학교)

Keywords: DED, 적층제조, Alloy 939

Alloy 939는 고온 환경에서 우수한 기계적 특성을 보유한 Ni 기반 초합금으로, 항공우주 및 발전 산업에서 널리 활용되고 있다. 그러나 DED(Directed Energy Deposition) 공정을 이용한 Alloy 939 제조 시 균열 발생 및 미세조직 불균일성이 주요 과제로 남아 있다. 본 연구에서는 반응표면 분석법(Response Surface Methodology, RSM)을 적용하여 레이저 출력, 주사 속도, 분말 공급량 등 주요 공정 변수를 최적화함으로써 결함을 최소화하고 기계적 특성을 향상시키는 방법을 연구하였다. 최적화된 공정 조건에서 제작된 시편에 대해 미세조직 분석 및 기계적 특성 평가를 수행하여 결정립 형상, 기공률, 상 분율 변화 및 기계적 거동을 평가하였다. 연구 결과, 특정 공정 조건에서 적절한 열 입력과 냉각 속도를 조절함으로써 고밀도·균질한 적층 구조를 확보할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 DED를 이용한 Alloy 939 적층 제조의 공정-물성 관계를 이해하는 데 기여하며, 향후 산업적 적용 확대에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

[P13-26]

Laser Powder Bed Fusion 공정으로 제조된 SA508 Gr.3 강의 인장 및 고주기 피로 특성: 황원구 (인하대학교), 류호진 (한국과학기술원), 이기안* (인하대학교)

Keywords: Laser Powder Bed Fusion, Reactor pressure vessel, Microstructure, High-cycle fatigue

SA508 Gr.3 Mn-Mo-Ni 저합금강은 우수한 용접성, 저온에서도 뛰어난 충격 인성, 중성자 조사에 대한 내성 및 적절한 인장 강도를 갖추고 있어 원자로 압력용기, 가압기, 증기 발생기 등 원자력 관련 핵심 부품에 넓게 사용되고 있다. 그러나 최근 원자로 압력용기의 설계가 점점 복잡해지고, 고성능이 요구됨에 따라 복잡한 형상을 가진 부품을 신속하면서도 정밀하게 제조할 수 있는 새로운 제조 기술의 필요성이 증가하고 있다. 기존의 전통적인 제조 공정만으로는 이러한 요구를 충족하는 데 한계가 있어, 이를 보완할 수 있는 대체 기술이 요구된다. 이를 해결할 수 있는 기술로 적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 공정이 주목받고 있다. AM은 컴퓨터 지원 설계(CAD) 모델을 기반으로 금속 분말이나 와이어를 층층이 적층하여 부품을 제작하는 방식으로, 기존 절삭 및 성

형 가공 방식과 비교할 때 형상의 자유도가 높고 Near-Net Shape 제조가 가능하다는 장점이 있다. 특히, AM 공정 중에서도 Laser Powder Bed Fusion (LPBF) 기술은 정밀한 금속 부품 제조 및 구조 최적화가 가능하여 금속 적층 제조 분야에서 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 LPBF 공정을 이용하여 SA508 Gr.3 강을 적층 제조하고, 그 인장 및 피로 특성을 평가하였다. 제조된 시험편의 내부 결함을 광학 현미경(Optical Microscope, OM)을 활용하여 분석한 결과, 기공율이 0.3% 이하로 측정되어 내부 결함이 거의 없는 건전한 소재임을 확인할 수 있었다. 초기 미세조직은 전자 후방산란 회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 분석을 통해 평가하였으며, 시험편이 99% 이상의 라스 마르텐사이트(Lath Martensite) 로 구성되어 있음을 확인하였다. 또한, 평균 결정립 크기는 약 0.83 ± 0.61 μm 로 측정되었다. 인장 특성을 분석하기 위해 초기 변형률 10^{-3} s^{-1} 조건에서 인장 시험을 수행한 결과, 항복 강도는 780 MPa, 최대 인장 강도는 1070 MPa, 연신율은 10.2% 로 나타났다. 또한, 고주기 피로 특성을 평가하기 위해 사인파형 하중을 적용하고, 주파수 10 Hz, 응력비 R = 0.1 조건에서 피로 시험을 수행하였다. 그 결과, 10^7 사이클에서 피로 한도(fatigue limit)는 350 MPa 로 측정되었다. 본 연구에서는 LPBF 공정을 이용하여 제조된 SA508 Gr.3 강의 미세조직과 인장과 피로 특성을 정량적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 해당 공정의 산업적 실용성과 원자력 부품 제조 분야에서의 적용 가능성을 검토하였다.

[P13-27]

Inconel 625 합금 적층재의 고온 압연 패스에 따른 미세조직 및 기계적 특성 분석: 임민혁*, 김현중, 조성재, 신승환, 홍민기, 이지운*, 홍순직 (공주대학교)

Keywords: Directed Energy Deposition, 공정 최적화, 고온 압연 거동, 초내열 합금(Ni계 분말)

적층 제조 공정 (AM)은 자동차, 항공우주, 에너지 및 원자력 산업 등 다양한 분야에서 전통적 제조 방법 대비 공정 속도, 비용 및 기술적 이점을 바탕으로 큰 관심을 받고있다. 특히, 3D 모델링을 통한 복잡한 형상과 맞춤형 부품 제작이 가능하여 리드 타임 단축 효과를 보이며, 니켈 기반 초합금인 Inconel 625는 우수한 피로·크리프 특성과 고온 산화 및 부식 저항성으로 터빈 블레이드, 가스 터빈, 원자로 모터 등의 주요 부품에 활용되고 있다. 금속 분말을 이용한 AM 방식 중 Powder Bed Fusion(PBF)와 Direct Energy Deposition(DED)이 대표적으로 사용되는데, PBF는 높은 정밀도와 밀도를 제공하는 반면, 빠른 출력과 대형 부품 제작에는 DED 방식이 유리하다. 그러나 DED 공정은 일반적으로 빌드 방향에 따른 주상정(또는 덴드라이트) 결정립 형성으로 인한 이방성 및 기계적 특성 저하라는 한계를 보인다. 이에 본 연구에서는 Inconel 625의 DED 공정 매개변수(Laser power, Scan speed, Hatch Spacing)를 설정하여 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하고 공정 최적화를 진행한 뒤 소성 가공(압연)과 후열처리 공정을 통해 기계적 특성 및 내구성 개선 방안을 모색하고자 하였다. DED 공정 최적화 이후 Inconel 625의 기계적 특성 개선을 위해 압연 공정을 설계하였다. 본 연구에서는 시편의 표면적 대비 부피가 작아 열 손실이 빠르게 발생할 수 있으므로 가열로에서의 균일한 가열 이후 압연 직전의 예열 상태 유지 또는 중간 재가열(re-heating) 과정을 통해 온도가 저하되지 않게 진행하였다. 치수 안정성과 균일한 미세조직 확보를 위해 가열 및 압연 후 연속 패스의 공정을 순차적으로 적용하였다.

[P13-28]

Directed Energy Deposition(DED) 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V와 산화물 분산 강화 합금의 적층 형상 및 물성 비교: 정재우*, 이윤선, 성지현, 김건우, 김다혜* (한국생산기술연구원)

Keywords: 적층제조, Directed Energy Deposition, Ti-6Al-4V, 산화물 분산 강화 합금, 공정 최적화

산화물 분산 강화(ODS, Oxide Dispersion Strengthened) 합금은 금속 기지 내에 열적으로 안정한 미세 산화물 입자가 균일하게 분산됨으로써, 우수한 고온 기계적 성질과 내산화성을 제공하는 소재이다. 이러한 특성 덕분에 ODS 합금은 항공우주, 에너지, 국방산업 등에서 고온 내구성이 요구되는 구조재 등으로 활용되고 있다. 기존 용융 기반 제조공정에서는 산화물의 균일한 분산이 어렵기 때문에 일반적으로 기계적 합금화(MA) 및 분말야금(PM) 공정을 통해 제조하고 있다. 형상 자유도가 높아 많은 관심을 받는 적층제조 기법에 ODS 합금을 활용할 경우에도 미세 산화물의 안정성 유지와 균일한 분산 확보 등에 기술적 과제가 남아 있다. 본 연구에서는 국부적 영역 적층과 손상 부위 보수, 이종소재 적층을 통한 물성 강화 등의 장점을 가지는 기술인 Directed Energy Deposition(DED) 적층 제조 기법을 활용하여 ODS-Ti64 합금의 적층 품질 및 기계적 특성 향상 여부를 검토하였다. 공정 조건에 따른 적층성 평가를 수행하고, 기존 Ti-6Al-4V와 비교 분석하였다. 레이저 용융 공정이 미세 산화물 분포에 미치는 영향을 조사하였으며, 산화물 응집에 따른 크기 변화 및 미세조직 변화를 분석하였다. 또한 기계적 강도 평가를 통해 ODS 합금의 향상된 기계적 특성 확보에 적층제조의 활용성을 평가하였다. 이 논문은 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 21-106-A00-006, 반응성 분말용 고증착률 DED 적층제조 모듈 개발 및 대상 국방부품 최적보수 기술개발)

[P13-29]

Binder Jet 적층제조용 고탄소강 분말 제조 수율 향상 기술 연구: 김영겸, 이주호, 채유빈, 박은수* (주식회사 이엠엘)

Keywords: Binder Jetting, Powder, Gas Atomization, D2 Steel

적층 제조(Additive Manufacuring) 기술은 최근 시제품 제작 위주에서 직접 부품을 제작 할 수 있는 기술로 발전하고 있고, 이러한 기술 중 복잡하고 정밀한 형상이 요구되는 금속 부품 제작 기술로 3D 프린팅과 같은 적층 방식의 기술을 적용하여 제품 제작 효율 향상을 도모하고 있다. 적층제조 기술의 일종인 Binder Jet 공정은 소결기반 적층제조 기술로 분말을 리코팅하고 그 위에 바인더를 주사하여 그린 바디로 형태를 만든다. 이후 탈지/소결 공정을 통해 제품의 밀도를 향상시킨다. MIM과 유사한 공정을 거치므로 사용되는 금속 분말 역시, 기존 레이저기반 적층제조 기술 대비 상대적으로 미세한 금속분말 (<20 μm)이 사용된다. 따라서, Binder Jet용 분말을 제조하기 위해서는 상대적으로 <20 μm의 분말의 수율을 향상시키는 기술이 요구된다. 본 연구에서는 Binder

Jet 적층제조용 고탄소강의 분말 제조 기술 및 미세 분말의 수율을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 금속 분말 제조 공정은 EIGA(Electrode induction gas atomization) 공법과 VIGA(Vacuum Induction Gas Atomiation) 공법 두 가지 공정을 적용하였으며, 공정별 분말의 특성을 분석하였다. 분무 공정(노즐 직경, 가스 종류, 가스 온도, 가스압력 등) 변수 제어를 통해 분말의 형상 및 입도 변화를 고찰하였다. 고압가스 분무를 위한 Gas heating system 개발을 진행하였으며, 가스온도별 가스압력 및 유지시간 등의 변화를 확인하였다. 공정 변수를 제어하여 제조된 분말의 입도 및 구형도, 산소함량, 유동도 등을 분석하여 그 유효성을 검증하였다. [사사문구] 본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임(20015347, 철강산업재도약기술개발사업)

[P13-30]

In-situ 가스 분무법에 의한 Y_2O_3 산화물 분산 강화 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 합금 분말의 합성: 임현태, 곽륜호, 박성민, 박창수, 박형기* (한국생산기술연구원)

Keywords: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Y_2O_3, 산화물 분산 강화 (Oxide dispersion-strengthened), 적층제조(Additive manufacturing), In-situ 제조 (In-situ fabrication)

산화물 분산 강화 (ODS) 합금은 고온에서 향상된 기계적 특성을 보이며, 적층 제조를 위한 차세대 분말 재료로서의 잠재력을 보여준다. 이러한 합금은 적층 제조 공정 중에 응고 및 입자 성장 거동을 조절하여 미세 기공 및 균열과 같은 결함을 완화할 수 있다. 본 연구에서는 합금 분말 내에서 균일한 산화물 분포를 달성하기 위한 ODS Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti6242) 합금 분말의 제조 기술에 대해 연구하였다. 열역학적 계산을 이용하여 In-situ 가스 분무를 위한 최적의 Ti6242–Y_2O_3 조성을 도출하여 Ti6242 용융 금속에서 산화물을 완전히 용해하고 냉각 시 재석출되는 아이디어를 제안하였다. 진공 아크 용융을 통해 입계를 따라 Y_2O_3가 조대하게 석출된 로드 잉곳을 제조하였다. 이렇게 제조된 로드 잉곳을 이용하여 전극 유도 가스 분무 방법을 통해 분말을 제조하였다. 제조된 ODS Ti6242 분말은 적층 제조에 적합한 구형으로 제조 되었으며, 분말의 표면에는 산화물과 같은 물질이 없는 매끄러운 상태를 보였다. 단면 분석 결과, 합금 분말 내에 수십 나노미터 크기의 Y_2O_3 산화물 입자가 균일하게 분포되어 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 In-situ 가스 분무법을 통해 산화물이 분산된 일체형 ODS Ti6242 합금 분말을 성공적으로 합성했으며, 고온 응용 분야의 적층 제조 분야를 발전시킬 가능성이 있을 것으로 전망된다.

[P13-31]

재료 압출 방식으로 적층 제조된 구리의 충격 거동 분석: 홍민기, 임민혁, 배주은, 이지운*, 홍순직, 송기안, 문종언 (공주대학교)

Keywords: 적층제조, 구리, 충격 시험

항공 우주 분야에서 금속 3D 프린팅을 활용하는 사례가 늘어남에 따라 철강, 알루미늄, 티타늄, 니켈 등 여러 종류의 금속을 적층 제조하려는 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 높은 전도율과 높은 반사율을 가진 구리의 경우 PBF 또는 DED와 같이 레이저 또는 전자빔을 직접 조사하여 소결하는 방식에 대해 어려움이 있어 재료 압출 방식 중 하나인 FDM 과 금속 분말이 혼합된 필라멘트를 활용하여 금속 적층 제조가 가능하다. FDM 방식은 다른 금속 적층 제조 방식에 비해 상대적으로 적은 가격으로 출력이 가능하나 높은 공공 비율, 낮은 기계적 성능이 존재한다. 본 연구에서는 FDM/FFF 방식으로 적층 제조한 구리를 HIP 처리를 하여 일반 소결 처리를 한 구리와 비교하여 상온 및 극저온에서의 충격 거동을 분석하여 기존 대비 성능 향상 정도를 평가하였고, SEM 촬영을 통해 충격 거동 분석 및 미세조직 분석을 수행하였다.

[P13-32]

DED 공정으로 제작한 Inconel 718의 용체화 열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가: 이윤선, 김다혜* (한국생산기술연구원)

Keywords: Laser-aided Energy Directed Deposition, Inconel 718, Solution Heat treatment, Microstructure, Mechanical properties

Inconel 718은 니켈 기반의 석출 경화형 합금으로, 우수한 강도, 내피로성, 내마모성, 고온 내식성을 갖추고 있어 항공우주 산업 및 가스터빈 엔진 부품에 널리 사용된다. 특히 고온 환경에서 작동하는 핵심 부품인 가스터빈 블레이드, 항공기 엔진 부품, 연소기 등의 필수적인 소재로 자리잡고 있다. 그러나 Inconel 718은 이러한 우수한 특성에도 불구하고 가공이 어렵고 복잡한 형상을 제작하는데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 적층 제조 기술이 각광받고 있다. DED(Direct Energy Deposition)와 같은 고속 적층 제조 공정은 효율적으로 원하는 형상을 제조할 수 있으며, 손상된 부품의 보수에도 용이하다는 장점이 있다. 그러나 적층 제조된 Inconel 718은 미세한 셀-수지상 조직(cellular-dendritic microstructure)을 형성하며 수지상 간 경계(inter-dendritic boundaries)를 따라 불규칙한 사슬모양의 Laves 상이 나타난다. 단단하고 취성이 강한 Laves 상은 기계적 특성에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 적층 소재는 빌드 방향에 따라 층간 결합부 및 용융풀 경계에서 국부적 미세구조 차이로 인해 기계적 특성에 편차가 발생하며 이를 해결하기 위해서도 후 열처리 과정이 필수적이다. 본 연구에서는 석출경화 상 형성을 통해 강도 및 내피로성을 확보하고, 미세조직 균질화를 달성하기 위해 다양한 용체화 열처리 조건을 적용하였다. 또한 초기 미세조직 변화에 따른 열처리 후 조직 변화와 그에 따른 기계적 특성 변화를 분석하여 DED 적층 제조된 Inconel 718의 최적 후 열처리 조건을 고찰하였다. 이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음.(No. 202300238087)

[P13-33]

Ni계 내열 합금의 고온 특성: 김송이, 권도훈, 김휘준* (한국생산기술연구원)

Keywords: Ni-based superalloy, Heat-resistant alloy, Gleeble Test

Ni-based superalloy는 고온의 환경에서 strength, creep 및 thermal fatigue 특성이 우수하고 산화 및 부식 저항성이 높아 가스

터빈, 발전 부품 소재 등에 적용된다. 본 연구에서는 Ni 기반 내열 합금 분말을 제조하여 고온에서의 열적 거동 및 기계적 특성에 대해 조사하고자 하였다. 분말은 gas atomization 공정으로 제조되었고, VIHP(Vacuum Induction Hot Press)공정을 이용하여 1250°C에서 성형 하였다. 제조된 분말과 성형체는 미세조직 및 상분석을 위해 FE-SEM, 및 X-ray diffraction, DSC 등의 분석을 수행하였으며 고온에서의 기계적 특성의 확인을 위해 Gleeble test를 진행 하였다. 그 결과 VIHP 공정을 이용한 고밀도의 건전한 성형체가 제조됨을 확인하였으며, 1050°C의 고온에서도 기계적 특성이 우수한 결과를 확인하였다. 또한 추가적으로 산화물 분산 효과를 확인하고자 Y_2O_3를 추가하여 기계적 합금화 및 성형체를 제조하여 이에 대한 고온 특성을 비교 분석 하고자 하였다.

[P13-34]

DED 공정을 이용한 Advanced 625 합금제조 및 기계적·미세조직적 특성 평가: 신현승 (주식회사 갓테크), 이욱진 (부산대학교), 김범준, 이진수, 박기덕* (주식회사 갓테크)

Keywords: Direct energy deposit(DED), 금속 분말, 인코넬

기존 적층 제조(AM) 공정에서 사용되는 금속 분말은 주조재 기반으로 개발되어 있어, 적층 공정에 최적화되지 않은 한계를 가진다. 이에 본 연구에서는 인코넬 625(Inconel 625) 합금을 기반으로 소량의 알루미늄(Al)과 타이타늄(Ti)을 첨가하여 기존 고용강화형 합금에서 석출경화형 합금으로 개량한 Advanced 625 합금을 개발하였다. 해당 합금을 Directed Energy Deposition (DED) 공정을 이용하여 적층 제조한 후, 수직 및 수평 방향에서 열처리 전후로 인장 시험을 수행하여 기계적 특성을 비교 분석하였다. 또한, 미세조직 분석을 통해 열처리에 따른 결정립 성장, 석출상 형성 및 기공률 변화를 조사하였다. 연구 결과, 소량의 Al 및 Ti 첨가를 통해 미세 석출상이 형성됨으로써 기존 Inconel 625보다 향상된 기계적 강도를 확보할 수 있음을 확인하였다. 특히, 열처리에 따른 석출상 분포 변화가 기계적 특성에 미치는 영향을 규명함으로써, 본 연구는 AM용 합금 조성 설계와 후처리 최적화에 대한 새로운 방향성을 제시하며, 향후 고성능 금속 적층 제조 분야에서의 활용 가능성을 제고할 것으로 기대된다.

[P13-35]

DED 공정에 적합한 Alloy 230 합금 조성 개발 및 기계적 특성 평가: 이진수, 김범준, 신현승, 박기덕 (주식회사 갓테크), 나혜성 ((주)헤이치브이엠), 박상원 (포항소재산업진흥원), 김세윤* (경남대학교)

Keywords: Directed Energy Deposition(DED), Alloy 230, 3D 프린팅, 가스 아토마이징

Directed Energy Deposition(DED)은 금속 적층 제조 기술 중 하나로, 기존의 주조(casting) 및 단조(forging) 방식과 비교하여 높은 설계 자유도, 소재 절약, 신속한 제조가 가능한 장점을 가진다. 특히, 복잡한 형상의 부품 제조 및 국부적인 소재 보수에 강점을 가지며, 항공우주 및 에너지 산업에서의 활용도가 증가하고 있다. Alloy 230 합금은 우수한 고온 강도와 내산화성을 바탕으로 터빈 엔진, 고온 가스로 및 화학 공정 장비 등 극한 환경에서 널리 사용된다. 그러나 기존 Alloy 230 조성을 DED 방식으로 제조할 경우, 공정 중 균열 발생 및 기계적 성질 저하 등의 문제점이 발생할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 DED 공정에 최적화된 새로운 Alloy 230 합금 조성을 개발하였다. 본 연구에서는 기존의 외산 Alloy 230과 새롭게 개발된 Alloy 230을 가스 아토마이징(gas atomization) 공정을 통해 분말 특성을 비교·평가하였으며, DED 적층 제조 공정을 활용하여 시편을 제작한 후, 인장 시험, 크리프 시험, 저주기 피로 시험 등 기계적 물성 평가를 수행하여 비교 분석하였다.

[P13-36]

Tribological Behavior of STS316L Sintered Body and Cu/STS316L Composite Fabricated by Binder Jetting Process: Kyung Il Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Binder jetting, Tribology, Friction coefficient, Sintering

The binder jetting (BJT) process offers high material selectivity and shape realization compared to other AM processes and enables the production of porous and composite materials through sintering and impregnation, common in powder metallurgy. STS316L powder, widely used in BJT, has excellent weldability, corrosion resistance, and tribological properties, yet studies on its tribological behavior remain limited. In this study, tribological tests were conducted on STS316L sintered bodies and Cu/STS316L composites fabricated via BJT. Sintering was done at three temperatures (1100, 1200, and 1300°C), and tribological tendencies were analyzed using the Pin-on-disc method. The friction coefficients and microstructures of the tribological traces were examined with scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and transmission electron microscopy (TEM). The results showed that for STS316L, both friction coefficient and tribological mark size increased with sintering temperature. In contrast, Cu/STS316L composites exhibited stable friction coefficients and smoother wear marks under all conditions. The tribological mechanisms were identified through microstructure analysis of the wear marks.

[P13-37]

진공가스아토마이징 시스템을 활용한 고청정 Alloy 230 초내열 합금분말 제조 및 적층 특성: 박상원*, 권홍기 (포항소재산업진흥원), 박기덕 ((주)갓테크), 나혜성 ((주)에이치브이엠)

Keywords: 가스터빈, 초내열 합금분말, 진공가스아토마이징, 수리?보수, 3D 프린팅

발전플랜트 산업에서 에너지 시스템의 구조적인 변화에 따라 녹색산업으로 분류되어 있는 고청정/고효율 천연가스발전소의 시장이 폭발적으로 성장하고 있고, 핵심부품인 가스터빈의 수요도 크게 성장하고 있다. 한편, 발전플랜트 산업에서 주요 핵심부품(Blade, Vane)등은 선진 해외사로부터 100% 수입에 의존하는 실정이지만 점차적으로 국산화 개발 및 연구가 진행되고 있다. 특히, 고온에서

운전되는 발전용 가스터빈 부품의 손상 시 운전 효율을 유지하기 위해 수리 및 재생 기술이 필수적으로 요구되고 있다. 한편, 3D 프린팅 기술을 이용한 터빈 블레이드 수리?보수가 진행되면 신규 블레이드 수요가 줄어들어 선진사의 기술개발 및 투자에 소극적이며, 기존 3D 프린팅 용 Ni Alloy 분말의 경우 일반적으로 많이 쓰이고 있는 소재 중심으로 생산되고, Alloy 230의 경우 주문-생산방식으로 소재를 수급해야하며 특수합금을 전문적으로 제조하는 기업과 공동연구기관의 3D 프린팅용 분말 합금 설계 노하우 및 잉곳/분말제조/조형체 제조기술, 평가기술이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 불순물 제어를 통한 고청정 잉곳을 공급받아 3D 프린팅 (PBF/DED) 공정에 적용 가능한 진공가스아토마이징 합금분말 제조공정 최적화를 진행하였다. 제작된 합금분말에 대한 입도 및 분체 특성 연구를 진행하였고, 3D 프린팅 공정을 통한 조형체 제작 및 건전성 평가, 미세조직 분석, 기계적 특성 평가를 수행하였다.

P14 : 디스플레이재료
Room 3층 로비, 4월 24일

[P14-1]
All-inorganic InP Quantum Dots with Chalcogenidometallate Ligands for Biosolar Catalysis: Jaehwan Lee, Yonghan Jo, and Himchan Cho* (KAIST)
Keywords: Quantum Dots, Photocatalysis, Biocatalysis, Core/shell structure, Inorganic ligands

Type-I core/shell quantum dots (QDs) are promising photocatalysts because of their high quantum efficiency, absorption coefficient, and stability. However, their shell with wide bandgap strongly confines the excitons within the core, impeding their participation in photocatalytic reactions. Our study presents a novel strategy to address these intrinsic limitations of Type-I core/shell QDs by introducing metal chalcogenide complex (MCC) ligands. Comprehensive optoelectronic analyses demonstrated that MCC ligands promote exciton dissociation and efficient charge transfer in InP/ZnSe/ZnS QDs, augmenting their photocatalytic capability. Consequently, the MCC-functionalized InP/ZnSe/ZnS QDs (MCC-InP) efficiently catalyzed a two-electron oxygen reduction reaction under light illumination, generating H_2O_2. Building on these findings, we established a photoenzymatic cascade system by integrating peroxygenase with MCC-InP QDs, enabling the continuous consumption of H_2O_2 while driving enantioselective conversion of various organic substrates. This system preserves the colloidal stability of MCC-InP QDs through the in-situ H_2O_2 consumption and catalyzes enantioselective hydroxylation and epoxidation reactions, yielding enantiopure enzymatic products with a record-high maximum total turnover number of 173,000 without external electron donors. Our study provides insights into charge carrier dynamics in ligand-modulated Type-I core/shell QDs, highlighting their potential for next-generation photocatalysis systems.

[P14-2]
Bright Colloidal Blue-emissive Europium Halide Perovskite Nanocrystals: Jaeyeong Ha, Seongbeom Yeon, Jaehwan Lee, Hyungdoh Lee, and Himchan Cho* (KAIST)
Keywords: Colloidal Europium Perovskites, Blue Emission, Phase Transformation

Europium halide perovskites are emerging as promising candidates for environmentally-benign blue light emitters with their narrow emission linewidth. However, the development of high-photoluminescence quantum yield (PLQY) colloidal europium halide perovskite nanocrystals (PNCs) is hindered by the limited availability of colloidal synthetic methods and the elusive reaction mechanisms. Here, we provide an effective synthetic route for achieving high-PLQY deep-blue-emitting colloidal $CsEuBr_3$ PNCs. Distinct phase evolution routes involving Eu^{2+}:CsBr, Cs_4EuBr_6, and $CsEuBr_3$, are identified using two different Br-organic ligand complex precursors, oleylammonium bromide (OLAMHBr) and trioctylphosphine dibromide ($TOPBr_2$). The OLAMHBr precursor initially promotes the formation of Eu^{2+}:CsBr phase, which, upon surpassing a threshold, transforms into the $CsEuBr_3$ perovskite phase via lattice reorganization of CsBr, mediated by a proton transfer reaction. In contrast, the $TOPBr_2$ precursor initially induces the formation of core/shell Cs_4EuBr_6/CsBr PNCs, which subsequently transform into $CsEuBr_3$ through a nucleophilic addition reaction. The $TOPBr_2$ route exhibited enhanced $CsEuBr_3$ phase homogeneity, resulting in a significantly higher PLQY (40.5%; full-width-at-half-maximum (FWHM) = 24 nm) at 430 nm, compared to the OLAMHBr route (16.5% at 418 nm). Notably, the phase-pure $CsEuBr_3$ PNCs demonstrated a world-record PLQY among the reported colloidal deep-blue-emitting lead-free PNCs that exhibit a narrow emission linewidth (FWHM < 25 nm). This work reveals the significant role of organic ligands in the colloidal synthesis of $CsEuBr_3$ PNCs and highlights their potential as non-toxic, solution-processable blue-light emitters.

[P14-3]
Interface-modified Nickel Oxide Hole Transport Layers for Low-operating Voltage Perovskite Light-emitting Diodes: Hyungdoh Lee and Himchan Cho* (KAIST)
Keywords: metal halide perovskite, nickel oxide, self-assembly molecules, interfacial engineering

Nickel oxide (NiO_x) has been widely used as a hole transport layer (HTL) in perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) due to its high carrier transport ability and intrinsic stability compared to organic materials. Despite these advantages, NiO_x has suffered from poor hole injection into the perovskite emission layer, hindering the fabrication of highly efficient optoelectronic devices. To overcome this issue, introducing an interlayer between NiO_x and the perovskite is a strategy for improving balanced hole injection via energy level tuning, reducing carrier loss at the interface, and more. In this work, we applied carbazole-based functional molecules as an interlayer between NiO_x and the perovskite emission layer to improve hole injection using a simple solution process. We confirmed that the functional interlayer molecule promotes hole injection into the perovskite by modification of work function and energy level. In addition, we successfully observed electroluminescence at a low voltage by controlling the electron transport layer (ETL). Finally, we demonstrated green perovskite light-emitting diodes using the functional molecule as an interlayer which shows dramatically luminance improvement at low operating voltage (2.3 V). We also achieved a maximum external quantum

efficiency (EQE) of over 14.38%, which is seven times higher than that of control devices, with a maximum luminance of 38,557 cd/m^2. It is expected that low-operating voltage perovskite light emitters can be realized using metal oxide-based inorganic layers for high power efficient devices.

[P14-4]

수열합성법으로 제조된 ZnO 분말의 나노구조 및 광학적 특성 변화: 임채림 (인하대학교), 김효한 (동국대학교), 박현순* (인하대학교)

Keywords: 세라믹, ZnO, 디스플레이

최근 투명 전도성 산화물은 평판 디스플레이, 태양전지, 광전자 소자 등 다양한 분야에서 폭 넓게 사용되고 있으며, 따라서 투명 전도성 산화물에 대한 연구와 응용이 지속적으로 증가하고 있다. 현재 투명전극으로는 ITO가 널리 사용되고 있으나, 원료 물질인 인듐의 수급량 부족과 이에 따른 가격 상승, 독성, 저온 공정의 어려움, 그리고 플라즈마 내 장시간 노출 시 열화로 인한 광학적 특성의 변화 등 문제점이 지적되고 있다. 이러한 문제점 들을 해결하기 위하여 ITO 대신 사용할 수 있는 ZnO에 관련한 많은 연구가 진행되고 있지만, 아직 미흡한 실정이다. 수열합성 방법은 비교적 저온에서 수행 가능한 액상분말 제조법으로써 다른 분말합성 방법에 비해 비교적 간단하며, 단 시간 내에 많은 양의 제조가 가능하며, 분말의 특성변화가 용이하기 때문에 본 실험에서 ZnO 분말을 제조하는데 응용 하였다. 본 연구에서는 수열합성 방법을 이용하여 Al이 도핑 된 ZnO(Al:ZnO) 분말을 제조하였다. ZnO의 수열합성을 위하여 ZnCl2 와 NaOH가 이용 되었으며, Al 도핑을 위해 AlCl3·6H2O 가 이용되었다. Al 도핑량에 따른 Al:ZnO 분말의 구조변화 및 이에 따른 전기적, 광학적 성질과의 상관관계를 고찰 하였다. Al:ZnO 분말의 형상과 크기를 확인하기 위하여, 주사전자현미경을 이용하였으며, X선 회절분석을 이용하여 제조된 Al:ZnO 분말의 결정구조를 확인하였다. 이들의 크기는 수 십 nm 에서 200 nm 범위에서 변화를 보였으며 구형 타입의 형상으로 보였다. PL측정 시 빛의 주된 파장은 약 600 nm의 범위에서 나타났으며, 발광강도가 Al의 도핑량에 따라 점진적으로 감소하였다. 또한 Hall effect measurement 와 Four point probe를 이용하여 Al doped ZnO 분말의 전기적인 특성을 확인하였다. 본 발표에서는 Al 도핑량에 따른 Al:ZnO 분말의 전기적, 광학적 그리고 나노구조적 특성 변화에 대한 구체적인 실험내용을 다루고자 한다

[P14-5]

Enhanced Detectivity in Infrared Quantum Dot Photodetectors via P-Type Ink-Based HTL and ALD-Induced Solvent Orthogonality: Hong Gu Kang* (Hanyang University), Ju Young Woo (Hanyang University, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)), and Seong-Yong Cho* (Hanyang University)

Keywords: Quantum dots, Photodetector, Ligand exchange, ALD

Quantum dots (QDs) have attracted attention as promising materials due to their simpler processing conditions, lower cost, and scalability compared to conventional compound semiconductors such as InGaAs. However, their lower performance necessitates strategies to enhance detectivity. This study aims to fabricate a Quantum dot photodiode (QDPD) with improved detectivity by reducing dark current and optimizing light absorption. The hole transport layer (HTL) in QDPD is typically fabricated using a solid-state ligand exchange process called the layer-by-layer method. However, this method induces stress due to ligand length reduction, leading to cracks that degrade device performance. Although solution-state ligand exchange has been explored to address these issues, strong ligand-ligand interactions often hinder redispersion and precise concentration control. In this study, a novel ligand was introduced for solution-state ligand exchange, enabling the fabrication of p-type QD ink. This approach reduced defect density by 30% by minimizing surface cracking. Since the ink produced via solution-state ligand exchange uses the same solvent as the underlying active layer, solvent orthogonality must be ensured. To integrate the p-type QD ink into the device, atomic layer deposition (ALD) was applied between the active layer and HTL, successfully securing solvent orthogonality. As a result, the dark current was reduced by two orders of magnitude compared to conventional devices. Additionally, the thickness of the HTL was controlled by adjusting the concentration of the p-type ink, enabling tunable optical absorption verified through optical simulation.

[P14-6]

Electrically Driven Amplified Spontaneous Emission in Perovskite Diodes: Changsoon Cho* and Jeonghwan You (Pohang University of Science and Technology)

Keywords: Perovskite, Amplified Spontaneous Emission, Laser, Parasitic Absorption

Perovskite have recently gained significant interest in the field of solid-state thin-film lasers due to their micropatternability and wavelength tunability. While numerous studies have demonstrated the exceptional amplified spontaneous emission (ASE) properties of optically pumped perovskite films, research efforts are now shifting toward the realization of electrically driven perovskite lasers. This presentation introduces a perovskite diode structure engineered to achieve optical ASE across the full device stack while maintaining stable operation under high current densities. Our optical analysis highlights two key design principles essential for achieving net gain in electrically driven stimulated emission: enabling a large-angle waveguide mode and minimizing parasitic absorption losses. These principles differ from those relevant to perovskite films without electrodes. To achieve a fully electrically pumped perovskite laser, it is crucial to enhance the external quantum efficiency at high charge carrier densities while simultaneously lowering the ASE threshold. This approach reinforces the potential of perovskites as a promising platform for next-generation laser technologies.

[P14-7]

Influence of Organic Spacer Length on Quantum Well Structure and Carrier Dynamics in Quasi-2D Dion-Jacobson Lead Halide Perovskites: Hyeonji Lee and Kwangdong Roh* (Ewha Womans University)

Keywords: Halide Perovskite, Quasi-2D, Dion-Jacobson, Light-Emitting Devices

Quasi-2D organic halide perovskites have gained considerable attention due to their excellent optical properties and solution-processability for optoelectronic devices. Dion-Jacobson (DJ) lead halide perovskites are especially recognized for eliminating the Van der Waals gap, resulting in enhanced environmental and thermal stability. However, optimizing their performance remains challenging, particularly concerning the spacer length and its influence on device characteristics. In this study, we investigate the role of spacer length in modulating the quantum well (QW) structure and affecting carrier transport in low dimensional forms of perovskites. We successfully synthesized a series of quasi-2D halide perovskites, denoted as (XDA)FAn-1PbnBr3n+1, with varying organic spacers (X) such as ethylenediamine (E), propanediamine (P), and butanediamine (B), and thoroughly examined their optical properties. The multiple quantum well (MQW) structure enhances carrier confinement and energy transfer, resulting in amplified spontaneous emission (ASE) under optical excitation. Furthermore, we demonstrate that the quasi-2D perovskites maintain stable ASE performance even under high-intensity optical pumping. The length of the organic spacer stripe significantly influences carrier confinement within the QW, thereby impacting carrier transport efficiency and mobility. As the spacer length increases, the QW structure gradually becomes asymmetric, affecting carrier recombination and altering the optical characteristics. Through experimental analysis, we investigate how spacer length modulates the QW structure, carrier transport mechanisms, and finally light amplification properties. This research offers valuable insights into how adjusting the length of organic spacers can enhance the performance of quasi-2D DJ lead halide perovskites, paving the way for the development of more efficient and stable optoelectronic devices with improved carrier transport.

[P14-8]

Primary-Blue Emitting Stretchable Color-conversion Layer with In-situ Synthesized Perovskite Nanocrystals Embedded in an Organic MatrixL Jun-Su Yeo, Eun-Ha Cho, Joo Yoon Woo, Yong Min Park, Joo Hyeong Han, Daehwan Kim, Won Bin Im, and Tae-Hee Han* (Hanyang University)

Keywords: Perovskite, Color-conversion layer, Stretchable

While the deployment of ultraviolet (UV) light-emitting diodes (LEDs) with red, green, and blue color-conversion layers (CCLs) in display technologies streamlines production and enhances uniformity, studies on blue CCLs are notably scarce, particularly in the sky-blue spectrum (> 470 nm), which fails to meet the stringent Rec. 2020 color standard. Given their high extinction coefficient, exceptional color purity, and superior photoluminescence quantum yield (PLQY), halide perovskites emerge as formidable candidates for color conversion in CCLs.[1] This study introduces an efficient method for the in-situ synthesis of perovskite nanocrystal (NC) films tailored for primary-blue CCLs. It also establishes a series of scientific principles concerning key variables that influence the nucleation and in-situ crystallization dynamics of perovskite NCs. The produced films are highly elastic, emit intense primary-blue light (~460 nm), and maintain photoluminescence stability against UV exposure. Through the incorporation of fluorinated arylammonium salts, this approach optimally modifies quantum and dielectric confinement effects, facilitating effective energy transfer mechanisms for primary-blue emission. The resulting phase-controlled perovskite NCs embedded within an organic matrix ensure spectrally consistent and durable photoluminescence, even under extreme tensile stress (> 250%) and after extended UV exposure (> 40 days). Accordingly, this research confirms that the in-situ developed stretchable blue CCLs conform entirely to the Rec. 2020 standard.[2] References [1] T.-H. Han. et al. Nature Rev. Mater. 7, 757–777 (2022) [2] J.-S. Yeo et al. ACS Nano 2025, 19, 1, 406–417

[P14-9]

High-Efficiency Perovskite Nanocrystal Light-Emitting Diodes Enabled by Multi-Site Coordinating Ligands: Jongho Park, Dae Hwan Kim, Ji Su Ha, Jun-Su Yeo (Hanyang University), Han Uk Lee, Hyeon Woo Kim, Sung Beom Cho (Ajou University), and Tae-Hee Han* (Hanyang University)

Keywords: perovskite, nanocrystal, ligand, light-emitting diode

Metal halide perovskite (MHP) nanocrystals exhibit exceptional optoelectronic properties, including high photoluminescence quantum yields (PLQY) and narrow band emission, making them promising candidates for next-generation high-color-purity light-emitting diodes (LEDs). However, their surfaces are typically passivated by long-chain organic ligands, which hinder charge injection and transport, leading to charge accumulation, recombination zone misalignment, and severe efficiency roll-off at high luminance levels. In contrast, polycrystalline perovskite thin films offer superior charge transport due to their reduced organic content and continuous perovskite network, but suffer from large grain size distributions, high defect density at grain boundaries, and suboptimal charge confinement. To fully harness the advantages of both material systems, we present a ligand engineering strategy that replaces long-chain ligands with short and multi-site coordinating ligands. The introduction of multi-site coordination ligands not only enhances surface passivation and stability but also facilitates efficient charge transport by reducing insulating barriers. Furthermore, the ligand exchange promotes strong electronic coupling interactions, leading to improved charge transport and precise recombination zone modulation,

which enhances charge balance within the emissive layer. This approach allows MHP nanocrystals to achieve better charge transport characteristics, thereby increasing luminance yield and luminous efficiency compared to those with conventional nanocrystals.

[P14-10]

Highly-Efficient Perovskite Nanocrystal Light-Emitting Diodes based on interior/exterior Strain Relaxation: Dae Hwan Kim, Jong Ho Park, Ji Su Ha, Jun-Su Yeo (Hanyang Univ.), Han Uk Lee, Hyeon Woo Kim, Sung Beom Cho (Ajou Univ.), and Tae-Hee Han* (Hanyang Univ.)

Keywords: Perovskite, nanocrystal, LED

Metal halide perovskites (MHPs) have emerged as promising candidates for next-generation optoelectronic devices due to their exceptional color purity, tunable bandgap, and solution processability. However, common types of MHPs, such as polycrystalline MHPs, suffer from low exciton binding energy (E_b) and long exciton diffusion lengths, which contribute to their low stability and labile nature, posing significant challenges for commercialization. On the other hand, perovskite nanocrystals (PNCs) with their high exciton binding energy, low defect density, and high photoluminescence quantum yield (PLQY) have garnered considerable attention, making them ideal for high-performance optoelectronic applications. Nonetheless, the highly dynamic nature of ligand binding leads to low longevity and a drastic decrease in PLQY. Additionally, the fact that the external quantum efficiency (EQE) of PNC-based light-emitting diodes (LEDs) falls behind the theoretical optical limit remains a bottleneck for the commercialization of PNC-based LEDs. In this work, we carefully controlled internal and external strains by implementing a multi-dopant alloying strategy, where dopants of varying radii relax the strain imposed by low structural integrity. Various A-site cations and B-site cations were initially introduced to reduce internal strain caused by size mismatches, minimizing defects and improving structural stability. Moreover, external strain was carefully modulated through surface engineering, where sulfur moieties of thiocyanate strongly bind to the surface, effectively passivating both vacancies and external strain. The optimized PNCs exhibit enhanced PLQY and stability, enabling the fabrication of high-performance LEDs with superior luminance and external quantum efficiency. Our findings highlight the importance of strain management and compositional engineering in achieving high-performance PNC-based optoelectronic devices. This work provides a comprehensive framework for rational design strategies, paving the way for PNCs with superior stability and efficiency in practical applications.

[P14-11]

RF sputtering으로 증착된 SnO_2 전자 수송층을 적용한 QLEDs의 성능 향상 연구: 최재휘, 김지완* (경기대학교)

Keywords: 양자점, 재료, 전자수송층, RF sputtering, QLEDs

콜로이드 양자점(Colloidal Quantum Dots, QDs)은 독특한 광학적 및 전기적 특성을 지닌 반도체 나노입자로, 입자 크기 조절을 통해 다양한 색상을 구현할 수 있으며 뛰어난 색 재현성을 제공한다. 이러한 특성 덕분에 발광층으로 활용된 양자점 발광 다이오드(Quantum Dot Light-Emitting Diodes, QLEDs)가 차세대 디스플레이 기술로 주목받고 있다. QLEDs에서 전자 수송층(Electron Transport Layer, ETL)은 전자 수송 및 전하 균형 조절에 필수적인 역할을 하며, 최적화를 통해 소자의 안정성과 효율을 향상시킬 수 있다. 일반적인 ETL 소재로는 높은 전자 이동도와 우수한 광 투과율을 갖춘 ZnO 나노입자(ZnO NPs)가 사용되지만, ZnO NPs는 상온에서 쉽게 응집되어 안정성이 떨어진다는 문제가 있다. 이에, ZnO와 유사한 에너지 준위와 광학적 특성을 가지면서도 안정성이 뛰어난 SnO_2가 ETL 소재로 주목받고 있다. 하지만 SnO_2는 상대적으로 높은 전자 이동도를 가지므로, QLEDs 내부에서 전하 주입 및 수송의 불균형을 초래할 가능성이 있어 이에 대한 조절이 필요하다. ETL은 일반적으로 용액 공정인 스핀 코팅을 통해 형성되지만, 이는 박막 두께의 정밀한 제어가 어렵고, 결정성과 균일성이 낮다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 고품질의 재현성과 우수한 결정성을 갖춘 RF 스퍼터링 공정을 활용하여 SnO_2 박막을 증착하였다. RF 스퍼터링 공정에서 산소 분압과 기판 온도를 조절하여 SnO_2 박막의 이동도와 전도도를 최적화하고, 이를 ETL로 적용한 Inverted 구조의 녹색 QLEDs(ITO/SnO_2/GQDs/CBP/MoO_3/Al)를 제작하였다. 산소 분압 증가에 따라 SnO_2의 밴드갭과 광 투과율이 증가하였으며, 기판 온도 조절을 통해 박막의 결정성과 이동도를 효과적으로 조절할 수 있었다. 최적화된 SnO_2 ETL을 적용한 QLEDs는 100,000 cd/m^2 이상의 높은 휘도를 보이고, 안정적인 소자 구동 특성을 보였다. 이는 기존의 SnO_2 NPs 기반 ETL을 활용한 QLEDs보다 우수한 성능을 나타낸다. 본 연구는 RF 스퍼터링 공정에서 산소 분압과 기판 온도를 조절하여 SnO_2 박막의 이동도와 전도도를 최적화하였고, 이는 QLEDs 성능 향상에 중요한 역할을 함을 제시하며, 이를 통해 차세대 디스플레이 기술 발전에 기여할 것으로 기대된다.

[P14-12]

$P(DEA)_3$ 전구체를 이용한 균일한 크기 분포의 InP/ZnSe/ZnS 양자점 합성과 QLED 응용: 조성현, 윤예닮, 김지완* (경기대학교)

Keywords: 콜로이드 양자점 ,InP

콜로이드 양자점(Colloidal quantum dots, QDs)은 독특한 광학적 및 전기적 특성을 가진 반도체 나노입자로써 차세대 디스플레이 소재로 주목받고 있다. 최근 전계발광을 활용한 양자점 발광 다이오드(Quantum dot light-emitting diodes, QLEDs)가 우수한 성능을 보이고 있지만 Cd 기반 QDs는 유해물질 제한 지침(RoHS)으로 인해 사용이 제한된다. 이에 따라 최근 연구에서는 Cd 기반 QDs를 InP 기반 QDs로 대체하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 InP QDs 합성에서는 P 전구체로 tris(trimethylsilyl)phosphine ($P(TMS)_3$) 또는 tris (dimethylamino)phosphine (($P(DMA)_3$)가 사용되지만 ($P(TMS)_3$)의 경우 높은 독성을 가지며 두 전구체 모두 반응성이 지나치게 높아 크기 분포를 정밀하게 제어하기 어렵다는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해

tris(diethylamino)phosphine ($P(DEA)_3$)를 전구체로 사용하여 녹색 InP/ZnSe/ZnS QDs를 합성하였다. ($P(DEA)_3$)는 높은 끓는점을 가져 고온에서 보다 안정적인 QDs 성장이 가능하며 이를 통해 균일한 크기 분포를 갖는 QDs를 합성하였다. 또한 InP 코어와 ZnS 외각 쉘 사이의 격자 불일치(7.85%)를 줄이기 위해 ZnSe/ZnS 이중 쉘 구조를 도입하여 InP/ZnSe/ZnS 구조의 QDs를 합성하였다. 코어 합성을 위한 온도 및 반응 시간을 최적화함으로써 높은 광발광 양자 효율(Photoluminescence quantum yield, PL QY)을 달성하였다. 합성된 QDs는 528nm의 발광 파장, 38nm의 반치폭 그리고 87%의 PL QY를 나타내었으며 균일하게 성장된 InP QDs를 발광층으로 사용하여 전계발광 소자를 제작하였다. 다양한 전자 수송층(Electron transport layer, ETL)을 적용한 소자는 Inverted 구조인 ITO/ETL/InP QDs/CBP/MoO_3/Al 로 구성되고 최대 휘도 2,100 cd/m^2이상을 나타내었으며 안정적인 소자 구동을 확인하였다. 본 연구를 통해 $P(DEA)_3$ 전구체를 활용하여 고온에서도 균일한 크기 분포를 갖는 InP QDs를 성공적으로 합성하였으며 이를 발광층으로 적용하여 전계발광 소자를 제작하였다. 향후 균일한 InP QDs 합성 기술과 최적의 ETL을 적용함으로써 QLED 소자의 효율과 수명을 더욱 개선할 것으로 기대된다.

[P14-13]

전주도금 공정에서 pH와 온도 제어에 따른 Invar 박판의 미세조직 상과 표면 형상의 변화: 김선민, 김진범, 김인경, 박용범, 신세은* (순천대학교)

Keywords: Invar, Electroforming, anomalous co-deposition, pH, Sulfate Bath temperature

OLED 증착 공정 중 열에 의한 변형을 막기 위해 Fine Metal Mask(FMM)은 저열팽창 특성이 우수한 Invar(Fe-36.5%Ni 합금)으로 제조한다. 현재 Invar 합금의 박판 제조 공정에는 압연 방식과 전주도금 방식이 있는데, 압연 공정을 사용할 경우 두께가 20 μm 이상으로 제한되지만 전주도금방법을 활용하면 10 μm 이하의 박판 제작이 가능하여 고해상도 디스플레이용 FMM 제조에 적합하다. 전주도금 Invar 제조 시, Ni 조성이 36 wt%에 가까워질수록 도금 중 anomalous co-deposition 현상으로 인한 columnar 형태의 마이크로 결정립을 갖는 미세조직이 발달하며 이는 극박판의 표면 조도를 높이는데 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 표면조도와 조성 균질성의 확보할 수 있는 최적의 공정 조건을 도출하기 위해 pH2.4 ~ 2.8, 온도 55 ~ 65ºC 범위에서 제조한 전주도금 Invar의 미세조직 발달을 조사하였다. 온도 55ºC 에서는 pH가 증가함에 따라 anomalous co-deposition 현상으로 인한 columnar-grain의 수가 증가하였으며, Ni 조성의 감소가 나타났다. 온도 조건 60ºC에서는 columnar-grain의 수가 감소하였으며, pH 증가에 따라 Ni 조성이 감소하였다. 65ºC 에서는 나노 결정립의 미세조직을 갖는 Invar 극박판을 얻었다. 55ºC를 제외한 조건에서는 pH가 증가함에 따라 mirror급의 표면을 얻었다. 또한 온도가 증가할수록 Ni 조성이 증가하였다. 따라서 본 연구는 Invar 박판 제조 시 도금층의 조성 균질성을 개선하고 전주도금 공정 시 발생하는 결함을 최소화하기 위한 적절한 pH 및 온도 조건을 제시하며, 이를 통해 전주도금 공정을 최적화하였다.

[P14-14]

Enhancing the Performance of Lead Halide Perovskite for Lasing via Halide Exchange Method: Yejin Jun and Kwangdong Roh* (Ewha Womans University)

Keywords: perovskite laser, halide exchange method

Perovskite semiconductor materials have demonstrated remarkable progress over the past decade, owing to their outstanding optical and electrical properties combined with the ease and low cost of synthesis. These materials have been actively applied in photovoltaic cells and light-emitting devices (LEDs) due to their excellent light absorption and emission characteristics. Specifically, perovskite-based solar cells have surpassed an efficiency of 25%, and external quantum efficiency (EQE) of LEDs has been reported to exceed 30% across the near-infrared (NIR), red, green, and blue spectral regions. Significant research has also been conducted on optically pumped operations for lasers, showing the versatility of perovskites in various optoelectronic applications. One of the key advantages of perovskite materials is their tunability in bandgap energy and emission wavelength, which can be easily controlled by adjusting the halide composition. However, there are challenges associated with the use of mixed halides, as issues such as halide segregation and ion migration can significantly degrade the material's emission properties and efficiency. Additionally, as the proportion of bromine (Br) for green emission or chlorine (Cl) for blue emission increases, the solubility of the perovskite precursor decreases sharply, making the synthesis of wide-bandgap semiconductors increasingly difficult. In particular, for lasing emission, a perovskite thin film must possess a minimum thickness, known as the cutoff thickness, typically around 50–60 nm, in order to support the formation of lasing modes within the waveguide structure. Achieving this thickness for Cl-based perovskite thin films, which are required for blue lasing emission, poses significant challenges. To overcome this, a method has been developed wherein a Br-based perovskite thin film is first formed, followed by halide exchange synthesis to create a sufficiently thick Cl-based perovskite thin film. In this study, we optimized various synthesis methods and successfully demonstrated amplified spontaneous emission (ASE) in Br-Cl mixed perovskite thin films within the blue-green spectral region. These films exhibited promising performance in terms of emission intensity and spectral stability. Going forward, we aim to achieve stable lasing spectra in deeper blue spectral regions through further research, with a focus on enhancing the laser cavity structure to enable the realization of functional laser devices. The broader impact of this research could span a range of industries, including displays, solid-state lighting, and high-speed optical communications, as perovskite lasers have the potential to cover the full color spectrum from NIR to red, green, and blue. As this technology matures, its application in these fields could lead to significant advancements in performance and efficiency, potentially transforming these industries with low-cost, high-efficiency perovskite-based optoelectronic devices.

[P14-15]

승온 속도 및 소결 온도가 MoO_2 소결체의 입성장과 치밀화에 미치는 영향에 대한 연구: 정재훈 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 이종범* (한국생산기술연구원)

Keywords: MoO2, 소결, 입성장, 치밀화

MoO_2는 고온에서 우수한 전기적 및 기계적 특성을 나타내는 소재로, 다양한 고온 응용 분야에서 활용되고 있다. 또한, 높은 녹는점과 산·알칼리성 전해질에서의 우수한 화학적 안정성을 갖춘 금속성 물질로서, 리튬 이온 배터리 전극 촉매, 광촉매, 가스 센서 및 전극 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 MoO_2 소결체의 입성장과 치밀화 거동에 미치는 승온 속도 및 소결 온도의 영향을 탐구하였다. 수 마이크로미터 크기의 MoO_2 분말을 1축 가압(300 MPa)하여 성형한 후, 서로 다른 소결 온도(850°C, 900°C, 950°C, 1000°C)와 승온 속도(10°C/min, 50°C/min, 250°C/min)에서 소결을 진행하였다. 소결체의 밀도는 Archimedes 원리를 이용해 측정하였으며, XRD 분석을 통해 결정 구조 및 상 변화를 조사하였다. 또한, SEM을 활용하여 소결체의 미세조직을 분석하였다. 이러한 분석을 바탕으로 소결 온도와 승온 속도 변화에 따른 MoO_2 소결체의 입성장과 치밀화 거동을 비교·평가하였다.

[P14-16]

Fabrication and Process Optimization of IZO Thin-Film Transistors Using a Slush-State Precursor in Solution Processing: soosang chea* and Jihyeok Jeong (Korea University of Technology and Education (KoreaTech))

Keywords: IZO, TFT, Slush state

In this study, we propose a novel fabrication method for indium zinc oxide (IZO) thin-film transistors using a slush-state precursor solution in a solution-based process. Conventional solution processing often suffers from film non-uniformity and degraded electrical properties due to uneven evaporation rates and irregular fluid dynamics. To address these issues, we introduce a technique in which the precursor solution is partially frozen (slush-state) prior to spin coating, thereby enhancing film uniformity and improving process reproducibility. Key process variables, including the concentration of metal salts, the freezing and thawing rates of the precursor solution, and the process temperature range, were systematically investigated. The concentration of metal salts influences the ratio of metal ions in the film and its crystallization behavior, while the freezing rate of the precursor solution plays a crucial role in solute distribution and microstructure formation. Additionally, optimizing the thawing rate facilitates uniform solute diffusion and helps regulate the solution viscosity for improved film deposition. The proposed method offers significant advantages over conventional solution-based processes, including enhanced film uniformity, controlled grain growth, and improved process reproducibility. This approach is expected to contribute to the development of next-generation low-cost oxide semiconductor fabrication and flexible electronic devices.

[P14-17]

Eco-friendly Fabrication of Quantum Dot Light-emitting Diodes Using Bright and Stable Hydrophilic QDs: Jisu Han (Department of Energy Science, Sungkyunkwan University), Jeongha Whang (Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University), Byong Jae Kim, Hyeongjun KIm (Department of Energy Science, Sungkyunkwan University), Donggu Lee (Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University), and Jaehoon Kim* (Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, SKKU Institute of Energy Science and Technology, Sungkyunkwan University, Department of Future Energy Engineering, Sungkyunkwan University)

Keywords: Quantum Dots, Light-emitting Diodes, Hydrophilic Ligands

Quantum dot light emitting diodes (QD-LEDs) are promising for as next-generation display, including AR/VR display, free flatform display, and so on. While recent QD-LEDs accomplished external quantum efficiency and luminance comparable to conventional organic LEDs, most QD inks constitute of hydrophobic solvents, many of those are harmful or even carcinogenic to human body, which is the potential threat to commercialization of the display. Moreover, highly bright and stable QD-LEDs achieved by interface-engineering of core/shell QDs is limited to Cd-based QDs because of complicated synthesis chemistry in Cd-free QDs. Therefore, other approaches suitable for universal QDs are necessary. To address these issues, we adopted designer ligands granting hydrophilicity to QDs for environmentally benign fabrication of QD-LEDs. Oligomeric zinc thiolate ligand tethering multiple carboxylate moieties allowed for maintaining photoluminescence quantum yield after the fabrication of hydrophilic QDs in ethylene glycol, one of well-known green solvents. We found that the replacement of original hydrophobic ligands with the zinc thiolate ligands displayed higher brightness and external quantum efficiency as well as reduced efficiency droop. Through several analyses, we revealed that zinc thiolate ligand can promote charge balance in the QD emissive layer by controlling electron injection rate. We believe that this research would pave a way for exploring next generation QD-LED display satisfying the demand on high brightness.

[P14-18]

InP 기반 양자점 발광 다이오드의 정공수송층 열화 분석: 박강현, 황준연, 이광근, 곽정훈* (서울대학교, 반도체공동연구소(ISRC), 소프트파운드리연구소)

Keywords: 양자점 발광 다이오드, 열화, 정공수송층, 디스플레이

양자점 발광 다이오드 (Quantum dot light-emitting diode, QLED)는 높은 색 순도와 색 재현율, 그리고 용액 공정이 가능하다

는 점에서 차세대 디스플레이 기술 중 하나로 주목받고 있다. 그 중 III-V족 InP 양자점 기반 QLED는 최근 환경 규제로 인해 사용이 제한되고 있는 카드뮴 기반 QLED를 대신하여 친환경 QLED로 떠오르고 있으며, 연구가 지속됨에 따라 유기발광다이오드에 맞먹는 수준의 높은 효율과 밝기를 보이고 있다.1 하지만, 그럼에도 불구하고 InP 기반 QLED의 짧은 구동 시간은 여전히 상용화의 주요 난제로 지적되고 있다. 최근 QLED의 주요 열화 원인으로 양자점에서의 전자 누설 전류에 의한 유기 정공수송층의 열화가 보고되고 있으며,2,3 InP 양자점은 전자에 대한 구속 효과가 약하여 상대적으로 카드뮴 기반 QLED에 비해 전자 누설 전류가 클 것으로 예측된다. 따라서 이로 인한 유기 정공수송층의 열화에 대한 연구 필요성이 크지만, 이에 대한 연구는 매우 제한적인 수준에 머물러 있다. 본 연구에서는 InP 기반 QLED의 전계 구동 과정에서 발생하는 유기 정공수송층의 열화 현상을 분석하였다. 먼저, 전계 구동에 따른 정공수송층의 열화를 전기적 및 화학적 분석 기법을 통해 분석하고, 열화 위치를 특정하였다. 또한, 전계 구동 시간에 따른 InP 기반 QLED의 휘도 및 전압 변화를 분석하여, 정공수송층의 열화 발생 시점을 도출하고, 더 나아가 정공수송층이 InP 기반 QLED의 전기적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 전계 구동에 따라 양자점과 정공수송층의 계면에서 열화가 발생함을 관찰하였으며, 이로 인해 소자의 저항이 상승하는 현상을 확인하였다. 이러한 InP 기반 QLED에서의 유기 정공수송층 열화에 대한 분석이 추후 InP 기반 QLED의 수명 향상을 위한 전략 수립에 기여할 것으로 기대된다. 사사 (Acknowledgement): 이 논문은 BK21 Plus program의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (Reference) (1) Won, Y.-H. et al. Nature 575, 634–638 (2019). (2) Gao, P., Chen, Z. & Chen, S. Adv. Mater.36, e2309123 (2023). (3) Azadinia, M. & Aziz, H. Adv. Opt. Mater. 13, (2025).

[P14-19]

Direct Photocatalytic Patterning for Efficient Perovskite Nanocrystal Light-Emitting Diodes: Seongkyu Maeng, Junho Kim, Taehyun KIm, Seyun Lee, Sun Jae Park, and Himchan Cho*(KAIST)

Keywords: Perovskite nanocrystal, Direct optical patterning, High-resolution, Light-emitting diodes, optoelectronics

High-resolution patterning is essential for utilizing perovskite nanocrystals (PeNCs) in augmented reality and virtual reality displays. However, due to the low stability of PeNCs, the patterning process is detrimental to their optical and electrical properties. Here, we introduce a dual strategy to achieve efficient crosslinked PeNC light-emitting diodes (PeNC-LEDs). First, we systematically designed a thiol crosslinker that enables nondestructive, high-resolution PeNC patterning. Second, we applied the film-state ligand exchange (FLE), which enhances optical and electrical properties of PeNC films by replacing long-chain ligands with short-chain ligands that provide dense surface passivation and better charge transport. Through our dual strategy, we achieved efficient crosslinked PeNC-LEDs, with a maximum external quantum efficiency (EQE_{max}) of 14.7% and a maximum luminance of 13,157 cd m^{-2} using 1,8-octanedithiol (ODT), and a EQE_{max} of 12.7% with a maximum luminance of 25,405 cd m^{-2} using 1,10-decanedithiol (DDT), both representing the highest reported values for green $CsPbBr_3$ PeNC-LEDs via direct optical patterning. Furthermore, the high versatility of FLE in modifying the halide composition enables the conversion of the emission wavelength of the crosslinked film, leading to the first demonstration of a crosslinked red $CsPbBr_xI_{3-x}$ PeNC-LED. Our dual strategy offers valuable insights into molecular design and process engineering in direct optical lithography, making it highly suitable for industrial applications and widely applicable for fabricating high-performance pixelated optoelectronics based on PeNCs.

[P14-20]

PEALD를 이용한 Al_2O_3 박막의 Passivation 특성에 관한 연구: 김성종, 김병량, 홍영규, 이규홍* (한국전자기술연구원)

Keywords: PEALD, OLED, Passivation Layer, 저온 증착, WVTR

최근 OLED, 마이크로 LED, 플렉시블 디스플레이 등 차세대 디스플레이 소자 산업에 대한 산업에 관심이 높아지면서, 저온에서 고품질 박막을 형성하는 공정에 대한 연구가 활발해지고 있다. 플라즈마 강화 원자층 증착(Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition, PEALD) 방법은 150ºC 이하의 저온에서도 높은 반응성을 유지하면서 균일한 박막을 형성할 수 있어, OLED 소자의 보호층(Encapsulation Layer) 증착에 매우 유리하다. 또한, PEALD로 증착된 무기 박막은 플라즈마에 의한 반응 활성화, 저온에서도 높은 에너지 제공 효과, 불순물 감소 및 균일한 원자층 형성 등의 요인으로 인해 매우 치밀한 구조를 가지게 되며, 이로 인해 OLED Encapsulation Layer로 적용할 때 높은 기밀성, 우수한 보호 성능, 그리고 균일한 두께 제어가 가능하여 보호층으로서의 기능을 효과적으로 구현할 수 있다. 본 연구에서는 OLED 소자의 Passivation Layer로 Al_2O_3 소재를 선정하고 PEALD 증착 공정을 최적화하였다. Al_2O_3는 우수한 수분 및 산소 차단 성능을 갖고 있을 뿐만 아니라 저온에서 균일한 박막 형성이 가능한 물질로 알려져 있다. 또한 기계적 성능 및 높은 유전율($\kappa \approx 8$~10)을 갖고 있어 우수한 절연체로 전기적 안정성을 향상시킬 수 있다. Al_2O_3 박막 증착에 사용된 전구체는 TMA(Trimethylaluminum)를 사용하였으며, 150ºC 이하의 저온에서 플라즈마 파워, 전구체 주입 시간, 산소 가스 유량 등을 조절하여 균일한 박막 증착 공정을 최적화하였다. 최적화된 박막의 형상 및 두께를 확인하기 위해 SEM 분석을 실시하였으며, 수분 침투 실험(Water Vapor Transmission Rate, WVTR)을 통해 최적화된 박막이 보호층으로서의 기능을 수행함을 검증하였다. 마지막으로, OLED 소자에 최적화된 Al_2O_3 보호층을 증착하여 제조된 박막의 성능을 확인함으로써, PEALD를 이용해 증착된 Passivation Layer의 가능성과 향후 개선 방향을 설정할 수 있는 기초 연구로 활용하였다.

[P14-21]

Modulation of Metal-ligand Complex for Balancing Reactivity in Formation of Homogeneous InGaP Quantum Dots: Doheon Yoo (DGIST, Dongguk University), Jongmin Choi (DGIST), and Min-Jae Choi* (Dongguk University)

Keywords: Quantum dots, InGaP alloy, blue emission, cation reactivity, uniform distribution

Indium phosphide (InP) quantum dots (QDs) have attracted significant interest as next-generation light-emitting materials. However, the synthesis of blue-emitting InP-based QDs is lagging compared to well-established green- and red-emitting InP QDs. Herein, we present a strategy to synthesize blue-emitting QDs by forming a homogeneous InGaP alloy. The introduction of asymmetric In-carboxylate and Ga-carboxylate complexes resulted in a balanced synthetic reactivity between In-P and Ga-P, forming homogeneous InGaP alloyed QDs. The resultant In1-xGaxP alloyed QDs exhibited a broad range of photoluminescence (PL) tunability, spanning from 535 nm to 465 nm, depending on the In/Ga ratio used in the synthesis. Further reinforcing of the InGaP core with ZnS and ZnSeS shell, resulting InGaP core-shell QDs have shown the photoluminescence quantum yield of 42% at 475 nm of photoluminescence peak.

[P14-22]

PI 기판을 활용한 유연 IGZO 박막 트랜지스터(TFT) 제작에 관한 연구: 김시연, 김성종, 김재선, 이혁주, 강준호, 조인성, 박영민, 김병량, 이규홍, 홍영규* (한국전자기술연구원)

Keywords: 폴리이미드(PI) 필름, 인듐 갈륨 아연 산화물(IGZO), 산화물박막 트랜지스터(OTFT), 유연 전자소자

최신 기술의 발전으로 차세대 디스플레이가 빠르게 성장하면서, 유연 전자소자에 관한 연구 필요성이 커지고 있다. 이중 유연 소자 기판의 기계적 특성이 중요해지고 있으며, 높은 공정 온도 및 기판의 유연성 부족으로 기존 TFT는 한계가 있다. 이에 산화물 기반 TFT(OTFT)는 낮은 공정 온도와 우수한 유연성으로 플렉서블 및 웨어러블 디바이스에 적합한 기술로 주목받고 있다. 특히, IGZO는 우수한 균일성을 가지며, 비정질 실리콘(a-Si)보다 높은 전자 이동도를 제공하여 Oxide TFT의 핵심 소재로 활용되고 있다. 본 연구에서는 유연성과 내구성이 우수한 폴리이미드(PI) 필름을 기판으로 활용하여 인듐 갈륨 아연 산화물(IGZO) 기반 박막 트랜지스터(TFT)를 제작하고, 그 특성을 평가하였다. 소자 제작은 기존 글라스 기반 공정 장비를 활용하였으며, 글라스 기판 위에 PI 용액을 코팅하여 균일한 필름을 형성한 뒤, 최종 소자 제작 후 글라스에서 분리하였다. OTFT 소자는 스퍼터링 공정을 이용해 게이트, 소스, 드레인 전극 및 IGZO 활성층을 증착하였으며, 절연층으로는 플라즈마 화학 기상 증착법(PECVD)을 통해 SiO_2를 증착하였다. 제작된 TFT의 전기적 특성은 전류-전압(I-V) 측정을 통해 평가하였으며, 구조적 특성 분석에는 주사형 전자 현미경(SEM)과 원자힘 현미경(AFM)을 활용하였다. 연구 결과, PI 기판 위에 제작된 IGZO TFT는 우수한 전기적 특성을 보였으며, 특히, 높은 이동도와 10^8 이상의 온/오프 전류비를 나타냈다. 본 연구에서 제시한 IGZO TFT는 유연 디스플레이 및 웨어러블 전자기기 분야에서의 적용 가능성을 보여주며, 차세대 유연 전자소자 개발에 기여할 것으로 기대된다.

[P14-23]

Design and Optimization of Perovskite-Based Optical Lasers: Utilizing Amplified Spontaneous Emission and Distributed Feedback Structures: hyeonjung cho and changsoon cho* (Pohang University of Science and Technology)

Keywords: Perovskite, ASE, Laser, DFB

Perovskite-based lasers exhibit great potential with their low lasing threshold and wavelength tunability. This study investigates the enhanced optical properties of vacuum-deposited CsPbBr3 perovskite thin films, achieving a low threshold of 35 $\mu J/cm^2$. Utilizing distributed feedback (DFB) structures, we harness amplified spontaneous emission (ASE) for stable lasing. The transition from 1D to 2D DFB structures improves optical confinement and output power. Spatially resolved photoluminescence and k-space imaging reveal optical feedback mechanisms and loss pathways, highlighting the importance of optimized optical design for high-performance, scalable perovskite lasers.

[P14-24]

Precise Control of Ag_2Te Quantum Dot Synthesis via Alternative Tellurium Precursors for Enhanced Stability and Uniformity: Ga Yeon Kwon and Min-Jae Choi* (Dongguk Univ.)

Keywords: quantum dots, silver telluride, near-infrared, stability

Silver telluride (Ag_2Te) quantum dots (QDs) have gained attention as environmentally friendly semiconductors with tunable characteristics in the near-infrared II (NIR-II) region, making them suitable for various advanced applications such as photodetector, bio-imaging applications. However, conventional tellurium precursors, such as Te dissolved in trioctylphosphine (TOP), often exhibit high reactivity, leading to rapid monomer depletion and uncontrolled growth dynamics. This results in poor size uniformity, limited reproducibility, and instability in the synthesis process. In this study, we introduce tris(dimethylamino)phosphine ($(DMA)_3P$) as an alternative tellurium precursor to achieve greater control over the synthesis of Ag_2Te QDs. Compared to QDs synthesized with conventional precursors, which were dominated by Ostwald ripening and surface dissolution, QDs synthesized using $(DMA)_3P$-Te exhibited a more gradual and controlled tellurium release. This was attributed to the stronger P-Te bond and the electron-donating properties of the dimethylamino groups, which minimized excessive nucleation and facilitated a growth-driven reaction pathway. As a result, the synthesized QDs demonstrated improved size uniformity and enhanced structural stability. These findings emphasize the significance of precursor selection in achieving precise control over QD growth, highlighting the advantages of $(DMA)_3P$-Te as a superior alternative. This approach offers new possibilities for advancing Ag_2Te QD-based applications, including bio-imaging, photodetection, and sensing technologies.

[P14-25]

In-Situ Tailored Crystal Growth Termination for High-Efficiency and Stable Perovskite Nanocuboid LEDs: Joo Yoon Woo, Jeong Wook Jang, Min Gyo Kim, Jong Ho Park, Dae Hwan Kim, and Tae-Hee Han* (Hanyang Univ.)

Keywords: Perovskite, Light emitting diode, display

Metal halide perovskites (MHPs) have emerged as highly promising light-emitting materials due to their excellent color purity, tunable bandgap, and solution processability, making them attractive for cost-effective display applications.[1] However, conventional solution-processed polycrystalline perovskite thin films suffer from significant challenges, including numerous charged defects at grain boundaries and surfaces, which facilitate ion migration, leading to material and device degradation during operation.[2] In this work, we introduce a chemically engineered in-situ crystallization strategy that modifies the surface chemistry of MHPs and incorporates a lateral surface capping approach using a linear ionic homopolymer. This method effectively directs crystal growth termination, resulting in the formation of nanocuboid perovskite grains with well-terminated surfaces and low defect density. The tailored surface chemistry enhances photophysical properties and electrical homogeneity, leading to superior charge injection and transport characteristics while mitigating charge accumulation and subsequent degradation. By introducing this distinctive strategy, light-emitting diodes (LEDs) incorporating these well-terminated perovskite nanocuboid thin films exhibit outstanding optoelectronic performance, achieving high luminance (>150,000 cd m^{-2}), high efficiency at elevated luminance (>102.1 cd A^{-1} at 100,000 cd m^{-2}), minimal efficiency roll-off (0.58% reduction at 100,000 cd m^{-2}), and extended operational stability ($T_{95} \approx 243$ h).[3] This in-situ crystallization strategy successfully integrates the advantages of colloidal nanocrystals and polycrystalline thin films while eliminating the critical drawbacks of each approach, offering a novel pathway for the development of highly efficient and stable perovskite-based LEDs. References [1] T.-H. Han. et al. Nature Rev. Mater. 7, 757–777 (2022) [2] T.-H. Han. et al. Adv. Mat., 32, 1905674 (2020) [3] J. W. Jang. et al. ACS Energy Lett. 9, 12, 6029-6038 (2024)

[P14-26]

Controlling Interfacial Defect Emission in $AgInGaS_2/AgGaS_2$ Core/Shell Quantum Dots via Metal Halide Treatment: 이현준*, 박성경, 김병재, 정운호, 이강현, 임재훈* (성균관대학교)

Keywords: Quantum dots, Core/shell, AgInGaS, Low-temperature photoluminescence

Ensuring defect-free emission in colloidal quantum dots (QDs) is key to their light-emitting applications. The defect-free heteroepitaxy of shell materials on the QD cores has been successfully employed in various types of QDs, including those from the II-VI and III-V groups. However, in the synthesis of I-III-VI-based core/shell QDs, the involvement of trap states originating from multinary composition poses challenges in minimizing the low-energy tail in emission spectra. Herein, we control the interfacial defect emission of $AgInGaS_2$ (AIGS)/$AgGaS_2$ (AGS) core/shell QDs by treating various In and Ga halides. We observed that AIGS cores with an In-rich surface underwent intensive Ostwald ripening, leading to a decrease of Ga content. On the other hand, guided by the principles of hard and soft acids and bases (HSAB), GaI_3 treatment on AIGS cores establishes a thermodynamically robust surface, effectively suppressing Ostwald ripening and enabling uniform AGS shell growth. The resulting core/shell QDs exhibited enhanced the band-edge emission with a quantum yield of 85%, a emission linewidth of 30 nm, and suppressed trap-related emissions. The temperature-dependent band gap behavior of ripened QDs, which deviates from the Varshni equation, suggests an electronic structure in AIGS/AGS QDs governed by donor-acceptor pair states. At room temperature, the donor states are thermally mixed within the electron state, whereas they become distinguishable at a low temperature of 80 K. These states become the primary cause of low-energy tail emission in AIGS/AGS QDs, which can be suppressed by the interfacial GaI3 treatment.

[P14-27]

Polarity-driven Assembly for Multi-dimensional Quantum-Dot Nano-Architectures with Strong Optical Responses in Luminescence and Chirality: Geon Yeong Kim, Doohyoung Lee, and Yeon Sik Jung* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: Quantum dot, Photonic crystal, nanotrasfer printing, chirality

Three-dimensional (3D) optical nanostructures have attracted significant attention in photonics for their remarkable ability to control light's amplitude, phase, and polarization. However, fabricating complex 3D optical nanostructures using bottom-up approaches remains highly challenging due to intrinsic limitations in structural precision and controllability, despite their nanoscale accuracy and cost-effectiveness. In this work, we present the fabrication and optical properties of intricately engineered two-dimensional (2D) and 3D nanostructures composed of colloidal quantum dots (QDs), enabled by multi-dimensional nanotransfer printing. Our versatile fabrication platform, guided by tailored interface polarity, allows precise geometric control over a wide range of 1D, 2D, and 3D QD architectures, unlocking advanced and highly tunable optical functionalities. Notably, we demonstrate a 2D QD nanomesh with precisely defined subwavelength square perforations, designed via finite-difference time-domain simulations, leading photoluminescence enhancement through optimized optical resonance. Additionally, we construct a 3D QD chiral structure by asymmetrically stacking 1D QD layers, achieving an exceptionally high circular dichroism (CD) intensity. This work highlights the potential of nanotransfer-printed QD architectures in realizing next-generation nanophotonic devices with highly controllable optical responses.

[P14-28] Canceled

In-situ STEM-DPC biasing을 이용한 OLED 소자 내 전기장 분포 이미징: 윤진하, 이기용, 김종일 (한국에너지공과대학교), 신미향, 이용희, 한석규 (삼성디스플레이), 오상호* (한국에너지공과대학교)

Keywords: OLED, In-situ biasing, STEM-DPC, Electric field imaging

유기발광다이오드(Organic light emitting diode, OLED)는 고해상도, 유연성, 낮은 전력 소비 등의 장점으로 디스플레이 및 조명 기술에서 널리 활용되고 있다. 그러나 OLED 소자의 다층 유기 구조는 계면에서의 전기장 불균형과 전하 축적을 유발할 수 있으며, 이는 소자의 효율 및 안정성을 저하시킨다. 특히, 정공주입층 (Hole injection layer, HIL)의 도핑 농도는 전하 주입 효율에 영향을 미치며, 이는 소자의 내부 전기장 분포와 직결된다. 따라서, 소자 구동 중 Injection Layer 도핑 농도 차이가 전기장 형성 및 전하 이동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 HIL의 도핑 농도를 조절하여 홀 주입 효율을 변화시키고, 이에 따른 소자 내 전기장 분포 변화를 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 HIL 도핑 농도가 다른 3종의 OLED 시편을 제작하고, in-situ STEM(Scanning Transmission Electron Microscopy) 기반 DPC(Differential Phase Contrast) 기법을 활용하여 전기장 분포를 실시간으로 측정하였다. 전압을 단계적으로 인가하며 전자빔 편향을 관찰한 결과, EML(Emission Layer)에서 전기장이 가장 크게 형성되었으며, 이는 발광층에서 전하가 효과적으로 제한되도록 설계된 소자의 구조적 특성과 일치하는 결과를 보였다. 또한, HIL 도핑 농도가 부적절할 경우 소자 내부 전압이 상대적으로 낮게 형성되었으며, 이에 따라 전기장 크기가 감소하고 발광 효율이 저하로 이어질 수 있음을 밝혔다. 본 연구는 OLED 소자의 다층 유기 구조에서 구동 중 전기장을 실시간으로 정량 분석할 수 있는 고감도 이미징 방법론을 확립하였으며, 이를 통해 전기장 변화와 소자 성능의 상관관계를 규명하는 데 기여할 수 있다. 나아가, 본 기법은 유사한 다층 유기·나노소자에도 적용 가능하여 소자의 신뢰성 평가 및 공정 최적화에 중요한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

P15 : 상변태
Room 3층 로비, 4월 24일

[P15-1]
SCM435강의 템퍼링 온도/시간에 따른 기계적 특성 분석: 김선진, 박지니, 오정석 (국립한밭대학교), 최정묵 ((주)진합), 박준식* (국립한밭대학교)
Keywords: 고강도 볼트, 템퍼링, 미세구조, 열처리, 기계적 득성

최근 저탄소 정책의 시행과 함께 친환경 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 경량화를 위해 경소재인 알루미늄(Al)과 티타늄(Ti)과 같은 소재가 주로 사용되지만, 이종 소재를 사용한 용접 결합의 경우 결합부의 부식 등의 문제로 인해 기계적 결합이 선호되고 있다. 이에 따라 고강도, 고경도화 및 경량화 등의 볼트 소재 연구가 필요하다. SCM435 소재는 크롬과 몰리브덴을 포함한 강으로 높은 강도와 경도, 우수한 내마모성과 피로강도를 가지고 있어 기계, 자동차등 다양한 산업 분야에서 볼트 소재로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 볼트용 철강소재의 열처리 후 템퍼링 온도 및 시간에 따른 미세구조의 변화와 기계적 특성을 분석하고자 하였다. 실험은 SCM435철강 환봉 시편을 절단 후, 다양한 온도 범위(200~600ºC)에서 시간(0.5, 1, 2h)에 따른 열처리를 진행 후 미세구조를 관찰하였다. 이를 통해 템퍼링 온도/시간에 따른 미세구조의 변화를 관찰하였으며, 구조적 변화에 따른 기계적 성질의 변화를 분석하고자 하였다.

[P15-2]
Silicide 코팅된 Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금의 산화 거동 및 Silicide 수명에 대한 고찰: 오정석, 박지니, 김선진, 박준식* (국립한밭대학교)
Keywords: 확산 코팅, Nb 합금, 산화 거동, 내산화성, silicate

본 연구에서는 Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금에 Si 팩 세멘테이션 코팅을 적용하여 산화 저항성 개선 효과를 비교하며 실리사이드 소모 속도를 분석하여 산화 저항 코팅의 수명을 확인하였다. As-cast 합금, silicide 코팅된 합금은 1500ºC에서 최대 20 h 시간 동안 산화 시험을 진행하였다. As-cast 합금은 모두 산화 되었으며 기존의 특성을 유지하지 못했다. 하지만 silicide 코팅된 합금은 20 시간의 산화 시험 후에도 기존의 특징을 유지하였으며 우수한 산화 저항 특성이 확인되었다. Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금에 Silicide 코팅이 적용될 경우 합금 원소로 이루어진 silicide가 형성되어 내산화성이 개선되었다. 또한 실리사이드 코팅층은 1500 h에서 약 23 h 후에 모두 소모되며, 이는 실리사이드 코팅층의 두께에 따라서 Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금의 고온 수명을 예측할 수 있다. 따라서 Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금에 silicide 코팅 시 합금의 내산화성이 개선되며 산화를 방지하고 코팅층이 안정적으로 유지되었으며 실리사이드 코팅층의 수명을 예측할 수 있다. 이를 통해 Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금의 고온 재료의 사용 가능성에 대해 확인하였다.

[P15-3]
VC기반 분말야금 공구강의 상 형성 거동에 미치는 V 함량의 영향: 박성민 (한국생산기술연구원, 고려대학교), 김대하 (포항금속소재산업진흥원), 임현태 (한국생산기술연구원), 고원석 (인하대학교), 박광석, 서보성, 박창수 (한국생산기술연구원), 김동회* (고려대학교), 박형기* (한국생산기술연구원)
Keywords: CPM-9V, 상형성거동, 공구강, 분말야금, 상변태

공구강은 가공용 공구로 사용되는 철강소재로 분류방법에 따라 탄소강, 합금강, 냉간공구강, 열간공구강, 고속도강 등을 총칭하는 말이다. 이러한 공구강은 일반적으로 열처리에 의한 변형과 열피로에 의한 균열 저항성이 우수해야 하며, 경도, 인성, 내마모성과 같은 특성이 요구된다. 특히, HSS는 주조와 단조공정을 거쳐 제작되며 이때 탄화물의 편석이 발생한다. 또한, 탄화물의 형상 및 분포를 제어하기 위한 열처리 및 가공 공정이 요구된다. 하지만, 분말야금기반 공구강에서는 분말 제조 시 분사가스에 의한 매우 빠른 냉각속도로 인해 탄화물의 편석이 제한되며, 분말내부에 미세한 탄화물을 고르게 형성시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 V함량을 제어한 분말야금 공구강을 제작하여 V함량이 공구강의 상 형성 거동 및 물성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 분말야금 공구강에 사용된 분말은 V함량이 9.04 wt%와 11.45 wt%로 제작하였으며, canning-HIP공정을 거쳐 벌크 시료로 제작하여 quenching-tempering (QT) 열처리를 진행하였다. 제작된 벌크 시료의 상 형성 거동을 분석하기 위해 Thermo-calc software를 이용한 열역학적 계산과 고온 in-situ XRD 분석을 진행하였다. 또한, V함량에 따라 기지에 잔류하는 C함량 도출하여 물성간의 상관관계를 조사하였다.

[P15-4]
Laser reflow 및 Mass reflow 공정을 이용한 SAC305 접합부의 특성 분석: 장준호, 강승연, 조정원, 황진하*, 류채우* (홍익대학교)
Keywords: Laser reflow, Mass reflow, intermetallic compound, shear strength

솔더링 공정은 두 모재 사이에 솔더를 용융시켜 확산 현상을 유도함으로써 전기적 및 기계적 접합을 형성하는 과정이다. 기존의 와이어 본딩 방식에 비해 솔더링 공정은 접합부의 크기가 작고 신호 이동 경로가 짧아, 고속 입출력(I/O)이 요구되는 전자 산업에서 널리 활용되고 있다. 특히, 최근 인공지능(AI)의 발전에 따라 Multi-stack chip과 같은 고밀도 패키징 기술이 주목받으며, 이에 적합한 신뢰성 높은 솔더 접합부의 필요성이 증가하고 있다. 기존의 Mass reflow 방식은 긴 열처리 시간이 요구되며, 이로 인해 열화가 발생하여 접합부의 신뢰성이 저하될 가능성이 있다. 이에 대한 대안으로 짧은 공정 시간과 국부적인 열처리가 가능한 Laser reflow 방식이 주목받고 있다. 본 연구에서는 Sn-3.0Ag-0.5Cu(SAC305) 솔더볼을 사용하여 Mass reflow 및 Laser reflow 공정을 수행하고, 접합부의 미세구조 및 기계적 특성을 비교 분석하였다. 공정 후 이미지 관측을 통해 금속간 화합물(Intermetallic compound, IMC)의 두께 변화를 정량적으로 평가하였다. 또한, 전단 강도 시험을 통해 접합부의 기계적 신뢰성을 검토하고, pad-lift 현상을 분석하여 기판 손상 빈도를 평가하였다. 본 연구를 통해 다양한 공정 조건에서 SAC305 솔더 접합부의 특성을 분석하고, 최

적의 Laser reflow 공정 조건을 도출하고자 하였으며 이를 통해 Mass reflow 방식과의 비교 분석을 통해 전자 산업에서의 적용 가능성을 고찰하였다.

[P15-5]

배기밸브 스핀들용 고강도-고연신 NiCrAl 합금 설계: 윤성민, 김가영, 유채은, 이제인* (부산대학교)

Keywords: Exhaust valve spindle, Lamellar structure, ThermoCalc, Corrosion resistance

배기밸브 스핀들은 엔진의 연소 과정에서 발생하는 배기가스를 외부로 배출시키는 부품으로, 연소실과 맞닿아 있기 때문에 고온의 배기가스에 직접적으로 노출된다. 기존에는 내열성 및 내식성이 우수하다고 알려진 Nimonic 80A, Inconel 합금 등을 사용하고 있지만, 배기가스에 존재하는 황화물과 바나듐 산화물에 의해 스핀들이 부식되고 표면이 깨지는 현상까지 보고됨에 따라 기존보다 우수한 내식성을 갖는 소재 개발이 필요하다. 최근 일본에서 개발한 NiCrAl 계 합금 (DSA 760)은 라멜라 구조를 형성하여 높은 기계적 특성과 내식성을 갖고 있어 스핀들용 부품으로 활용되지만, 이를 독점하고 있어 국산화가 반드시 필요한 상황이다. 본 연구에서는 국산화를 위해 ThermoCalc를 활용하여 새로운 합금 원소를 선정하고, 기존 합금 조성에서 새로운 합금 원소를 첨가했을 때의 미세조직을 비교하였고, 새로운 합금을 제시하고자 하였다. 열역학 계산 결과, Ti, Nb, V, Ta, W, Mo가 선정되었고, 열처리는 기존과 동일하게 진행하였다. 0.5 wt%의 합금원소를 추가하였을 때, Ti을 첨가한 합금을 제외하고 모두 기존 합금과 유사한 라멜라 구조를 형성하였으며, 경도값 역시 유사하였다. 추후 연구에서는 기계적 특성과 내식성 평가를 함께 진행하여 소재 국산화에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

[P15-6]

열처리 조건에 따른 Fe-Ni/Fe-Ni-3.2Mn 바이메탈 소재의 확산 거동 및 미세조직: 노주림, 송유진 (국립공주대학교), 한준희, 전재열 (한국생산기술연구원), 김대근 (고등기술연구원), 이진규* (국립공주대학교)

Keywords: Fe-Ni계, Fe-Ni-Mn계, 바이메탈, 고상확산접합, 압연

바이메탈(bimetal)은 열팽창계수가 다른 두 금속을 압연 및 접합을 통해 제조한 소재로, 온도가 상승하면 열팽창계수가 큰 금속이 더 많이 팽창해 반대편으로 휘어지고, 온도가 감소하면 원래 상태로 되돌아오는 특성을 가진다. 이러한 특성 덕분에 바이메탈은 온도 조절기, 차단기, 전자 개폐기 등 다양한 조절 장치에 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 Fe-Ni/Fe-Ni-3.2Mn 바이메탈 소재를 압연 및 접합하여 제조하고, 열처리에 따른 확산 거동 및 미세조직 변화를 고찰하였다. Mn 함유량에 따른 바이메탈의 특정 굴곡값(specific deflection)을 확인하고, 목표 굴곡값에 근접하는 조성으로 설계된 고열팽창(HES) Fe-Ni-3.2Mn 합금과 저열팽창(LES) Invar(Fe-42Ni) 합금을 압연 후 고상 확산 접합(solid-state diffusion bonding) 방법으로 바이메탈 소재를 제조하였다. 압연 공정으로 제조된 바이메탈 합금은 700ºC, 800ºC에서 30분간 확산 열처리를 실시하여 접합 계면의 확산 거동을 조사하고, 열처리 온도 및 시간에 따른 계면 확산 거동과 미세조직 변화를 분석하였다. 제조된 바이메탈 합금의 접합 계면 미세조직과 상 분석을 위해 주사전자현미경(SEM), 에너지분산 X선 분광법(EDS), X선 회절분석(XRD), 후방산란전자회절분석(EBSD)을 사용하였으며, 접합 계면의 기계적 특성은 마이크로 비커스 경도기를 통해 측정하였다. 또한 EBSD 분석을 통해 IPF(Inverse Pole Figure) map, IQ(Image Quality) map, GB(Grain Boundary) map, KAM(Kernel Average Misorientation) map, GOS(Grain Orientation Spread) map 등을 이용하여 열처리 조건에 따른 결정립 크기, 재결정화, 전위 밀도의 변화를 고찰하였다.

[P15-7]

과포화고용체상 유도 기반 Cu-Ge 컬러합금의 색상범위 확대 및 기계적 물성 향상에 대한 연구: 손정호, 심아진, 정의감, 강결찬, 박혜진, 홍성환 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범* (세종대학교)

Keywords: 컬러 합금, CIE L*a*b* 색 공간, 과포화고용체, 상변태

Cu-계 전이에너지 제어형 컬러 합금은 구리에 특정 원소를 첨가하여 전이에너지를 조절함으로써 색상을 조정할 수 있는 합금이다. 그러나 이러한 합금은 고용 한계로 인해 색상 구현 범위가 제한되며, 강도가 비교적 낮다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 다상의 Cu-Ge 합금을 과포화 고용체로 상변태시켜 고용강화를 유도함으로써 기계적 물성을 개선하고, 색상 구현 범위를 확장하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 Ge 함량이 7, 9, 10 at.%인 다상 합금을 열처리 및 급냉 공정을 통해 상변태시켜 과포화 고용체 컬러 합금을 제조하였다. 또한, 열처리 시간에 따른 상변화를 조절하여 미세조직을 변화시키고, 이를 통해 합금의 기계적 물성과 광학적 특성을 제어하였다. 시편은 Induction melting 주조법을 이용하여 가로 12mm, 세로 6mm, 높이 50mm의 판형으로 제작되었다. 각 시편은 박스 전기로(GAS 주입용 Muffle Box Furnace: Pyrotech)를 사용하여 700ºC에서 30분, 60분, 180분 동안 열처리한 후, 약 2ºC의 얼음물에서 담금질하였다. 제조된 샘플의 상과 미세조직 분석을 위해 X-선 회절 분석(XRD: Panalytical) 및 주사 전자 현미경(SEM: JEOL JSM-6390) 분석을 진행하였으며, 기계적 물성을 평가하기 위해 비커스 경도 시험(Micro-indenter: SHIMADZU HMV-G21DT)을 수행하여 경도 변화를 측정하였다. 또한, 합금의 광학적 특성은 분광 측색계(Photon-spectrometer: SCINCO, Colormate)를 이용하여 분석하였다.

[P15-8]

Cu-Ni-Cr 컬러합금의 변형량 제어를 통한 미세조직 변화 및 기계적광?학적 특성 연구: 장성문, 정의감, 조가은, 강결찬, 박혜진, 홍성환 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범* (세종대학교)

Keywords: 컬러 합금, CIE L*a*b* 색 공간, 소성변형

기존의 동합금 연구는 전이에너지 제어 메커니즘을 사용하여 색상제어가 가능하다는 장점이 있지만, 강도가 약해 활용도가 떨어진

다는 단점이 존재한다. 따라서 이번 연구에서는 컬러합금에 소성변형을 적용하여 개선되는 특성을 확인하고자 하였다. 금속재료에 소성변형을 적용할 경우 전위밀도 증가에 따른 강도 향상이 나타난다. 또한 미세조직 변화를 야기하여 금속의 색상에 영향을 줄 것으로 사료된다. 실험은 변형량 차이에 따른 특성변화를 확인하기 위해 소성변형 공정인 압연공정과, 극심한 소성변형 공정인 고압비틀림공정을 사용했다. 고압비틀림공정은 회전응력과 동시에 압축응력을 부여하여 압연보다 더 많은 소성변형을 가하기 때문에 평범한 압연과는 다른 미세조직을 보일 것으로 예상된다. 회전력에서 오는 변형 특성상 Center 부분과 Edge 부분을 나누어 비교하면, 같은 힘을 주었을 경우 Edge 부분이 더 많이 변형되고 Center 부분은 상대적으로 덜 변형이 일어날 것이다. 이와 같은 특성을 고려하여 변형량 차이에 따른 물성변화를 확인하고자 하였다. 자세한 실험 내용은 다음과 같다. 분석에 사용된 시편의 조성은 $(Cu_{85}Ni_{15})_{95}Cr_5$ 이며, 가로 12 mm, 세로 6 mm, 높이 50 mm의 판형으로 Induction melting 주조법을 사용하여 제조되었다. 주조된 시편은 GAS 주입용 Tube Furnace (Pyrotech)를 사용하여 900ºC에서 24시간 동안 등온 열처리된 후 즉시 약 2ºC의 얼음물에 급랭되었다. 이후 압연공정과 고압뒤틀림공정 처리 후 열처리 한 샘플과 비교하였다. 압연을 진행한 샘플은 압하율 75% 까지 압연을 진행한 후 분석을 진행하였다. HPT 처리한 샘플은 총 5번, 0.2 rpm의 화전속도를 가지고 회전하였고, 3Gpa의 압축응력을 가하여 최종두께 0.4~0.5 mm 가 되도록 샘플을 제작하였다. 열처리만 진행한 샘플과 압연공정, HPT공정, 압연+HPT공정을 적용한 샘플 총 4개의 샘플을 제작하였으며, HPT는 공정특성상 Edge 와 Center의 소성변형량이 다르기 때문에 나누어 분석을 진행하였다. 각 합금들의 상 및 미세조직을 분석하기 위해 각각 X-선 회절분석기 (XRD: Panalytial)와 주사 전자 현미경(SEM: JEOL JSM-6390)을 사용하였으며, 비커스 경도 시험(Micro-indenter: SHIMADZU HMV-G21DT)을 통해 기계적 물성을 측정하였다. 또한, 분광 측색계(Photon-spectrometer: SCINCO, Colormate)를 사용하여 합금의 광학적 특성을 분석하였다.

[P15-9]

Influence of V on the Microstructure and Mechanical Characteristics of $(CrFeNiCu)_{100-x}V_x$ High Entropy Alloys: Dilshodbek Yusupov*, Abbas Muhammad Aoun, Gyeol Chan Kang, Dong Sung Hong, Hae Jin Park, Sung Hwan Hong, and Ki Buem Kim* (Sejong University)

Keywords: High-entropy alloy, Mechanical behaviour, Microstructure, Thermo-physical parameter

In this study, the $(CrFeNiCu)_{100-x}V_x$ (x = 0 - 20 at.%) high entropy alloys have been designed via the consideration of the thermo-physical relationship between minor V and other major elements to investigate the effect of V content on the microstructure and mechanical behaviour of $(CrFeNiCu)_{100-x}V_x$ HEAs. The phase formation from dual phase FCC phases to the mixture of FCC1, FCC2 and BCC phases has been observed. The yield strength of the $(CrFeNiCu)_{100-x}V_x$ HEAs is enhanced from 291 to 1717.47 MPa, which is associated with the volume fraction of the BCC phase strongly. On the one hand, the plasticity of the alloys reduced from 45 to 10.65%, however, it could be considered a reasonable plasticity. These results show that adding a minor alloying element in high entropy alloys with consideration of thermo-physical parameters leads to forming a multiple solid solution structure with considerable excellent mechanical properties. Moreover, Thermo-physical parameters, such as the mixing entropy (ΔS_{mix}), the mixing enthalpy (ΔH_{mix}), atomic size difference (δ%), and the valence electron concentrations (VEC) were calculated to understand the microstructural variation. Meanwhile, the thermo-physical parameters were used to explain the formation of mixture BCC and FCC phases in the HEAs and discussed the relationship with mechanical parameters.

[P15-10]

수소 배관용 심리스강관의 Mn/C 함량에 따른 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향: 임성진, 이강진, 박상민, 송기안* (공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

Keywords: Hydrogen Pipeline, Hydrogen Embrittlement Resistance, Microstructure, Mechanical properties, Heat treatment

지구 온난화와 환경 오염 문제로 인한 탄소중립 및 온실가스 감축 목표 달성을 위해 대체 에너지원으로 수소가 주목받고 있다. 현재 수소는 압축 기체 상태로 파이프라인을 통해 운송되고 있으며, 수소 운송을 위한 강관은 고압 수소 환경에서 견딜 수 있는 내수소취성이 우수한 고강도 페라이트계 강재가 사용되고 있다. 수소 강관에는 주로 탄소와 망간을 주요 합금 원소로 포함하는데, 탄소는 강도를 증가시키지만 과도한 함량은 시멘타이트 형성을 유도하고 수소취성을 증가시킬 수 있고, 망간은 강의 강도를 향상시키고 결정립을 미세화하는 역할을 하지만, 과도한 함량은 편석이 발생되어 수소 취성을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 탄소와 망간의 함량을 조절한 심리스 강관을 제작하여 열처리에 따른 미세조직의 분석과 기계적 물성에 대하여 평가하고자 한다. 구체적으로, C, Mn 함량을 조절한 심리스 강관에서 퀜칭 및 템퍼링의 열처리를 진행하였으며, 주사전자현미경(SEM), X-선 회절 분석기(XRD), 후방산란전자 회절 패턴 분석기(EBSD)를 통해 열처리에 따른 합금의 미세조직을 분석하였으며, 경도 시험, 샤르피 충격 시험을 통해 합금의 기계적 물성을 평가하고자 한다. This work was supported by Korea Planning & Evaluation of Industrial Technology (KEIT) funded by Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE, Korea) (RS-2024-00444672). This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009). This work was supported by Korea Institution of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) funded by Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE, korea) (NO.20215810100090).

[P15-11]

DC 마그네트론 스퍼터링용 고엔트로피 합금 타겟의 미세구조 및 특성 분석: 현명우, 이유진, 서진오, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범* (세종대학교)

Keywords: 스퍼터링 공정, 고엔트로피 합금, 분말 제조방식, 타겟 물성, 미세 구조

고엔트로피 합금(High Entropy Alloy, HEA)은 여러 원소를 균등한 조성비로 혼합하여 BCC나 FCC 등의 단일상 구조를 형성하는 합금으로, 높은 강도, 내식성 및 열적 안정성과 같은 우수한 물성을 나타낸다. 하지만, 고엔트로피 합금 자체는 제조 비용이 높고 가공성이 제한적이기 때문에, 이를 보다 효율적으로 활용할 수 있는 고엔트로피 합금 코팅(HEA Coating) 기술이 주목받고 있다. 고엔트로피 합금 코팅은 기존 고엔트로피 합금 소재에 비해 소재 사용량을 절감하면서도 특정 기계적 물성을 최적화할 수 있어 항공우주, 절삭 공구 등 다양한 산업 분야에서 활용 가능성이 높다. DC 마그네트론 스퍼터링을 이용한 코팅 증착에서는 타겟의 특성이 코팅층의 결정 구조, 기계적 물성 및 화학적 조성에 직접적인 영향을 미친다. 특히, 타겟의 원소 균일성, 상 분포 및 미세구조는 코팅층의 물성을 결정짓는 핵심 요소이므로, 코팅을 증착하기 전에 타겟의 특성을 정밀하게 분석하는 것이 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 고엔트로피 합금 타겟의 미세구조 및 물성이 분말 제조 방식에 따라 어떻게 달라지는지를 분석하고자 한다. 본 연구에서는 고엔트로피 합금 타겟의 조성 균일도, 밀도, 미세조직, 상, 기계적 물성 등의 특성을 분석하기 위해 두 가지 방식으로 제조된 고엔트로피 합금 타겟을 비교 분석하였다. 첫 번째 방식은 각각의 원소 분말을 혼합하여 소결한 Mixed-powder 방식, 두번째 방식은 주조한 합금을 분말화한 후 혼합한 Alloy-powder 방식이다. 타겟의 특성 평가를 위해 다음과 같은 분석 기법을 활용하였다. X선 회절 분석기(XRD, X-ray diffractiometer)을 이용하여 결정 구조를 분석하였으며, 전계 방출 주사 전자 현미경(FE-SEM, Field Emission Scanning Electron Microscopy)을 이용해 미세구조를 관찰하였다. 또한, 에너지 분산형 X선 분광법(EDX, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)을 통해 원소 조성과 균일성을 평가하였으며 비커스 경도 시험(Micro-indenter: SHIMADZU HMV-G21DT)을 통해 기계적 물성을 측정하였다.

[P15-12]

Development of Bulk Metallic Glass for Thermal Neutron Shielding with High B and Gd Content: Seonghoon Yi* and Hyeseong Choi (Kyungpook National University)

Keywords: Bulk metallic glass, Amorphous, Thermal neutron shielding, High B and Gd content

Neutron shielding plays a crucial role in radiation protection, particularly in the nuclear industry and radiation-related research. This study aims to develop bulk metallic glasses (BMGs) containing high concentrations of B and Gd, exploring their potential to improve thermal neutron shielding performance. Amorphous alloys, in contrast to crystalline alloys, provide superior shielding effectiveness due to their non-crystalline structure, and are expected to exhibit enhanced mechanical properties and durability. This research is expected to make significant contributions to radiation shielding and related technologies in the nuclear field.

[P15-13]

Electrochemical Properties of Fe-Based Amorphous Ribbons: Moosung Kim (Kyungpook National University), Sangeon Jun (Seoul National University), Juneyoung Lee, Sejin Jang, Seonghoon Yi* (Kyungpook National University), and Howon Jang* (Seoul National University)

Keywords: Amorphous, catalysts, Active sites, HER

Water electrolysis has gained significant attention as a sustainable method for green hydrogen production. Currently, platinum (Pt) is widely used as an electrocatalyst; however, its high cost and scarcity present major challenges for large-scale applications. To address this issue, we fabricated Fe-based amorphous ribbons and investigated their electrochemical properties. Our results show that compositional modifications improve electrochemical performance by increasing the number of active sites. This suggests that Fe-based amorphous alloys have the potential to serve as cost-effective alternatives to Pt-based catalysts. The fabrication process involved designing alloy compositions based on glass-forming ability (GFA), electrochemical properties, and mechanical durability. The alloys were synthesized using arc melting, followed by rapid quenching via the melt-spinning process to obtain amorphous ribbons. The structural and thermal properties of the ribbons were analyzed using X-ray diffraction (XRD) and simultaneous differential thermal analysis. Furthermore, we analyzed the electrochemical properties of the ribbons in both the hydrogen evolution reaction (HER) and oxygen evolution reaction (OER), investigating the effect of composition on catalytic activity and stability.

[P15-14]

Al 첨가에 따른 Cu-Al 합금의 광학적 특성 및 기계적 물성 변화 연구: 조창희*, 조가은, 박혜진 (세종대학교), Jürgen Eckert (Austrian Academy of Sciences & Montanuniversität Leoben), 김기범 (세종대학교)

Keywords: 고용강화, 광학적 특성, 기계적 물성

최근 금속 소재의 심미적 기능에 대한 요구가 증가함에 따라 사용되는 질화 코팅 및 아노다이징과 같은 표면처리 기법은 표면에 비균질한 색상 표현 및 기계적 물성을 저하시킬 수 있다는 단점을 가지고 있다. 선행 연구에 따르면 Cu-계 합금의 전이에너지를 조절함으로써 합금의 광학적 특성의 변화가 일어나며 고용강화로 인한 기계적 물성이 향상됨을 알 수 있다. 허나 선행 연구 컬러합금의 경우 첨가 원소의 낮은 고용한계로 인하여 색상 변화가 한정적이라는 한계점을 가지고 있었다. 이를 위해 본 연구에서는 Cu에 대한 높은 고용한도를 가지는(최대 약 18 at.% at 300ºC) Al을 첨가원소로 정하여 합금 설계를 진행하였다. 설계합금의 경우 FCC 단일상을 유지할 수 있어 가공성 확보에 유리하며 Al 첨가는 Cu의 d-밴드 전자구조에 영향을 미쳐 전이에너지를 조절함으로써 색상 범위를 확대할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 따라 Cu-Al 합금을 설계하고, Al 함량 변화에 따른 기계적 물성과 광학적 특성 분석을 진행하였다. Cu-Al 2원계 상태도를 기반으로, FCC 단일상이 유지되는 조성 범위에서 $Cu_{(100-x)}Al_x$ (x = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15) 합금을 유도 용해 주조법을 사용하여 Bulk 샘플을 제조하였다. 제조된 시편은 X-선 회절 분석기(XRD, Panalytical)를 활용

하여 상(phase) 동정 및 격자 변화를 분석하였으며, 주사전자현미경(SEM, JEOL JSM-6390)을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 기계적 물성은 마이크로 인덴터(SHIMADZU HMV-G21DT)를 이용한 비커스 경도 시험을 통해 평가하였고, 광학적 특성은 분광 측색계(SCINCO Colormate)를 활용하여 CIE Lab* 색 좌표 변화를 측정함으로써 분석하였다.

[P15-15]

Advancing Sharpness with Metallic Glass Blades: Sejin Jang, Moosung Kim, Juneyoung Lee, and Seonghoon Yi* (Kyungpook National University)

Keywords: Amorphous, Surgical knives, sharpness

In the field of medical instruments, the development of sharper and more durable blades has been a continuous research focus. In this study, we aimed to enhance the sharpness and mechanical properties of surgical blades using amorphous alloys. Currently, surgical scalpels are made of crystalline stainless steel, which results in a rough edge surface. However, the surface roughness of the blade is closely related to the size of surgical scars, making its improvement a critical issue. Amorphous alloys do not contain grain boundaries or dislocations, allowing for higher sharpness compared to crystalline alloys. Additionally, their high hardness and corrosion resistance further enhance their value as surgical blade materials. In this study, a specialized alloy was produced through arc melting and subsequently transformed into amorphous alloy rods using the suction casting method. These plates were then precisely processed to create ultra-sharp cutting edges. The blades underwent a meticulous grinding and polishing process, involving sequential grinding and honing to refine the surface. Optical microscopy (OM) was used continuously to ensure the complete removal of surface scratches. The formation of the amorphous structure was confirmed through X-ray diffraction (XRD) analysis, while sharpness and mechanical properties were evaluated using scanning electron microscopy (SEM). Furthermore, results from the actual cutting test demonstrated that amorphous alloy blades exhibited superior performance compared to conventional stainless-steel blades. Our findings indicate that amorphous alloy blades possess significantly enhanced sharpness, suggesting their potential to greatly improve the performance of surgical scalpels.

[P15-16]

열처리를 통한 Zr계 비정질 합금의 구조 튜닝과 그에 따른 기계적 반응: 이명준, 유근희 (서울대학교), 류욱하 (국립금오공과대학교), Shuang Su (Harbin Institute of Technology), 박은수* (서울대학교)

Keywords: 비정질 합금, 가상온도, 나노인덴테이션

비정질 합금은 최초로 발견이 보고된 이후로 높은 강도, 파괴 인성과 부식 저항성과 같은 매력적인 특성으로 인해 많은 주목을 받았다. 비정질 합금의 그러한 물성은 그 구조와 밀접한 연관성을 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, 물성의 튜닝은 주로 유리전이 온도 이하에서 열처리를 진행하여 free volume 함량이 감소하는 구조 완화(structural relaxation)을 일으키거나, 극심한 변형을 주거나 이온 조사를 통해 free volume 함량이 증가하는 rejuvenation을 일으키는 것으로 진행되어 왔다. 하지만 그러한 방법은 특정한 물성을 타겟팅 하여 구조 및 물성을 튜닝하는 것이 어렵다는 단점이 있었는데, 최근 특정 온도에서 구조 완화 시간 이상으로 열처리를 진행하는 것으로 해당 온도에서의 과냉각 액상의 구조를 가지게 만들어, 비정질 합금의 기계적 특성을 튜닝할 수 있다는 연구 결과들이 보고되었다. 그러한 선행 연구들을 기반으로 하여, 우리는 조성은 같으나 다른 초기 구조를 가지고 있는 Zr계 비정질 합금을 대상으로 구조 완화 시간 이상으로 열처리를 진행하는 공정이 해당 비정질 합금들에 어떻게 영향을 미치는지 확인하고자 한다. 우리는 서로 다른 냉각 속도에서 제작된 Zr계 비정질 합금을 동일한 온도에서 열처리를 하거나 하나의 냉각 속도로 제작된 비정질 합금을 서로 다른 온도에서 열처리를 진행한 뒤, 나노인덴테이션 실험을 통해 변형 거동을 확인하여 열처리 공정에 따라 비정질 합금의 기계적 반응이 어떻게 달라지는지를 확인하였다. 이러한 연구 결과가 비정질 합금의 post-processing 방식에 대한 새로운 insight를 제공할 것으로 기대한다.

[P15-17]

Analysis of Self-Healing Behavior in Co-Based Superalloys by Spontaneous Segregation of B and Y During In-Situ Tensile Test at Elevated Temperature: 민현기 (서울대학교), 윤국노 (University of California Berkeley), 박은수* (서울대학교)

Keywords: superalloy, self-healing, high temperature materials

고온용 구조 소재는 고효율 발전 등을 위한 가스 터빈 및 우주 산업 등에 널리 사용되는 미래 산업의 핵심 소재이다. 하지만 이와 같은 금속 소재, 특히 독특한 미세구조를 가져 고온 물성이 우수한 초합금(superalloy)의 작동 온도는 거의 한계에 달했으며, 이를 해결하기 위한 새로운 패러다임의 필요성이 강조되고 있다. 이에 본 연구에서는 금속 분야에서는 생소한 자가치유의 개념을 코발트기 초합금계 내부에 도입하였다. 부연하면, 고온 환경에서 과고용된 치유 원소가 결함부로 자발적으로 편석되어 결함부를 강화하고 메꾸는 자가치유 기작의 발현을 통하여, 금속 재료가 결함에 능동적으로 감응해 결함을 자가 치유하게 함으로써 합금의 작동 온도와 사용 수명을 비약적으로 증가시키고자 하였다. 특히 이러한 자발적 자가 치유 기작을 위하여, 다양한 변수를 고려하여 치유 물질을 결정하였다. 이를 위해 Co 합금 내에서 결함부와의 결합 에너지, 상호 확산 계수 및 결함 강화 에너지를 계산하여 자가 치유를 위한 후보 물질을 결정하였다. 이후, 자가치유 기작의 면밀한 분석을 위하여 자가치유 기작을 결함부 강화 및 파괴 지연 기작, 결함부로의 석출을 통한 결함 차폐 기작, 계면 안정화와 그에 따른 기존 특성 회복 기작으로 나누어 설명하고, 각 기작이 재료의 물성 회복에 어떠한 영향을 끼치는지를 정량적으로 분석하고자 하였다. 이러한 물성의 회복을 면밀히 분석하기 위하여, 본 연구에서는 개발한 소재에 의도적으로 균열을 형성하고 이를 SEM 내부에서 실시간으로 관찰하였다. 부연하면, 고온으로 가열된 소재의 균열 선단을 실시간 EDS와 EBSD 분석을 통해 과고용된 치유 원소가 결합부로 편석되어 결함부위를 강화하고, 결함부에서 석출되어 결함을 닫

는 자가 치유 기작을 확인하였다. 또한, 재료의 실제 사용 환경을 모사한 유사 크리프 시험을 통하여 재료의 물성 회복을 검증하였다. 그 결과 치유 원소의 첨가를 통해 재료가 외부 응력에 감응하여 파괴를 지연시키고 결함을 차폐하는 자가 치유 기작이 실제 사용 환경 내부에서 효과적으로 발현되었음을 확인하였다. 이와 같은 연구 결과는 기존의 금속에서는 구현하기 어려웠던 자가 치유 기작의 초기적 연구로써, 다양한 소재 분야에 적용 가능하다는 점에서 큰 의의가 있다.

[P15-18]

AB_2계 수소저장합금의 라베스상 형성 거동 연구: 이소영 (서울대학교 재료공학부), 박형기 (한국생산기술연구원), 박은수* (서울대학교 재료공학부)

Keywords: 수소저장합금, 라베스 상, 미세구조, 상 변태, 합금 설계

AB_2계 수소저장합금은 높은 수소 저장 용량과 우수한 열역학적 특성으로 인해 차세대 에너지 저장 소재로 주목받고 있다. 수소저장합금은 상용화를 위해 평탄압을 유지하는 것이 중요하다. 합금이 다상 구조를 갖게 되면 상 간의 수소 용해도 차이로 인해 평탑압 구간이 일정하지 않으므로, 단상으로의 제어가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 AB_2계 합금에서 라베스상(Laves phase)의 형성 거동을 규명하고, 이에 따른 미세구조 및 상 변화를 분석하였다. 합금 조성과 열처리 조건에 따른 상 안정성 및 결정구조 변화를 주사전자현미경(SEM)과 X선 회절(XRD) 분석을 통해 확인하였으며, 각 원소의 역할과 상 분율 변화가 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 이를 바탕으로, 라베스상의 형성 거동이 합금의 미세구조적 특성에 미치는 영향을 이해하고, 향후 수소 저장 소재의 설계 및 최적화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[P15-19]

Influence of High-Entropy on the Mechanical Properties of Metallic Glasses Dynamical Mechanical Behavior and Nano-Indentation Properties: Yitian Yin (Northwestern Polytechnical University), Myeong Jun Lee (Seoul National University), Wook Ha Ryu (Kumoh National Institute of Technology), Jichao Qiao* (Northwestern Polytechnical University), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

Keywords: Dynamic mechanical properties, Nano-indentation behaviors, Metallic glass, High entropy metallic glass

In this study, we systematically investigated the effect of annealing on the dynamic mechanical properties and nano-indentation behaviors of $Zr_{56}Al_{16}Co_{28}$ metallic glass (MG) and $Zr_{30}Hf_{25}Al_{20}Co_{10}Ni_{10}Cu_5$ high entropy metallic glass (HEMG). The competing mechanisms between structural aging and rejuvenation of MG and HEMG introduced under various thermodynamic excitations were explored. Physical aging was applied under sub-T_g using differential scanning calorimetry (DSC) and different driving frequencies were applied to the two compositions by dynamic mechanical analyzer (DMA) to study the microstructural heterogeneities of different compositions. Nanoindentation tests reveal a more heterogeneous microstructure of HEMG. Kohlrausch-Williams-Watts (KWW) model combined with quasi-point theory were employed to describe the microstructural heterogeneity of the materials. The results indicate that HEMG exhibits a stronger frequency dependence in relaxation behavior due to greater structural heterogeneity. Furthermore, HEMG demonstrates slower structural relaxation, attributed to the high-entropy effect, which enhances local energy barriers, suppress atomic-scale local rearrangements, and hinders the activation of β-relaxation. By integrating experimental findings with theoretical models, this study establishes the correlation between structure, energy state, and thermodynamic behavior, providing valuable insights for optimizing the performance of metallic glasses.

[P15-20]

Nanomechanical Performance of Metallic Glasses Under Different Structural States: Shuang Su (Harbin Institute of Technology, Seoul National University), Myeong Jun Lee (Seoul National University), Zhiliang Ning*, Yongjiang Huang (Harbin Institute of Technology), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

Keywords: Nanomechanical performance, Metallic glasses, Creep behaviors, Free volume contents

This study investigates the nanomechanical performance of metallic glasses (MGs) under different structural states. The hardness gradient and creep behaviors of CuZr-based MGs in various structural states were quantitatively analyzed. The results indicate that ion irradiation significantly increases the free volume content, leading to a pronounced hardness gradient. Furthermore, nanoindentation creep analysis reveals a transition in deformation mechanisms induced by irradiation-induced structural rejuvenation. Irradiation enhances the activity of shear transformation zones (STZs), promoting plastic deformation, as reflected in the pop-in behavior and stress exponent analysis. The relaxation spectrum extracted from the creep results shows the relaxation peak value increases with the free volume content, indicating that ion irradiation influences relaxation dynamics by altering atomic mobility and free volume distribution. These findings contribute to a deeper understanding of mechanical modulation mechanisms by tailoring structural states of MGs and provide a theoretical basis for the potential application of MGs in environments requiring controlled mechanical properties.

[P15-21]

통전 처리에 따른 Cu-Ni-Si계 합금의 미세조직 및 경도 변화: 정이화, 장정아, 강성규* (경상국립대학교)

Keywords: 구리합금, 석출강화, 통전, 미세조직, 기계적특성

Cu-Ni-Si계 합금은 Ni_2Si의 석출로 인해 순수 구리에 비해 강도가 증가하는 석출경화형 합금이다. Ni_2Si는 열처리 시간이 증가함

에 따라 연속 석출물에서 불연속 석출물로 성장하는데, 이때 불연속 석출물은 전기 전도도 측면에서 이점을 가지고 있다. 그러나 일반적인 열처리 시에는 불연속 석출물이 석출되기까지 최소 30분에서 최대 24시간이 걸리는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 동일 온도 열처리 대비 미세조직 변화를 가속한다고 알려진 통전 처리를 Cu-Ni-Si 합금에 적용하고자 한다. Ni_2Si의 최대 고용도를 고려한 두 가지 조성(Cu-4.5 Ni-0.95 Si, Cu-6 Ni-1.26 Si in wt. %)의 합금을 주조하여 압연 후 열처리하여 준비하였다. 그 후 EBSD 분석을 통해 각 합금의 미세조직을 분석하고 비커스 경도 시험을 진행하였다. 약 85 A/mm^2의 전류밀도를 1분과 5분 동안 가해준 C45NS 시편에서는 불연속 석출물이 관찰되지 않았지만 경도가 각각 102%, 142% 증가한 것을 보아 석출경화가 일어났음을 예상할 수 있었다. 또한 30분 동안 전류를 가해준 시편의 미세조직에서 불연속 석출물이 확인되었고, 이때의 미세조직 변화를 결정립계 분포를 바탕으로 분석하였다. 이와 같은 변화를 얻기 위해서 일반적인 열처리에서는 약 1시간 이상의 시간이 필요함을 고려할 때 통전 처리가 실제로 석출 거동을 가속했음을 추정할 수 있다. 본 연구를 통해 석출경화형 합금에 통전 처리 적용 가능성을 증대시킬 수 있을 것이라 기대한다.

[P15-22]

열처리에 따른 석출강화형 Cu-4.5Ni-0.95Si 합금의 미세조직, 전기적 및 기계적 특성 변화 분석: 장정아 (경상국립대학교), 안지혁 (한국재료연구원), 강성규* (경상국립대학교)

Keywords: 구리합금, 석출강화, 불연속 석출, 기계적 특성, 전기적 특성

구리는 높은 전기전도도 덕분에 전기/전자 기기 분야의 주력 재료로 쓰이고 있다. 그 중 Cu-Ni-Si 합금은 대표적인 석출강화 합금으로 시효처리를 통해 연속 석출물과 불연속 석출물의 형성을 유도할 수 있고, 특히 불연속 석출물이 형성되면 연속 석출물이 형성된 것보다 강도가 낮지만 높은 전기전도도를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 그 동안 연구되지 않았던 조성인 Cu-4.5Ni-0.95Si 합금의 불연속 석출 거동을 다양한 조건의 시효처리 후 분석하였다. 대기주조 후 50 % 열간압연 및 980도에서 1시간 동안 용체화 처리를 거친 합금을 각각 470, 500, 550℃에서 20, 40, 60, 120, 180분 동안 시효처리를 하고 각각 전기전도도와 비커스 경도를 측정하였다. OM 및 SEM, EBSD 분석을 이용해 시효에 따른 불연속 석출의 미세조직 변화를 분석하여, 시편의 전기전도도와 비커스 경도를 미세조직을 기반으로 분석하였다. 470℃, 500℃와 550℃에서 시효한 시편 모두에서 과시효에 따른 라멜라 구조의 δ-Ni_2Si 불연속 석출물이 형성됨을 확인하였고, 시효 온도가 증가할수록 불연속 석출물의 형성 및 성장 속도가 가속화되는 것을 관찰하였다. 또한 시효 시간이 증가할수록 불연속 석출물의 성장에 따라 전기전도도가 증가하고, 비커스 경도의 경우 그 값이 점차 감소하는 경향을 확인하였다. 본 연구를 통해 새로운 조성의 Cu-4.5Ni-0.95Si 합금의 불연속 석출 거동을 분석할 수 있었으며 최종적으로 불연속 석출의 활성화 에너지를 정량화 할 수 있었다.

[P15-23]

모사회절패턴을 이용한 준안정 β-Ti 합금의 ω상 이중회절 해석: 김진하* ((주)피레타), 최병학 (국립강릉원주대학교)

Keywords: 오메가(ω) 상, β-Ti 합금, 이중회절(double diffraction), 회절패턴

준안정 β-Ti 합금은 athermal ω 상과 isothermal ω상이 나타난다. 이 ω 상을 투과전자현미경으로 분석하면 β-bcc <011>, <113> 방향에서 특정한 회절패턴이 관찰된다. 기존의 연구에서는 이를 hcp 구조의 새로운 상으로 해석하였지만 일반적인 hcp 상과 달리 금지된 위치에서 추가 회절점이 발견된다. 따라서 ω 상을 hcp 상이 아닌 β-bcc 격자의 이중회절로 인한 회절패턴임을 규명이 필요하다. 투과전자현미경의 회절패턴을 재현하기 위해 실격자점을 투명필름에 인쇄하고 그린 레이저를 투과시켜 모사 회절패턴을 구현하였다. 이 모사 회절패턴을 이용하여 단일 격자층에서의 회절패턴과 이중층에서의 격자층 회절패턴을 분석하였다. Bcc 격자의 <011>, <113> 방향을 각각 특정 각도(±70º, ±35º)로 회전시켜 겹쳤을 때, 단일층에서는 보이지 않는 추가 회절점이 관찰되었다. 투과전자현미경으로 분석된 기존의 ω 상 회절 패턴과 본 연구에서 구현된 이중 회절 패턴이 일치함을 입증함으로써, ω 상이 독립적인 결정구조가 아니라, β-bcc 격자의 중첩 효과일 가능성이 높음을 제시하였다. 본 연구를 통해 β-Ti 합금에서의 ω 상변태 해석을 재정립하고, 금속 재료에서의 상변태 및 회절 해석에 대한 새로운 접근법을 제공할 것으로 기대된다.

P16 : 철강-제선,제강,환경,에너지
Room 3층 로비, 4월 24일

[P16-1]

Single Hot Thermocouple Technique(SHTT)을 이용한 슬래그 중 Al_2O_3 함량에 따른 CaO의 용해속도 연구: 이나경, 정용석* (한국공학대학교)

Keywords: 제강 슬래그, CaO 용해, 탈황, Al_2O_3 활동도

제강공정 중 CaO는 슬래그에 투여되어 슬래그 융점 하락 및 용강 내 황 제거를 위한 flux로써 사용된다. 또한, Al dross는 전기로 조업 중 화학 에너지 공급 및 Fe 회수를 위한 환원제로써 고려되고 있으며, Al은 래들, 턴디쉬 조업 중 탈산제로써 주로 사용되고 있다. Al계 첨가물들의 투입은 제강공정 중 슬래그 내 Al_2O_3 함량을 증가시킨다. 본 연구에서는 CaO-SiO2-Al_2O_3-MgO 슬래그 내 Al_2O_3 함량(0, 5, 10, 15, 20 wt%)에 따른 CaO 입자의 용해 거동을 1600ºC에서 Single Hot Thermocouple Technique (SHTT)를 사용하여 실시간으로 관찰하였다. 실험결과 슬래그 내 Al_2O_3 함량이 증가할수록 CaO 입자의 용해 시간은 감소하였다. 슬래그 내 Al_2O_3 함량 증가에 따라 입자 내 침투하는 슬래그의 양이 증가하였으며, 이는 본 실험결과에 대한 원인으로 사료된다. 또한, Al_2O_3 10 wt% 이상 슬래그에서는 CaO 입자의 분화 현상이 발견되었다. 본 연구 결과를 통해 CaO 입자의 용해 반응 기구에 대해서 발표하고자 한다.

[P16-2]

열분해에 의한 폐타이어의 성분 및 열량 변화: 명재욱, 김선중* (조선대학교), 김장열, 강영현 (포항산업과학연구원)

Keywords: Gross heats, Sulphur, Zinc, Pyrolysis

2050 탄소 중립 정책이 시행됨에 따라 CO_2 배출량을 줄이기 위해 고로-전로 공정에서 전기로 공정으로의 전환이 이루어 지고 있으며, 화석 연료를 대체하기 위한 탄소 자원 중 폐타이어를 고려할 수 있다. 폐타이어는 코크스와 유사한 약 8000 cal/g의 발열량과 안정적인 슬래그 포밍 현상을 촉진할 수 있어 전기로의 사용에 적합하다. 한편, 폐타이어는 휘발분의 함유량이 높으므로 열분해를 통해 고정탄소를 농축할 수 있으나, 제조 단계에서의 가황 공정에 의해 높은 S 함유량을 가지기 때문에 철강 생산품의 품질을 저하시킨다. 본 연구에서는 폐타이어의 열분해 거동을 파악하기 위해 저항로에서 TGA 실험을 진행하였다. 실험은 Ar 분위기에서 상온에서부터 1273 K까지 승온시켜 반응을 진행하였다. 샘플은 Ar 분위기의 반응로 내부에서 서냉하여 샘플의 온도가 상온이 된 후 회수하였다. 열분해 거동을 통해 무게 감소율을 확인하였고, 회수된 샘플은 Ultimate, Proximate, FT-IR, SEM-EDX, Gas 및 Gross heats 분석을 통해 열분해 특성을 확인하였다.

[P16-3]

유동층 계산 가속화를 위한 기계학습 기반 차수축소모델 개발: 서승원, 진봉민, 양현진* (인하대학교)

Keywords: 특이값분해(SVD), 기계학습(machine learning), 다상유동모델(multiphase flow), 유동화(fluidization)

차수축소모델(Reduced Order Model, ROM)은 높은 계산비용이 소요되는 물리기반 수학적 모델의 주요 물리특성을 보존하면서 해를 근사화하는 기법으로 계산을 가속화시킬 수 있는 하나의 방안으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 차수축소모델(ROM)을 직경관 유동층 반응기에 적용하여 주입 가스 유량에 따른 고체분율과 차압의 예측 가능성을 평가하였다. 물리기반 가스-분광 다상유동모델을 통해 얻어진 해를 바탕으로 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 수행하여 주요 유동특성을 여러 모드(mode)로 추출 후 선별하여 기계학습을 통해 차수축소모델을 구축하였다. 이후 이론 및 실험 데이터를 바탕으로 차수축소모델에서 예측되는 최소유동화 속도 및 고체분율 분포의 정확도를 평가하였다.

[P16-4]

Investigation of Microstructure Evolution of Iron Ore Fines by Dehydration: DAVIN MYOUNG, Eunju Kim, Inkook Suh, and Joonho Lee* (Korea University)

Keywords: hematite ore, mixed ore, limonite ore, reduction, gangue

Due to the depletion of high-grade iron ores, utilizing low-grade iron ores has become essential in the ironmaking process. A notable characteristic of low-grade iron ores is their high goethite content. When low-grade iron ore fines are processed in a hydrogen-rich fluidized bed reactor, microstructure evolution due to dehydration plays a crucial role in determining their reducibility. The iron ore samples—hematite, mixed, and limonite—were analyzed with a particle size ranging from 2 to 4 mm. XRD Rietveld analysis revealed that the hematite ore contained 71.3% hematite and 22.1% goethite. In contrast, the mixed ore had 33.0% hematite and 54.6% goethite. The limonite ore contained 20.8% hematite and 77.6% goethite. Additionally, gibbsite was detected in the hematite ore, and kaolinite was identified in the mixed ore. Following heat treatment, all goethite transformed into hematite, with quartz as the predominant gangue mineral. Microstructural analysis using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) indicated that the hematite ore exhibited minimal crack formation upon heating, attributed to its fine dispersion of goethite. The mixed ore displayed a porous hematite structure facilitated by vapor release, thereby reducing crack formation. In contrast, the limonite ore, characterized by a pisolitic structure, showed significant cracking upon heating, leading to structural degradation. Thermal fragmentation, assessed by heating at 700ºC for 30 minutes and subsequent sieving of fragmented particles, ranked the ores as follows: limonite > hematite > mixed

ore. Mercury porosimetry measurements indicated that the raw hematite ore had the largest average pore size (0.087 μm), followed by mixed ore (0.049 μm) and limonite ore (0.026 μm). After heat treatment, the average pore size of hematite ore increased slightly to 0.095μm, while mixed (0.044 μm) and limonite (0.021 μm) ores exhibited reduced pore sizes, suggesting the formation of nanopores. Considering the mean free paths of reducing gases CO (0.2327 μm) and H_2 (0.3939 μm), hematite ore facilitated molecular diffusion, whereas limonite ore demonstrated Knudsen diffusion. Surface area analysis post-heat treatment ranked the ores as follows: limonite (15.104 m^2/g) > mixed (8.356 m^2/g) > hematite (2.779 m^2/g), indicating that a higher goethite content enhances reduction potential. ICP analysis revealed that SiO_2 content was highest in limonite (6.062%), followed by mixed (4.48%) and hematite (1.769%). Al_2O_3 content was highest in mixed ore (2.463%), followed by limonite (1.531%) and hematite (0.911%). FactSage simulations indicated the formation of olivine and spinel phases, with fayalite (Fe_2SiO_4) and hercynite ($FeAl_2O_4$) being predominant. The high SiO_2 content in limonite promotes fayalite formation, potentially reducing the reduction rate in the final stage. The addition of Al_2O_3 (≤3%) to magnetite (Fe_3O_4) promotes the formation of a network-like wustite structure, enhancing metallic iron formation. However, as the Al_2O_3 content increases furthermore, a dense hercynite layer is formed, which may slow down the reduction process. Consequently, the effect of Al_2O_3 on the reduction rate varies depending on its concentration. In conclusion, this study underscores the significance of microstructure evolution in low-grade iron ores on reduction kinetics, providing valuable insights for assessing ore suitability in fluidized bed reduction processes.

[P16-5]

Novel Cu Equivalent Formula for Suppressing Hot Shortness Induced by Cu-Rich Liquid Phase Formation in EAF Steel: Cho Minseo and Joonho Lee* (Korea Univ.)

Keywords: steel scrap, tramp element, hot shortness, Cu equivalent

The implementation of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) has resulted in a notable increase in steel production via the Electric Arc Furnace (EAF) process, leading to enhanced utilization of steel scrap. This scrap often contains tramp elements, including copper and tin, which traditional refining processes cannot remove. Consequently, these elements are perpetuated and concentrated throughout the steel recycling process. Specifically, copper introduced from the scrap can exist as a liquid phase on the steel surface during hot rolling, potentially leading to hot shortness. The Cu equivalent formula quantifies the relative contributions of various tramp elements and serves as a critical indicator; surface cracks induced by the Cu-rich liquid phase may develop when the value surpasses a defined critical upper limit. However, due to the variable effects of each constituent element, a definitive standard remains elusive. This study undertakes an analysis of the chemical composition of steel produced in domestic EAFs to ascertain the current levels of tramp elements present. Thermodynamic calculations are performed to explore the influence of these elements on the formation of the Cu-rich liquid phase on the steel surface during the hot rolling. A novel Cu equivalent formula is proposed to assess hot shortness in steel products from the EAF process in Korea.

[P16-6]

슬래그 내부 가스 발생 및 탈산 반응에 미치는 폐플라스틱 첨가 가탄재의 영향: 안효주, 박노근* (영남대학교), 강영조, 심상철 (동아대학교), 이은진, 김효민 (머티리얼솔루션파크)

Keywords: 슬래그, 슬래그 포밍, 가탄재, 폐플라스틱, 탄소중립

최근 산업 발전과 함께 온실가스 배출이 급격히 증가하면서, 철강 산업에서도 탄소 배출 저감을 위한 친환경 기술 도입이 필수적인 과제로 떠오르고 있다. 2050년 탄소 중립 목표 달성을 위해 산업계에서는 다양한 노력을 기울이고 있으며, 특히 단기적으로 실행 가능한 솔루션의 중요성이 강조되고 있다. 이에 본 연구에서는 기존 가탄재를 대체할 수 있는 실질적인 방안 중 하나로 폐플라스틱을 첨가한 친환경 가탄재 개발에 집중하였으며, 이를 활용한 탄소 배출 저감 가능성을 평가하고자 하였다. 실험에서는 3원계 슬래그에 폐플라스틱과 가탄재를 혼합하고, 포밍 과정에서의 면적 변화를 실시간으로 관찰하여 포밍 효율성을 분석하였다. 또한, 가스 분석을 통해 폐플라스틱 연소 시 발생하는 가스를 조사하고, 내부 반응 메커니즘을 규명하였다. 분석 결과, 폐플라스틱이 연소하면서 CH_4, CO 등의 가스를 방출하는 것이 확인되었으며, 고온에서 폐플라스틱이 우선적으로 분해되며 발열 에너지를 방출함으로써 포밍이 더욱 급격하게 진행됨을 확인하였다. 추가적으로, 반응이 진행된 시점의 시편을 각각 EPMA 분석한 결과, 폐플라스틱 첨가 시 FeO 내 산소 비율이 감소하는 것이 관찰되었으며, 이는 폐플라스틱이 고온에서 불완전 연소되어 생성된 CO 가스가 FeO를 환원시키는 역할을 했음을 확인하였다. 본 연구팀은 위 분석 방법을 통해 폐플라스틱을 첨가한 슬래그의 포밍이 더 급격하게 증가하는 현상에 대해 이해하고자 하였으며, 가탄재의 일부분을 폐플라스틱으로 대체하였을 때의 효과 및 가능성을 확인하였다.

[P16-7]

철광석 펠렛의 가스 환원 속도상수 측정: 이지언, 유홍재, 강영조* (동아대학교)

Keywords: 철광석 펠렛, 직접 환원, CO+H2 혼합가스, 열중량분석(TG), 배가스 분석

2050년 탄소중립 달성이라는 목표가 전세계적으로 대두됨에 따라 제철 및 제강산업에도 큰 변화가 요구되고 있으며 그중에서도 CO2 배출 저감을 위한 철광석의 직접환원 공정의 필요성이 주목받고 있다. 펠렛 형태의 철광석과 샤프트 형태의 반응기를 사용하는 환원 공정은 이미 상용화 단계에 있지만 철광석의 환원 속도에 대한 이론은 알려진 바가 많지 않다. 특히, CO2 배출량 저감을 위해서 환원성 가스에 수소 함유 가스를 활용하게 될 경우, 환원반응 기구와 환원 속도에 다양한 변화가 예상된다. 본 연구에서는 환

원성 가스의 변화에 따른 철광석 펠렛의 환원 거동을 조사하기 위하여 CO+H2 혼합가스에 의한 철광석 환원 실험을 실시하였다. 환원율은 열중량 분석을 이용하여 결정하였으면 환원반응 기구 검토를 위하여 배가스 분석을 실시하였다. 시간에 따른 환원율 측정 결과를 이용하여 환원반응의 율속단계를 결정하고 해당하는 단계의 환원반응의 속도상수를 결정하였다.

[P16-8]

다입경-다상유동모델을 이용한 유동층 내 유동화 특성 평가: 단일 입경 모델과의 비교 분석: 심승현, 진봉민, 양현진* (인하대학교)

Keywords: 다입경-다상유동모델, 유동층, 입자 크기, 고체분율

기존의 연속체 가정을 따르는 다상유동모델(예: Eulerian model) 기반의 유동층 모사 연구들은 보편적으로 하나의 대표 입도를 사용하여 수행되었으나 실제 산업에 활용되는 분철광석은 넓은 입도 분포를 가지므로 보다 정밀한 모사를 위해서는 다입경 모델의 적용 가능성을 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 두 개의 대표 입경(0.36 mm, 2.45 mm)을 선정하여 연속체 기반의 다입경-다상유동모델을 개발하였다. 이를 바탕으로 최소유동화속도 및 유동화 특성에 대한 계산을 수행하였다. 기존의 단일 입경 모델과 비교하여 계산 결과의 차이를 분석하였으며, 반응기 높이에 따른 고체분율 변화를 입도 분포에 따라 비교하여 다입경 모델이 유동 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구를 통해 다입경 모델의 적용 가능성과 계산의 수렴성, 그리고 유동화 거동 예측의 신뢰성을 검토하였으며, 이를 통해 보다 현실적인 유동화 모델 구축에 기여하고자 한다.

[P16-9]

폐콘크리트의 전기로 제강공정 활용 가능성 평가: 윤누가, 서인국, 이준호* (고려대학교)

Keywords: 리싸이클링, 폐콘크리트, 전기로, 정련

폐콘크리트에서 골재와 분리된 시멘트 페이스트는 CaO, SiO_2 등의 산화물로 구성되어 있으며 높은 염기도를 갖고 있어 철의 정련 과정에서 CaO를 대체하는 플럭스로 활용될 가능성이 있다. 특히, 폐콘크리트는 가격 측면에서는 물론 온실가스 배출 저감 측면에서 매우 유용한 리싸이클링 재료로 판단된다. 그러나, 시멘트의 응결 조절제로 사용되는 석고에 포함된 황산염으로 인해 제강공정에서 용강 중 S의 농도를 높이게 되어 품질 저하, 내구성 저하, 설비 부식 등의 문제를 유발할 수 있다. 따라서, 폐콘크리트에서 회수된 시멘트 페이스트를 전기로 제강공정에서 CaO 대체 플럭스로 활용하기 위해서는 생산 제품의 황 허용 기준을 충족해야 한다. 본 연구에서는 열역학적 계산 기법을 활용하여 폐콘크리트에서 회수된 시멘트 페이스트를 전기로 제강공정에 적용할 때, 제품의 황 함량이 허용 범위 내에서 유지될 수 있는 조건을 검토하였다. 본 연구 결과는 향후 건설폐자재의 제강 플럭스로의 재활용을 위한 실험적 연구의 기초자료로 활용될 예정이다.

[P16-10]

Bottom-Blowing 가스 주입을 통한 용강 중 질소 제거반응의 속도론적 고찰: 변근우, 박주현* (한양대학교)

Keywords: N_2 탈가스, 저취(bottom-blowing), 전기로

자동차 시장의 확장은 고강도 자동차 외장 패널 및 모터용 전기강판과 같은 제품의 수요를 크게 증가시킬 것으로 예상된다. 이러한 제품들은 성형성과 자기적 특성을 확보하기 위해 불순물을 매우 정밀하게 제어해야 한다. 특히, 질소는 강재의 기계적 특성에 영향을 미치는 중요한 원소로, 질소 함량이 증가하면 인장 강도와 항복 강도가 향상되지만 연신율이 감소하여 성형성이 저하될 수 있다. 그러나 전기로(EAF) 공정에서는 용해 과정에서 대기 중 질소가 용강에 용해되는 문제가 발생한다. 이는 전기로 공정이 대기 환경에서 아크 열을 이용하여 원료를 용해하는 특성을 가지고 있기 때문이다. 또한 철 스크랩이나 직접환원철(DRI)과 같은 원료에서 질소가 용강 내로 유입될 수 있으며, 아크 방전 및 난류 형성으로 인해 질소 용해가 촉진될 가능성이 크다. 이러한 문제로 인해 일반적으로 질소 제어는 2차 정련(Vacuum Degassing, Ruhrstahl-Heraeus) 공정에서 수행되지만, 2차 정련 공정은 상당한 비용이 소요된다. 이는 진공 유지에 필요한 고성능 펌프와 Ar 및 기타 가스 사용으로 인해 운영 비용이 높기 때문이다. 뿐만 아니라, 현재 전기로 공정에서는 용강 내 풍부한 탄소로 인해 CO gas 발생량이 많아 탈질이 어느 정도 이루어지지만, 향후 수소환원철(H_2-DRI)이 사용될 경우 탄소 공급이 제한되어 CO gas 발생량이 감소할 수 있다. 이를 대비하기 위해 최근에는 전기로 공정 내에서 저취(bottom-blowing) 기술을 활용하여 질소를 효과적으로 제거하고, 2차 정련에 대한 의존도를 줄이려는 연구가 진행되고 있다. 이를 위해 다양한 종류의 가스 취입 조건이 질소 제거에 미치는 영향을 조사할 필요가 있다. 본 연구에서는 유도로에서 실험을 수행하였으며, 용탕 내 질소 함량 변화를 관찰하기 위해 in-situ 샘플링 기법을 적용하였다. 먼저 전해철을 녹인 뒤 N_2 gas를 불어주어 질소 포화 모합금을 제조하였다. 그 후, 실제 공정의 저취(bottom-blowing)를 모사하기 위해 알루미나 랜스를 이용하여 도가니 바닥 근처에서 Ar/CO_2/CO gas를 주입하였으며, 랜스 팁과 도가니 바닥 간의 거리는 10 mm를 초과하지 않도록 유지하였다. 실험 결과, 질소 제거 반응은 2차 반응을 따르는 것으로 확인되었으며 본 발표에서 그 결과를 소개하고자 한다.

[P16-11]

전기로 슬래그 포밍에 대한 조성, 온도, 가탄재 영향: 김기현*, 임동혁, 차홍주 (고등기술연구원)

Keywords: 전기로 슬래그, 슬래그 포밍, FeO, 탄재

전세계적인 탄소중립 선언에 맞춰 철강업계에서도 이에 대한 대비를 마련 중이며, 기존의 고로 기반의 생산체계에서 전기로 기반으로 변경하고 있다. 전기로는 1톤당 이산화탄소 배출량이 고로의 약 25% 수준이므로 다수의 철강 회사들이 탄소중립 로드맵으로 전기로 설비를 도입 중이며, 이를 통한 고에너지효율 공정을 적용하고자 한다. 전기로에서의 에너지 절약 기술 중 하나인 슬래그 포밍 최적화 기술은 조업 중 용강과 슬래그에 투입되는 에너지가 대기 중으로 방출됨을 제어하여 전력 효율을 상승시킨다. 전기로 슬래그 내 FeO 성분과 투입되는 탄재와 반응으로 인해 생성되는 CO 기체를 이용하여 슬래그 포밍 현상을 유도한다. 이 때, 슬래그

포밍 높이의 최적화가 중요하며, 너무 낮을 경우에는 전극을 슬래그에 침적 시켜 작업하는 것이 불가능하며, 너무 높을 경우에는 슬래그의 유출로 인해 용강 수율 하락, 로 손상, 온도 저하 등 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 조업 온도에 따른 슬래그의 조성 중 FeO 함량과 투입되는 탄재에 대한 슬래그 포밍 현상을 실시간 영상 촬영을 통해 관찰하고 FactSage©를 이용한 열역학 계산을 통해 해석하고자 하였다. 그리고 자원순환의 방안으로 폐고무를 탄재로 활용하기 위한 조건을 제시하고자 하였다.

[P16-12]

수세 처리를 통한 철강 공정 부산물 內 유해 물질 제거 기술 개발: 강순형, 정용수*, 김현, 김희원 (포항산업과학연구원), 홍순곤 (POMIA), 홍성표, 김정근 (베페사징크코리아(주))

Keywords: 부산물, 환경, 더스트, 슬러지, 수세척

철강 공정에서 발생하는 더스트와 슬러지에는 Fe나 유가 금속 성분들이 함유되어 있는 경우가 많다. 그런 부산물들을 최대한 활용함으로써 원가 절감을 이루는 것은 철강 기업에게 중요한 환경/경제적 과제다. 하지만 부산물들에 유용한 성분이 들어있다고 해서, 철강 공정에 그들을 그대로 투입할 수는 없다. 부산물에는 유용한 성분뿐만 아니라 Zn, Cl, Na, K, 등 유해 물질들도 함께 포함되어 있다. 유해 물질들을 제거하지 않고 원료와 함께 투입할 경우, 공정 내에 해당 물질들이 농축되어 설비에 장애를 일으키거나, 환경 문제를 일으키게 된다. 이는 곧 설비 관리 비용과 환경비용의 증가로 이어지므로, 철강 기업들의 목표에 반하는 결과를 가져오게 된다. 본 연구는 부산물 內 알칼리 금속(Na, K)과 염 성분이 공정 설비와 환경에 부하를 가한다는 사실을 포착했고, 수세 처리를 통한 부산물 내 유해 물질 제거 기술을 개발했다. 본 발표는 해당 연구의 내용 및 결과를 담고 있고, 기술을 현장에 적용하기 위해 검토했던 과정들도 포함하고 있다. 본 연구 및 현장 적용 사례가 타 분야 및 타 부산물 재활용 방안에 확대 적용되기를 기대한다.

[P16-13]

철강부산물을 이용한 합금철 전구체 제조 기술 개발: 김희원*, 정용수*, 김현, 강순형 ((재)포항산업과학연구원(RIST)), 홍순곤 ((재)포항소재산업진흥원(POMIA)), 성민경, 김중현 (베페사징크코리아(주))

Keywords: 철강 부산물, 합금철, 예비 환원, 유가금속

환경부는 지속 가능한 순환경제사회의 기반을 구축하기 위해 「순환경제사회 전환 촉진법」을 2025년 1월 1일부터 시행하고 있다. 이 법은 자원의 효율적 이용과 폐기물 발생 억제, 순환이용 촉진을 통해 지속 가능한 순환경제사회를 만드는 데 기여한다. 이는 순환경제 목표 설정 및 성과 관리, 폐기물의 재사용 및 우선 적용 등 전 과정을 규정하여 친환경 경제 체계를 강화하고 있다. 이러한 순환경제사회에 기여하고자 본 연구에서는 철강 부산물을 활용한 합금철 전구체 제조 기술 개발을 위한 예비 환원 실험을 진행하였다. 이를 통해 철강 공정에서 발생하는 Slag 및 Dust로부터 Fe 함유 Mn, Si, Cr, Ni 등의 유가금속 함량을 증가시키는 방안을 제시하였다. 철강 부산물 샘플을 건조 및 분쇄 후 환원 실험을 진행하였고, 각 조건에 다른 유가금속의 환원율을 분석하였다.

[P16-14]

직접환원철 제조 공정에서의 펠렛 환원분화 특성 연구: 박태준* (한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이동수, 김혁 (현대제철)

Keywords: 수소환원, 직접환원, 펠렛, 환원분화, Linder test

고로는 높은 효율성으로 인해 주요 철강사에서 핵심 설비로 활용되며, 이에 따라 다양한 기술 개발과 원료 최적화 평가 방법이 정립되었다. 그러나 고로 공정은 석탄 기반의 제선 방식으로 다량의 온실가스를 배출하는 한계를 가진다. 최근 전 세계적으로 온실가스 배출 규제가 강화됨에 따라, 철강 산업에서도 저탄소 공정 도입이 요구되고 있다. 이에 따라 고로 대비 온실가스 배출이 적으며, 향후 수소 환원 제철 공정으로의 전환이 용이한 직접환원철(DRI) 제조 기술이 주목받고 있다. 대표적인 DRI 공정으로는 MIDREX와 ENERGIRON이 있으며, 글로벌 철강사들은 해당 설비 도입을 적극적으로 추진하고 있다. 직접환원철(DRI) 제조 설비는 환원로 이후 공정에서 추가적인 환원이 불가능하므로, 목표 환원율을 확보할 수 있는 적절한 원료를 선별하여 사용하는 것이 중요하다. 특히 샤프트 타입 환원로는 고온의 환원가스를 활용하여 내부의 펠렛을 환원시키는 방식으로, 환원 구간에서의 환원가스의 흐름과 펠렛의 환원 및 분화 특성이 조업 효율에 큰 영향을 미친다. 따라서 안정적인 조업을 위해서는 장입 원료인 펠렛의 환원 특성이 중요하다. 따라서 현재 MIDREX 공정에서 활용되는 펠렛의 환원 과정 중 분화 특성을 연구하고자 한다. 본 연구에서는 샤프트로 내의 주요 환원 구간을 모사하여 펠렛의 환원 과정 중 분화 특성을 평가하기 위한 장비를 구축하였다. 또한 환원 온도, 가스 조성과 펠렛 회전 등 동적 환원 실험 조건을 설정하여 펠렛의 환원 분화 정도를 측정하고 특성을 분석하였다.

[P16-15]

전기로 공정 조건에서 열간압축철(HBI) 사용 비율 및 탄소함량 변화에 따른 용강, 슬래그 변화 예측: 이민주, 박주현* (한양대학교)

Keywords: Hot briquetted iron (HBI), CO_2 reduction, Hydrogen reduction, Gangue oxide, Electric arc furnace (EAF)

CO_2 발생 저감을 위하여, 철강업계에서는 철강 생산방식을 고로-전로 기반 조업에서 전기로 조업으로 점차 변경하는 중이다. 전기로 조업의 경우 고로-전로 조업대비 약 75%의 CO_2 절감이 가능하지만, 순환원소(Cu, Sn 등) 농축 및 고급 원료 공급 감소 문제가 발생하고 있다. 이를 해결하기 위하여, 원료를 고철에서 직접환원철 (Direct-reduced iron, DRI) 또는 성형된 형상의 열간압축철 (Hot briquetted iron, HBI)로 변경하려는 연구가 지속적으로 행해지고 있다. HBI는 순환성 원소가 존재하지 않는 대신 SiO2로 대표되는 맥석 성분과 인(P) 함량이 높은 특징이 있어, 슬래그 제어를 통한 탈린 거동을 명확히 이해하는 것이 요구된다. 하지만 현재 국내 철강 생산 조업의 경우 DRI/HBI를 고철 대비 최대 10% 정도 활용하고 있으며, 고철과는 조성 및 용해 방식에 차이가 있어, 고철 기반의 전기로 활용 기술에 비해 HBI 기반 기술은 아직 미비한 상황이다. 추가적인 탄소발생 감축을 위하여, 추후 수소 환원 DRI/HBI를 사용할 경우에도 마찬가지로 용해 기술 개발은 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 HBI 사용 비율에 따라 용해 시

발생하는 용강 슬래그 조성 변화를 Factsage 열역학 계산 프로그램을 이용하여 예측하였으며, 특히 수소환원 HBI를 사용하였을 때 발생하는 용강, 슬래그 조성 및 추가적인 Flux 사용시의 변화를 계산하였다. 스크랩을 사용하는 전기로 조업 조건에서 0%, 0.5%, 1.0%C-HBI를 추가적으로 투입할수록, 용강 내 탄소 함량은 약 260ppm에서 100% HBI 투입 기준 약 120, 140, 170ppm으로 감소하는 것으로 계산되었다. 그러나 1.5%C-HBI 조건에서는, 30% HBI 투입 전까지는 다른 탄소 조성 HBI와 같이 용강 내 탄소 함량 감소 현상을 보이다가, 30% 이후에는 오히려 탄소 함량이 최대 약 300ppm까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 용강 내 탄소 변화는 HBI로 투입된 초기 탄소 함량, FeO 함량 및 용강 내 CO 가스 반응으로 인하여 결정된다. 이러한 슬래그-용강 간 FeO-C 환원반응으로 인해 HBI 내 탄소 함량이 높아질수록 용강 무게가 증가하게 되고, 이로 인한 수율 증가 효과를 얻을 수 있다. 또한 환원반응으로 생긴 CO가스는 전기로의 열 효율을 증가시킬 수 있는 slag foaming 현상과도 밀접한 연관이 있어, 이를 제어하기 위한 적절한 슬래그 조성 설계가 필요하다. 인 제거의 경우 슬래그의 염기도 특성과 용강 내 산소 활동도에 의해서 결정되며, HBI에 포함되어 있는 맥석 내 SiO_2로 인하여, HBI 첨가량이 늘어날수록 슬래그의 인 제거 능력 (phosphate capacity)는 log scale 기준 약 17에서 15로 HBI 내 초기 탄소 함량과는 무관하게 감소하게 된다. 0%C (수소환원 조건)-HBI를 사용하였을 경우 HBI 내 맥석 성분 중 SiO_2 및 FeO로 인하여 스크랩 조업 대비 약 2배의 슬래그 부피 증가 및 인 제거 능력 감소가 야기되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 추가적인 탄소와 CaO와 같은 flux 투입을 통하여 제어할 수 있는 것으로 계산된다. 따라서 상용 HBI 및 수소환원 HBI를 전기로에서 사용할 경우, 슬래그의 인 제거 효율을 개선하기 위하여 Flux 투입을 통한 슬래그 조성 설계가 필수적이며, 특히 수소환원 HBI 사용 시 기존 전기로 조건의 약 2배 가량 증가하는 슬래그 부피를 제어하기 위하여 추가적인 탄소 투입이 필수적으로 요구된다.

[P16-16]

Development of Flux Manufacturing Technology for Inclusion Refining in the Use of Wasted-Refractories and Industrial By-products: 김인아, 정은진* (포항산업과학연구원(RIST))

Keywords: 부산물, 폐내화물, Flux, 재활용, 고부가화

'21년 기준 국내외 철강업계에서의 폐내화물의 처리 현황은 유럽에서는 약 40% 수준을 매립하고 60% 수준을 지반 충진재, 슬래그 첨가제, 일부 내화물로 활용하는 반면, 대한민국은 약 77%가 매립되고 있어 폐내화물 활용이 현저히 부족한 실정이다. 특히. 국내 철강업계에서의 연간 내화물 사용량은 12.5만톤으로 이 중 11만톤의 폐내화물이 매립되고 있어 폐내화물 재활용 연구가 중요한 문제로 대두되고 있다. 또한, 국내에서는 정련제 원료 소재를 전량 수입에 의존하고 있어 폐자원을 활용한 정련제 국산화 및 기술 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 폐자원의 고부가가치 활용 가능성을 제시하고, 철강산업의 친환경적 정련 공정을 위한 기초 연구를 수행하고자 하였다. 금속 부산물 및 폐내화물을 활용하여 탄소 저감형 복합 Flux를 개발하는 방안에 대해 접근하고자 하며, 정련제의 국산화를 통해 원가 경쟁력을 확보하고 산업 부산물을 활용하여 탄소 저감형 Flux로써의 활용 및 산업기여를 최종 목표로 한다. 특히, 철강 내 불순물인 Al_2O_3 개재물 정련을 위해 부산물 원료를 정련제용으로 조합하여 폐내화물 기반의 복합 Flux로의 정련능을 평가하였으며, 이를 위해 CaO-SiO_2-Al_2O_3 기반의 조성을 최적화하여 Al_2O_3 개재물 흡수 능력을 향상시키고, 저융점에서 효과적으로 작용하는 Flux 조성을 설계 및 평가하고자 한다.

[P16-17]

Dissolving C in molten Fe: Sudipta Bag (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science & Technology), Vijay Gupta, Won Kyung Seong, Benjamin Cunning (Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science & Technology)

Keywords: Dissolution of carbon in iron, prevention of surface precipitation, potential nucleation of carbon allotrope

We are studying dissolution of carbon (C) into molten iron (Fe) while also aiming to prevent precipitation of graphite on the surface(s) of the molten Fe-C mixture. The Fe-C system has a eutectic (17.28 at% C and 82.72 at% Fe) at 1147ºC. We are exploring the potential for nucleation and growth of, e.g., diamond (and of graphite), of either the eutectic composition or different compositions of C in Fe, by first 'controlling' dissolution of C in the molten Fe and then quickly dropping T ("T drop experiments") to nucleate carbon structures from the resulting supersaturated solution. Following quenching of molten Fe-C, we use Scanning Electron Microscopy (SEM), SEM-EDS, and Raman spectroscopy, among others, to analyze the product. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

P17 : 전산재료과학
Room 3층 로비, 4월 24일

[P17-1]
Atomistic simulations of $TiMn_2$-based hydrogen storage alloys using a Machine-Learing-Based Deep Potential: Hun-Min Jo and Won-Seok Ko* (Inha Univ.)
Keywords: Machine Learning Potential, Deep Potential, Ti-Mn alloys, Atomistic simulation

Titanium-manganese (Ti-Mn) alloys, particularly $TiMn_2$-based intermetallic compounds, have been widely studied for hydrogen storage materials due to their high storage capacity, economic feasibility, and relatively easy activation. However, atomic-scale interactions in Ti-Mn alloys remain challenging, and there are limitations in the development of optimized hydrogen storage alloys. Conventional interatomic potentials often fail to capture complex bonding characteristics in metal-H systems, necessitating the development of more accurate machine-learning-based models. In this study, we developed a machine-learning-based Deep Potential (DP) for the Ti-Mn-H ternary system. Training datasets for multi-component alloy systems were generated by utilizing an active-learning scheme. The resulting DP model provides predictions consistent with first-principles calculations for both pure and alloy systems in terms of physical properties, including formation energy, equilibrium volume, equation of state, interstitial energy, vacancy formation energy, surface formation energy, and elastic moduli. This work provides a reliable computational tool for understanding $TiMn_2$-based hydrogen storage alloys at the atomic scale and contributes to the development of more efficient hydrogen storage materials.

[P17-2]
Computational Insights into Engineered Linear Carbonates for Nonflammable Li-Ion Battery Electrolytes: Ukseon Shin (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Jina Lee, A-Re Jeon, Minah Lee* (Pohang University of Science and Technology), and Dong-Hwa Seo* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)
Keywords: Battery Organic Electrolyte, Density Functional Theory, Classical Molecular Dynamics, Machine Learning, Safety

Fire and explosion hazards significantly impede the widespread adoption of lithium-ion batteries (LIBs) in electric vehicles and energy storage systems. Although reducing the flammability of LIBs' organic electrolytes provide effective solutions to thermal safety issues, such modifications often compromise battery performance and cost-effectiveness. Despite alternatives—such as high-concentration electrolytes, extensive fluorination, and flame-retardant additives—being proposed, practical replacements for high-performance commercial electrolytes remain elusive due to challenges including cost, inherent toxicity, and electrode compatibility. To address these challenges, we employed a systematic molecular engineering approach. Specifically, we designed an alkyl-chain extension to reduce solvent volatility and an alkoxy substitution to enhance solvation stability. Classical molecular dynamics (cMD) simulations and DFT calculations revealed that dibutyl ether (DBC)—a simple alkylated linear organic carbonate derived from diethyl carbonate (DEC)—exhibits enhanced intermolecular interactions and improved polarizability. Moreover, we discovered that bis(2-methoxyethyl) carbonate (BMEC), produced via alkoxy substitution, forms a clamp-like structure in which additional ethereal oxygen atoms interact with Li^+ ions, yielding a more stable configuration compared to a single carbonyl oxygen interaction. These observations were corroborated by FTIR and ^7Li NMR spectroscopic analyses. Additionally, multivariable linear regression was used to elucidate the factors affecting the molecules' flash and boiling points. Our work highlights the efficacy of computational molecular design and provides valuable insights into potential strategies for next-generation electrolyte development.

[P17-3]
Enhancing Selective Hydrogen Peroxide Production Through Structural Tuning of Molybdenum Phosphide Catalysts: A Density Functional Theory Study ; Bogeun Park (Hanyang University), Hyeuk Jin Han* (Sungshin Women's University), Min-Jae Choi* (Dongguk University), and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University)
Keywords: MoP, Hydrogen Peroxide, DFT (Density Functional Theory)

Hydrogen peroxide (H_2O_2) is a green oxidant with broad applications in chemistry, medicine, and environmental science. Traditionally, H_2O_2 has been produced via the energy-intensive anthraquinone process. However, sustainable alternatives for H_2O_2 synthesis have garnered significant attention. Among these alternatives, the two-electron oxygen reduction reaction (2e-ORR) has emerged as a promising route. However, the selective production of H_2O_2 is hindered by the competing four-electron ORR, which favors water formation, particularly during the critical adsorption of the OOH intermediate. Consequently, the development of catalysts that selectively promote H_2O_2 production over water remains a significant challenge. In this study, we investigated the catalytic performance of molybdenum phosphide (MoP) catalysts in two structural forms: planar MoP with a (0001) surface orientation and hexagonal-columnar MoP with a (10-10) surface orientation. These structural variations significantly influence catalytic behavior, which is essential for practical applications. Depending on the experimental conditions, either the planar or hexagonal structure may predominate. To elucidate the impact of these structural modifications, we employed density functional theory (DFT) to assess how

changes in catalyst structure affect the adsorption strength of key intermediates and, ultimately, the catalytic efficiency. The findings of this study indicate that both MoP structures exhibit lower overpotentials for H_2O_2 formation compared to the four-electron ORR pathway. Notably, the hexagonal-columnar structure demonstrates enhanced selectivity due to its favorable OOH adsorption, as revealed by crystal orbital Hamilton population (COHP) and density of states (DOS) analyses. These analyses highlight significant bonding interactions between phosphorus in MoP and oxygen in OOH. These theoretical findings were further validated by experimental tests, confirming that the hexagonal-columnar structure outperforms the planar variant in terms of H_2O_2 selectivity. The insights from this study underscore the potential of structural engineering to optimize green oxidant production, with broader implications for the development of efficient and environmentally friendly H_2O_2 synthesis methods.

[P17-4]

네킹의 곡률을 활용한 재료의 변형률 속도 민감도 측정: 고태영, 권지혜, 구강희, 김형섭* (포항공과대학교)

Keywords: 유한요소해석, 변형률 속도 민감도, 일축인장시험, 네킹

본 연구는 금속 재료의 일축 인장 시험 시 나타나는 네킹(Necking)의 곡률을 기반으로 재료가 지니는 변형률 속도 민감도(Strain rate sensitivity, SRS)를 측정하는 방법에 대하여 논한다. SRS의 값이 큰 재료는 네킹 발생 이후에도 하중이 가해짐에 따라 파단이 발생하지 않고, 곡률이 점차 커지면서, SRS의 값이 작은 재료보다 파단 시점이 느리게 나타난다. 이러한 SRS는 전통적으로 변형률 점프 시험이라는 과정을 통해 시험 장비를 이용한 반복적 실험을 통해 측정하고 있지만, 이는 과정이 복잡하며 온도 설정, 기기를 다루는 방식에 따른 오차가 발생할 수 있다는 문제가 존재한다. SRS의 값이 재료의 네킹 이후 변형률-응력 곡선 길이에 영향을 미친다는 사실은 활용되고 있지만, 실질적으로 네킹의 변형 정도와 SRS 사이의 연관성에 대한 연구는 진행된 바가 없다. 본 연구에서는 다른 SRS를 가지는 visco-plastic material의 일축인장 시험을 유한요소해석으로 진행함으로써, SRS와 네킹의 곡률 사이의 연관성에 대해 확인하였다. 더 나아가, 변형률 점프 시험을 통해 측정한 SRS의 값과의 비교 결과를 기반으로, 네킹의 곡률에 기반한 측정법의 우수한 정확도 또한 논하였다.

[P17-5]

나노 압입 시험을 통한 결정립 국부변형거동 측정과 CP-FEM을 활용한 인장 물성 예측 연구: 신선호, 성효경* (국민대학교), 하상렬 (명지대학교)

Keywords: Nanoindentation, EBSD, Crystal Plasticity, Finite Element Method

최근 다양한 인공지능(AI) 모델이 개발되면서, 인공지능을 활용한 합금 설계가 활발히 연구되고 있다. 이를 위한 데이터베이스 구축은 핵심적이며 필수적인 과제 중 하나이다. 그러나 다양한 합금 소재의 물성 확보를 위해 인장 시험을 수행하는 것은 상당한 시간과 비용이 소요된다. 이에 대한 대안으로 비커스 경도(Vickers Hardness) 시험이 활용되기도 하지만, 이는 소재의 표면 특성만을 평가할 수 있어 소재의 벌크 물성을 정확하게 설명하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 나노 압입 시험을 활용하여 소재의 국부적인 기계적 물성과 변형 거동을 측정하고, 후방산란전자회절(Electron Backscattered Diffraction, EBSD) 기반의 방위 이미징 현미경(Orientation Imaging Microscopy, OIM)을 통해 결정립 수준에서의 방위에 따른 변형 거동 및 물성을 분석하였다. 일반적으로 나노 압입 시험을 이용한 탄성 계수 측정에는 헤르츠 접촉 모델(Hertzian Contact Model)이 적용되는데, 본 연구에서는 접촉 초기점(Zero-Point) 보정을 수행하여 나노 압입 시험을 통해 얻어진 전 구간에서의 강성 데이터를 신뢰성 높은 기계적 특성 값으로 변환하였다. 뿐만 아니라, 특정 방위에서의 국부적 변형 거동 데이터에 결정소성 유한요소법(Crystal-Plasticity Finite Element Method, CP-FEM)을 적용하고 모델링하였다. 이를 통해 미세조직 방위 관찰과 나노 압입 시험을 결합하여 다결정 금속 소재의 벌크 강도를 예측할 수 있는 방법론을 제시하고자 하였다. 본 연구에서 제안하는 방법론은 기존의 전통적인 인장 시험을 대체하거나 보완할 수 있는 가능성을 지니며, 합금 소재의 물성 데이터베이스 구축 과정에서 시간과 비용을 포함한 다양한 제약을 해결할 수 있는 효율적인 접근법이 될 것으로 기대된다.

[P17-6]

First-Principles Studies of the Stability, the Electronic Properties and the Optical Properties of the TiB_2(0001)/TiN(111) Interfaces: Seon Young Jeon and Won June Kim* (Changwon National Univ.)

Keywords: First-principles calculation, TiB_2(0001)/TiN(111) Interface, Stability, Electronic properties, Optical properties

Ultra-high-temperature ceramics (UHTCs) are regarded as potential solar-absorbing materials for sustainable energy resources. Recently, research has been extensively conducted on multilayer film structures utilizing UHTC materials. When multilayer UHTC films are exposed to light, the difference in refractive indices between materials causes multiple reflections at the interfaces, leading to destructive interference that enhances light absorption in the main absorption layer. In such multilayer configurations, therefore, the bottom layer generally serves as the main absorption layer with strong metallic properties, while the upper layers exhibit lower metallicity and refractive indices. Among diverse combinations of UHTCs for multilayer structure, titanium diboride (TiB_2) has been experimentally demonstrated to exhibit superior absorption efficiency when it deposited with titanium nitride (TiN) layer compared to a single-layer TiB_2. However, its theoretical studies on the structural and electronic properties of TiB_2/TiN multilayer are insufficient yet. In this study, we employed first-principles calculations not only to investigate the atomic-scale structural stability and electronic properties of TiB_2/TiN interfaces, but also to predict their optical properties. The surface and interfacial energy showed that the most stable configuration of TiB_2/TiN interface are formed when Ti-terminated TiB_2 and N-terminated TiN surfaces are bonded together. Through the electronic structure analysis, Ti-terminated TiB_2 surface showed the strong metallic character, while the N-terminated TiN

surface showed lower metallic character, resulting the large differences in refractive indices. Additionally, the calculated absorption coefficient demonstrated that TiB_2 exhibits the higher absorption efficiency compared to TiN in the surface model, contrary to the bulk results. The reflectance analysis confirmed that the improvement of the optical selectivity of TiN surface, compared to its bulk state, leads good optical selectivity of whole TiB_2/TiN interface. This study provides a comprehensive analysis of relationship among structural stability, electronic properties, and optical properties, of TiB_2/TiN multilayers, serving as a new guideline for theoretically analyzing the optical properties of multilayer films applying solar-absorbing materials.

[P17-7]

First-Principles Studies on the Ferroelectric Switching of Hafnia: Effect of Oxygen Vacancy and Nitrogen Defects: Inhwan Oh and Won June Kim* (Changwon National University)

Keywords: hafnia, ferroelectricity, switching energy barrier, nitrogen doping, oxygen vacancy

Ferroelectric hafnia (HfO_2) has attracted considerable attention as a potential material for next-generation memory device due to its robust ferroelectric polarization even in ultrathin films. However, the metastable nature of ferroelectric phase and relatively high polarization switching energy compared to conventional ferroelectrics still limits the practical applications of HfO_2 for high-speed memory devices. To overcome this limitation, many experimental studies have focused on the effect of doping elements to the ferroelectric properties of hafnia. Among them, nitrogen doping has been reported to suppress oxygen vacancy migration and stabilize the ferroelectric phase. Nevertheless, the impact of nitrogen doping on polarization switching mechanism is still not unveiled. In this study, we employed first-principles calculations and climbing nudged elastic band (CI-NEB) method to investigate the effects of oxygen vacancy and nitrogen doping to the polarization switching energy in HfO_2. Our results revealed that the co-substitution of oxygen vacancies with atomic or molecular nitrogen reduces the polarization switching energy. Our results suggest a promising route to lowering operating voltages and power consumption in hafnia-based next-generation memory devices.

[P17-8]

Effect of Lattice Distortion on Hydrogen Diffusion in Hydrogen Storage Alloys : An atomistic simulation study: Ji-Su Lee and Byeong-Joo Lee* (POSTECH)

Keywords: Hydrogen storage alloys, molecular dynamics, machine learning potential, lattice distortion, diffusion

Hydrogen, with its abundant availability and eco-friendly properties, is emerging as a next-generation energy carrier. Therefore, the development of efficient hydrogen storage and transportation technologies is essential. Among metal hydrides, Ti-Mn-based alloys have attracted attention due to their fast hydrogen absorption kinetics, good reversibility, and stable operation at low temperatures. In metal hydrides, hydrogen diffusion plays a crucial role in determining hydride formation rates, and previous studies have emphasized the correlation between lattice distortion and hydrogen diffusion. Since lattice distortion is significantly influenced by composition and elemental distribution, a systematic investigation of the Composition–Structure–Property-Relationship in hydrogen storage alloys is necessary. In this study, molecular dynamics (MD) simulations were employed to elucidate the effect of lattice distortion on hydrogen diffusion behavior. To perform reliable MD simulations, the development of an accurate interatomic potential is essential. A machine learning potential was developed for the Ti-Mn-H ternary system, effectively reproducing the properties of Ti-Mn alloys. We analyzed how hydrogen diffusion behavior is influenced by lattice distortion in structures with different compositions and atomic arrangements using the developed machine learning potential.

[P17-9]

A Computational Study of Copper Phthalocyanine as an Effective Catalyst for Li-CO_2 Batteries: Huncheol Seo and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

Keywords: Li-CO_2 battery, Electrolyte catalyst, Copper phthalocyanine, DFT calculation

Li-CO_2 batteries produce power by employing ambient CO_2 as the active component at the cathode while using lithium for the anode, attracting considerable attention as an innovative energy storage technology. During operation, lithium ions migrate between the electrodes through the electrolyte, driving the charge–discharge cycle. The use of gaseous CO_2 not only overcomes raw material limitations but also dramatically enhances energy density. Moreover, by capturing CO_2, Li-CO_2 systems offer a promising strategy to mitigate climate change, with the electrochemically driven formation of Li_2CO_3 enabling the recycling of lithium resources. Despite these advantages, the practical application of Li-CO_2 batteries is limited by sluggish reaction kinetics and significant cell polarization. To address the limitations of Li-CO_2 batteries, previous studies demonstrated that manganese phthalocyanine (MnPc) effectively enhanced reaction kinetics and reduced overpotential by stabilizing CO_2 radical intermediates. Motivated by these insights, we explored copper phthalocyanine (CuPc) as a potential alternative by replacing manganese with copper and investigated its effectiveness in enhancing Li-CO_2 cell performance. Our DFT calculations suggest that during discharge, CuPc stabilizes the $CO2^{*-}$ intermediate, promoting its transformation into Li_xCO_2 species through a directed electron transfer from the copper center to its ligand. This process lowers the overpotential and improves reaction reversibility. Our findings provide a deeper understanding of the catalytic function of CuPc and contribute to the advancement of carbon-negative energy storage technologies.

[P17-10]
Exploring the Possibilities of Pt Nanostructure Size for Enhanced Oxygen Reduction Reaction Efficiency: seokho lee, Seohee Jang, Yeonwoo Do, Janghyeon Oh, and Kihyun Shin* (Hanbat national university)
Keywords: Nanoparticles, Fuel Cell, Pt, ORR, DFT

The efficient development of catalysts for fuel cell cathodes plays a crucial role in advancing fuel cell technology. In this study, we utilized platinum (Pt), renowned for its high catalytic activity, and synthesized octahedral (Oh), cubo-octahedral (COh), and icosahedral (Ih) structures. We investigated how variations in their sizes affect the catalytic activity for the oxygen reduction reaction (ORR). We introduced O, OH, and OOH intermediates at three primary sites (vertex, edge, face) to understand the relation between activity and specific site. Based on these analyses, we conducted comparative studies of various Pt nanoparticles (NPs) in terms of size and structure to identify optimal catalysts that effectively enhance the ORR reaction rate. This research underscores the potential of size control in improving ORR catalytic activity and provides crucial foundational data for the design of high-performance fuel cell cathodes.

[P17-11]
Enhanced Oxygen Evolution Reaction Performance of Co_4N via Al and Sn Substitution: A DFT Study ; Minhyeok Choi (Hanyang University ERICA), Myeongjin Kim* (Kyungpook National University), and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)
Keywords: Co_4N, OER, DFT(Density Functional Theory)

The production of hydrogen via water electrolysis is critical for advancing sustainable energy solutions, offering a clean and renewable hydrogen source. The oxygen evolution reaction (OER) is central to this process, but its efficiency is hindered by a significant energy barrier. While Ru catalysts are known to exhibit outstanding OER performance, the high cost limits their practical application on a large scale. This has prompted the development of alternative catalysts that can deliver comparable or enhanced performance at a lower cost. Transition metal nitrides (TMNs) have gained attention as potential candidates because of their capacity to modulate the d-band center, thereby enhancing catalytic activity in electrochemical processes. Among them, Co_4N stands out for its metallic characteristics and high electrical conductivity, showing promising potential. In this study, we enhanced the electrochemical properties of Co_4N by doping Al and Sn into the Co sites. To avoid affecting the magnetic moment of Co, Al and Sn were selected from p-block metals, with Al having a smaller atomic radius and Sn a larger one. This substitution was designed to induce variations in the bond length within Co_4N, thereby influencing its structural and electronic properties. DFT calculations revealed that $AlCo_3N$ and $SnCo_3N$ exhibit significant modifications in their electronic structures compared to Co_4N, which may lead to improved OER performance by optimizing both thermodynamic and kinetic properties. These findings suggest that doping Co_4N with Al and Sn is an effective strategy for enhancing its catalytic efficiency, making it a strong candidate for OER applications in water electrolysis.

[P17-12]
Pathway Analysis and Catalyst Design for Coke Mitigation in Dry Reforming of CH_4 and C_2H_6 ; Chaehyeon Moon and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)
Keywords: Dry reforming, Single Atom Catalysts(SACs), Density Functional Theory (DFT), Coke mitigation

Consumption of fossil fuels has increased, and greenhouse gases are being emitted continuously. Methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2), which are representative greenhouse gases, have led to severe environmental issues like global warming. Dry reforming of methane (DRM) reaction produces syngas (CO and H_2) through the reaction of CH_4 and CO_2. It is considered an effective strategy to diminish greenhouse effect. Syngas serves as a valuable feedstock for the synthesis of various chemicals and H_2 is in the spotlight as a future energy source. However, the DRM reaction faces a significant challenge due to coke formation on the catalyst surface caused by carbon deposition (C*). To mitigate this issue, extensive research has been conducted on single-atom catalysts (SACs) to prevent the formation of coke by inhibiting the accumulation of C* species on the catalyst surface. In this study, we considered not only Ni SAC but also Ni clusters such as Ni_4 and Ni_6, recognizing the possibility that Ni may not always exist as isolated atoms on the support. Adsorption energies of intermediates were analyzed on these catalysts to evaluate their coke resistance. Our calculations revealed that the Ni_4/Al_2O_3 catalyst, with four Ni atoms on the support, exhibited a higher energy barrier for carbon formation, effectively suppressing coke deposition. Furthermore, this study extended the investigation from CH_4 (C_1 molecule) to C_2H_6 (C_2 molecule), as C_2 species are commonly present alongside CH_4 in natural gas. By exploring the reaction pathways and identifying key intermediates for C_2H_6 conversion, we identified the intermediates included in the most favorable reaction pathways. The adsorption energy calculation to mitigate coke formation was performed on the corresponding intermediates. An optimal catalyst was identified to suppress coke formation during the C_2H_6 reforming process, providing valuable insights for the development of stable catalysts for DRM and beyond.

[P17-13]
Enhancing Lithium Metal Battery Performance: Investigating the Role of Oxygen-Rich Nanodiamonds in Suppressing Dendrite Formation Using Density Functional Theory: Dongkyung Kim, Won Cheol Yoo*, and Byung-Hyun Kim* (Hanyang University ERICA)

Keywords: LMBs (Lithium metal batteries), ASEI (Aritificial solid electrolyte interphase), NDs (Nanodiamonds) , DFT (Density Functional theory)

Lithium metal batteries (LMBs) are considered one of the next generation battery technologies due to their advantages such as high energy density, small battery volume and fast charging. However, when lithium metal is unevenly deposited to form dendrites during charging and discharging, problems such as short circuit and shortened battery life occur. As a method to address this issue, nanodiamonds (NDs) with excellent mechanical strength and insulating properties can be incorporated into an artificial solid electrolyte interphase (ASEI) layer to suppress dendrite formation. Notably, the oxygen-rich modified NDs (O-NDs) exhibit lithiophilic properties, which further enhance the performance and stability of LMBs. However, the influence of these ND surface properties on the electrochemical performance and long-term stability of LMBs has not been sufficiently investigated. In this study, the effect of surface oxygen content on the performance of lithium metal batteries (LMBs) is evaluated by comparing oxygen-rich nanodiamonds (O-NDs) and reduced surface nanodiamonds (r-NDs). Oxygen-rich nanodiamonds (O-NDs) exhibit increased lithiophilicity and enhanced lithium-ion flux, thereby improving the performance and stability of LMBs compared to reduced surface nanodiamonds. To investigate the changes in lithiophilicity with respect to the surface oxygen content, we calculate the lithium adsorption energies on the surfaces using density functional theory (DFT) and assess the energy barriers, providing a detailed analysis of the surface properties of NDs. The results of this study confirm that an increase in the oxygen content on the nanodiamond surface enhances the adsorption strength of lithium ions, thereby significantly contributing to their surface adsorption. The ease of lithium-ion adsorption on the surface reduces the nucleation overpotential, allowing for uniform lithium deposition, thereby improving LMB performance. In addition, when the surface of nanodiamonds is oxygen-rich, the diffusion energy barrier is lower compared to when there is less oxygen, suggesting enhanced lithium-ion flux in O-NDs. These results are in good agreement with experimental data and indicate that O-NDs outperform r-NDs in enhancing LMB performance.

[P17-14]

Fully-Coupled Simulation of Bipolar Filamentary Resistive Switching by Phase-field and Electrothermal Models: Jinwoo Oh, Dongmyung Jung, and Yongwoo Kwon* (Hongik Univ.)

Keywords: Resistive memory, Conductive filament, phase-field simulation

The most challenging part of the device simulation of resistive memory is dealing with the behaviors of the conductive filament (CF). In the case of bipolar switching by valence-change mechanism, the evolution of the CF is determined by the formation, annihilation, and migration of anion vacancies in the switching material which is usually a transition metal oxide. Here, it was experimentally confirmed that by restricting the filament switching material used for information storage to a narrower region, the variability of the device decreased. In this study, we simulated the forming process for three models with different sizes of HfO_2. The phase-field and electrothermal models are coupled in a finite-element package, COMSOL Multiphysics. The central advantage of our model over other device simulations is that our model can predict the shape of the CF for different physical conditions including material properties, device architecture, initial defect configuration, and bias conditions. A CF area is not pre-defined. Our results have shown a significant variability improvement in RRAM for the self-aligned model.

P18 : 이차전지 원료소재
Room 3층 로비, 4월 24일

[P18-1]
Lithiophilic Metal-Coated Mesoporous Graphite for Enhanced Stability and Performance in Lithium-Ion Battery Anodes: Yehui Kim (Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Junghoon Yang (Korea Institute of Industrial Technology), Soongju Oh (Korea University), and Dong-Hyun Kim* (Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: Lithium-Ion Battery, Anode, Mesoporous graphite, Lithiophilic Metal

The increasing demand for lithium-ion batteries (LIBs) is driven by the rapid growth of Electric Vehicles (EVs) and energy storage systems (ESS). LIBs require high energy density, long cycle life, and superior charge-discharge performance, with the anode material playing a crucial role in determining battery lifespan and charging speed. Graphite, the conventional anode material, suffers from structural instability and surface degradation during lithium-ion insertion, leading to performance deterioration. To address these limitations, this study proposes mesoporous graphite with a pore size of 2–50 nm to enhance the material's lithium accommodation capacity. The mesoporous structure is expected to mitigate volume change-induced stress during charge-discharge cycles, thereby extending the lifespan of the electrode. Additionally, its relatively high specific surface area can increase energy density, reduce local current density, and enhance lithium-ion reactivity. Furthermore, to overcome the low lithium storage capacity of graphite, lithiophilic metal coatings were introduced. These coatings not only increase the specific surface area but also improve lithium mobility, reduce nucleation overpotential, and lower interfacial resistance, thereby mitigating dendritic growth and enhancing long-term stability. To verify these improvements, mesoporous silica-templated graphite was synthesized, and lithiophilic metals were coated onto its surface via a solution-based reduction method using metal salts under agitation. The fabricated materials were assembled into half-coin cells and subjected to various electrochemical evaluations, including: Discharge capacity measurements under different C-rates, charge-discharge Coulombic efficiency (CE, %), capacity retention rate (CRR, %), voltage profile analysis, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), long-term cycling stability tests. Additionally, morphological and structural characterizations such as scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) mapping, and X-ray diffraction (XRD) were performed to confirm metal coating states and particle sizes. The results were compared with natural and artificial graphite in terms of battery cycling stability and overall performance enhancement. This study is expected to overcome the challenges associated with volume expansion and dendritic growth in LIB anodes, contributing to the development of next-generation anode materials with enhanced stability and performance.

[P18-2]
리사이클 실리콘 음극의 바인더 전해질 최적화 및 Mg 영향 평가: 이효연, 네르시시얀 하이크 (충남대학교), 정경진 (주식회사 시리에너지), 이종현* (충남대학교)
Keywords: 이차전지, 음극, 실리콘, 마그네슘

리튬이온 배터리 음극 소재로 실리콘은 높은 이론용량을 가지지만 충·방전 과정에서 부피 팽창으로 인한 기계적 불안정성이 문제로 작용한다. 이와 더불어 실리콘의 저가 생산 공정개발은 이차전지 산업 활성화를 위해 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 산업 폐기물로부터 리사이클 실리콘을 이용한 음극 개발을 진행하여 상용화 가능성을 평가하였다. 바인더 및 전해질 조합이 음극의 전기화학적 성능에 미치는 영향을 평가하고 실리콘 제조 과정에서 잔류 마그네슘 불순물의 존재 유무에 따른 음극 특성 변화를 대칭셀을 이용하여 분석하였다. 충방전 실험 완료 후 전극 표면에서의 성분 및 형상변화를 XPS, SEM 등을 활용하여 분석하고 고찰하였다. 본 연구를 통해 리사이클 실리콘 음극의 전기화학적 특성을 평가하고저가 실리콘 음극의 실용화 가능성을 제고하는 데 기여하고자 한다.

[P18-3]
EoL LIB 황산 침출액 중 유가금속의 일괄 전해 기초연구: 하류, 강영조* (동아대학교), 류지훈 (에바싸이클)
Keywords: 리튬이온배터리, 폐배터리 재활용, 유가금속 회수, 황산침출, 전해환원

전기 자동차 시장의 폭발적인 성장으로 리튬 이온 배터리 (LIB) 의 생산량이 크게 증가하면서 공정 스크랩이나 End-of-Life (EoL) 배터리에서 유가금속을 효과적으로 회수하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 폐 LIB의 황산 침출 후 침출 액 내 Ni, Co, Mn 등 유가금속을 용매 추출을 통해 분리할 수 있는데, 각 원소에 적합한 용매가 개별적으로 사용할 필요가 있고 공정 단계도 복잡하다. 이에 본 연구는 황산 침출액 중 유가금속을 전해환원을 이용하여 일괄적으로 회수하고자 하였다. 이때 전해환원된 금속은 일괄적으로 황산에서의 용해 효율이 낮다고 알려져 있으므로 본 연구는 일괄로 증착된 합금의 형태를 제어하고, 이를 통해 황산화 효율을 향상시킬 수 있는 가능성을 조사하는 것을 목표로 하며 전류 밀도, PH 등의 영향을 고려하여 유가금속 회수 및 황산화 효율을 극대화할 수 있는 최적의 조건을 도출 하고자 하였다.

[P18-4]

메탄술폰산계 심층 공융 용매를 이용한 양극활물질 침출: 김유진 (서울과학기술대학교), 카인와이진, 김재연 (한국재료연구원), 변재원* (서울과학기술대학교)

Keywords: 심층 공융 용매, 배터리 재활용, 리싸이클링, 양극재, 메탄술폰산

최근 지속 가능한 양극활물질 재활용 기술이 필요함에 따라 이온성 용매(Ionic Liquind, IL) 및 심층 공융 용매(Deep Eutectic Solvent, DES) 등 친환경 용매가 주목받고 있다. 심층 공융 용매는 이온성 액체와 비슷한 물리적 성질을 가지면서도 이온성 액체에 비해 물에 대한 비활성, 저렴한 가격, 무독성 등의 장점으로 주목받고 있다. 하지만 심층 공융 용매는 일반적으로 높은 녹는점을 가지며, 높은 녹는점은 높은 점도를 야기해 용매를 액상으로 유지하기 위한 에너지 소비를 증가시킨다. 또한 높은 점도는 용액의 혼합, 여과 등을 어렵게 하여 공정 효율성을 감소시키며, 물질전달 속도를 감소시켜 양극활물질의 침출을 저해하는 요인으로 작용할 수 있다. 이를 해결하기 위해 심층 공융 용매를 이용한 침출 공정은 일반적으로 120ºC 이상의 높은 침출 온도를 선택하고 있다. 본 연구에서는 수소결합 공여체(Hydrogen bond donor, HBD)로서 메탄술폰산(Methanesulfonic acid, MSA)을, 수소결합 수용체(Hydrogen bond acceptor, HBA)로서 염화콜린(Choline chloride, ChCl)을 사용하여 적절한 비율로 혼합해 심층 공융 용매를 제조하였다. 메탄술폰산계 심층 공융 용매는 리튬 코발트 산화물(LiCoO2, LCO)로부터 코발트 이온을 선택적으로 침출할 수 있음이 확인되었다. 양극활물질 내 리튬은 잔여물로서 리튬 산화물(Li2O) 형태로 얻어질 수 있다. 또한 메탄술폰산계 심층 공융 용매에 유기화합물을 첨가하여 리튬과 코발트를 모두 침출할 수 있는 침출 시스템이 연구되었다. 이 시스템은 90ºC의 낮은 온도에서도 리튬 99.8%, 코발트 99.1%를 성공적으로 침출할 수 있음이 확인되었다.

[P18-5]

열처리 공정 변수에 따른 전해 동박 특성 영향: 윤태환, 임효균, 윤준서, 강병재, 박일송*, 우태규* (전북대학교)

Keywords: Keywords: Copper foil, Electroplating, Heat treatment, Mechanical properties, Crystal structure

최근 인공지능(AI), 5G 통신 기술의 발전과 함께 플렉시블 스마트폰 및 디스플레이 등의 전자기기 부품에 대한 수요가 증가하고 있으며, 전기차용 배터리팩 수요가 급격히 증가되고 있다. 이러한 첨단 산업에서는 고강도, 고연신 특성을 갖춘 동박이 필수적으로 요구되고 있으며, 고밀도, 경량화 소재에 적용하기 위하여 동박의 두께는 점점 감소하는 추세이다. 전해동박은 Roll to Roll 공정으로 여러 단계를 거쳐 제조가 이루어지고 있다. 이때 기계적 물성이 확보되지 않으면 찢어짐, 주름 및 휨 등의 불량 발생으로 생산이 어려운 상황이다. 따라서 적절한 물성확보를 위한 연구가 절실히 필요하다. 본 연구에서는 전해도금 공정에서 MPSA, PEG, PVP 등 다양한 첨가제를 첨가하여 동박을 제조하였으며, 이때 제조된 동박의 열처리 조건에 따른 기계적 물성 변화를 분석한다. 열처리는 불활성 분위기에서 100~400ºC 조건으로 진행하였고, 결정립 성장과 내부 응력 완화가 기계적 물성 및 전기적 특성 등에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과 특정 열처리 조건에서 결정립 및 조직구조 변화를 통해 연신율과 기계적 강도가 변화됨을 확인할 수 있었다. 또한 열처리에 따른 미세조직 제어가 동박의 전기적 특성에 영향을 주었으며, 표면거칠기 변화에 대한 추가적인 연구의 필요성을 확인하였다. 감사의 글 이 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00410332, 2024년 산업혁신인재성장지원사업). Corresponding author: ilsong@jbnu.ac.kr, goodman@jbnu.ac.k

[P18-6]

전해동박 제조에서 MPSA와 PVP 첨가제의 물성에 대한 주효과 분석: 임효균, 윤태환, 윤준서, 박일송*, 우태규*, 강병재 (전북대학교)

Keywords: 전해동박, 첨가제, MPSA, PVP

전해동박을 제조하는 과정에서 일반적으로 염화이온이 포함된 기본욕에 가속제(광택제), 억제제, 평활제를 첨가하게 되는데 이때 가속제와 평활제의 첨가량에 따른 주효과(Main effect)에 대한 분석을 진행하였다. 평활제인 PVP첨가량은 예비실험을 통하여 인장강도의 최대점인 40 ppm까지 테스트를 진행하였고, 가속제인 MPSA의 경우에도 0-40 ppm 범위에서 테스트를 진행하였다. 조건별 SEM, XRD 장비 및 인장강도 테스트를 통해 표면 상태, 우선성장 방위 및 기계적 특성을 분석하였다. 동일 PVP 첨가량에 대한 MPSA 첨가량의 경우 첨가량이 증가 할수록 표면조도(Rz)가 증가하여 1.32 μm를 나타내었고, 표면에 불균일화가 나타나고 있어 10 ppm의 첨가가 적절하였다. PVP 첨가의 경우 미첨가 대비 표면조도가 감소하였고, 첨가량이 증가하면서 표면조도가 감소하는 경향을 가지고 있다. 그러나 예비테스트에서 PVP 40 ppm을 초과하여 첨가한 결과 표면이 거칠어지는 문제가 있었다. 기계적 특성에 대한 주효과 분석결과 효과가 큰 첨가제는 PVP 첨가제 이며, MPSA 첨가제와의 교호효과(Interaction effect)는 없는 것으로 판단된다. 표면조도에 대한 주효과의 경우 큰 차이가 없으며, 두 첨가제간의 교호효과가 있음을 확인하였다. 감사의 글 이 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00410332, 2024년 산업혁신인재성장지원사업).

[P18-7]

Tailoring Phase Ratios in Partially Ordered Cathode Materials: 김호준, 박상욱, 서동화* (한국과학기술원(KAIST))

Keywords: 이차전지, 양극재, Mn계

With the increasing demand for energy storage, efficient and scalable energy storage solutions is becoming increasingly critical. In lithium-ion batteries (LIBs), cathode materials, which account for the highest price among battery raw materials, must pursue cost-effectiveness with high-performance. Mn-based cathode materials have gained significant attention due to their earth-abundance and favorable cost-performance balance, along with traditional spinel LMO cathodes and next-generation DRX cathodes being actively researched. While spinel LMO cathodes offer excellent rate capability, their low energy density remains a limitation. In contrast, DRX

cathodes provide higher energy density but struggle with rate capability and cycle life. To complement the shortcomings of each material and enhance its strengths, partially disordered spinel-like cathodes have emerged as promising candidates, balancing energy density and rate performance. However, achieving the intended control over phase composition during synthesis remains an unresolved challenge. In this study, we reveal that spinel-to-DRX phase ratio can be controlled by adjusting the lithium content during synthesis in $Li_xMn_2O_4$ composition. Synchrotron X-ray and TEM analyses reveal that despite initial phase differences, cathode materials converge to a specific phase ratio during cycling, emphasizing the importance of optimizing their portion of Li in stoichiometric composition from the outset. Our findings provide valuable insights into the design of Mn-based cathodes and highlight key considerations for effective synthesis methods for tailoring phase ratios in partially ordered spinel-like cathodes.

[P18-8]

Improving the Cyclability of Silicon Anodes for Li-ion Batteries Using Titanium Dioxide Nanosheets: Sol Han, Jeong Yun Hwang*, and Kyu Hyung Lee* (Yonsei Univ.)

Keywords: Li-ion battery, anode material, 2D material, nanostructure

The growing global concern about environmental pollution has made it essential to replace traditional fossil energy. Li-ion batteries (LIBs) are widely recognized as energy storage devices capable of replacing conventional fossil fuels due to their high energy density. However, with the development of electric vehicles, LIBs have encountered their limits. The performance of LIBs is influenced by the interaction of battery components, including cathode, anode, and electrolyte. Among them, anode material has a remarkable effect on the overall performance of the entire battery. Graphite is widely used in LIBs as an anode material, but it has many limits such as poor rate capability, low capacity, etc. So, Si has attracted the attention of many researchers due to its very high theoretical specific capacity (4200mAh/g). However, it has a critical problem in causing significant volume change during charging and discharging. In this study, we suggested the core-shell structure as an anode material in LIBs that Si particles are surrounded by metal oxide with sheet-like nanostructure, titanium dioxide nanosheets (TiO_{2-x} NSs). We expected that 2D TiO_{2-x} NSs structure buffer volume expansion during the charge and discharge process. Our TiO_{2-x} nanosheet has a thickness of 1nm, which is shorter than the mean free path of Li-ion, so Si@TiO_2 NSs can be used as an anode material for LIBs. As a result of the half-cell test, we found a significant improvement in cyclability.

[P18-9]

Optimization of Carbonization Temperature for Enhancing the Electrochemical Properties of Monodisperse Carbon/SiO_2 Anodes in Lithium-Ion Batteries: Kyungin Kim, Xue Dong, Chaeheon Woo, and Jae-Young Choi* (Sungkyunkwan University)

Keywords: Si-based anode, Carbon/SiO2 nanocomposite, Porous materials, Li-ion batteries

Silicon dioxide (SiO_2) is electrochemically inactive and, therefore, cannot be directly utilized as an anode material. Although SiO_2 offers advantages such as cost-effectiveness and excellent cycle stability, its electrochemical activity must be enhanced for practical application in lithium-ion batteries. One effective strategy to achieve this is embedding carbon within the SiO_2 matrix. Nanocomposites of C/SiO_2 synthesized via a simple sol-gel method exhibit a uniform molecular-level distribution of carbon and silica. Following carbonization at 800ºC, the resulting C/SiO_2-800ºC nanocomposite demonstrates a high specific surface area of 480.38 m^2 g^{-1} and improved electrical conductivity. These improvements significantly enhance electrochemical activity and lithium-ion diffusion. Notably, the C/SiO_2-800ºC anode delivers a remarkable reversible capacity of 832.19 mAh g^{-1} after 300 cycles at a current density of 100 mA g^{-1}. These findings highlight the potential of C/SiO_2-800ºC as a promising alternative anode material for lithium-ion batteries.

[P18-10]

Microstructure-Guided Design of Co-precipitated Hydroxide Precursors using Diffusion Model: Changhwan Lee* (POSCO Holdings)

Keywords: Co-precipitation, Precursors, LMR, Diffusion

We present a diffusion-based approach for generating and optimizing the microstructures of co-precipitated hydroxide particles used in lithium-ion battery cathodes. Our method begins with systematic extraction and analysis of key image descriptors (particle size, circularity, texture) across various process conditions. While certain process variables show clear statistical correlations with these descriptors, others exhibit highly non-linear or unclear relationships, motivating the use of a generative diffusion model that directly maps process parameters to particle morphologies. We validate our model by comparing generated images against experimental SEM data, observing close agreement in both qualitative features and quantitative descriptors. Finally, we demonstrate an inverse design workflow that predicts process conditions required to achieve target morphological properties. This data-driven strategy can accelerate the development and optimization of advanced cathode materials by reducing reliance on trial-and-error experimentation.

[P18-11]

수계 아연-이온 전지용 음극재의 Al 첨가에 따른 전기화학적 특성 평가: 곽대영 (한국생산기술연구원), 윤기혁, 안건형 (동국대학교), 한준희 (한국생산기술연구원), 전재열* (한국생산기술연구원)

Keywords: Zinc-Ion Batteries, Anode, Zn-Al alloy, Electrochemical Performance, Microstructure

최근 리튬-이온 전지(Lithium-Ion Battery, LIB) 기반 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS)에서 발생한 화재 사고로 인해 안전성이 높은 전지에 대한 수요가 급증하고 있다. 아연-이온 전지(Zinc-Ion Battery, ZIB)는 수성 기반 전해질을 사용하여 폭발 위험이 없으며, LIB에 비해 높은 안정성과 경제성을 동시에 갖춘 차세대 전지 후보로 주목받고 있다. 그러나, Zn 음극재의 부식과 덴드라이트(Dendrite) 성장 문제로 인해 방전 용량 손실이 발생하며, 가역성이 낮아지는 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해 Zn 음극재의 표면 코팅 및 형상 제어 기술이 활발히 연구되고 있지만, 복잡한 코팅 공정과 계면 저항 증가 문제로 인해 상용화되기 어려운 실정이다. 이에 따라, 후처리 기술을 통한 부반응 억제 대신 소재 자체의 내식성을 향상시키고 덴드라이트 성장을 억제할 수 있는 고내식 Zn-Al 음극재 제조의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 Al을 첨가한 Zn-xAl 음극재 제조 및 첨가 함량에 따른 전기화학적 특성 평가를 수행하였다. 충·방전 실험 결과, Al 첨가에 따라서 방전 용량 및 수명 특성이 개선됨을 확인하였다.

[P18-12]

양극재 폐소성용기의 침출액(Li_2SO_4)으로부터의 수산화리튬(LiOH) 전환 연구: 왕제필*, 김진성, 유주원, 임아진 (국립부경대학교 , BB21 사업단), 박종성, 맹지윤 (국립부경대학교)

Keywords: 양극재 폐소성용기, 리튬침출액(Li_2SO_4), 수산화리튬, 알칼리성 침전제, 수산화바륨

본 연구에서는 양극재 폐소성용기의 침출액(Li_2SO_4)으로부터 침전 및 습식 전환법을 통한 수산화리튬을 제조하는 연구를 진행하였다. 리튬침출액의 성분 분석 결과 Na 이온 251.63 ppm, Al 이온 4026.6 pm, Mg 이온이 1121.6 ppm으로 주요 불순물로 존재하였고, 이를 제거하기 위해 양이온 교환수지 H형(SCR-BH, Mc-08H)을 사용하였다. 수산화리튬 전환 반응을 위해 알칼리성 침전제로 수산화바륨, 수산화칼륨, 수산화칼슘, 수산화스트론튬을 사용하여 침전 및 치환 반응을 유도하였으며, 반응 온도와 몰 비율에 따라 수산화리튬의 전환율과 회수율을 최적화하였다. 수산화바륨을 사용했을 때, 70ºC, [OH]/[Li]=1에서 전환율 98.78%, 회수율 98.86%을 확인하였으며, 최종적으로 분리된 LiOH(aq)은 진공-Ar 분위기의 90ºC 이상에서 24시간 동안 건조하여 LiOH·H2O 분말로 제조하였고 99.8%의 순도를 확인하였다.

P19 : 표면계면
Room 3층 로비, 4월 24일

[P19-1]

STM을 활용한 $Ti_3C_2T_x$ MXene의 표면 및 전자 구조 측정: 윤철환, 노준섭, 박재은, 권순용, 신형준* (울산과학기술원)

Keywords: $Ti_3C_2T_x$ MXene, 주사터널링현미경, 전자 구조

MXene 소재는 전이 금속과 탄소 및 질소와 결합한 2차원 구조의 전자기 차폐재로서 활발히 연구되어왔다. 전자기 차폐에서 전자기파의 반사와 흡수가 중요하며 소재의 전기 전도도, 유전율, 투자율에 영향을 받는다. 전자 기기들의 소형화, 집적화에 따른 전자기 차폐재로서의 성능 개발을 위해 나노 수준에서의 물성 평가가 요구되지만, 아직 충분히 연구되지 않았다. 본 연구에서는 MXene의 표면 및 전자 구조를 주사터널링현미경을 이용해 나노 수준에서 분석하였다. MXene 소재는 전구체의 용액 박리 과정에 의해 표면에 작용기 (-O, -OH, -F)가 존재하게 된다. 고분해능 STM 이미지를 통해 작용기에 따라 영역별로 높이 차이가 있음을 확인하였다. 각 영역에서 dI/dV를 측정했고 전자 구조의 차이를 분석하였다.

[P19-2]

이온결합물질의 표면 이온 탈착 메커니즘: 유동엽, 김요한, 신형준* (울산과학기술원)

Keywords: 표면 점 결함, 결함 생성, 이온결합물질, 주사터널링현미경

표면 점 결함에서의 국소 전자 상태는 전기화학적 활동도를 증가시켜 활성 부위로써 작용, 다양한 화학 반응을 촉진한다. 표면 점 결함을 생성시키는 방법은 다양하게 제시되었으나, 결함 생성을 정밀하게 제어할 수 있는 방법에 대해서는 연구가 필요한 상황이다. 본 연구에서는 주사터널링현미경을 이용하여 이온결합물질의 표면 이온 탈착을 다양한 조건에서 시행하였고 표면 이온 탈착 메커니즘을 제시한다. 또한 전산모사를 통하여 제시한 메커니즘의 이론적 토대를 마련하였다. 본 연구를 통해 다양한 표면 물질에서 표면 이온 탈착 조건을 규명할 수 있을 것이다.

[P19-3]

원자탐침단층촬영법을 활용한 Ni계 고엔트로피 합금의 열처리에 따른 γ-γ' 형성 및 조성편석에 관한 연구: 김유석, 김시현, 박서연, 이규호 (인하대학교), 신원상 (성균관대학교), 김윤준* (인하대학교)

Keywords: High entropy super alloy, γ-γ' ordered phase, Precipitation behavior, Atom probe tomography

Ni계 고엔트로피 합금은 우수한 고온 물성으로 가스터빈, 자동차 엔진 부품 등에 적용 가능한 초내열 합금이다. Ni계 고엔트로피 합금의 고온 기계적 물성은 기존 Ni계 합금과 같이 γ상의 정출과 γ'상의 석출로 형성된 γ-γ' 규칙상에 의해 발현된다. Re와 같은 확산을 억제하는 내화원소를 첨가하는 경우, 석출상 계면에 편석되어 석출상의 조대화를 억제하여 고온 기계적 물성이 증가할 것으로 예상된다. 본 연구는 고특성을 발현을 위해 기존 Ni계 고엔트로피 합금에 Re을 미량 첨가한 합금을 통하여 NiCoFeCrAlRe 성분계를 확립하였으며, 본 연구에서는 고온 기계적 물성에 영향을 미치는 γ-γ' 규칙상의 형성 거동을 규명하고자 하였다. 이를 위해 표 1에 나타난 성분계 소재를 Bridgman 방식의 일방향 응고 장비를 활용하여 4.8(지름)×100 mm(길이)의 봉상 소재로 제작하였다. 일방향 응고 장비의 고온로는 승온 속도 7.7ºC/min로 설정하여 210분간 온도를 상승시켜 최종 1600ºC에 도달한 후 60분 동안 유지한 후 35 μm/sec의 이송 속도로 5cm 만큼 이송하여 일방향으로 응고한 뒤 급냉시켰다. 이 후 응고 시편을 다시 일방향 응고 장비에 장입하여 1300ºC에서 20시간 유지하여 용체화 처리 후 공냉을 진행하였다. 그 후, Box furnace에서 승온 속도 8.0ºC/min로 90분동안 상승시켜 750ºC에 도달한 후 1, 2, 5, 10 및 20 시간 유지한 뒤 공냉시켰다. 열처리 시간 별 γ-γ' 규칙상 형성 거동 차이를 규명하기 위하여 광학현미경과 전자현미경의 EDS, EBSD를 활용하여 규칙상의 형상 및 조성 편석을 비교 분석하였다. 또한, 원자탐침단층촬영법 분석을 활용하여 클러스터 및 계면 내의 원자 분포, 구체적인 석출상 형성 거동에 대해 분석을 진행하였다. <표 1> 합금 조성표 성분 Ni Al Co Cr Fe Ti Nb Mo W Re 원자량 (at%) 47.07 16.90 8.90 7.40 10.20 5.80 1.20 0.90 0.41 1.23

[P19-4]

Study on Hydrophilic/Hydrophobic Conversion Mechanism on TiO_2 Surface via Graphene Transfer: YunJin Kim, Soosang Chae* (Korea University of Technology and Education),So Rim Lee, and Taeil Lee* (Gachon University)

Keywords: TiO_2, switching wettability, ultraviolet

Titanium dioxide (TiO_2) has been utilized as an important material in various fields such as environmental purification, self-cleaning surfaces, and solar energy conversion due to its excellent photocatalytic properties and chemical stability. Meanwhile, graphene has been reported as a material with excellent chemical stability, UV transparency, and wet transparency. In this study, after transferring graphene onto the TiO_2 surface, the hydrophilicity/hydrophobicity conversion mechanism of the TiO_2 surface according to UV irradiation was investigated using contact angle measurements, surface roughness analysis, and Raman spectroscopy. Next, the possibility of using the TiO_2 thin film as a photocatalyst was evaluated by performing a methyl orange dye degradation experiment. In addition, the TiO_2/graphene pattern was formed through the graphene transfer process using a mask, and UV irradiation enabled the wettability of the TiO_2 surface to be controlled. The results of this study are expected to be utilized in various applications that require a patterned surface with mixed superhydrophobicity and superhydrophilicity, and further contribute to the advancement of surface material engineering technology.

[P19-5]

Characterization of Oxide Layer Formation under Accelerated Corrosion Conditions with Na-EDTA Assistance: Sang-Hun Lee, Mansoo Choi, Wang-Kyu Choi, Seon Byeong Kim, Byung-Seon Choi, and Seung Joo Lim* (Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: Corrosion, Oxide film, Stainless steel, Na-EDTA, Decontamination

The chemical decontamination of the primary coolant loop in nuclear power plants is a crucial process during shutdown, aimed at reducing radiation fields around the reactor core and minimizing radation exposure for maintenance personnel. Radioactive nuclides accumulate within the oxide layer formed on the internal surfaces of the loop system, which primarily consists of Fe, Cr, and Ni oxides-key components of materials such as stainless steel, carbon steel, and Ni-based alloys. Since these oxide layers serve as hosts for activated corrosion products and radionuclides, their effective removal is essential for lowering system radiation levels. To achieve efficient oxide layer dissoulution, a decontamination technique that selectively dissolves the oxide film while minimizing damage to the base metal is required. However, simulating the oxide layer found in the primary system presents a challenge, as these layers form over extended periods under high-temperature and high-pressure conditions. Therfore, it is necessary to accelerate the formation of corrosion oxide films under controlled conditions. In this study, oxide films were prepared under various corrosion conditions, including temperature, time, and Na-EDTA coecnetration to simulate accelerated corrosion. Their characteristics were evaluated to determine the optimal parameters for oxide layer formation. The findings provide valuable insights into the controlled accelearation of oxide film growth, contributing to the development of more effective chemical decontamination strategies in nuclear power plants.

[P19-6]

Eco-Friendly and Sustainable Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes from CO_2 via Fluidized Bed CVD: Hyeri Cho, Seung Hyun Nam, and Dong Young Kim* (Korea Carbon Industry Promotion Agency (KCARBON))

Keywords: Carbon dioxide, single-walled carbon nanotube, chemical vapor deposition, fluidized-bed, pore Structure

With the growing global interest in carbon neutrality, research on carbon capture, utilization, and storage (CCUS) has been actively conducted. In particular, the technology of converting industrially emitted CO_2 into high-value materials such as single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) offers not only economic advantages but also an environmentally friendly synthesis approach. This process follows a step-by-step approach, in which stable CO_2 molecules are decomposed and converted into hydrocarbons, which are subsequently used to synthesize SWCNTs. Since this process involves controlling various parameters such as catalyst nucleation and water vapor capture, it is a highly complex chemical process. In this study, we investigated a fluidized bed chemical vapor deposition (CVD) method for converting CO_2 into high-value SWCNTs using Ni/Al_2O_3-based catalysts for CO_2 decomposition and Fe/Al_2O_3-based catalysts for SWCNT growth. The Ni/Al_2O_3 catalyst/support structure facilitated the conversion of CO_2 into methane, which was then utilized for SWCNT growth using a Co/Al_2O_3 catalyst. The physicochemical properties and structure of the SWCNTs synthesized from CO_2 conversion were analyzed using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), high-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM), Raman spectroscopy, and thermogravimetric analysis (TGA). Additionally, the pore structure parameters of the SWCNTs were determined using the high-resolution αs-plot method combined with the Subtracting Pore Effect approach, while micropore and mesopore size distributions were analyzed using the Horvath-Kawazoe and Barrett-Joyner-Halenda methods, respectively. The CO_2 conversion results demonstrated that SWCNTs were successfully synthesized using the Fe/Al_2O_3-based catalyst. FE-SEM and HR-TEM analyses revealed that the synthesized SWCNTs had diameters in the range of 1–3 nm. Furthermore, Raman spectroscopy and nanopore analyses confirmed that the SWCNTs synthesized from methane exhibited similar physicochemical properties to those derived from CO_2, demonstrating the competitiveness of this conversion process.

[P19-7]

Highly Selective Synthesis and Nanoporosity Analysis of Double-Walled Carbon Nanotubes via Fluidized Bed Chemical Vapor Deposition: Seung Hyun Nam, Hyeri Cho, and Dong Young Kim* (Korea Carbon Industry Promotion Agency (KCARBON))

Keywords: Double-walled carbon nanotube, micropore, mesopore, pore structure, chemical vapor deposition

In this study, double-walled carbon nanotubes (DWCNTs) with over 85% double-wall structure selectivity were successfully synthesized using a Fe/Al_2O_3-supported catalyst via fluidized bed chemical vapor deposition (FBCVD). Unlike previous studies on single-walled carbon nanotube (SWCNT) synthesis, this study focused on optimizing catalyst design and synthesis conditions to achieve stable double-walled structures. The physicochemical properties of the high-yield DWCNTs were analyzed using high-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM), field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM), Raman spectroscopy, and thermogravimetric analysis (TGA). HR-TEM and FE-SEM were used to precisely measure the outer and inner diameters as well as the interlayer distance, while Raman spectroscopy was employed to evaluate crystallinity and structural characteristics. Additionally, carbon yield was determined via TGA to assess catalyst performance. To further characterize the adsorption properties of the synthesized DWCNTs before and after purification, nitrogen adsorption-desorption measurements were conducted at 77K. From these measurements, the Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area, pore structure, and pore volume were evaluated. The results indicated that the synthesized DWCNTs exhibited an average outer diameter of approximately 2.6 nm, an average inner diameter of

approximately 1.9 nm, and an interlayer distance of approximately 0.35 nm. These values suggest that the synthesized DWCNTs maintain high uniformity and crystallinity, comparable to previously reported DWCNTs. Furthermore, structural analysis revealed that DWCNTs exhibited a low degree of bundling, resulting in a more individualized structure with high specific surface area and mesoporous properties. Such mesoporous structures facilitate enhanced adsorption and ion transport, making them highly promising for a variety of applications. In particular, the high surface area and pore volume of the synthesized DWCNTs suggest their potential applicability in high-performance electronic materials such as supercapacitors and next-generation energy storage devices.

[P19-8]

Tunable Nanoporosity in Single-Walled Carbon Nanotube Assemblies via Interfacial Engineering: Dong Young Kim* (Korea Carbon Industry Promotion Agency (KCARBON))

Keywords: Single-walled carbon nanotube, chemical vapor deposition, pore structure, micropore, mesopore

Single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) were synthesized using catalytic chemical vapor deposition (CVD) with an Fe-based supported catalyst. The residual catalyst and support materials in the synthesized SWCNTs were removed through an HCl purification process, which effectively increased the carbon yield to approximately 96 wt%. The removal of the MgO-based catalyst support during purification led to a significant increase in the specific surface area (SSA) to 940 m^2/g and the total pore volume to 2.7 mL/g. The acid-treated SWCNT network assembly exhibited a highly developed mesoporosity structure with a significantly increased outer surface area. This mesoporosity characteristic plays a crucial role in maintaining high SSA and pore volume, enhancing the applicability of SWCNTs in various fields. In particular, the nanoporosity of SWCNTs serves as a critical physical and chemical factor in applications such as supercapacitors, lithium-ion batteries, catalyst supports, gas storage, and sensors. Therefore, precise characterization and control of SWCNT pore structures is considered a key research area for future nanotechnology applications. The structural properties of SWCNTs were systematically characterized using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), thermogravimetric analysis (TGA), and Raman spectroscopy. Additionally, nitrogen adsorption-desorption measurements at 77K were conducted to investigate the nanoporosity of the SWCNT network. In particular, the pore structure evolution induced by HNO_3/H_2SO_4 treatment was systematically analyzed. Acid-treated SWCNTs exhibited an increase in micropores due to nanotube aggregation and a slight decrease in mesopores, indicating that mesoporosity remained dominant in the overall structure, playing a crucial role in the SWCNT network's performance. These findings were further examined by comparing the nanoporosity variations in SWCNTs synthesized using different methods, including fluidized-bed CVD, HiPco process, laser ablation, arc discharge, and floating catalyst techniques. The results clearly distinguished the differences in SWCNT pore structures depending on the synthesis method. Furthermore, the study demonstrated that acid treatment with HNO_3/H_2SO_4 serves as a key factor not only in controlling SWCNT crystallinity but also in effectively tailoring the nanoporosity structure.

[P19-9]

분말 표면 코팅을 통한 고 기능성 표면 특성 구현 ; 황세훈, 정다운, 이호년* (한국생산기술연구원)

Keywords: Magnetron sputtering, Powder, Core-shell, Coating, PVD

분말 소재는 전자통신, 생명공학, 센서, 분말야금, 촉매 등 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 그 응용 분야가 점차 늘어나고 있는 추세임. 최근에는 전자파 흡수체, 전지용 양극 소재로 널리 사용되고 있으며, 의료용 생체재료로 많은 연구가 진행되고 있음. 분말 코팅 기술은 분말 소재 표면에 다양한 소재를 코팅하여 다기능화와 새로운 성능을 구현할 수 있으며, 분말 소재의 한계와 문제점을 보완할 수 있음. 분말 표면을 코팅하는 방법으로는 무전해 도금, 원자층 증착(ALD) 등이 있으나, 단점이 있어 쉽게 적용하기 어렵다. 무전해 도금의 경우 코팅층 내부의 불순물로 인해 고순도 코팅막을 얻기 어렵고, ALD는 증착 속도가 매우 낮아 두꺼운 금속층을 코팅하기 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 물리 기상 증착(PVD) 공정 중 하나인 마그네트론 스퍼터링을 활용하여 분말 표면에 고기능성 코팅을 구현하는 기술을 개발하였다. 스퍼터링은 고순도의 금속 박막을 높은 접착력으로 형성할 수 있으며, 합금뿐만 아니라 산화물 및 질화물 등의 다양한 물질을 증착할 수 있어 코팅 재료 선택에 제약이 없다는 장점을 가진다. 분말 소재의 표면 특성을 개선하기 위해 Cubic Boron Nitride(CBN)와 SiO_2 분말을 대상으로 스퍼터링을 적용하였다. 실험에 사용된 분말의 평균 입자 크기는 각각 300 μm와 15 μm이며, 증착 공정은 SiO_2 분말에 대해 5회, CBN 분말에 대해 10회의 사이클로 진행하였다. 코팅 재료로는 크롬을 사용하였다. 분석을 위해 주사전자현미경(SEM)과 에너지분산형분광법(EDS)을 활용하여 분말 표면의 코팅 특성을 평가하였으며, 집속이온빔(FIB) 분석을 통해 코팅층의 두께를 측정하였다. 또한, 균일성 검증을 위해 EDS 분석을 추가적으로 수행한 결과, 증착 사이클이 증가함에 따라 코팅층 두께가 점진적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 분말 전반에 걸쳐 균일한 코팅이 형성됨을 확인하였다.

[P19-10]

근접 스퍼터링 공정에 따른 CrN 박막의 물성 변화 연구: 황세훈*, 정다운, 이호년 (한국생산기술연구원)

Keywords: Magnetron sputtering, Abrasion resistance, CrN, Friction coefficient, Hardness

현대 산업에서는 다양한 부품이 사용되며, 이들 부품의 내구성을 높이기 위해 내마모 코팅이 널리 적용되고 있다. 특히, 자동차 부품 중 실린더 형태를 가지는 구성 요소들은 외경과 내경이 맞물려 작동하며, 마찰로 인해 마모가 발생한다. 기존에는 마모를 줄이기 위해 한쪽 부품의 외경에만 코팅을 적용해 왔으나, 이로 인해 코팅되지 않은 내경 부품의 마모가 심화되는 문제가 발생하였다.

이를 해결하기 위해 내경 코팅이 필요하며, 스퍼터링 공정을 활용하는 것이 유력한 방법 중 하나이다. 그러나 내경 코팅을 위해서는 스퍼터링 건을 기판 내부로 삽입해야 하며, 이로 인해 타겟과 기판 간 거리가 짧아지게 된다. 근접 스퍼터링 시 증착된 박막의 물성 변화에 대한 연구는 제한적이므로, 본 연구에서는 이러한 조건에서 형성된 CrN 박막의 표면 및 마찰 특성을 분석하고자 한다. 본 연구에서는 스퍼터링 건과 기판 간 거리를 3, 7, 10 cm로 설정하여 Cr 및 CrN 박막을 증착하였다. 기판 간 거리에 따라 표면 형상의 변화를 SEM을 이용하여 분석하였으며, XRD를 이용하여 결정성을 분석하였음. 또한, 나노인덴터를 이용하여 표면 경도를 측정하였으며, 핀온 디스크 장비를 이용하여 마찰계수를 측정하였음. Cr 및 CrN 박막 모두 근거리에서 증착될수록 입자가 커지는 경향을 보였으며, 기판 바이어스를 인가하면 이러한 성장 현상이 완화되는 것을 확인하였음. 경도의 경우 거리에 따른 명확한 경향성을 나타내지는 않았지만, 상대적으로 근거리에서 형성된 박막의 마모율이 낮은 것을 확인하였음.

[P19-11]

단일 이온의 선택적 용해: 한희준 (울산과학기술원), 박윤재 (기초과학연구원), 김요한 (울산과학기술원), Ding Feng (울산과학기술원, 선전기술연구원), 신형준* (울산과학기술원, 기초과학연구원)

Keywords: 물, 소금, 용해, 주사터널링현미경, 밀도범함수 이론

소금이 물에 녹는 용해 반응은 이온과 관련된 간단한 반응이지만, 열역학적으로는 엔탈피 증가와 엔트로피 증가가 경쟁하는 반응이다. 그러나 미시적인 실험이나 관측이 제한적이기 때문에, 다양한 이론적 접근을 통해 연구가 진행되어왔다. 본 연구는 저온 주사터널링현미경을 통해 소금 표면 위의 물 분자의 거동을 조사했고, 탐침을 정밀하게 제어하여 단일 음이온을 선택적으로 용해했다. 선택적 용해의 기작을 밀도범함수 이론을 통해 규명했다. 음이온이 물 분자의 쌍극자 모멘트에 의해 쉽게 분극되며, 양이온과 음이온 간의 쿨롱 상호작용이 감소하여 음이온이 선택적으로 용해되는 것이다. 본 연구를 통해 양이온과 음이온의 분극률이 이온 결합의 해리에 중요한 요소임을 밝혔다.

P20 : 인공지능재료과학
Room 3층 로비, 4월 24일

[P20-1]
머신러닝을 활용한 인장 특성과 구멍확장율의 정량적 분석: 서혜진 (포항공대철강대학원), 이정아 (포항공대), 박재정 (카이스트), 최연택 (포항공대), 김래언 (포항공대철강대학원), 정재면* (한국재료연구원), 이승철* (카이스트), 서민홍 (포스코), 김형섭* (포항공대철강대학원)
Keywords: 구멍 확장률, 인장 특성, 머신러닝, GAIN, ETR

구멍확장률(Hole Expansion Ratio: HER)은 판재성형성 평가의 중요 지표로, 성형 공정의 효율성 측정에 널리 활용된다. 기존 연구에서는 HER에 영향을 미치는 주요 인장 특성을 실험적으로 규명하려 했으나, 데이터 부족으로 인해 명확한 결론을 도출하는 데 어려움이 있었다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 머신러닝 기법을 적용하여 HER과 인장 특성 간의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. 먼저, Generative Adversarial Imputation Network(GAIN)를 활용해 실험 데이터의 결측치를 보완하였으며, Extra Tree Regressor(ETR) 모델을 이용하여 HER 예측의 두 단계 접근법을 적용하였다. GAIN의 데이터 보완 성능을 검증하기 위해 일부 알려진 데이터를 의도적으로 제거한 후 복원하였으며, 복원된 값이 기존 실험 연구에서 보고된 허용 범위 내에 있음을 확인하였다. 또한, ETR 모델의 예측 성능을 Adaboost, Random Forest 등 다른 회귀 모델과 비교 평가한 결과, ETR이 가장 낮은 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 나타내어 우수한 성능을 보였다. 마지막으로, 설명 가능한 인공지능(Explainable AI, XAI) 기법인 Shapley Additive Explanations(SHAP)을 활용하여 각 인장 특성이 HER에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 판재의 이방성 계수(r-value), 항복 이후 연신율(Post-necking Elongation, PE), 총 연신율(Total Elongation, TE) 순으로 HER에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구는 머신 러닝을 활용하여 인장 특성과 HER 간의 정량적 관계를 규명함으로써, 성형 공정 최적화를 위한 데이터 기반 접근법을 제시하였다.

[P20-2]
Optimized Data Architectures for NLP Applications: A Case Study in Hydrogen Storage Research: 이수민, 최혜경 (Sungkyunkwan University (SKKU)), 노민종* (Samsung SDI Co., Ltd), 심재혁* (Korea Institute of Science and Technology (KIST)), 김윤석* (Sungkyunkwan University (SKKU), Korea Institute of Science and Technology (KIST))
Keywords: 자연어, LLM, 데이터베이스, 수소저장합금

최근 ChatGPT 출시 등 자연어 처리(natural language processing, NLP) 기술이 급속도로 발전함에 따라 과학 출판물의 검색과 분석을 자동화하려는 수요가 높아지고 있다. 그러나 여전히 다양한 논문에서 추출된 데이터를 체계적으로 수집, 처리, 활용하기 위한 표준화된 프레임워크는 부족한 실정이다. 본 연구는 다운 스트림 NLP 작업을 지원하기 위한 관계형 데이터베이스 구조를 제안한다. 데이터 베이스는 논문의 제목, 초록, 출판 연도, DOI 등의 핵심 메타데이터를 관리하는 'Master' 테이블을 중심으로 Figure caption, Table caption, Paragraph를 저장하는 'sub' 테이블들과 관계형 구조를 이루도록 한다. 이를 통해 데이터 수집 과정을 표준화 및 간소화하고 통합된 모델을 지원함으로써 연구자들이 특정 연구 목표에 맞는 맞춤형 NLP 파이프라인을 구축할 수 있도록 한다. 본 프레임워크의 유용성을 검증하기 위해 수소 저장 합금 관련 저널 논문 278편을 크롤링하였고, 도메인 특화 지식을 반영한 네 가지 라벨 클래스를 적용한 자연어 이해(natural language understanding) 기반 분류 작업을 수행하였다. 해당 분류 전략을 적용함으로써 벡터 데이터베이스에서 모든 데이터를 전체 스캔하는 과정을 줄여, 검색 증강 생성(retrieval-augmented generation) 프로세스의 효율성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인했다.

[P20-3]
ZK60 압출재의 재결정 여부 예측을 위한 기계학습 모델 개발: 천세호, 유진영, 이성호, 이태경* (부산대학교)
Keywords: 재결정, GOS, 기계학습, electropulsing treatment

금속재료의 재결정 여부는 미세조직 제어와 기계적 특성 향상에 중요한 요소이다. 재결정 조직을 판별하기 위해 grain orientation spread(GOS) 값이 널리 사용되지만, 연구자마다 임계값을 1°~5°로 기준을 다르게 설정하고 있어 결과의 신뢰성이 떨어질 수 있다. 이러한 주관적 설정 문제를 해결하기 위해 재결정 판별 모델을 개발하려고 한다. 본 연구에서는 ZK60 압출재에 400°C에서 electropulsing treatment(EPT)와 furnace heat treatment를 각각 1분, 5분, 30분, 60분 수행하였다. 특히, EPT는 ED와 TD로 각각 적용하였으며, EPT 방향에 따라 재결정 양상과 결정립 성장 경향이 다르게 나타나는 특성이 알려져 있어, 이러한 다양한 변수들을 동시에 고려하기 위해 기계학습 기반 예측 모델을 도입하였다. EBSD 분석을 기반으로 처리 시간, 온도, 결정립 크기, 결정립 종횡비, EPT 방향 등의 변수를 입력 데이터로 사용하여 모델을 구축하였다. 이를 통해 기존 방법의 한계인 GOS 임계값 설정의 주관성을 보완하고, 새로운 처리 조건에서도 재결정 여부와 미세조직 특성을 정량적으로 예측할 수 있다. 본 연구에서 개발된 예측 모델은 ZK60 합금뿐만 아니라 다른 마그네슘 합금 및 금속소재에도 적용이 가능하여, 재료 설계 및 열처리 공정 최적화에 실질적인 도움이 될 것으로 기대된다.

[P20-4]
지능형 모델링을 통한 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 전위 기반 소성 거동 모사: 임현빈, 이정민, 송영환, 문종언* (공주대학교)
Keywords: 전위소성 모델, 회귀분석, 지능형 모델링, K-nearest neighbor 알고리즘

전위기반 소성 모델(Kocks-Mecking model)은 미세조직 및 합금 조성에 따라 모델 파라미터가 달라지므로, 이를 최적화하는 과정이 필수적이다. 특히, 고엔트로피 합금과 같은 새로운 구조용 소재는 특유의 미세조직과 전위 거동 특성을 가지며, 기존 물리 모델만으로는 정확한 예측이 어렵다. 본 연구에서는 지능형 모델링 기법을 활용하여 전위소성 모델의 파라미터를 기계학습하고, 최적의 값을 신속하고 정밀하게 도출하는 방법을 조사하였다. 다수의 모델 파라미터를 생성한 후, K-nearest neighbor 회귀 분석을 적용하여 최적화를 수행함으로써 합금의 전위 거동을 정확하게 예측하였다. 또한, 예측값과 실험값 간 오차를 최소화하여 모델의 신뢰성을 검증하였다. 제안된 지능형 모델링 기반 접근법을 통해 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 전위 거동을 빠르고 정확하게 모사할 수 있음을 확인하였으며, 향후 다양한 합금계에도 적용 가능할 것으로 기대된다.

[P20-5]

고특성 Ti 합금 설계를 위한 LangChain 기반 대형언어모델 알고리즘 개발: 서기완, 박은수* (서울대학교)

Keywords: 대형 언어모델, Human-in-the-loop, Olson Flow-Block Diagram, 합금 설계, 타이타늄

현대 산업 수준이 나날이 발전함에 따라 기존 소재를 뛰어넘는 고특성 소재에 대한 수요 또한 함께 증가하고 있다. 특히 금속 소재의 경우 향상된 성능과 함께 낮은 유지비용 및 친환경성에 대한 요구가 높아지고 있어 차세대 신합금 개발 체계의 복잡도가 증가하고 있다. 본 연구에서는 합금 설계라는 과정을 시스템적인 관점에서 접근하여 그 계층적 구조를 단순화하고 이에 따라 설계 과정의 효율성을 높이고자 한다. 특히 합금의 공정 과정, 미세구조 그리고 그에 따른 각종 특성 간의 유기적인 관계를 체계적으로 분석하기 위해 Olson flow-block diagram을 사용하고자 한다. 이는 복잡한 시스템의 작동 시퀀스를 단순화해서 시각화 하는데 유용한 도식으로 앞서 언급한 공정, 미세구조 그리고 특성 간의 상관 관계를 직관적이고 체계적으로 분석할 수 있도록 해준다. 다만, 사전 데이터를 기반으로 Olson flow-block diagram을 수기로 작도하기 위해서는 방대한 양의 연구 데이터가 요구되며 그 정확도까지 확보하기 위해서는 많은 시간과 자원의 투자가 요구된다는 한계점이 있다. 이러한 한계를 돌파하기 위해 본 연구에서는 GPT와 같은 대형언어모델의 뛰어난 일반화 능력과 작업 효율성을 활용하고자 한다. 다만, GPT는 소스 코드에 대한 접근 권한이 제한적이기에 사용자의 의도에 맞춰 세부적인 파라미터를 수정하는 것이 불가능하고, 서로 다른 소스의 데이터를 대량으로 일괄 처리하는 능력이 제한적이라는 단점을 가지고 있어 LangChain과 같은 대형 언어모델 프레임워크를 활용한 코드를 작성하여 상기 Olson flow-block diagram의 작도를 자동화할 수 있는 알고리즘의 개발하였다. 특히 human-in-the-loop(HITL)로 훈련시킨 classification 모델을 활용하여 입력한 문헌 데이터에서 키워드를 효율적으로 추출할 수 있었다. 본 포스터에서는 작성한 코드의 작동 원리를 설명하고, 고특성 Ti 합금을 설계하는데 있어 해당 대형언어모델 알고리즘의 실질적인 활용 방안에 대한 case study 결과를 분석하여 논하고자 한다. Acknowledgement: 이 논문은 2025년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 21-106-A00-006(KRIT-CT-23-019), 반응성 고증착률 적층제조 기술 특화연구실)

[P20-6]

AI-Based Automatic Extraction and Analysis of CO_2 Capture Technologies in Large-Scale Literatures: So Yun Jeong (Pukyong National University), Kyuri Choi, Kisung Moon, Byeol Kang, Yeol Kyo Choi, Hong Woo Lee (POSCO HOLDINGS), and Byung Chul Yeo* (Pukyong National University)

Keywords: CO_2 capture, natural language processing, automatic extraction, artificial intelligence, big data

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) has emerged as a key solution for reducing CO_2 emissions and mitigating greenhouse gas concentrations. However, the effectiveness of carbon capture technologies varies depending on CO_2 concentration, energy consumption, and economic feasibility, making it difficult to apply a single technology across diverse carbon-emitting industries such as steel, cement, and chemical production. To address this challenge, this study aims to develop an AI-driven Natural Language Processing (NLP) system for the automated extraction and classification of CO_2 capture-related information from vast literature datasets. The AI model developed in this study is expected to achieve over 90% accuracy in extracting relevant information. By leveraging AI-based techniques, the proposed model will offer valuable insights for selecting optimal carbon capture technologies, contributing to global decarbonization efforts.

[P20-7]

Python 기반 이미지 일괄처리를 통한 효율적인 상분율 측정 방법 비교 연구: 허성준*, 박노근*, 박재형, 천해영, 조진우 (영남대학교)

Keywords: 상분율 측정, 파이썬, 미세조직 분석, 자동 분석, imageJ

금속 재료의 상분율 측정은 미세구조 분석에서 중요한 요소이며, 일반적으로 XRD 데이터 기반 분석(HighScore Plus)과 이미지 분석(ImageJ)이 널리 사용되고 있다. 그러나 ImageJ는 배경과 유사한 색상이 있는 경우 상 탐지가 어렵고, 대비 및 밝기 조절이 수동으로 이루어져야 하며, 이미지 전처리 과정에서 결정립 크기가 변형되는 등의 단점이 존재한다. 또한, XRD 기반 상분율 분석(HighScore Plus)은 다중 상이 존재할 경우 피크 중첩으로 인해 정량화가 어렵고, 벌크 시편에서는 텍스처 효과와 내부 조직의 비균질성으로 인해 회절 강도가 실제 상분율을 정확히 반영하지 못하는 한계가 있다. 특히, 표면을 정밀 연마하더라도 내부 잔류 변형이 영향을 미칠 수 있으며, 비정질 상은 직접 분석이 어려워 추가 실험이 필요하다. 본 연구에서는 Python 기반 이미지 처리 알고리즘을 활용하여 다수의 이미지를 일괄처리하고, 동일한 임계값을 적용하여 신뢰성 높은 상분율 분석을 수행하였다. CLAHE(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)를 적용하여 국부적인 밝기 조정을 수행함으로써 전체적으로 균일한 밝기 값을 유지하도록 하였다. 이를 통해 전체 대비를 왜곡하지 않으면서도 세부 정보를 보존하며 대비를 향상시킬 수 있었다. 또한, 데이터 처리 후 자동으로 엑셀 파일로 저장할 수 있어 분석의 효율성을 극대화하였다. 실험 결과, Python 기반 자동 분석법은

ImageJ 및 XRD 분석법 대비 재현성과 일관성이 높고, 수작업 없이 대량의 데이터를 빠르게 처리할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 분석 방법은 향후 다양한 금속 재료의 상분율 정량 분석에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P20-8]

Identification of High-Entropy Nickel Manganese Cathode with High Energy Density and Structural Stability through Machine-learning Interatomic Potential: JAEJUNG PARK (KAIST), Jinyoung Jeong (Soongsil University), Bumsoo Park (KAIST), Kyoungmin Min* (Soongsil University), and Seungchul Lee* (KAIST)

Keywords: High-entropy Cathode, Graph Neural Network, Material Discovery, Density Functional Theory

A high-entropy (HE) doping strategy recently enabled the development of an HE-nickel manganese cathode (HE-LNMO) by replacing cobalt in NCM cathodes, achieving high capacity with minimal volume change. Building on this, the study applies deep learning and computational methods to explore a broader range of dopants and identify HE cathodes that possess structural stability with superior electrochemical performance. For 1,365 HE doping combinations from 15 dopants (cathodes with the formula $LiNi_{0.90}Mn_{0.02}D^1_{0.02}\ D^2_{0.02}\ D^3_{0.02}\ D^4_{0.02}O_2$), a graph neural network-based CHGNet model was employed to avoid the high computational cost of full DFT calculations. CHGNet, trained on the Materials Project, can perform structural optimization and predict energy values in optimized states when given an unstable structure. An initial dataset of 300 combinations (about 20% of the total) was generated via DFT calculations on both discharge and charge states (SOC: 90%), yielding optimized structures, energy per atom, stress, force, and magnetic moment values. This dataset was then used to fine-tune CHGNet's parameters through transfer learning, retaining pre-trained layers while updating others. The model subsequently predicted energy and volume for the remaining 1,065 cathodes to estimate average voltage and volume change. Only those cathodes with >875 mWh/g gravimetric energy density, >3.5 V average voltage, and ≤5% volume change were selected for further DFT verification, enabling rapid and accurate identification of outstanding HE cathodes.

[P20-9]

Fe-Mn-Si계 형상기억합금 성능 최적화 및 합금 설계 전략 구축을 위한 Large Language Model 활용: 윤제인, 박은수* (서울대학교)

Keywords: 대형 언어 모델, 합금 설계, 형상기억합금

재료 설계 분야에서 대형 언어 모델(Large Language Model, LLM)을 활용한 데이터 기반 설계는 공정-미세구조-물성 관계를 체계적으로 분석하고, 혁신적인 가설 생성이 가능한 도구라고 알려져 있다. 본 연구에서는 LLM을 통한 사전 수집된 문헌 자료 분석과 적절한 프롬프트 엔지니어링을 통해 핵심적인 합금 설계 원리를 조합하여 새로운 합금 설계 가설을 생성하였다. 특히 "in-context learning" 기능을 활용해 기존에 학습된 적 없는 조합의 문장을 생성하며, 전문가의 명시적 개입 없이도 효율적인 설계 가설 도출이 가능함을 확인하였다. 본 연구의 가설 생성을 위해 일반적인 Fe-Mn-Si계 형상기억합금 논문 20편과 작은 결정립 조건에서의 논문 10편을 분석하였다. 일반적인 논문에서 낮은 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE)가 마르텐사이트 변태를 촉진해 형상기억합금의 특성을 개선한다는 아이디어를 도출하였으며, 작은 결정립 조건에서는 과도하게 생성된 어닐링 쌍정 계면 밀도(Annealing Twin Boundary, ATB)를 억제할 때 회복 응력와 회복 변형률이 모두 향상된다는 아이디어를 얻었다. 이 두 아이디어를 바탕으로 Olson Flow-Block Diagram을작도하여 통해 방대한 양의 가설을 생성하였고, 이를 과학적 근거와 시너지 효과 수준에 따라 분류 및 평가하여 새로운 시너지 효과를 가진 가설을 생성하였다. 최종적으로 LLM을 통해 작은 결정립 조건에서 마르텐사이트 핵 형성을 촉진하면서 동시에 ATB 밀도 증가를 억제할 수 있는 최적의 SFE를 도출에 대한 시너지 가설을 설계하였다. 본 포스터는 이러한 가설 생성 과정에서 Python 및 LangChain을 활용하여 생성된 가설들을 시스템 차트(system chart)로 시각화하고, 다양한 평가 및 범주화 단계를 거쳐 최적의 설계 전략을 도출한 과정을 설명한다. LLM 기반 데이터 통합과 가설 생성을 통해 Fe-Mn-Si 형상기억합금의 미세구조 제어 및 성능 최적화 가설을 도출함으로서, 궁극적으로는 본 모델이 기존 합금 설계 접근 방식을 혁신적으로 개선할 수 있는 전략임을 보여준다.

[P20-10]

Enhancing Nanoscale Resolution in AFM Images Using Deep Learning Algorithm: Jeongwoo Yang, Jintae Moon, Panithan Sriboriboon, and Yunseok Kim* (Sungkyunkwan University)

Keywords: AFM, Topography, MachineLearning

As the size of devices in the semiconductor industry shrinks to nanoscale, the importance of acquiring improved image resolution and analyzing the accurate surface of devices have increased. Atomic force microscopy (AFM) is one of the most powerful practical techniques for investigating the properties of materials at the nanoscale dimension. However, it requires a fairly long time to obtain clear and accurate images from AFM measurements. So, the needs for research that can achieving high-resolution images from AFM with high throughput has increased. In previous reports, convolutional neural networks have applied to enhance image resolution, improving the study of medical images such as CT scans and MRIs. Referring to previous studies, we utilized deep neural networks to improve the resolution of images of patterned silicon oxide, which were obtain from AFM measurements. We demonstrate that the result of our study would be applied to not only augments the quality of low-resolution images but also reduces the time required for high throughput. We also anticipate that our approach can be extended to various other patterned materials, fascinating more efficient data analysis.

P21 : 에너지재료
Room 3층 로비, 4월 25일

[P21-1]

가압경수로형 원전 2차 주요계통 부식생성물 특성 분석: 강민정 (한국기술교육대학교, 한국원자력연구원), 하성준, 심희상 (한국원자력연구원), 권순우, 정소영, 김병훈, 권혁철 (한국수력원자력(주)), 전순혁* (한국원자력연구원)

Keywords: 원자력발전소, 2차계통, 탄소강, 부식생성물, 미세구조

지속 가능한 에너지원에 대한 연구가 증가함에 따라, 저 탄소 및 안정적 에너지 공급원으로 원자력의 잠재력이 주목받고 있다. 다양한 원자력 발전소 유형 중에서도, 가압경수로 (pressurized water reactor, PWR)는 우수한 안전성과 운영 효율성으로 인해 널리 사용되고 있다. 그러나, 국내 많은 가압경수로형 원자력 발전소의 운영허가 기간 만료가 도래하고 있으며, 계속 운전을 위해서는 인허가 신청을 통해 운영허가 기간 연장은 필수적이다. 또한, 안정적이고 효율적인 운영 및 관리를 위해서는 발전소 시스템의 지속적인 모니터링과 평가가 필요하다. 특히, 장기휴관 중 증기발생기를 제외한 원전 2차 주요계통은 대기에 노출되는데, 대기 중에는 이산화황, 이산화질소, 염화물, 먼지 등 다양한 불순물이 존재하기 때문에 금속의 부식을 유발하며, 이는 원전 2차계통의 건전성을 저하시킬 수 있다. 또한, 상대습도 40% 이상에서 탄소강의 부식속도가 매우 빠르기 때문에 장기 휴관 기간 중 2차 주요계통 배관 및 구조물의 대기부식을 최소화 하기 위해서 대기 중 상대습도를 40% 이하로 관리하고 있다. 본 연구에서는 계획예방정비 중인 국내 가압경수로형 원전에서 복수 및 급수 계통 등 주요지점별 부식생성물 시료를 채집하고 이에 대해 다양한 분석을 수행하였다. ICP-MS 분석 결과, 채취 시료 모두 Fe가 약 96.0 wt.% 이상으로 대부분을 구성하고 있지만, 미량 검출된 금속의 종류 및 함량은 위치별로 조금씩 달랐다. 또한, 계통 건전성을 저하시키는 Na, Cl, S 등의 불순물은 검출되지 않았으나, Cu가 미량 검출되었다. SEM 분석 결과, 다면체, 둥근형태, 침상형태, 꽃잎형태 등 다양한 형태의 부식생성물 입자가 관찰되었다. XRD분석 결과, 각 지점에서 채취한 시편은 철 산화물 및 수산화물의 구조적, 화학적 특성이 다르게 나타났으며, 이는 부식 환경의 차이에 기인한 것으로 판단되었다. 부식생성물에 대한 다양한 분석결과에 근거하여 계획예방정비 중인 발전소의 계통 건전성을 평가하였다.

[P21-2]

고이온전도도 Li_7P3S_{11} 고체전해질 개발을 위한 할로겐족 도핑 전략: 제일원리 및 분자동역학 계산 기반 연구: 유승원, 최용석* (단국대학교)

Keywords: 리튬이온전지, 황화물계 고체전해질, 제일원리계산(DFT), 분자동역학(Molecular Dynamics), 배터리

전고체 리튬 전지(ASSLB)는 액체전해질이 고체전해질로 대체된 전지로, 리튬 덴드라이트 성장 억제에 유리하고 높은 안정성을 가져 기존의 리튬 이온 전지를 대체할 전지로서 연구자들로부터 많은 주목을 받고 있다. 하지만 고체전해질은 상용 액체 전해질 대비 낮은 이온전도도 때문에 연구개발 수준에 머무르고 있으며 상온에서 액체전해질과 동등수준을 확보하는 것이 전고체전지용 고체전해질의 핵심 이슈이다. 현재까지 보고된 산화물계, 황화물계, 고분자계열 고체전해질들 중 이온전도도 측면에서 가장 우수한 성능을 보이는 고체전해질은 황화물계이다. 이 중에서도 Li_7P3S_{11}는 ~1 mS/cm 정도의 높은 이온전도도를 가져, 초이온전도체(superionic conductor)로 주목받고 있다. 따라서 Li_7P3S_{11}의 이온전도도를 추가로 향상시킬 수 있다면, 액상 전해질의 대체재로 활용 가능하다. 고체전해질의 이온전도도를 향상시키는 가장 효과적인 방안 중 하나는 이종 원소를 유입시키는 것이다. 특히 할로겐족 원소는 다른 황화물계 고체전해질(예: Li_3PS_4, $Li_{10}GeP2S_{12}$)의 이온전도도를 2배 가까이 향상시킨 바 있다. 이러한 관점에서, Li_7P3S_{11}내 할로겐족 유입이 이온전도도에 미치는 영]향과 그 원리에 대한 연구는 전고체전지의 상용화를 앞당길 중요한 연구이나, 이는 아직까지 거의 보고되지 않고 있다. 최근까지 보고된 Li_7P3S_{11}로의 할로겐족 첨가 연구들을 정리해보면, 공통적으로F와 I를 넣을 시 이온전도도가 저하되며, Br과 Cl을 유입시킬 시 이온전도도가 향상되는 경향을 보인다[DOI: 10.1016/j.electacta.2021.138849]. 이는 화학적인 관점에서의 예측과 다른 매우 특이한 결과이다: 전기음성도, 원자 반지름, 원자량 등의 물성을 기준으로 볼 때 F, Cl, Br, I의 순서로 감소/증가하며, 따라서 이온전도도 또한 이 순서로 증가/감소해야 한다. 이러한 기존 이론과는 상반되는 현상에 대한 원인을 밝히고, 이에 기반하여 고이온전도도 고체전해질의 개발 방향을 제시하는 것이 본 연구의 핵심이다. 앞선 현상의 원인을 밝히기 위해서는 할로겐족이 유입된 Li_7P3S_{11} 내부에서 Li이온의 이동 시 발생하는 원자거동 분석이 필수적이다. 본 연구에서는 이러한 분석이 가능한 제일원리(DFT) 및 분자동역학(Molecular Dynamics) 계산 기술을 활용하여 할로겐족의 유입 전후 Li_7P3S_{11} 고체전해질 내 Li의 이동속도를 정량분석하고, Li 확산 시 발생하는 주변 원자들의 거동을 분석하여 할로겐족에 의한 이온전도도 변화의 원인을 토의한다.

[P21-3]

리튬 이온 배터리용 MS_2(M = Sn, Mo) 음극의 상반된 메커니즘과 동역학에 대한 원자 단위 계산 기반 해석: Song Jae-In, Yong-Seok Choi* (Dankook Univ.)

Keywords: 리튬 이온 배터리, 황화물계, 음극재, 제일원리계산, 분자동역학

1991년 이후 리튬 이온 배터리가 상용화된 이후, 흑연 음극재는 층상 구조에 기반한 안정적인 성능으로 전지 상용화를 이끌어 왔다. 이와 유사한 층상구조로서 황화물계 디칼코제나이드 음극 MS_2 (M = Sn, Mo)은 더 높은 이론 용량을 가질 뿐만 아니라 환경친화적인 특징을 가져 차세대 리튬 이온 배터리 음극재로서 주목받고 있다. 동일한 디칼코제나이드 음극이더라도, 양이온 M의 종류에 따라 상반된 양이온 저장 거동과 성능을 보인다. 대표적인 예시로 MoS_2와 SnS2로 MoS_2의 경우 삽입 반응에 의해서만 양이온을 수용하며 그 결과, 긴 수명을 보이나 용량이 작다는 단점이 있다. 반면, SnS_2는 삽입, 전환, 합금 반응 모두 수반하여 높은 용량을 보이나, 반대로 수명이 짧다. 그 결과, MoS_2는 장시간 작동이 요구되는 전지에, SnS_2는 고용량 전지에 적합한 소재로 보고되

고 있다. 이렇듯 양이온 종류에 따른 기구 변화를 설명할 수 있다면, 상용화 목적에 부합하는 전극을 설계할 수 있다. SnS_2와 MoS_2의 충방전 거동을 비교해보면, SnS_2의 경우 방전 시 구조가 무너져 다른 상을 형성하며, 이 과정에 의해 형성된 상들이 성능을 크게 변화시킨다. 따라서 방전 시 구조가 무너지는 원인과 무너진 후 형성되는 상들의 특성을 해석한다면 두 전극의 성능이 차이나는 원리를 이해할 수 있다. 본 연구에서는 제일원리 계산 및 분자동역학을 활용해 전압, 확산계수 등의 전기화학적 성능을 예측했으며, 이를 바탕으로 우수한 음극재 개발의 방향성을 제시한다.

[P21-4]

Activated Mn Through Controlled Structural Disorder Extends the Reversibility of Li/Mn-Rich Layered Cathodes: Seongkoo Kang, Dayeon Choi, Dahye Yoon, and Yong-Mook Kang* (Korea Univ.)

Keywords: Li-Ion Battery, Li-Rich Cathode, Mn-Rich Cathode, Oxygen Redox, Atomic Disorder

High-energy density Li-ion battery cathodes use Co and Ni as primary redox centers for electrochemical energy storage. However, the growing demand for more sustainable materials aroused increasing interest in utilizing economic elements like Mn. Li-rich Mn-based cathodes achieve high energy density through the complex interplay between two redox centers: transition metals and oxygen. Despite many investigations that have focused on understanding the relationship between the transition metals and oxygen redox, the precise nature of reversible redox processes remains elusive. This study provides a broader perspective on the interplay between cation and anion redox, considering their involvement in two distinct phases. We induced the change of electronic structure through chemical treatments, as confirmed by the soft X-ray absorption technique. Upon delithiation, a difference in local disordering behavior was evidenced with X-ray total scattering analysis. Using a combination of X-ray absorption and resonant inelastic X-ray scattering, we observed the structural disorder that activates Mn redox participation from the monoclinic phase. This activation significantly improved the electrochemical properties of Li/Mn-rich cathodes. Our research paves the way for the systematic design of high-energy density and environmentally sustainable Li/Mn-rich cathodes with stabilized oxygen redox.

[P21-5]

Deformation Mechanism Maps of Pure Lithium and Their Role in Stack Pressure Optimization for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries: Hee-Tae Jeong and Woo Jin Kim* (Hongik Univ.)

Keywords: Deformation Mechanism, Grain Size, Lithium, Dendrite, Void

The present investigation provides a stratehgy for improving the interfacial stability between lithium metal anodes and solid-state electrolytes in all-solid-state lithium-ion batteries by optimizing stack pressure. It first establishes constitutive equations for various creep deformation mechanisms in lithium metal, based on an extensive evaluation of experimental data collected from the literature over the past 60 years. Using this analysis, comprehensive deformation mechanism maps for lithium are developed. The study demonstrates how these deformation mechanism maps can guide the selection of optimal stack pressure conditions to suppress void and dendrite formation on lithium surface. The ideal stack pressure is shown to depend on multiple factors, including lithium metal thickness, aspect ratio, applied current density, grain size, and operating temperature. Eventaually, experimental observations are compared with theoretical predictions, and the implications of the findings are discussed.

[P21-6]

Electrochemical Properties of Aluminum-Magnesium Foils as the Anode Material for Rechargeable Batteries: Junoh Jung, Hee-Tae Jeong, and Woo-Jin Kim* (Hongik Univ.)

Keywords: Aluminum, Anode materials, Lithiation, Solid solution strengthening

The present study investigates the electrochemical and mechanical characteristics of aluminum-magnesium (Al-Mg) alloy foils as anode materials for lithium-ion batteries, focusing on the effects of Mg solutes on lithiation behavior and structural stability. The addition of Mg enhances mechanical strength through solid-solution strengthening and precipitation hardening, improving the alloy's resistance to plastic deformation during cycling. Furthermore, the presence of Mg reduces the lithiation voltage and nucleation overpotential, while increasing charge transfer kinetics. Notably, Al-Mg alloys exhibit a two-stage lithiation process due to the formation of an intermediate Al_3Li phase prior to the equilibrium β-LiAl phase. This sequential phase transition mitigates volumetric expansion and mechanical stress, contributing to improved cycling stability and Coulombic efficiency. Among the tested compositions, the aged Al-10 wt.% Mg demonstrates the excellent electrochemical performance due to unique microstructure and optimized Mg distribution. These findings provide insight into the development of high-performance Al foil anodes with enhanced lithiation stability for next-generation lithium-ion batteries.

[P21-7]

Effect of Carbon Nanotube Incorporation on Mechanical and Electrochemical Characteristics of Aluminum Foil Anodes in Lithium-Ion Batteries: JunYoung Kim, Hee-Tae Jeong, and WooJin Kim* (Hongik Univ.)

Keywords: Rechargeable battery, Aluminum, Carbon nanotube ,Composite, Hardness

Aluminum (Al) foil anodes have attracted interdisciplinary interest for next-generation high-energy-density lithium-ion batteries

(LIBs). However, challenges such as low initial Coulombic efficiency and rapid mechanical-electrochemical degradation must be addressed. In this study, Al-carbon nanotube (CNT) composite foil anodes were fabricated using spark plasma sintering followed by hot rolling. The microstructural characteristics and CNT distribution within the Al matrix were systematically analyzed. Additionally, the evolution of hardness was investigated after annealing at various temperatures. The hardness increased with CNT content and annealing temperature, reaching a peak at 723 K before decreasing. Galvanostatic charge/discharge tests revealed that the initial Coulombic efficiency improved with higher CNT content. However, capacity retention declined significantly with cycling, and the durability of the Al-CNT composite foil anode decreased as CNT content increased. This study provides a comprehensive understanding of the trade-off between capacity retention and initial Coulombic efficiency in Al-CNT composite anodes, offering valuable insights for optimizing Al foil anodes to enhance the performance and longevity of high-energy-density LIBs.

[P21-8]

Controlling Interlayer Disorder Toward Reversible Phase Transition in a Layered Sodium Manganese Oxide Cathode: Seongkoo Kang, Jihyun Kim, and Yong-Mook Kang* (Korea Univ.)

Keywords: Sodium-ion Battery, Layered Oxide Cathode, Reversible Phase Transition, Disorder

Sodium manganese oxides are promising Na-ion battery cathodes but they suffer from irreversible structural disordering during electrochemical reactions. Most strategies to date have aimed to suppress the disordering of the cathode by stabilizing the layered structure. Here, we conversely increase atomic disorder in the Na-birnessite, a layered sodium manganese oxide, and thereby modulate its phase transition behavior toward improved electrochemical reversibility. Our study reveals that Mn vacancies and Mn migrated into the interlayer affect interlayer local environment of Na^+ and water molecules and consequently enhance Na^+ mobility. We observe better capacity retention for disordered “D-Na-birnessite”, which undergoes a facile phase transition from the birnessite-type structure to an O’3-type α-Na_xMnO_2-like structure through another intermediate metastable birnessite-type phase. This research highlights the positive effects of atomic disorder to regulate phase transition routes for achieving superior electrochemical reversibility. This work paves the way to overcoming the limits of layered oxide cathodes.

[P21-9]

Enhanced Zn Metal Anode Stability in Aqueous Zn-Ion Batteries via PVDF/Carbon Composite Passivation Layers: Annisaa Hayya Arundati, Najla Zulfikar (Pohang University of Science and Technology), Yeonwoo Seo (Korea Institute of Energy Research), Kyoungdoc Kim* (Pohang University of Science and Technology), and Segi Byun* (Korea Institute of Energy Research)

Keywords: Polyvinylidene fluoride, polymer carbon composites, protective coating layers, nonsolvent-induced phase separation, zinc dendrite suppression

The utilization of Zn anodes in aqueous Zn-ion batteries (AZIB) has garnered significant attention due to their cost-effectiveness and inherent safety. However, their practical application is hindered by severe side reactions between Zn and H_2O, including Zn corrosion, dendrite formation, hydrogen evolution, and passivation layer buildup, leading to a limited cycle life. In this study, we employ a nonsolvent-induced phase separation method to fabricate porous composite passivation layers incorporating carbon black (CB) and carbon nanotubes (CNT) into polyvinylidene fluoride (PVDF), forming PVDF/CB@Zn and PVDF/CNT@Zn, respectively. These PVDF/carbon composite layers facilitate uniform Zn deposition through a synergistic effect, where porous PVDF enhances Zn^{2+} ion transport via its porous network, while carbon regulates electron distribution and suppresses localized current densities, thereby mitigating dendrite growth. As a result, PVDF/CB@Zn and PVDF/CNT@Zn exhibit stable Zn plating/stripping for over 500 hours at 1 mAh/cm^2 and 1 mA/cm^2, demonstrating significant improvements in cycle stability. In-situ optical microscopy confirms the suppression of dendrite formation even under harsh cycling conditions. Furthermore, Full cells composed of an α-MnO_2 cathode and two types of anodes, PVDF/CB@Zn and PVDF/CNT@Zn, demonstrate enhanced electrochemical performance, with differences in optimal composition and passivation layer properties depending on the carbon additive used. This study not only presents a novel strategy for stabilizing Zn anodes but also offers a generalizable approach for optimizing polymer/carbon interfaces in AZIBs. Acknowledgement: This work is supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea Ministry of Science and Information and Communication Technologies (MSIT) (No. GTL24011-000, CAP22073]-000), and Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2024-00419413, HRD program for industrial Innovation).

[P21-10]

이차전지 음극재용 TiX_2 (X = S, Se) 이차원 단결정 소재: 유소현 (한국세라믹기술원, 연세대학교대학원), Nguyen Vu Binh, 정용재, 남우현 (한국세라믹기술원), 이도근, 박종환 (한국전기연구원), 이규형 (연세대학교대학원), 조중영* (한국세라믹기술원)

Keywords: TMDC, 2차원 물질, 이차전지, 2D Materials, TiX_2

차세대 반도체 물질로 각광받고 있는 물질군인 전이금속 디칼코게나이드 (Transition Metal Dichalcogenides)는 전이금속(M)을 중심으로 칼코겐 원소(X)가 X-M-X 형태로 결합된 2차원 층상 구조를 갖는 물질군이다. 층간 결합은 상대적으로 약한 반데르발스 결합으로 이루어져 있어 크기나 두께 제어가 용이하며, 이에 따라 물리적·전자적 특성 제어가 가능하다. 본 연구에서는 혼합 용융염을 사용하여 TiX_2 (X = S, Se) 단결정을 합성하였으며, 합성된 단결정의 결정구조, 원자간 결합에너지 등 미세구조 분석을 실시하였다. 이

후, 합성된 TiX_2 단결정을 미분화하여 Na 및 Li 이온 배터리의 음극재로서의 성능을 평가하기 위해 초기방전용량을 측정하였으며, TiS_2-Li^+는 171 $mAhg^{-1}$, $TiSe_2$-Li^+는 202 $mAhg^{-1}$였고 TiS_2-Na^+에서는 136 $mAhg^{-1}$, $TiSe_2$-Na^+는 235 $mAhg^{-1}$을 확보하였다. 이러한 결과를 통해 TiX_2 단결정 소재가 차세대 이차전지용 음극재로서 유망한 물질임을 확인할 수 있다.

[P21-11]

할라이드 도핑 LLZO 전해질을 이용한 Li-Mg 대칭 셀의 전기화학적 안정성 평가: 윤혜진, 염채연, 이승호, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

Keywords: LLZO, LiMg, 할라이드, 고체 전해질

전고체 전지는 높은 안전성과 긴 수명을 제공하는 차세대 에너지 저장 시스템으로 주목받고 있으며, 그 핵심 요소인 고체 전해질의 이온 전도도 및 계면 안정성이 전지 성능을 결정짓는다. 특히, LLZO($Li_7La_3Zr_2O_{12}$)는 높은 리튬 이온 전도도와 화학적 안정성을 갖춘 대표적인 산화물계 고체 전해질로, 전고체 전지의 실용화를 위한 유망한 후보이다. 그러나, LLZO는 전극과의 계면 저항이 높고, 소결 과정에서 균일한 미세구조 형성이 어려운 한계를 가진다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 LLZO에 할라이드(halide)를 도핑하여 고체 전해질로 사용하고, Li-Mg 합금을 음극 및 양극으로 적용한 symmetric cell의 안정성을 평가하였다. XRD 및 SEM 분석을 통해 도핑된 LLZO의 결정구조 및 미세구조 변화를 조사하였으며, 임피던스 측정을 통해 Li-Mg 전극과 전해질 계면에서의 저항 변화를 분석하였다. 또한, DFT 계산을 수행하여 할라이드 도핑이 LLZO의 구조적, 전자적, 열역학적 안정성에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구를 통해 할라이드 도핑이 LLZO 기반 전고체 전지의 계면 저항 감소 및 이온 전도도 향상에 미치는 영향을 규명하고, Li-Mg 전극과의 계면 안정성을 확보하기 위한 방향을 제시하고자 한다.

[P21-12]

Mo_2C 촉매를 이용한 CO_2 환원 촉매 반응 평가: 이현주, 네르시시얀 하이크, 이종현* (충남대학교)

Keywords: CO_2RR, TMC, catalyst

여러 산업에서 화석연료 사용량 증가로 인해 대기 중 이산화탄소(CO_2) 배출량이 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라, 지속 가능한 에너지 전환을 위해 CO_2를 단순히 폐기하는 것이 아니라, 고부가가치 탄소화합물로 전환하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, CO_2를 유용한 화합물로 전환하기 위한 고성능 촉매 개발이 핵심 연구 분야로 주목받고 있다. 본 연구에서 전이 금속 탄화물(TMC, Transition Metal Carbide)을 합성하기 위해서 고상-화염 연소 합성(SF-CS, Solid-Flame Combustion Synthesis)법을 사용하였다. 이 방법으로 합성된 Mo_2C 나노 결정 촉매를 사용하여 CO_2 전기화학적 환원 반응을 수행하였으며, 실험은 $KHCO_3$ 전해질을 사용한 H-cell에서 진행되었다. 촉매 성능을 평가하기 위해 선형 주사 전압법(LSV), 순환 전압법(CV)을 활용한 전기화학 분석을 수행하였으며, 생성된 메탄올은 고성능 액체 크로마토그래피(HPLC)를 이용하여 정량 분석하였다. 추가적으로, GPAW 기반의 밀도범함수이론(DFT) 계산을 통해 CO_2와 촉매 간의 흡착에너지를 산출하였다.

[P21-13]

In-Situ Polymerized 3D $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ Nanowire Network as a Composite Solid Electrolyte for Solid-State Batteries: Seung-Ju Baek and Chan-Jin Park* (Chonnam National University)

Keywords: Composite solid electrolyte, In-situ polymerization, Solid-state batteries, LLZO nanowire

With the rapid expansion of electric vehicles, the demand for lithium-ion battery technology has grown significantly. Although conventional lithium-ion batteries with liquid electrolytes are widely used, they pose safety risks such as short circuits, electrolyte leakage, and thermal runaway. Solid-state batteries (SSBs) have emerged as a promising alternative. Among them, composite solid electrolytes (CSEs) have gained particular attention due to their ability to combine the mechanical strength of ceramics with the flexibility of polymers. This unique synergy offers enhanced thermal stability and higher energy density. However, challenges remain, including low ionic conductivity at room temperature and poor interfacial contact between the electrolyte and electrodes. In this study, we address these challenges by developing a three-dimensional ceramic network based on garnet-type Li7La3Zr2O12 (LLZO) nanofibers to facilitate continuous lithium-ion conduction pathways. The system incorporates vinyl ethylene carbonate (VEC) monomer as a precursor to synthesize the polymeric matrix, which synergistically enhances ionic conductivity at room temperature. The in-situ polymerization process effectively reduces interfacial resistance at the electrolyte-cathode interface. The resulting CSE demonstrates excellent electrochemical properties, including a high ionic conductivity of 0.3146 mS cm-1 at room temperature and remarkable electrochemical stability up to 5.04 V vs. Li/Li^+ at 30 ºC. In addition, the solid-state Li|CSE|NCM811 cell maintained a specific discharge capacity of 109.2 mAh g-1 after 200 cycles at 0.5 C and 30ºC, corresponding to a capacity retention of 73.4%. This approach presents a promising strategy for the development of fast ionic conductor electrolytes that can significantly enhance the performance of high-energy solid-state batteries

[P21-14]

특정 결정면 성장 고엔트로피 탄화물 나노 촉매의 수전해 특성 평가 및 DFT를 통한 흡착에너지 계산: 정준모, Hayk Nersisyan, 이종현* (충남대학교)

Keywords: 수소, HER, DFT, 고엔트로피 탄화물

금속 산업은 산업부문 온실가스 배출량의 38.3%를 차지하며, 산업부문 중 가장 많은 온실가스를 배출하고 있다. 온실가스 배출을

줄이기 위해 금속산업에서는 철광석을 수소로 환원시키는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 위해서는 고순도 수소가 요구된다. 고순도 수소는 대부분 전기분해를 통해 얻어지며, 고가의 금속인 Pt를 촉매로 사용하기 때문에 이를 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 수소 발생용 촉매로 {100} 및 {111} 면이 노출된 단결정 고엔트로피 탄화물 나노 결정(High Entropy Carbide, HEC)을 합성하기 위해 마그네슘 열환원 방법을 사용했다. 마그네슘 열환원 반응 중 액체 Ni이 HEC {111} 면의 성장 억제를, 액체 Al이 {100} 면의 성장을 억제함을 확인하였다. DFT-GPAW를 통해 HEC의 특정 결정면과 수소와의 흡착에너지 계산 및 Charge Density 계산을 진행하였다. HEC는 10 mA/cm^2 기준으로 0.147 V의 낮은 과전압으로 수소 생성 반응에 대한 우수한 촉매 활성을 보인다.

[P21-15]

$BaTiO_3$ 분말 크기 및 승온 속도 변화가 소결 거동에 미치는 영향: 정재훈 (한국생산기술연구원, 인하대학교), 이종범* (한국생산기술연구원)

Keywords: MLCC, 소결, 입성장, 치밀화

MLCC(Multi-Layer Ceramic Capacitor, 적층 세라믹 콘덴서)는 전기에너지를 저장하고 일정량을 공급하는 댐 역할을 하는 수동부품으로, 다른 커패시터에 비해 다양한 환경에서도 안정적으로 작동하며, 대량 생산과 소형화에 유리한 장점을 가지고 있다. 최근 휴대용 전자기기의 수요 증가와 함께 전자제품의 다기능화 및 경량화가 가속되면서 MLCC의 수요가 증가하고 있으며, 자동차 및 산업용 응용 분야에서 고신뢰성이 더욱 중요해지고 있다. 이에 따라 미세구조 개선이 핵심 연구 과제로 부각되고 있다. MLCC의 용량 구현과 신뢰성을 향상시키기 위해 다양한 소결 변수에 따른 입자 성장 및 치밀화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 승온 속도의 차이에 따른 소결 특성(입자 성장 및 치밀화) 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 본 연구에서는 MLCC의 유전체로 사용되는 $BaTiO_3$(BTO)를 대상으로, 서로 다른 입도 크기의 BTO 분말을 다양한 승온 속도로 소결하여 분말 크기 및 승온 속도 차이가 BTO 소결체의 입자 성장과 치밀화에 미치는 영향을 탐구하였다. 사용된 BTO 분말의 평균 입도 크기는 150 nm 및 250 nm 이며, 1축 가압(300 MPa) 후 성형체를 제작하고, 타겟 온도인 1200ºC까지 서로 다른 승온 속도(10ºC/min, 50ºC/min, 100ºC/min)로 가열하여 소결을 진행하였다. 소결된 시편의 결정 구조, 결정립 크기 및 밀도는 XRD, SEM 및 아르키메데스 원리를 활용하여 분석하였으며, 이를 통해 BTO 입도 크기 및 승온 속도가 소결체의 입자 성장과 치밀화에 미치는 영향에 대해서 알아보았다.

[P21-16]

Hybrids of $NiFe_2S_4/MoS_2$ as Efficient Catalyst for Water Splitting Applications: Karattadipalayam Periyasamy Nithyanandam, Perumal Naveenkumar, Munisamy Maniyazagan, Nayoung Kang, Hyeon-Woo Yang, and Sun-Jae Kim* (Sejong University)

Keywords: Hybrids, Metal chalcogenides, Electrocatalyst, Water splitting

The development of clean energy technology is much needed to reduce the utilization of fossil fuels and control the global warming crisis. Among the various technologies, electrochemical water splitting is a reliable and safest way of produce the hydrogen and oxygen from water. So, for enormous attention is paid for the findings of lost cost, long life catalyst for both hydrogen evaluation and oxygen evaluation process. In recent years, spinel sulfides have received great attention for the reliable catalytic properties. In this study we construct the Spinel nickel ferrate sulphides with overcoated molybdenum disulphides for the novel composition for water splitting applications. The $NiFe_2S_4$ is prepared by two steps, initially NiFe-MoF is prepared by hydrothermal method, and the NiFe-MoF with adequate amount of sulphur was annealed at 600ºC at argon atmosphere. The MoS_2 is overcoated on the surface of $NiFe_2S_4$ by hydrothermal process. The hybrids of two different metal sulfides have the merits of both and rich in catalytic activity and electrochemical activity The phased purity of the materials has identified by X-ray diffraction analysis. The hierarchical coral-flower like morphology significantly enhanced surface area and active sites for electrocatalysis. The catalytic performances of the electrocatalyst are tested by three electrode system consist of graphite rod catalyst loaded Ni-Foam and Ag/AgCl in 3M KCl as counter, working and reference electrodes in 1M KOH electrolyte. The measured overpotential of $NiFe_2S_4$, MoS_2, $NiFe_2S_4/MoS_2$(1 :1), $NiFe_2S_4/MoS_{2(1:2),\ NiFe2}S_4/MoS_2$(2:1), and Pt are 249, 170, 197, 145, 166, and 23 mV at a current density of 40 mA cm^2 for HER. In OER process, the achieved overpotential are 414.5, 451.9, 359.4, 400.3, 395.0, and 428.8 mV for $NiFe_2S_4$, MoS_2, $NiFe_2S_4/MoS_2$(1:1), $NiFe_2S_4/MoS_2$(1:2), $NiFe_2S_4/MoS_2$(2:1), and RuO_2respectively at a current density of 40 mA cm^2. These results indicated the constructed hybrids have a good catalytic property than pristine materials. The outstanding catalytic performances of the hybrids are attained by their unique morphology, interesting chemical composition and other features, which makes them a reliable candidate for water splitting applications.

[P21-17]

Surface Reconstruction Based on Hydrothermal Synthesis and Post-Treatment for Enhanced Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Water Electrolysis: Byeong-Chan Choi, Jinho Koo (Korea Institute of Industrial Technology, Pusan National University), Joosung Park, and Hyoung Chan Kim* (Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Stainless Steel, Hydrothermal Synthesis, Water electrolysis, Oxygen evolution reaction, Surface Treatment

Water electrolysis is gaining attention as a key technology for producing next-generation eco-friendly energy by electrically dissociating water into hydrogen (H_2) and oxygen (O_2). In particular, within the field of alkaline water electrolysis (AWE), the development of alternative electrode materials to replace conventional precious metal catalysts is crucial. This study presents a method to enhance the oxygen evolution reaction (OER) activity by employing hydrothermal synthesis and subsequent surface reconstruction

via post-treatment on a cost-effective stainless steel 304 (SS304)-based electrode. Initially, metal oxides were formed on the SS304 electrode surface through hydrothermal synthesis. To further activate the catalytic surface, an additional acidic immersion process was applied. This post-treatment effectively converted metal oxides into more stable (oxy)hydroxides, significantly enhancing the electrode's electrochemical performance. The electrode's microstructural and chemical characteristics were examined using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The electrochemical properties were evaluated via linear sweep voltammetry (LSV), Tafel slope analysis, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and long-term stability tests. Experimental results demonstrated that the post-treated electrode exhibited reduced charge transfer resistance (R_{ct}) and an increased surface roughness factor. Moreover, it maintained a low overpotential (276.7 mV @ 10 mA cm^{-2}) even after more than 10,000 cycles of accelerated degradation testing.

[P21-18]

Intergranular Corrosion in Stabilized Ferritic Stainless Steel: JinHo Park* (Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: Intergranular corrosion, Stainless steel, Cr segregation

The general commercial practice to prevent intergranular corrosion (IGC) is to add stabilizers such as Ti and Nb, in amounts 16-20 times more than the total amount of carbon and nitrogen. However, IGC still occurs in stabilized ferritic stainless steel that meets this requirement. To clarify the IGC mechanism in stabilized low-Cr ferritic stainless steel, precipitation kinetics and intergranular segregation were examined through sequential aging treatment and analyzed using transmission electron microscopy with electron energy loss spectroscopy and a three-dimensional atom probe. The sequential aging treatment demonstrates that precipitation kinetics follow the preferential formation of TiC due to the much faster diffusion of C and Ti compared to Nb and Cr. Consequently, solute Cr atoms segregate along the grain boundary, resulting in Cr depletion in the vicinity of the grain boundary. This study highlights that IGC can significantly compromise the stability and durability of components and structures across various industrial sectors, including chemical processing, aerospace, and nuclear power. The occurrence of IGC in these materials poses substantial risks to safety and performance, underscoring the need for effective corrosion prevention and control strategies. Understanding the IGC mechanisms in these stabilized steels is crucial for ensuring the long-term reliability of metal components in diverse industrial applications.

[P21-19]

슬러리 코팅 방법을 활용한 피복관 모사 크러드 층 제조 연구: 하성준, 김기웅, 임상엽, 이종연, 전순혁, 심희상* (한국원자력연구원)

Keywords: 핵연료, 피복관, 크러드, 크러드 유기 국부 부식

원자력 발전소 1차 계통의 구조재료 부식 과정에서 발생하는 크러드(Corrosion-Related Unidentified Deposits, CRUD)는 철과 니켈 이온으로부터 형성된 금속 산화물 부식 생성물로, 핵연료 피복관 표면에 부착되어 주요 운영 문제를 야기한다. 피복관에 형성된 크러드는 열전달 효율 저하를 통해 국부적인 온도 상승을 유발하며, 이는 피복관의 부식을 가속화하고 산화층을 불균일하게 형성시킬 수 있다. 장기간의 부식 진행은 피복관 산화층 내 수소화물 형성을 촉진시켜 피복관 파단으로 이어질 가능성이 있으며, 이는 피복관 건전성과 핵연료 안전성에 심각한 영향을 미친다. 따라서, 크러드 층의 형성은 불가피하기 때문에 피복관 표면에서 크러드의 영향을 평가하는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 크러드를 모사하기 위해 마그네타이트(Fe3O4) 분말을 대체재(surrogate)로 선정하였고, 슬러리 코팅 기법을 활용하여 핵연료 피복관 표면에 다공성 크러드를 모사하는 실험을 수행하였다. TGA(Thermogravimetric Analysis)와 DSC(differential Scanning Calorimetry)를 통해 마그네타이트 분말, 바인더 및 슬러리 용액의 열물성 평가를 수행하였으며, 이를 바탕으로 슬러리 용액을 사용하여 지르코늄 피복관 표면에 코팅, 건조, 탈지 과정을 거쳐 크러드 부착 모사 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 FIB-SEM 및 XRD 분석을 통해 특성을 평가를 수행하였으며, 실제 원전에서 형성된 크러드 층과 유사한 다공성 구조를 유사한 다공성 구조를 성공적으로 제조한 것을 확인하였다. 이와 같이 제조된 모사 시편은 크러드 유기 국부 부식(Crud-Induced Localized Corrosion, CILC) 연구에 필요한 샘플 제조 기술로 활용할 예정이다.

[P21-20]

균질화 온도에 따른 Zr 합금의 미세구조 변화 및 수소화물 석출거동 분석: 임상엽, 이경근, 전순혁, 심희상* (한국원자력연구원)

Keywords: 원자력발전소, Zr 합금, 수소화물, 수소지연 파괴

지르코늄 합금은 고온강도, 내식성 및 낮은 중성자 흡수 단면적 등으로 인해 핵연료의 피복재로 사용된다. 지르코늄 합금의 우수한 특성에도 불구하고, 원자로 내부의 고온고압 수화학 환경에서 지르코늄 피복재의 산화가 촉진되면 수화학 환경 및 물의 분해로 인해 수소가 발생하고, 이 수소가 지르코늄 피복재 표면으로 흡수되는 hydride pick up 현상이 발생한다. 원자로 가동 조건에는 수소가 지르코늄 합금 내에 안전하게 고용되지만, 피복재가 약 200ºC 이하로 냉각되면 고용된 수소가 지르코늄 재료에서 수소화물로 석출된다. 높은 취성의 특징을 갖는 수소화물은 지르코늄 모재와의 격자 불일치로 인해 내부 응력을 유발시키고, 그로 인해 지르코늄 피복재의 기계적 물성을 크게 저하시킨다. 수소화물 석출에 의한 피복재 균열 및 취성은 원자로 구조물의 건전성 유지를 크게 저하시키며, 이러한 현상은 수소지연 파괴(delayed hydride cracking, DHC) 메커니즘에 의한 균열 전파와 밀접한 관련이 있다. 이런 이유로 압력관에서 수소 및 중수소 농도의 증가는 피복재의 건전성을 위협하는 큰 요인 중 하나이다. 따라서, 지르코늄 합금 내의 수소화물 석출 거동을 이해하는 것은 원자로의 건전성 유지를 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 Zr-2.5% Nb 압력관 재료에 대해 균질화 온도(300–550 ºC)가 피복재의 미세구조 변화, 수소 흡수, 수소화물 석출거동에 미치는 영향에 대해 TEM 분석, 수소분석, 광학현미경을 통해 분석하였고, 새롭게 고안한 이미지 기반 영상 처리 기법을 통해 수소화물 형태 및 분율에 대해 정량적으로

분석하였다. 분석 결과, 균질화 온도 300–350 ℃ 범위의 경우 피복재의 미세구조에 유의미한 변화는 관찰되지 않았다. 하지만, 400–550 ℃ 범위의 균질화 온도 범위에서는 β-Zr의 분해와 α-Zr의 입자 성장 등 미세구조에 큰 변화가 관찰되었다. 또한, 이미지 기반 정량 분석 결과 300–400 ℃ 균질화된 시편에서는 수소 농도에 따라 수소화물의 길이와 면적 분율이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 반면, 400–475 ℃ 범위에서는 균질화 온도의 증가에 따라 수소화물의 길이와 종횡비가 감소하는 결과가 도출되었다. 이러한 결과는 β-Zr의 분해 및 α-Zr의 재결정과 grain 성장 현상이 수소화물의 성장 및 형상 변화에 영향을 준다는 것을 의미하며, 향후 α-Zr의 결정방위 변화가 수소화물의 형성과 방향성에 미치는 영향을 추가적으로 EBSD 분석기법을 통해 수행할 예정이다.

[P21-21]

가압경수로형 원전 2차계통에서 복합불순물이 니켈기 합금의 일반부식에 미치는 영향 및 열역학적 고찰: 임상엽, 심희상, 전순혁* (한국원자력연구원)

Keywords: 가압경수로, 니켈기 합금, 불순물, 일반부식, 열역학

가압경수로형 원전 2차계통에서 탄소강 배관 표면은 냉각수 또는 습증기에 노출될 때 유동가속부식에 의해 배관 두께가 감소된다. 탄소강 배관의 유동가속부식이 진행되는 동안, 환원성 분위기인 2차계통 내에서 탄소강 표면에 형성되는 철산화물은 마그네타이트이다. 배관에 형성된 마그네타이트 중 일부 입자는 표면에서 떨어져 주급수 라인으로 유입되고, 냉각수에 포함되어 증기발생기 2차계통으로 유입된다. 증기발생기 2차계통으로 유입된 마그네타이트 입자는 증기발생기의 주요 구조물인 증기발생기 전열관 표면, 관지지대, 관판 상단에 부착된다. 증기발생기 구조물에 부착된 마그네타이트는 증기발생기의 성능과 건전성을 저하시키는 원인이 된다. 마그네타이트가 표면에 부착된 증기발생기 전열관은 다공성 구조의 마그네타이트가 Alloy 600이나 Alloy 690 재질의 증기발생기 전열관에 비해 열전도도가 훨씬 낮기 때문에 전열관의 열전달 성능을 저하시킨다. 또한, 증기발생기 전열관과 관지지대 또는 관판 상단에 존재하는 틈새에 부착된 마그네타이트는 국부적인 비등과 그에 따른 국부적인 온도 상승에 의해 다양한 불순물이 다공구조의 마그네타이트 내부로 유입되고, 최종적으로 농축된다. 마그네타이트 내 농축된 불순물의 농도는 정상운전 조건 냉각수에서 관리되는 불순물 농도에 비해 약 10^4에서 10^6 정도 높다. 따라서, 틈새 내 마그네타이트가 부착된 증기발생기 구조물 표면은 매우 극심한 부식환경에 노출되어, 응력부식균열, 공식, 입계부식 등 다양한 종류의 부식이 발생하고, 가속화된다. 특히, Alloy 600 재질의 증기발생기 전열관을 사용하는 원전의 경우에는 응력부식균열에 대한 사고와 이슈가 많이 발생하였기 때문에, 응력부식균열에 대한 많은 관심이 있었으며, 선행연구가 많이 진행되어 왔다. 하지만, 전열관 재질을 Alloy 600에서 Cr 함량이 약 2배 많은 Alloy 690으로 교체된 이후에는 불순물 Pb가 농축된 환경이 아닌 정상조건 환경에서는 국내외 원전에서 응력부식균열에 의한 전열관 손상 사례는 보고된 바 없다. 따라서, 전열관 부식열화 현상에 대한 연구는 응력부식균열보다는 균일부식에 초점을 두어야 한다. 본 연구에서는 복합 불순물이 농축된 2차계통 증기발생기 틈새 모사 조건에서 대표적인 증기발생기 전열관 재질인 Alloy 600과 Alloy 690의 균일부식 거동 연구와 그에 대한 기구를 열역학적인 해석으로 규명하였다. 증기발생기 틈새 조건을 모사하기 위하여, 마그네타이트 내 존재하는 불순물로 알려진 Pb, S, Na, Cl을 2차계통 모사 용액에 첨가하였다. 또한, 정상조건에 비해 높은 온도와 높은 pH 조건을 선정하여 틈새 조건을 모사하였다. 총 3000시간 동안 부식시험을 수행하였다. 부식시험 후 전열관에 형성된 산화물은 주사전자현미경을 이용하여 분석하였으며, 집속이온빔을 이용하여 산화층 단면에 대한 미세구조와 화학성분을 분석하였다. 복합 불순물이 니켈기 합금의 일반부식 및 산화층 형성 거동에 미치는 영향에 대해 열역학 계산 프로그램인 HSC Chemisty와 MULTEQ를 함께 활용하여 부식 및 산화층 형성 기구를 규명하고자 하였다.

[P21-22]

TRU핵연료 공정수율 향상을 위한 반응방지 신소재 세라믹 도가니의 밀도 변화에 미치는 제조공정조건의 영향: 박상규*, 안정수, 김기환, 송훈, 김준환 (한국원자력연구원)

Keywords: 금속연료, 공정 수율, 핵연료 도가니, NdYO3, SFR

사용후핵연료는 강한 방사선과 높은 열을 방출하는 장반감기 방사성동위원소를 포함하고 있다. 따라서 방사성 독성이 수십만 년 이상 지속되는 사용후핵연료를 안전하게 관리하기 위한 기술의 확보는 국가 차원에서 매우 중요한 현안 중 하나이다. 이를 위해 현재 사용후핵연료 처리의 일환인 건식처리기술(파이로프로세싱) 및 소듐냉각고속로(SFR) 기술개발이 진행되고 있다. TRU핵연료는 이러한 파이로프로세싱을 통해 생산되는 핵연료이며, 핵물질 손실율 증가에 따른 핵연료 재활용율감소 문제는 사용후핵연료 재사용을 위한 당위성 확보를 위한 필수 해결 요소이다. TRU핵연료 주조공정에서 주조부품과 금속연료간의 반응은 금속연료 수율감소와 핵물질 손실율 증가를 유도한다. 이를 해결하기 위해 금속연료 주조 용융물과 주조부품간의 반응을 방지할 수 있는 신소재를 개발하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 상용 소재인 Y2O3 소재에 비해 반응저감성이 우수한 신소재로 NdYO3를 활용하여 이에 대한 반응저감성을 검증한 뒤, 주조공정을 위한 도가니 형태로 소결 제조하는 공정을 연구하였다. 도가니 형태를 만들기 위해 슬립캐스팅 공정을 사용하였으며, 소결 공정은 Ar 분위기에서 1450℃, 1550℃, 1550℃, 1600℃ 4개의 온도조건에서 5시간 동안 유지하여 제조였다. 각각의 조건에 따른 밀도 및 SEM 분석을 바탕으로 기공율과 밀도변화를 분석하였으며, XRD분석으로 상변화를 검증하였다.

[P21-23]

Oxide Purification in $MgCl_2$ Molten Salt by $SnCl_4$ gas Sparging: Dongjun Shin, Taeho Kim, and Changhwa Lee* (Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: Molten Salt, Thermodynamics, Salt purification, Gas sparging process

Molten salts is effective media in the fields of high-temperature batteries and thermal energy storage systems (TES) due to their stability at high temperatures, as well as their high heat capacity and thermal transfer properties. Among various molten salt candidates,

$MgCl_2$ stands out due to not only its ability to effectively lower the melting point of salts when mixed with other liquid salts allowing for relatively low-temperature operation, buy also cost-effective, being abundant in the earth's crust. However, $MgCl_2$ is highly hygroscopic, easily transforming into a hydrated form during handling. The slightly hydrated $MgCl_2$ can lead to corrosion of structural materials in the form of MgOHCl at high temperatures or increase the viscosity of the fluid as insoluble MgO forms, thereby reducing its efficiency as a heat transfer medium. To handle these issues, technology for producing high-purity $MgCl_2$ is necessary, and various studies are being conducted. In this study, the process of gas sparging $MgCl_2$ containing molten salts with $SnCl_4$ was thermodynamically reviewed, and its feasibility was evaluated through experiments. The moisture content within the molten salts was analyzed using the Karl Fischer method, while the concentration of oxides was assessed using non-dispersive infrared spectroscopy (NDIR). Detailed discussions on the experimental results are provided. This study presents new technological approaches for producing high-purity molten salts and aims to contribute to improving the performance of liquid heat transfer.

[P21-24]

고농도 산소 공공이 도입된 Black TiO_{2-x} 나노입자 기반 고성능 태양광 증발 시스템 구현: 전희연, 김정현, 이영인* (서울과학기술대학교)

Keywords: 산소 공공, 광열 변환 구조체, 대기압 플라즈마, 태양광 증발 시스템

광열 변환 소재 기반 태양광 증발 시스템은 태양광을 직접 열로 변환하여 증발-증류를 통한 오염수 정제와 CO_2 배출을 최소화한 해수 담수화를 통해 인류에게 필수적인 물과 관련된 다양한 문제를 해결할 수 있는 기술로 평가받고 있다. 태양광 증발 시스템 기술은 기존 열에너지 기반 기술에 비해 친환경적이며, 무한한 태양광 에너지를 활용할 수 있을 뿐만 아니라 소재의 안정성이 확보된다면 반영구적 사용이 가능하기 때문에 높은 에너지 효율 대비 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 따라서 광열 소재 기반 태양광 증발 시스템으로 활용이 가능한 고성능 원천 소재 및 시스템 기술 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 광열 변환 소재 중 Black TiO_{2-x} 나노입자는 고농도의 산소 공공에 의해 charge carrier density가 증가하여 극대화된 국부적 표면 플라즈몬 공명(LSPR) 효과가 발생하고, 산소 공공에 의한 많은 defect energy level이 형성되어 태양광 전파장에 대한 흡광이 가능하고 고농도의 결함에 의한 높은 재결합률을 나타내기 때문에 대표적인 광열 변환 소재로 널리 연구되고 있다. 이러한 산화물은 높은 농도로 산소 공공이 도입되어야만 넓은 파장의 태양광을 흡광할 수 있으나, 수소 환원과 같은 기존 공정으로는 산화물 표면에만 산소 공공이 형성된다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 초음파 스프레이 열분해 (USP) 공정을 활용하여 나노입자의 결정화 과정에서 산소 공공을 형성하는 불완전 산화법을 통해 TiO_2 나노입자에 고농도 bulk 산소 공공을 도입하였다. 합성된 Black TiO_{2-x} 나노입자를 Dip-coating 공정을 통해 부직포에 부착하여 태양광 증발기를 제작하였다. 일반적으로 태양광을 활용한 광열 증발기는 별도의 물 이송층을 도입하여 수조와의 직접 접촉하는 면적을 최소화하는 구조로 설계하여 수조 내부에 존재하는 물의 대류에 의한 열 손실을 최소화하고자 한다. 따라서 물의 원활한 공급을 바탕으로 우수한 증발률을 달성하기 위해서는 증발기 표면의 친수성을 극대화하는 것이 중요하다. 이러한 개념을 바탕으로 본 연구에서는 증발기 표면의 친수성을 극대화하기 위해 대기압 플라즈마 공정을 활용하여 최적의 공정 조건을 통계적으로 도출하고 광열 증발기의 표면 특성과 증발률의 상관관계에 관해서 고찰하였다. 궁극적으로 대기압 플라즈마 공정으로 친수화된 증발기는 플라즈마 처리 전 증발기보다 증발 효율이 최대 약 1.38배 증가하였다.

[P21-25]

CTP 배터리용 방열소재를 위한 MgO 분말이 구상화 및 열처리 공정 개발: 김지혜*, 박찬욱 ((재)대구기계부품연구원)

Keywords: 셀투팩, 배터리, 방열소재, MgO 분말, 과립

최근 배터리 산업은 배터리 소재에서 배터리 구조로 초점이 이동하고 있다. CATL과 BYD는 CTP(Cell To Pack) 배터리를 출시했으며, LG에너지솔루션은 MPI를 시작으로 CTP 배터리 제조 기술도 선보였다. 향후에는 전기차 섀시(Chassis)에 배터리를 직접 통합하는 방식이 적용될 예정이며, 이를 CTC(Cell to Chassis), MTB(Module to Body), CTB(Cell to Body), CTV(Cell to Vehicle) 등으로 구분할 수 있다. 이러한 방식은 배터리 무게를 약 10% 경감하고, 주행거리를 14% 이상 향상시킬 수 있다. 그러나 높은 에너지 밀도로 인해 안전성이 위협받을 수 있으므로, 필연적으로 열관리 기술이 요구된다. 따라서 배터리 팩의 방폭 및 방열 성능을 동시에 구현할 수 있는 고기능성 세라믹 열계면 소재부품(접착제, 열패드, 갭필러 등)의 개발이 필요하다. 세라믹 열계면 소재부품은 세라믹 분말과 고분자 소재가 혼합된 복합소재로, 복합소재의 85% 이상이 세라믹 분말로 구성되고, 우수한 방열 성능을 구현하기 위한 고열전도성 세라믹 분말의 개발이 필요하다. Al2O3 분말을 적용한 열계면 소재부품은 약 2~3 W/mK의 열전도도를 보이나, MgO 분말을 적용하면 방열 성능을 6 W/mK까지 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 열계면 소재부품에 사용되는 구상화 MgO 분말을 제조하기 위한 수계 슬러리, 과립화 공정, 열처리 공정을 개발하였다. 수계용 Mg 화합물의 분쇄 효율을 최적화하고, 다양한 분산제와 바인더를 혼합하여 수계 슬러리를 제조한 후, 과립분무 특성을 평가하여 적합한 첨가물을 선정하였다. 또한, 과립분무 공정 조건이 구상 분말의 특성에 미치는 영향을 분석하고, 열처리 온도에 따른 Mg 화합물의 상변화 및 열처리 후 변화를 관찰하였다. 이 연구는 2025년도 중소벤처기업부 및 중소기업기술정보진흥원 연구비 지원에 의한 연구임('RS-2023-00275303')

[P21-26]

Synthesized $SnSe_2$ via Salt Flux Method: Structure, Chemical, and Thermoelectric Characterization: Vu Binh Nguyen, So Hyeon Ryu, Yong-Jae Jung (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Yonsei Univ.), Woo Hyun Nam (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology), Kyu Hyoung Lee (Yonsei Univ.), and Jung Young Cho* (Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology)

Keywords: Thermoelectric Materials, Two dimension Materials, Transition Metal Dichalcogenide, Tin Disenlenide, Semiconductor

Tin Disenlenide ($SnSe_2$) is a layered transition metal dichalcogenide (TMDC) with unique electronic, optical, and thermoelectric properties, making it a promising candidate for applications in energy conversion and electronic devices. In this study, high-purity $SnSe_2$ was synthesized using a salt flux method with a KCl-NaCl mixture. Structural analysis by X-ray diffraction (XRD) confirmed the formation of phase-pure $SnSe_2$ with (00l) direction, indicating a preferred orientation along the c-axis. Raman spectroscopy verified the layered structure of the material by detecting A_{1g} (~180 cm^{-1}) and E_g (~110 cm^{-1}) vibration modes of selenium atoms. The Scanning Electron Microscopy (SEM) revealed a plate-like morphology while Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) confirmed an approximate stoichiometric Sn:Se ratio of ~ 1:2. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) indicated that Sn and Se exist in their expected oxidation states (Sn^{4+} and Se^{2-}), verifying chemical high purity. Thermoelectric measurements showed a positive Seebeck coefficient, characteristic of p-type behavior, which increased with temperature. Electrical conductivity exhibited a semiconducting temperature dependence, and the power factor suggested promising thermoelectric efficiency.

[P21-27]

A bimetal sulfide-rGO/NC as an anode material for Lithium-ion batteries: Naveenkumar Perumal, Munisamy Maniyazagan, Hyeon-Woo Yang, and Sun-Jae Kim* (Sejong University)

Keywords: Bimetal sudlife, Composites, Anode materials, Lithium-ion batteries

Graphene-based composites are the most concerning candidates for energy storage and conversion applications. This composite has a high surface area, good structural flexibility, and good electrical conductivity. Herein, the metal sulfide-based electrode materials have high capacity with poor cycle life and electrical conductivity. This issue was addressed by making a composite with graphene and other carbon materials. In this present study, we aimed to develop the bimetal sulfide anchored rGO, further, it is over-coated with a carbon layer. Firstly, the bimetal-based metal-organic framework anchored rGO was prepared by the solvothermal method. The carbon coating of the Bimetal sulfide/rGO was achieved by a chemical method using dopamine hydrochloride as a carbon source. The prepared composite was annealed at 600ºC for 2 hours in an argon atmosphere. The obtained XRD pattern of the prepared electrode materials was indexed with JCPDS no: 01-075-0607, which confirms the formation phase of pure $FeCoS_2$. The presence of D and G bands in the Raman spectra indicated the distorted and graphitic carbon. The existence of carbon and graphene brings buffer space, which makes the composite more flexible with a good reversible nature. The morphological investigations exposed the nanoparticle morphology of $FeCoS_2$ and $FeCoS_2$ anchored rGO and their carbon blanket-covered $FeCoS_2$-rGO. XPS study exposed the presence of Co, Fe, S, N, C, and O elements and their chemical environments. Cyclic voltammetry study exposed the redox behavior of materials. The composite exhibits a border peak than pristine $FeCoS_2$. The calculated b values are closer to nearly 0.9 which represents the charge storage mechanism depends on both surface-controlled and diffusion-controlled processes. Furthermore, the lithium-ion diffusion kinetics was examined by Electrochemical impedance spectroscopy. The calculated charge transfer resistance of $FeCoS_2$, $FeCoS_2$-rGO, and $FeCoS_2$-rGO@NC are 191.35, 170.90, and 64.81 Ω respectively. The more vertical line of the composite was attributed to the more lithium-ion conductivity than the $FeCoS_2$, and $FeCoS_2$-rGO. The lithiation and de-lithiation capacity of the materials were investigated by galvanostatic charge-discharge studies using the potential window of 0.01 to 3.0 V at current densities of 0.1 and 1 A g^{-1}. The initial discharge capacity of $FeCoS_2$, $FeCoS_2$-rGO, and $FeCoS_2$-rGO@NC are 879.20, 834.17, and 838.07 mAh g^{-1} at 0.1 A g^{-1} with initial coulombic efficiency of 76.15, 74.49, and 82.16% respectively. At 1 A g^{-1}, the $FeCoS_2$, $FeCoS_2$-rGO, and $FeCoS_2$-rGO@NC have delivered the discharge capacities of 458.14, 534.77, and 546.55 mAh g^{-1} respectively. After 250 cycles, the $FeCoS_2$, $FeCoS_2$-rGO, and $FeCoS_2$-rGO@NC have delivered the discharge capacities of 457.16, 927.79, and 905.15 mAh g^{-1} respectively. Ever-increasing trend of capacities indicates the lithium-ion-induced reactivation process. These results indicate that $FeCoS_2$-rGO@NC is a reliable candidate for lithium-ion battery applications.

[P21-28]

A Study on the Cycle Test of ASS bettery Using Lithium Metal and Lithium Magnesium Alloy: 김상우* (한국생산기술연구원)

Keywords: 리튬, 리튬-마그네슘, 용해, 전고체전지

Lithium metal batteries are highly anticipated due to their theoretical high energy density and high output characteristics. However, issues related to cycle stability still limit their performance. In particular, the instability of the lithium metal anode and cathode surfaces during charge and discharge cycles remains a significant challenge. In this study, we focused on improving the surface morphology of the lithium metal anode and enhancing the stability of the cathode surface. The anode was fabricated using a lithium alloy foil, while the cathode was made by combining NCM, Super-P, garnet LLZO, and binder polymers. A solid electrolyte, LLZO composite solid electrolyte, was used for the battery, and it was designed and manufactured under typical battery operating conditions. Charge and discharge tests were performed under the same conditions (70ºC, 0.1C). The study also involves manufacturing lithium metal and lithium-magnesium alloy foils for secondary batteries and performing stability tests to evaluate their performance.

[P21-29]

저분자 리그닌을 사용한 질소 도핑 활성탄의 제조 및 슈퍼커패시터 활물질로의 활용: 박희진 (한국세라믹기술원), Md Rezaul Karim (영남대학교), 박소연 (광운대학교), 이태규, 남우현 (한국세라믹기술원), 최진우 ((주)이레사이언스), 임영수 (국립부경대학교), 신원호* (광운

대학교), 조중영* (한국세라믹기술원)
Keywords: 저분자 리그닌, 활성탄, 질소 도핑, 슈퍼커패시터

본 연구에서는 아민 작용기를 포함한 저분자 리그닌을 사용한 질소 도핑 활성탄의 제조와 에너지 저장 장치 소재로의 활용에 대해 보고한다. 저분자 리그닌의 화학적 활성화를 위해 KOH를 사용하였으며, 활성화 온도 및 유지시간을 달리하여 제조된 활성탄의 물성을 비교하였다. 평가 결과, 활성탄의 표면에 pyrrolic-N(N-5) 작용기가 우세하게 도핑됨을 확인하였고, 특히 700°C, 2 시간 조건에서 제조된 활성탄(AML-AC700)의 비표면적과 전체 기공부피가 각 2119.2 m^2/g, 1.44 cm^3/g으로 가장 우수한 특성을 나타냈다. 다음으로 전기화학 특성 평가를 위해 슈퍼커패시터 활물질로 AML-AC700를 사용한 전극과 상용 활성탄을 사용한 전극을 비교하였다. 그 결과, 전류밀도 1 A/g 조건 하의 GCD 분석에서 AML-AC700의 비정전용량은 215 F/g으로 상용 활성탄 전극에 비해 두 배 이상 큰 용량을 가졌다. 또한, 10,000 사이클 충·방전 이후에도 우수한 안정성과 효율성을 보였다. 이는 AML-AC700의 높은 비표면적과 도핑된 질소가 전하 저장 효율을 증가시키고 전기 화학적 성능 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

[P21-30]

Cost-Effective Pt-Ce-Ni Catalyst with Ultra-Low Pt Loading for Industrial AEM Water Electrolyzers and PVEC Devices: 양비룡*, Shahbaz Ahmed, Mallappa Mahanthappa, Debabrata Chanda, Gyung-gyun Park (Kumoh National Institute of Technology, GHS Co. Ltd.), Myung Seon Ryu (Pheonix Tech Co., Ltd.), Myung-sik Choi (S.J. Tech Co. Ltd.), Kweon Soon-Yong (Korea National University of Transportation)
Keywords: Green Hydrogen, OER, HER, Tafel

While numerous catalysts exist for alkaline and AEM water splitting, long-term stability remains a challenge for industrial applications. This study introduces a cost-effective method for green hydrogen production using a low platinum loading (0.25 mg cm^{-2}) Pt-Ce-Ni catalyst. This catalyst demonstrated superior oxygen evolution reaction (OER) activity compared to RuO2, achieving overpotentials of 270 mV and 360 mV at 50 mA cm^{-2} and 100 mA cm^{-2}, respectively. When comparing nickel mesh (NM) and nickel foam (NF) as catalyst supports, both exhibited similar initial activity; however, NM provided significantly enhanced long-term stability. An AEM water electrolyzer utilizing the Pt-Ce-Ni/NM catalyst achieved a low cell voltage of 1.54 V at 50mA cm^{-2} and maintained stable performance for over 48 hours at 100 mA cm^{-2}. This exceptional performance is attributed to abundant active sites, the ordered structure of NM, favorable charge distribution, and synergistic effects between Pt, Ce, and Ni. This research highlights a promising approach for developing low-cost, highly stable electrocatalysts by leveraging structurally ordered electrode materials to improve durability and minimize catalyst degradation in water electrolyzers.

Acknowledgments: This work was partly supported by the Technology development Program of MSS [RS-2024-00467484] and the ICT development R&D program of MSIT [RS-2024-00467484]. This work was supported by the Technology development Program(RS-2023-00690003) funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea). This work was supported by the Korea Innovation Foundation(INNOPOLIS) grant funded by the Korea government(MSIT) (2024-IT-RD-0087-01-101). This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under project number 202100390004. This research is funded by Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency (project number 202402570002).

[P21-31]

Improving PEM Water Electrolyzers with Surface-Engineered 1T'-Phase WS2 Nanosheets and Stabilized Ti_3C_2 MXene for Enhanced Performance and Cost-Efficiency: 양비룡*, Debabrata Chanda, Ahmed Shahbaz, Mallappa Mahanthappa, Gyung-gyun Park (Kumoh National Institute of Technology, GHS Co. Ltd.), Myung Seon Ryu (Pheonix Tech Co., Ltd.), Myung-sik Choi (S.J. Tech Co. Ltd.), Kweon Soon-Yong (Korea National University of Transportation)
Keywords: Hydrogen Evolution Reaction, PEM Water Electrolyzer, Tafel Slope

The production of green hydrogen through the electrolysis of water is an effective way to create a carbon-free energy footprint. Electrochemical hydrogen evolution reactions (HER) are the most attractive for overall water splitting, and the use of Pt-based catalysts (PGMs) has traditionally driven this process. However, alternative low-cost, active, and stable non-PGM catalysts are highly desirable for replacing PGMs. In recent years, transition metal chalcogenides (TMDs) such as MoS2 and WS2 have received much attention as potential HER catalysts. These materials have demonstrated low hydrogen adsorption free energy (ΔG*) and low overpotential, making them promising alternatives to PGMs. In this study, we have modified 1T′-WS2@C-Ti3C2 MXene with a stable form of C-Ti3C2 MXene was cationically modified to improve adhesion to the WS2 layer on carbon paper (CP) surface. The material exhibited a high number of electrochemically active sites, excellent structural stability, and superior electrocatalytic activity, making it a promising candidate for hydrogen evolution reaction (HER) catalysts. In the practical cell setup employed with a low catalyst loading of 0.27 mg cm^{-2} and a Nafion117 membrane, which generated a small voltage of 1.9 V at a current density of 1500 mA cm^{-2}. Furthermore, the modified catalyst exhibited a mass activity that was 30 times higher than ionomer-containing 1T′-WS2@C-Ti3C2 MXene electrode, highlighting the importance of optimizing both the catalyst and the electrode fabrication process to improve the intrinsic catalytic activity, electrode conductivity, and stability for practical PEM water electrolysis. The findings suggest a promising direction for future research in this field. Acknowledgments: This work was partly supported by the Technology development Program of MSS [RS-2024-00467484] and the ICT development R&D program of MSIT [RS-2024-00467484]. This work was supported by the Technology

development Program(RS-2023-00690003) funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea). This work was supported by the Korea Innovation Foundation(INNOPOLIS) grant funded by the Korea government(MSIT) (2024-IT-RD-0087-01-101). This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under project number 202100390004. This research is funded by Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency (project number 202402570002).

[P21-32]

Surface Interfacial Electronic Coupling-Driven Enhancement of HER and OER Performance in Cr-Mediated Ni_3Se_4/CoSe for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis: Bee lyong Yang*, Mallappa Mahanthappa, Ahmed Shahbaz, Debabrata Chanda, Gyung-gyun Park (Kumoh National Institute of Technology, GHS Co. Ltd.), Myung Seon Ryu (Pheonix Tech Co., Ltd.), Myung-sik Choi (S.J. Tech Co. Ltd.), and Kweon Soon-Yong (Korea National University of Transportation)

Keywords: Cr-Ni_2Se_3/CoSe, HER, OER, AEMWE, Overpotential, Tafel

Developing efficient and robust catalysts to replace precious-metal-based benchmarks for electrocatalytic overall water splitting is a crucial step toward sustainable energy utilization and environmental sustainability. This study investigates the enhanced performance of Cr-mediated Ni $_2$ Se $_3$ /CoSe (Cr-NCS) for the hydrogen evolution reaction (HER) and oxygen evolution reaction (OER), driven by effective surface interfacial electronic coupling. Using a hydrothermal synthesis approach, the composite material exhibits a morphology that significantly enhances electronic interactions, optimizing water, protons, and oxygen adsorption energies. Experimental evaluations reveal outstanding electrocatalytic performance metrics, including overpotentials of 234 mV and 240 mV at 50 mA cm $^{-2}$ for HER and OER, respectively. Density functional theory calculations provide mechanistic insights, indicating that the Cr sites in the composite play a pivotal role in enhancing catalytic activity, resulting in lower theoretical overpotentials compared to non-Cr counterparts. Furthermore, the study demonstrates the performance of an anion exchange membrane water electrolyzer incorporating Cr-Ni $_2$ Se $_3$ /CoSe/NF, showcasing impressive metrics: a current density (j) of 780 mA cm-2 at 1.85 V. These results highlight the critical role of surface interfacial electronic coupling in improving the efficiency of electrocatalytic processes and energy conversion, paving the way for advancements in sustainable hydrogen production technologies. Acknowledgments: This work was partly supported by the Technology Development Program of MSS [RS-2024-00467484] and the ICT development R&D program of MSIT [RS-2024-00467484]. This work was supported by the Technology Development Program(RS-2023-00690003) funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea). This work was supported by the Korea Innovation Foundation(INNOPOLIS) grant funded by the Korea government(MSIT) (2024-IT-RD-0087-01-101). This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under project number 202100390004. This research is funded by Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency (project number 202402570002).

[P21-33]

Enhancement of reactive performance in SnO_2 Nanorod-based gas sensor via room-temperature plasma surface treatment: Yoonhyeong Choi and Wooyoung Lee* (Yonsei Univ.)

Keywords: Metal Oxide, Gas sensor, Plasma

Hydrogen is gaining attention as a next-generation clean energy source, highlighting the importance of developing highly sensitive hydrogen gas sensors. Metal oxide semiconductor (MOS)-based hydrogen gas sensors have been extensively studied, and various approaches have been proposed to enhance their performance, such as increasing the operating temperature or modifying the structure of the sensing material. However, many of these methods require complex fabrication processes, emphasizing the need for simpler yet effective performance enhancement techniques. In this study, we fabricated a hydrogen gas sensor using SnO_2 nanorods (average thickness ≈ 100 nm) as the sensing layer, deposited via e-beam evaporation. To improve sensor performance, we introduced an O_2 plasma treatment. The plasma treatment was conducted at room temperature, and the effects of plasma power and treatment duration on sensor performance were analyzed. O_2 plasma treatment modulated the oxygen vacancies and surface chemical composition of the SnO_2 nanorods, increasing their reactivity with hydrogen molecules and significantly enhancing sensor sensitivity. These results present a novel approach for improving the sensitivity of MOS-based hydrogen gas sensors and suggest that plasma treatment can be effectively utilized to control the electronic and chemical properties of metal oxide surfaces.

[P21-34]

MoO_2 분말 압축 밀도 변화에 따른 소결 특성 연구: 치밀화 속도 및 결정립 성장 분석: 이종범, 정하국* (한국생산기술연구원)

Keywords: MoO_2, compact density, sintering, densification, grain growth

MoO_2 분말을 100~800 MPa 범위의 다양한 단축 압력으로 압축하여 55~65% 범위의 상대 밀도를 갖는 성형체를 제조하였다. 이 성형체들을 N_2 분위기 하에서 650~1050 ℃ 범위의 목표 온도로 1시간 동안 소결한 후, 이들의 소결 거동, 특히 치밀화 속도와 결정립 성장을 조사하였다. 상온에서 MoO_2 분말의 압축 과정 중, 파단이나 국부적인 변형이 발생하기 전의 단축 압력 범위 내에서 압축 밀도와 압력의 로그 값 사이에 선형 관계가 관찰되었다. 소결된 MoO_2 시편의 상대 밀도는 압축 밀도와 소결 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 주어진 소결 온도에서 가장 높은 압축 밀도를 가진 시편이 가장 우수한 치밀화 속도를 나타내었다. 소결된 시편의 결정립 크기는 상대 밀도에 비례하였으며, 결정립 성장은 Arrhenius 방정식을 따르는 것으로 나타났다. 소결

과정 중 55%, 60%, 65%의 상대 밀도를 갖는 시편들은 소결 온도에 따라 다른 활성화 에너지 값을 나타내었다. 낮은 소결 온도에서 55%, 60%, 65%의 압축 밀도에 대한 활성화 에너지는 각각 50.8, 39.6, 26.1 kJ/mol이었으며, 높은 소결 온도에서는 각각 19.8, 21.5, 25.4 kJ/mol이었다.

[P21-35]

MoO_2 분말의 소결 과정이 미세구조 변화, 결정립 및 결정립 성장에 미치는 영향: 이종범, 정하국* (한국생산기술연구원)

Keywords: MoO_2, Sintering, XRD, SEM, Morphology, Crystallite, Grain growth

평균 기공 크기가 3.4 nm이고 비표면적이 2.5 g/cm^{3}인 MoO_2 미세 분말을 건식 압착 방식으로 압축한 후, 질소(N_2) 분위기에서 무가압 소결을 진행하였다. 소결 조건은 1000–1150ºC에서 2시간 동안, 그리고 1050ºC에서 0.5–12시간 동안이었다. 이후, 시료의 형상, 결정립 및 결정립 성장과 관련된 미세구조 변화를 조사하였다. 특정 온도 및 시간 조건에서 소결을 진행한 결과, 불규칙한 형태의 MoO_2 분말이 표면 에너지로 인해 등축정 구조로 상전이되었으며, 이는 소결 초기 단계에서 더 빠른 결정립 성장에 기여하였다. 결정립 크기 및 결정립 크기는 소결 시간이 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하였으며, 성장 지수(n)는 각각 약 2.8과 4로 나타났다. 이는 결정립 성장이 전위 매개 격자 확산에 의해 지배되고, 결정립 성장은 표면 확산 제어 기공 이동성에 의해 결정됨을 의미한다. 소결 온도 증가는 결정립 크기 및 결정립 크기 모두를 증가시켰으며, 이는 Arrhenius 방정식을 따르는 경향을 보였다. 결정립 성장 및 결정립 성장에 대한 활성화 에너지는 각각 95.65 kJ/mol과 76.95 kJ/mol로 결정되었다.

[P21-36]

Post-irradiation Examination (PIE) of reactor materials: EPMA Methods and the Need for Advanced Analytical Techniques: Gahyun Choi* and YangHong Jung (Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI))

Keywords: PIE, EPMA, TEM, FIB, irradiated materials

Post-irradiation examination (PIE) research plays an important role in many aspects of enhancing the safety of nuclear power plants, developing next-generation reactors and nuclear fuel, and managing radioactive waste. PIE is used to understand how the nuclear fuel and structural materials inside the reactor change when exposed to high radiation and high temperatures, which can improve the safety of nuclear power plants and help predict the lifetime of nuclear fuel. These studies require sophisticated analytical techniques, and EPMA and FIB-SEM play an important role. Electron probe microanalysis (EPMA), an advanced analytical method that integrates electron microscopy and microanalysis, is critical for determining the chemical composition of microscopic regions within solid samples that are only a few micrometers in diameter. Unlike other quantitative analyzers, EPMA provides reliable and precise analysis through a relatively simple process, making it an essential tool in the nuclear industry. The Irradiated Material Examination Facility (IMEF) at the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) is using EPMA for irradiated material analysis, with a facility design that incorporates lead and tungsten shielding for safe examination of samples. This study details the characteristics of reactor materials and the various analytical techniques for evaluating irradiated nuclides utilizing radiation-shielded EPMA, and describes the need for advanced instrumental techniques such as FIB and TEM.

[P21-37]

MOF-Derived Bimetallic Phosphoselenide Nanoparticles for an Efficient Bifunctional Electrocatalyst for Overall Water splitting: Maniyazagan Munisamy, Perumal Naveenkumar, K. P. Nithyanandam, Hyeon Woo Yang, and Sun-Jae Kim* (Sejong University)

Keywords: Water splitting, Hydrogen evolution reaction, Oxygen evoluation reaction, Metal-organic framework.

Alkaline water electrolysis for hydrogen production has attracted wide attention due to its green, sustainability and feasibility of utilizing renewable energy sources such as wind and solar power. However, electrochemical water splitting involves the hydrogen evolution reaction (HER) and the oxygen evolution reaction (OER), both of which involve proton transfer processes, resulting in high kinetic barriers and hence limiting the efficiency of water splitting. Transition metal-based compounds have garnered increased attention for their abundance on earth, low cost, and tunable structural properties. The includes sulfides, phosphides, nitrides, oxides, borides and selenides. These electrocatalysts exhibit high activity due to their high electrical conductivity, high number of active sites, mass charge transfer, and synergistic effect on water electrolysis. Transition metal phosposelenide compounds are one of the most promising material systems for application, it has layer-dependent tunable band gap, fat response speed, high mobility, high specific area and unique electrocatalytic activity. In this study, a simple solvothermal strategy is adopted to synthesize metal organic framework based bimetallic copper cobalt based phosphoselenide (CuCoPSe@C) nanoparticles with superior water splitting activity and stability, owing to the perfect nanoparticle structure with numerous active sites. Moreover, the bimetallic transition metal element not only enhances the electroconductibility of the catalyst, but also further improves the electrocatalytic ability. The as-synthesized CuCoPSe@C nanoparticles exhibit excellent electrocatalytic performances. Under alkaline conditions, CuCoPSe@C nanoparticles exhibit an overpotential of 35 and 360 mV for HER and OER, respectively, at 10 mA cm^{-2}. For total water splitting, a low voltage of 1.58 V is required to provide a current density of 10 mA cm^{-2}. And the catalyst exhibits long-term durability for 48 h at a high current density of 10 mA cm^{-2}.

[P21-38]

Development of Rolling Process Model for U_3Si_2 Fuel Plate Using Finite Element Method: Kyeongmin Park, Gwanyoun Jung, Taewon Cho, Dongjun Park, Yongjin Jeong (Korea Atomic Energy Research Institute), Hyeongjin Kim, and Hojin Ryu* (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: U_3Si_2, fuel plate, RERTR, defect, hot rolling

Following the implementation of the U.S. RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors) program, research has been conducted on achieving high density in low-enriched uranium to replace highly enriched uranium. U_3Si_2, in particular, exhibits relatively stable irradiation behavior due to its high viscosity characteristics and has been selected as both second and third generation uranium alloy, leading to active ongoing research in U_3Si_2 plate-type nuclear fuel development. However, during the rolling process of forming U_3Si_2 fuel into plates, geometric defects occur in the fuel meat due to the structural characteristics of plate-type fuel. These fuel meat defects not only limit the uranium density in the meat but also compromise the thermal stability and structural integrity of the fuel, necessitating improvement. In this study, a finite element model was developed using Abaqus to predict the behavior of fuel meat in U_3Si_2 fuel plate during the rolling process. Through the development of this model, rolling simulations can be performed to conveniently predict the geometric behavior of fuel meat according to rolling process parameters without fuel plate fabrication. This is expected to contribute to improving the manufacturing yield and safety of U_3Si_2 plate-type nuclear fuel.

P22 : 마그넷
Room 3층 로비, 4월 25일

[P22-1]
PLP 공정으로 제조한 Nd-Fe-B 소결자석에서 윤활제의 효과: 김소연 (한국재료연구원, 울산과학기술원), 변재호, 이정구, 김태훈, 김수민* (한국재료연구원), 이기석* (울산과학기술원)
Keywords: Nd-Fe-B 소결자석, PLP, 윤활제, 미세분말, 입자미세화

Nd-Fe-B 영구자석은 높은 자기적 특성으로 인해 전기자동차, 스피커, 발전기, 센서 등 다양한 산업에 적용되어 왔으며, 특히 전기/하이브리드 자동차 시장 규모가 확대됨에 따라 구동모터의 작동 온도를 고려하여 상온에서 고보자력을 확보하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 Nd-Fe-B 자석의 보자력을 향상시키기 위해 Nd보다 결정자기이방성(Magnetocrystalline anisotropy)이 높은 중희토류(heavy rare-earth, HRE) 원소를 첨가하지만, 중희토류 원소의 가격/수급의 불안정과 잔류자화 감소의 한계가 있다. 중희토류 원소의 첨가 없이 자석의 보자력을 극대화하는 대표적인 방법이 입자 미세화다. 일반적인 Nd-Fe-B 상용소결자석은 3-5 μm의 결정립을 가지며, 이로 인해 domain-wall motion에 의한 자화 반전이 지배적이다. 자석의 결정립이 줄어들어 단자구 크기에 가까워질수록 자화 반전 거동이 coherent rotation으로 전환되어 보자력이 향상된다. 하지만 분말이 작아질수록 비표면적의 증가로 분말 간 거리가 감소함에 따라 마찰력과 자기적 척력이 증가하여 분말의 정렬이 방해되고, 결과적으로 소결자석의 잔류자화 특성은 감소한다. Sagawa 박사는 2008년 Pressless process(PLP)라는 미세한 분말을 정렬하여 고보자력의 소결자석을 제조하는 데 효과적인 공정을 제안하였다. 이 기술은 저압/고자장 환경에서 분말을 정렬하는 기술로 균일한 수축이 가능하고 net-shape 형태의 자석 제조가 가능하다. 특히 분말 정렬 시 윤활제를 도입하여 분말간 거리를 확보하고 마찰력을 감소시킴으로써 분말 정렬의 효과를 극대화할 수 있다. 본 연구에서는 Nd-Fe-B 소결자석을 제조를 위한 PLP 공정에서의 윤활제의 효과를 확인하기 위해 Jet-mill을 통해 얻은 3 μm 미만의 분말에 8개의 탄소사슬을 가지는 유기 윤활제를 사용하여 코팅하였고, 저압/고자장 환경 하에 분말을 정렬하여 소결자석을 제조하였다. 최종 자석의 자기적 특성과 미세구조를 분석하였으며, 이를 통해 PLP 공정에서의 윤활제 효과를 확인하고 최적 윤활제, 코팅 방법, 최적 첨가량 등을 도출하였다.

[P22-2]
Improvement of Magnetic Properties in Nd-Fe-B Sintered Magnets by Grain Boundary Diffusion Using Dry-Coated Pr-LRE-Tb-Al-Cu Alloys: Dong Hyun Lee (DGIST, Kyungpook National Univ.), Seong Chan Kim, Hyeonjong Jeong, Ju-young Baek, Tae-Young Yun, Jong Tae Kim (DGIST), Donghwan Kim, Sang Hyub Lee (R&D Center, Star Group), Jong Wook Roh (Kyungpook National Univ.), Dong Hwan Kim, and Jeongmin Kim* (DGIST)
Keywords: Grain boundary diffusion process, Nd-Fe-B sintered magnet, Light rare-earth (LRE), Coercivity, Remanence

The Nd-Fe-B sintered magnets are widely used in various applications, including hard disk drives, magnetic sensors, wind power generators, high-efficiency air-conditioner compressors, and electric vehicle motors. Nd-Fe-B magnets exhibit a large maximum magnetic energy product, but in high-temperature environments, the coercivity decreases and performance deteriorates. To achieve high coercivity and remanence at high temperatures, heavy rare-earth (HRE) based grain boundary diffusion process (GBDP) is widely used. However, the limited supply and price surge of the HRE elements caused by the recent trade war inhibit the wide application of HRE. In this study, we investigated the variation in magnetic properties according to the coating method for the optimization of GBDP. To find optimized coating method, dip-coating and dry-coating were conducted. Moreover, to reduce the HRE usage, light rare-earth (LRE) and low-melting-point metals were used for the diffusion sources. The addition of LRE and low-melting-point metals significantly reduced the amount of Tb required in GBDP for coercivity enhancement. Dry-coating has a significant impact on simplifying the process, reducing the use of diffusion sources and enhancing magnetic properties. The magnetic properties and microstructure of Pr-LRE-Tb-Al-Cu (LRE= La, Nd and Ce) diffusion magnets with various compositions are discussed.

[P22-3]
Influence of TbH_x Content on the Microstructural and Coercivity of Nd-Fe-B Sintered Magnets Processed by Spark Plasma Sintering and Internal Grain Boundary Diffusion: Seong Chan Kim (DGIST), Dong Hyun Lee (DGIST, Kyungpook National Univ.), Jung Woo Ha (DGIST), Kyoung-Hoon Bae (R&D Center, Star Group), Jong Wook Roh (Kyungpook National Univ.), Dalhyun Do (Keimyung Univ.), Jong Tae Kim, Tae-Young Yun, Seok-Hwan Chung, Jeongmin Kim, and Dong Hwan Kim* (DGIST)
Keywords: Nd-Fe-B sintered magnet, Spark plasma sintering, Coercivity, grain boundary diffusion, Internal grain boundary diffusion

The grain boundary diffusion (GBD) process is widely used to enhance the coercivity of Nd-Fe-B sintered magnets by diffusing heavy rare earth (HRE) elements such as Dy and Tb along grain boundaries through heat treatment. However, conventional GBD has several limitations, including excessive consumption of diffusion sources at the surface, inhomogeneous diffusion, and restricted diffusion depth. To overcome these limitations, this study fabricated Nd-Fe-B sintered magnets by combining the spark plasma sintering (SPS) process with internal grain boundary diffusion (i-GBD) using TbHx as the diffusion source. In the i-GBD process, Nd-Fe-B powder was uniformly mixed with TbHx before SPS, followed by post-sintering heat treatment to induce diffusion. A previous study

compared the diffusion depth and uniformity between conventional GBD (c-GBD) and i-GBD under a fixed TbHx content of 1 wt.%. The results demonstrated that i-GBD enabled uniform diffusion throughout the entire magnet, forming a homogeneous core-shell structure. In contrast, c-GBD exhibited concentrated diffusion near the surface, resulting in limited diffusion depth. This difference in diffusion uniformity significantly influenced coercivity; i-GBD achieved higher coercivity due to its homogeneous diffusion, whereas c-GBD showed relatively lower coercivity due to its restricted diffusion depth. To further investigate the differences between the two processes, TbHx content was varied from 0 to 5 wt.%, and the resulting microstructure and coercivity were analyzed. Based on these results, the effects of TbHx content on diffusion behavior and magnetic properties were quantitatively evaluated to determine the optimal conditions for coercivity enhancement.

[P22-4]

Interrelation Between the Grain Structure and The Magnetic Properties of Melt-Spun Nd-Ce-Fe-B Ribbon: Jung Woo Ha, Hyeonjong Jeong, Seong Chan Kim (DGIST), Dong Hyun Lee (DGIST, Kyungpook National Univ.), Ju-young Baek, Tae-Young Yun, Jong Tae Kim (DGIST), Jaehyuk Kim (Yonsei Univ.), Seok-Hwan Chung, Jeongmin Kim, and Dong Hwan Kim* (DGIST)

Keywords: Sintered Nd-Fe-B magnet, Spark plasma sintering, Melt-spun ribbon, Grain structure, Coercivity

Sintered Nd-Fe-B magnets are essential components in electric vehicle motors, wind power generators, hard disks, and magnetic sensors. Various studies have been conducted to enhance the properties of Nd-Fe-B magnets. One of these studies focuses on the melt-spinning process, which rapidly cools molten alloys to form amorphous or fine nanocrystalline structures. This process produces melt-spun ribbons with significantly finer grain sizes compared to conventional casting methods, optimizing the magnetic properties of sintered magnets. Grain size significantly influences magnetic properties, as grain sizes close to the magnetic domain size suppress multi-domain formation and enhance magnetic performance. In this study, the melt-spinning process is employed to achieve a fine-grained structure. Furthermore, the SPS process with low-temperature sintering maximizes the advantages of melt-spun ribbons by suppressing grain growth. This study investigates the crystal structure of melt-spun ribbons based on process parameters and analyzes the magnetic properties of sintered magnets derived from melt-spun ribbons. To determine the interrelation between grain structure and magnetic properties, XRD and SEM analyses are performed on the melt-spun ribbons, while BH tracer measurements are conducted on the sintered magnets produced from the melt-spun ribbons.

[P22-5]

Effect of Heating Rate on the Soft Magnetic Properties of High-Fe Nanocrystalline Alloys: Eunjin Park, Jongil Lee, and Seonghoon Yi* (Kyungpook National University)

Keywords: Amorphous, Nanocrystalline, Soft magnetic

This study investigates the influence of heating rate on the microstructural evolution and soft magnetic properties of high-Fe nanocrystalline alloys. The Fe content was increased to enhance saturation magnetization (Ms), and amorphous ribbons were fabricated using the melt-spinning method. Controlled crystallization was induced through thermal annealing at various heating rates, and structural and magnetic properties were analyzed using X-ray diffraction (XRD), differential scanning calorimetry (DSC) vibrating sample magnetometry (VSM), and DC BH loop tracer measurements. The results reveal that heating rate plays a crucial role in determining grain growth, phase stability, and overall magnetic performance. It was observed that slower heating rates facilitated finer nanocrystalline grain formation, leading to lower coercivity (Hc) and higher permeability (μ), whereas faster heating rates promoted coarser grain growth, which affected the soft magnetic properties. Additionally, variations in heating conditions influenced the onset of primary crystallization and the evolution of the nanocrystalline phase, directly impacting magnetic performance. This study provides valuable insights into optimizing the annealing process for high-Fe nanocrystalline soft magnetic alloys, demonstrating that precise control of thermal treatment is essential for achieving superior magnetic properties.

[P22-6]

Fe-based Soft Magnetic Composites for High-Frequency Power Applications Fabricated by Spark Plasma Sintering: Hyungjin Nam, Seongjun Kim, Mingyo Jeong, and Seonghoon Yi* (Kyungpook National University)

Keywords: Fe-based soft magnet, amorphous, sintering

With increasing demand for energy efficiency and sustainable power systems, the development of soft magnetic materials with reduced electromagnetic losses has gained significant attention. Fe-based amorphous alloys, characterized by high saturation magnetization, low coercivity, and high electrical resistivity, have emerged as promising candidates for minimizing core losses in high-frequency power applications. Soft magnetic powder cores with insulating coatings offer superior electrical resistivity and magnetic stability compared to conventional magnetic laminations, making them suitable for compact, high-efficiency power devices. This study investigates the magnetic, mechanical, and corrosion properties of Fe-based amorphous alloys with and without Cr addition, focusing on the influence of Cr on glass-forming ability, core loss reduction, and environmental stability. SiO2-based insulating layers were applied to enhance high-frequency performance, and a comparative analysis was conducted to establish an optimal composition for high-frequency power conversion systems, ensuring reduced core losses and improved long-term reliability.

[P22-7]
Optimization of Dy-LRE-Zn-Cu Grain Boundary Diffusion for Enhancement of Magnetic Properties in Nd-Fe-B Sintered Magnets: Hyeonjong Jeong (DGIST), Dong Hyun Lee (DGIST, Kyungpook National Univ.), Jung Woo Ha, Ju-young Baek, Tae-Young Yun, Jong Tae Kim (DGIST), Donghwan Kim, Sang Hyub Lee (R&D Center, Star Group), Seok-Hwan Chung, Dong Hwan Kim, and Jeongmin Kim* (DGIST)
Keywords: Nd-Fe-B sintered magnet, Grain boundary diffusion process, Light rare earth element (LRE), Transition metal (TM), Coercivity

The sintered Nd-Fe-B magnets with high coercivity and maximum magnetic energy product are widely used in electric vehicle (EV) drive motors and various other applications. However, magnetic properties of sintered Nd-Fe-B magnets tend to degrade at high temperatures such as the operating conditions of EV drive motors. The improvement of magnetic properties has been achieved through the grain boundary diffusion process (GBDP) of heavy rare earth (HRE). However, the GBDP of HRE leads to significant agglomeration at the magnet surface. In this study, transition metals and light rare earths (LRE) enhance diffusion efficiency by replacing HRE and improve magnetic properties. The optimal grain boundary diffusion temperatures for various Dy-LRE-Zn-Cu (LRE= Pr, Nd, La and Ce) diffusion sources were determined. Magnetic properties of Dy-LRE-Zn-Cu were systematically analyzed.

[P22-8]
Effect of Cu Addition on the Thermal and Magnetic Properties of Fe-Based Amorphous Alloys: Seongjun Kim, Hyeongjin Nam, Mingyo Jeong, and Seonghoon Yi* (Kyungpook National University)
Keywords: amorphous, soft magnet, Fe-based

Fe-based soft magnetic materials are increasingly utilized in industries such as automotive, medical equipment, energy storage, and magnetic engineering due to their advantageous properties, including low hysteresis loss, low coercivity, high permeability, and high saturation magnetization, as well as their cost-effectiveness. In this study, we investigate the differences in magnetic properties between Fe-based amorphous alloys with and without Cu addition by analyzing their thermal and magnetic characteristics. By adding Cu, we designed compositions in which a distinct glass transition temperature (T_g) is present, while the previously single crystallization temperature (T_x) separates into T_{x1} and T_{x2}. This separation allows the nanocrystallization of α-Fe at T_{x1}, improving magnetic properties. Experiments were conducted using melt-spinning to fabricate amorphous ribbon samples, followed by evaluation of their magnetic properties using a Vibrating Sample Magnetometer (VSM), DC loop tracer, and AC analyzer.

[P22-9]
Magnetic Properties and Microstructure Analysis of Hot-Deformed (Ce,La)-Fe-B Magnets with Eutectic Alloy Addition: Kyungmi Lee, Ye Ryeong Jang, and Wooyoung Lee* (Yonsei Univ.)
Keywords: Permanent magnet, Hot-deformed

In research to reduce the use of heavy rare earth and improve the performance of permanent magnets, Ce is being used a lot. However, Ce-Fe-B type alloys have a detrimental effect on magnetic properties due to the formation of a paramagnetic CeFe2 phase. In this study, we investigated the fabrication of bulk Ce–Fe–B and (Ce,La)–Fe–B magnets by hot-deformation. It was found that no texture could be developed in the Ce–Fe–B alloy after deformation, attributed to the absence of a rare-earth rich phase. However, a pronounced preferred orientation was observed in magnets where La was substituted for Ce. The development of texture is linked to the reduced formation of the CeFe2 Laves phase in the (Ce,La)–Fe–B alloy, which allows the formation of a rare-earth rich intergranular phase necessary for texture formation during hot deformation. Furthermore, a eutectic alloy was produced using the melt-spinning process. Hot deformation was performed by mixing the (Ce,La)–Fe–B and LRE-containing eutectic alloys, and the magnetic properties of the alloy were improved by reducing the formation of the paramagnetic CeFe2 phase by adding eutectic alloy powder. In addition, through the hot deformation process, the degree of alignment of the magnet was increased to improve the Hcj, resulting in a high (BH)max value.

[P22-10]
Microstructural Optimization and Coercivity Enhancement in Nd-Ce-Fe-B Magnets through Grain boundary diffusion of Pr-La Mixed Alloy: Ye Ryeong Jang and Wooyoung Lee* (Yonsei University)
Keywords: Nd-Fe-B sintered magnet, Grain boundary diffusion process, chemically induced liquid film migration, light rare earth

We report on the magnetic and microstructural characteristics observed in Nd-Ce-Fe-B sintered magnets following grain boundary diffusion process (GBDP) with Pr-La-Cu-Ga alloys. The microstructural feature of the shell and grain boundary phase (GBP) in GBD treated with Pr-La-Cu-Ga and Pr-Cu-Ga were characterized via the electron probe microanalysis and high-angle annular dark-field scanning transmission electron microscopy analysis. Despite partial substitution of Pr with La, the magnets exhibited higher coercivity than those without substitution, showing an increase from 13.7 kOe (11.3kOe before heat treatment) to 20 kOe without the use of heavy rare earth (HRE) elements. The GBDP with Pr-containing alloys forms a high-anisotropy Pr-rich shell, enhancing coercivity; however, this shell formation also initiates chemically

induced liquid film migration (CILFM), resulting in undesirable grain growth in the magnets, which restricts the improvement of coercivity. The formation of Pr-enriched thin RE-rich shell in Nd-Ce-Fe-B magnets with GBDP of Pr is more advantageous for enhancing coercivity. The RE concentration in the high-anisotropy RE-rich shell can be more effectively controlled by suppressing CILFM. It was confirmed that CILFM effectively suppressed using La due to its low solubility in the 2:14:1 phase. Using La with Pr as a source for the GBDP allows for preferential accumulation of La in the GBP, inhibiting the accumulation of Pr in the GBP and thus increasing the Pr concentration within the RE-rich shell. Consequently, utilization of La can be a solution to prevent undesirable grain growth caused by CILFM, increase the RE concentration in the shell, and potentially reduce the cost of the GBDP source.

[P22-11]

Effect of Grain Boundary Diffusion With Tb-saving Tb-X-Cu (X=La or Ce) Sources on Microstructure and Coercivity of Nd-Fe-B Sintered Magnets: A Comparative Study with Tb-Cu Source: 김혁중 (한국재료연구원, 포항공과대학교), 김수민, 김태훈* (한국재료연구원), 이준민* (포항공과대학교), 이정구 (한국재료연구원)

Keywords: Nd-Fe-B magnet, grain boundary diffusion process, Tb-X-Cu, Tb-saving

Nd-Fe-B 영구자석은 자석 내 $Nd_2Fe_{14}B$ 주상 (2-14-1 main phase)의 높은 자기이방성과 포화자화 특성으로 인해 매우 우수한 보자력과 잔류자화 특성을 나타내기 때문에, 전기자동차용 고효율 전기모터에 필수적으로 사용되는 소재이다. 그러나 Nd-Fe-B 자석은, 자석 내 2-14-1 주상의 비교적 낮은 큐리 온도 (~310 ºC)로 인해, 약 150 ºC의 모터 작동 온도에서 보자력이 감소하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 고가의 중희토류 원소인 Tb을 이용한 입계확산 공정을 적용하여 상온에서 2.5 T 이상의 높은 보자력을 확보하는 기술이 개발되어 왔다. 최근에는, Tb의 입계확산 효율을 향상시키기 위해, Tb과 Cu를 eutectic 조성으로 합금화 하여 입계확산함으로써 자석의 보자력을 3.0 T 까지 향상시키는데 성공 하였다. 입계를 따라 확산된 Tb이 자석 중심부까지 침투하여, 자기이방성이 높은 Tb-rich shell [$(Tb,Nd)_2Fe_{14}B$]을 자석 내부에 고르게 형성 하였으며, 동시에 반강자성 성질을 띄는 Cu가 Nd-rich 입계상에 용해되어 2-14-1 주상 간 자기교환결합을 억제함으로써 자석의 보자력이 매우 향상 되었다. 하지만, $Tb_{70}Cu_{30}$ 입계확산공정은, 입계확산물질 내 비교적 많은 양의 Tb 사용 (Tb 70 at.%)으로 인해, 자석의 가격 경쟁력이 악화되고, Tb-rich shell 형성 중 Tb을 소모하면서 일어나는 불필요한 결정립 조대화 현상인 CILFM 현상이 과도하게 일어나는 문제점이 있다. 또한, Tb은 2-14-1의 Fe와 반강자성 결합 (antiferromagnetic coupling)을 하기 때문에, 자석내로 확산하는 Tb의 양이 많을수록 자석의 잔류자화 감소가 크다. 본 연구에서는, 이러한 문제를 해결하기 위해, 열역학적으로 2-14-1 주상 내에서 안정하지 않아 (즉, shell 형성이 용이하지 않아), CILFM을 효율적으로 억제할 수 있는 저가의 물질인 La과 Ce을 기존 $Tb_{70}Cu_{30}$ 입계확산물질의 Tb과 치환하여 Tb 함량이 저감 된 $Tb_{40}(La\ or\ Ce)_{30}Cu_{30}$ 입계확산물질을 개발함으로써, 더 적은양의 Tb 사용으로 $Tb_{70}Cu_{30}$-입계확산자석에 상응하는 보자력을 갖는 Tb 저감형 고보자력 입계확산자석을 제조하고자 하였다. 그 결과, 3 wt.%의 $Tb_{40}La_{30}Cu_{30}$ (실제 Tb 사용량: 1.5 wt.%)를 입계확산 하여 3 wt.%의 $Tb_{70}Cu_{30}$ (실제 Tb 사용량: 2.6 wt.%)를 입계확산한 자석과 유사한 보자력과 잔류자화를 갖는 소결자석을 얻는데 성공하였다 (Tb-La-Cu: 보자력 2.8 T, 잔류자화 1.4 T / Tb-Cu: 보자력 2.8 T, 잔류자화 1.3 T). 미세구조 분석 결과, Tb-La-Cu-입계확산자석의 경우, 주상의 Nd에 대한 치환에너지가 양의 값을 갖는 La은 주상이 아닌 Nd-rich 입계상에만 주로 용해되어, La에 의한 쉘의 고유자기특성저하가 억제되었고 CILFM에 의한 shell 두께의 과도한 증가 및 결정립 과성장 현상이 최소화되었다. 또한, 자석 표면에서의 CILFM 억제로 인해 Tb의 입계확산 깊이가 증가하여, Tb-Cu-입계확산자석 대비 Tb 사용량이 감소하였음에도 불구하고 보자력은 Tb-Cu-입계확산자석과 동등한 수준으로 구현되었다. 3 wt.% Tb-Ce-Cu-입계확산 자석의 경우, 쉘에 Tb과 함께 고유자기특성이 열악한 Ce이 동시에 고용되어 있는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 CILFM에 의한 쉘 형성에 있어서 Tb 뿐 만이 아닌 Ce 또한 개입된다는 것을 나타낸다. 쉘 형성에 대한 Ce의 개입으로 인해, 쉘의 결정자기이방성이 낮아지고, CILFM 발생을 위한 과도한 구동력을 부여하여 매우 두꺼운 두께의 쉘과 매우 큰 크기의 2-14-1을 형성하여 자석의 보자력이 Tb-La-Cu-입계확산자석보다 낮게 나타난다. 결론적으로, 주상에서 안정하지 않은 저가의 La을 Tb과 치환함으로써, 입계확산 이후의 쉘의 미세구조 개선 및 Tb의 입계확산깊이 향상을 유도하여, 기존 Tb-Cu 합금 대비 58% 적은양의 Tb을 사용하고도 기존 입계확산과 동등 수준의 보자력을 구현해 내는데 성공했다.

[P22-12]

Densification and Magnetic Properties of $Sm_2Fe_{17}N_3$ Bulk Magnets Processed via Spark Plasma Sintering and Hot Pressing: Jaehyuk Kim, Ye Ryeong Jang, Ho Jeong Kim, and Wooyoung Lee* (Yonsei Univ.)

Keywords: Permanent magnet, Spark Plasma Sintering, $Sm_2Fe_{17}N_3$

$Sm_2Fe_{17}N_3$ has attracted attention as a next-generation rare-earth permanent magnet due to its high saturation magnetization (M_s), large anisotropy constant (k_1), and high Curie temperature (T_c). However, $Sm_2Fe_{17}N_3$ decomposes into α-Fe and SmN phase at temperatures above 500ºC, making it difficult to fabricate magnets through conventional sintering process. As a result, it is primarly used in the form of bonded magnets, which incoporate non-magnetic binders. However, the presence of a large volume of non-magnetic binders significantly reduces the magnetic properties compared to the original powder. To overcome this issue, researchers have been expliring low-temperature sintering techniques for $Sm_2Fe_{17}N_3$. In particular, the recently developed Spark Plasma Sintering (SPS) method enables densification at relatively lower temperatures and shorter processing times compared to conventional Hot Press (HP) techniques. Therefore, in this study, we aim to fabricate bulk $Sm_2Fe_{17}N_3$ magnets using both SPS and HP methods and conduct a comparative analysis of their density and magnetic properties.

[P22-13]

Microstructural Investigation of a Nanocrystalline Nd-Fe-B Magnet Prepared by Laser Powder Bed Fusion: Ho-Jeong Kim (Yonsei University), Taesuk Jang (Sunmoon University), Du-Rim Eo (KITECH), and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

Keywords: Additive manufacturing, Nd-Fe-B, Permanent magnet, Laser powder bed fusion

Recently, the additive manufacturing technique has emerged as a sustainable alternative technology for producing near net-shape permanent magnets with complex geometries. In particular, the LPBF (Laser Powder Bed Fusion) provides an advantage in producing magnets with a fine microstructure which is beneficial for magnetic properties regardless of the size or shape of the part. The cooling rate of the melt pool in the LPBF process ranges from 10^5 to 10^7 K/s, which is significantly faster than other additive manufacturing processes. The most of studies on the LPBF process for permanent magnets have focused on the Nd-Fe-B based permanent magnets. However, studies on the existing permanent magnet using LPBF are limited to the correlation between process variables and density, as well as the correlation between density and magnetic properties. This study aims to characterize the microstructure of LPBFed materials in depth and examine the effects of process parameters and repeated heat cycles involving during the LPBF process on the microstructure and magnetic properties. To achieve this, samples with similar densities but different solidification microstructures were fabricated, and their magnetic characteristics were analyzed. Nd-Fe-B magnets were manufactured by Laser Powder Bed Fusion using commercially available spherical powder (MQP-S-11-9). Unlike the nanocomposite microstructure of the initial powder, all LPBF samples had a microstructure in which the $(Nd, Pr)_2Fe_{14}B$ grains were basically separated by grain boundary phases through the remelting and solidification of the initial powder. The magnet with the strongest magnetic properties of H_{ci}= 10.3 kOe, B_r= 6.2 kG, and $(BH)_{max}$= 7.5 MGOe was produced when LPBF was performed under the conditions of P90, V500, H70, and L30 (volume energy density = 85.7 J/mm^3). The solidification behavior of Nd-Fe-B magnets during LPBF was analyzed in detail using thermodynamic simulations.

[P22-14]

Development of Ultra-High Performance Nanocrystalline Soft Magnetic Materials through Control of Precipitation Temperature of Alpha-Fe Phase: Subin Ahn (Seoul National University), Wook Ha Ryu (Kumoh National Intsitute of Technology), and Eun Soo Park* (Seoul National University)

Keywords: High magnetic saturation, Low coreloss, Nanocrystal, Nanocluster, Multi-nucleation

As the electronics market, including smartphones and smart homes, continues to expand, there is an increasing demand for high-performance components such as inductors. The performance of inductors heavily relies on the characteristics of their core soft magnetic materials, which serve as crucial elements determining the performance and efficiency of next-generation electronic devices. This study focuses on maximizing the content of ferromagnetic elements such as Fe and Co to minimize core loss in nanocrystalline structures. However, increasing the ratio of ferromagnetic elements presents technical challenges in controlling nanocrystalline size and distribution. To address these challenges, we developed a novel approach incorporating multiple immiscible elements as nucleation sites within the amorphous matrix. By controlling the precipitation temperature of the α-Fe phase, we optimized the nanocrystallization process and successfully achieved significantly higher saturation magnetic flux density (Bs) while maintaining low coercivity (Hc). Furthermore, this composition demonstrated easier thermal treatment processes for nanocrystalline control compared to previously studied compositions, offering advantages for mass production. Microstructural analysis of the developed material revealed that the multiple addition of immiscible elements resulted in uniform nanocrystalline distribution, which proved to be the key factor in achieving superior soft magnetic properties. DSC and in-situ XRD analyses clearly demonstrated the effects of immiscible elements on the precipitation temperature of the α-Fe phase and crystallization kinetics.

[P22-15]

NdFeB 제조를 위한 FeB 원료내에 존재하는 탄소 제어 열환원 공정 개발: 김완규, 이병건, 김가민, 박선영, 구광모* ((주)케이에스엠테크놀로지)

Keywords: FeB, 희토류 영구 자석, NdFeB

기후변화에 대응하기 위해 국제사회는 단계적으로 탄소 배출량을 감축하고 넷제로(Net-Zero) 사회로 전환하기 위해 노력하고 있다. 국제에너지기구(Internatioanl Energy Agency, IEA)의 조사에 따르면 탄소중립 계획에 가장 큰 영향을 받는 분야는 발전, 산업, 운송, 건축 분야 순으로, 이 중 발전과 운송 부문에서 희토류 영구자석의 수요가 크게 늘 것으로 예측하고 있다. 현재 시장에서 가장 일반적으로 사용되는 희토류 자석은 NdFeB 자석으로 네오디뮴, 철, 붕소로 형성된 정방정계 결정으로 현재 가장 강력한 영구 자석이다. NdFeB 자석의 주요 미세조직구조는 Φ상인 $Nd_2Fe_{14}B$로 구성되며, 2차 Nd-rich 상으로 둘러싸여 있다. 그러나 NdFeB 자석 제조 시 탄소가 포함되어 있으면 고온(700-1,000°C)에서 소결 시 반응이 일어나 α-Fe 상, 네오디뮴 탄화물(Nd_2C_3, NdC_2), 철 화합물(Fe_3C, Fe_3B) 및 추가 상을 초래할 수 있다. 상기와 같은 상이 발생하면 미세구조에 영향을 미쳐 자기적 특성에 영향을 주어 성능이 저하되기 때문에 탄소의 제어가 필요하다. 본 연구에서는 NdFeB 제조를 위한 strip 제조 시 사용되는 원료인 FeB 내 탄소 제어를 위한 탈탄 공정에 대한 연구를 진행하였다. 1차 실험으로 FeB 분말과 B_2O_3 분말을 혼합하여 반응 온도(1,300°C, 1,500°C)와 반응 시간(1hr, 4hr)에 따른 탄소 제어 경향을 확인하였으나 공정 온도가 낮아 탄소 제어가 불가하였다. 이에 2차 실험으로 Fe-B 공정 조성 비율에 맞춰 FeB, Fe, B_2O_3 분말을 혼합하여 반응 온도와 시간에 따른 탄소 제어 경향을 확인하였다.

[P22-16]

Packing Density Behavior of Amorphous Soft Magnetic Powder Using DEM Simulation: Jungjoon Kim, Sang-Min Yoon (Institute for Advanced Engineering), Hiw-Jun Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Dae-Weon Kim, Young-Kyun Kim* (Institute for Advanced Engineering), and Hyunjoo Choi* (Kookmin University)

Keywords: Amorphous powder, Packing density, DEM simulation, High-frequency applications, Power conversion

Soft magnetic materials are essential in electric vehicle motors, transformers, wireless power transfer (WPT) systems, and power conversion devices, where low loss in high-frequency regions is critical. With the advancement of wide bandgap (WBG) semiconductors (SiC, GaN), power conversion systems are shifting to the MHz range, requiring materials with high permeability and low iron loss. Amorphous iron-based powders offer superior saturation magnetization and reduced eddy current loss, making them ideal for high-frequency applications. However, their high strength and brittleness hinder high-density forming, leading to low final density and magnetic dilution. Optimizing the initial packing density is essential to mitigate these effects and enhance magnetic performance. This study employs Discrete Element Method (DEM) simulations to analyze the packing behavior of amorphous soft magnetic powders based on particle size distribution and angle of repose analysis. Key parameters, including surface energy, pull-off force constant, static friction coefficient, and rolling friction coefficient, were evaluated. The results show that higher surface energy promotes particle agglomeration, reducing packing density, while lower friction coefficients improve flowability, increasing packing density. This research provides insights into optimizing high-density forming processes, enhancing the performance of soft magnetic materials in power conversion and high-frequency applications. The findings are also applicable to high-density forming in fuel cells, metal 3D printing, and battery electrodes.

[P22-17]

자기장 변조를 통한 자기 도메인 패턴 형성 기술의 산업적 응용 연구: 이재웅*, 이효수, 이해중, 박태훈 (한국생산기술연구원)

Keywords: 자기패턴 필름, 자기 감응성 나노소재, 자기장 변조기술, 자기장 기반 패턴형성

자기장을 이용한 패턴 형성 기술은 다양한 산업 및 학문 분야에서 중요한 연구 주제 중 하나로 자리 잡고 있다. 특히, 보안, 데이터 저장, 디스플레이 및 센서 기술과 같은 응용 분야에서 자기장 기반 패턴 형성 기술의 활용 가능성은 지속적으로 확대되고 있다. 기존의 자기 패턴 형성 기술은 포토리소그래피, 전사 프린팅, 혹은 특정 자성 물질의 물리적 배열을 활용하는 방식으로 구현되었으나, 이러한 방법들은 제작 공정이 복잡하고 대량 생산이 어렵다는 한계를 가진다. 또한, 높은 정밀도의 패턴 형성을 위해서는 고비용의 장비와 다단계 공정이 필요하여 상용화에 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 자기패턴을 형성할 수 있는 특수 필름을 이용하여 다양한 형태의 자기장 패턴을 구현하는 방법을 제시한다. 자기패턴 필름은 특정한 자기장이 가해질 때 미세한 자기 도메인 패턴이 형성될 수 있도록 설계된 소재로, 이를 활용하면 비교적 간단한 방법으로 맞춤형 자기 패턴을 형성할 수 있다. 이러한 접근 방식은 기존의 자기 패턴 형성 기술과 비교하여 비용 효율적이며, 높은 유연성과 재현성을 제공한다는 장점을 가지고 있어 산업화에 유리하다. 자기 감응성 나노소재와 자기장 변조 시스템을 활용하여 자기 도메인의 배향을 정밀하게 조절함으로써 다양한 형태의 패턴을 형성할 수 있으며, 이는 보안 태그, 정보 저장 매체, 고감도 센서 및 광전자 소자의 제조에 응용될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 자기패턴 필름의 특성을 분석하고, 다양한 자기장 인가 방식에 따른 패턴 형성 결과를 비교함으로써 자기 패턴을 활용한 응용 가능성을 평가하였다. 이를 통해 자기장 기반 패턴 형성 기술의 발전 가능성을 제시하고, 실질적인 응용 방향을 탐색하는 데 기여하고자 한다.

[P22-18]

동적 디스플레이 구현을 위한 나노 입자 거동 예측 및 패턴 연구: 홍정범, 박종관, 고병철* (인하대학교), 이효수, 이해중, 이재웅 (한국생산기술연구원), 황민영, 우종봉, 이종호 (데코벨리(주))

Keywords: 자성,나노 입자, 자기장 시뮬레이션, 동적 디스플레이

최근 다양한 차세대 디스플레이 기술 개발과 더불어 내부 건축 디자인 또한 사용자를 위한 적합한 인포모티브 와 감성 표현이 중요해졌다. 특정 색과 정보를 표현 하기 위해 기존 기술로 LCD(Liquid Crystal Display), OLED(Organic Light-Emitting Diode) 등 많은 기술 개발이 되었으나, 건축 디자인의 대면적화 하기 위한 고비용, 높은 소비 전력이 문제가 되었다. 또한 전자 잉크(E-Ink)는 저전력으로 패턴을 구현 할 수 있으나 특정 색이 고정되어 다양한 색상 구현에 어려움이 있었다. 그렇기에 본 연구에서는 자기장 방향과 세기에 따라 색 조절이 가능한 광학적 가변 물질 중 자성 나노 입자를 활용하였으며, 자기장을 통해 입자 배열의 변화는 빛의 회절 각도 변화를 야기하기 때문에 나노 입자 거동에 대한 예측을 진행하였다. 거동 예측을 위해 기존 입자간 Electrostatic Energy, Magnetic dipole moment 등 이론적 수식을 바탕으로 계산하고 이를 상용 시뮬레이션을 통해 구현 하였다. 검증 실험을 위해, 자성 나노 입자가 포함된 자성 필름을 제작하고, 더불어 실험을 위한 솔레노이드 제작을 수직형, 수평형으로 나눠 제작을 하였으며, 권선수 및 입력 전류를 점진적으로 증가시켜 자기장 세기를 제어 하였다. 솔레노이드에서 발생하는 자기장 분포는 3D Hall Sensor를 통해 측정하고 실제 실험을 통한 색상 구현과 나노 자성 입자의 거동 및 배열에 따른 색상 구현을 비교하여 예측의 정확성을 검증 하였다.

P23 : 복합재료
Room 3층 로비, 4월 25일

[P23-1]
비금속 원자를 활용한 Al-Zn-Mg-Cu-O 합금에 MWCNT와 SiC의 첨가로 인한 석출물 거동에 따른 미세조직과 기계적 성질의 변화: 박현우, 조운성 (순천대학교), 배동현, 이진원 (연세대학교), 신세은* (순천대학교)
Keywords: Al-Zn-Mg-Cu alloy, non-metallic element, MWCNT, SiC

항공우주와 자동차 산업 분야에서 연비 향상을 위해 높은 비강도와 우수한 기계적 성질을 가지는 소재를 개발하고자 하는 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 본 연구에서는 비금속 원소가 포함된 알루미늄 합금 기지 (Al-Zn-Mg-Cu-ZnO)에 약 3 vol.%의 CNT와 5, 10, 15, 20 vol.%의 SiC 강화상을 각각 기계적 밀링을 통해 균일하게 분산시켜 복합분말을 제조하였다. 그 후 약 450ºC에서 280 MPa의 압력을 가한 상태로 1시간 동안 Hot press를 진행하여 알루미늄 복합소재를 제조하였다. 소결 후, 복합재의 기계적 성질과 석출물의 거동을 비교하기 위해 T6 열처리 (450ºC 1h W/Q + 120ºC 24 h A/C)를 진행하였다. 두 복합소재 모두 소결 중의 높은 온도에서 석출물이 성장하여 조대화된 것이 미세조직을 통해 확인되었다. T6 열처리는 석출물의 크기를 감소시키고 고르게 분포시켜 복합재의 경도값을 최대 2배 증가시켰다. 또한, 밀링 시간이 증가함에 따라 결정립이 미세화되었고, 강화재가 균일하게 분산되어 경도가 최대 10% 증가하였다. 그러나 Al alloy - O / SiC 복합소재의 경우 T6 열처리 후 SiC의 첨가 분율이 증가함에 따라 경도가 감소하는데, 이는 Mg의 계면 확산량 증가로 합금의 주요 석출물인 $MgZn_2$를 구성하는 Mg 원자가 매트릭스 내부에서 고갈되어 석출물의 수가 감소한 결과이다. 두 강화재는 알루미늄 대비 낮은 열팽창계수를 가지고 있어, 열처리 시 전위들이 강화재 주변으로 쌓이게 되어 석출물의 크기가 작아지는 효과를 나타낸다. 결과적으로, 두 강화재의 첨가는 석출물의 크기를 감소시키며, T6 열처리는 Mg의 계면 확산을 가속화시켜 석출물의 수를 감소시킨다.

[P23-2]
Delivering Carbon in Liquid Metal Flux at Ambient Pressure: Md Mahbubul Alam (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Vijay Gupta (Institute for Basic Science (IBS)), Yousaf Adnan (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Benjamin Cunning, Won Kyung Seong (Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))
Keywords: Carbon, liquid metal, diamond, nucleation, crystal growth

We are exploring whether carbon clusters, particularly diamonds, can directly nucleate and grow in liquid metal (LM; thus, metal flux) at ambient pressure. In the effort described here, carbon (C) is dissolved into nickel (Ni) foil through the catalytic dissociation of methane at temperatures ranging from 700ºC to 1000ºC in an argon-hydrogen-methane (Ar-H_2-CH_4) atmosphere. Rapid cooling is used to obtain a carbon-saturated Ni foil. Indium (In) is then introduced alongside this Ni(C) foil, and the mixture is heated to moderate temperatures, potentially suitable for nucleating carbon clusters. An In-Ni liquid metal flux is expected to form, thus 'freeing' the carbon from Ni into the In-Ni metal flux. We use Scanning Electron Microscopy (SEM), SEM-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS), Optical Microscopy, Raman Microscopy, and X-ray Diffraction (XRD), among other techniques to analyze the product. In general, we are studying dissolution of carbon and perhaps other relevant elements (to be discovered–simply as possible examples, perhaps H, perhaps Si, etc., in appropriate amounts) to study how carbon 'behaves' when it clusters. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[P23-3]
Cu-Ag 합금 용탕을 이용한 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 내 3차원 연속연결 다상 헤테로구조 제작: 조호근, 최문수 (단국대학교), 한승전 (한국재료연구원), 김형섭 (포항공과대학교), 주수현* (단국대학교)
Keywords: Liquid metal dealloying, Cu-Ag melt, 3D interconnected composite, heterostructure

금속용탕 탈성분법(Liquid Metal Dealloying, LMD)은 전구체 합금에서 금속 용탕과 혼화성이 높은 원소를 선택적으로 용해시키고, 동시에 불혼화성 전구체 합금 원소들이 자기조직화(self-organization)됨으로써 3차원 연속연결구조가 형성되는 새로운 개념의 탈성분 공정이다. 결과적으로 LMD 공정 후, 자기조직화에 의해 형성된 불혼화성 원소들의 뼈대 구조와 침투한 금속 용탕이 응고된 상이 결합된 복합재료가 제작되며, 최근에는 물성 향상을 위해 단순한 성분계를 넘어 여러 합금 원소를 추가하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금(High-Entropy Alloy, HEA)을 전구체로 사용하는 LMD 공정에 대한 연구가 보고되었으며, 이 과정에서 Cu 용탕과 혼화성이 높은 Mn과 Ni이 우선적으로 탈합금화되어, 3차원 연속연결구조를 가지는 Cu-rich melt channel이 전구체 합금 내부로 형성된다고 알려져 있다. 그러나 순수한 Cu 용탕을 이용한 LMD 공정에서는, 전구체 합금의 모든 구성 원소(Co, Cr, Fe, Mn, Ni)가 Cu와 높은 혼화성을 가지므로 어느 순간 모든 조직이 용해되는 현상이 발생하여, 일정 두께 이상의 복합재료를 제작하는 데 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 CoCrFeMnNi HEA 전구체 합금의 완전 용해 현상을 억제하고 안정적으로 헤테로구조를 제작하기 위해 Cu-Ag 합금 용탕을 활용하였다. 복잡한 탈성분 및 합금화 반응을 예측하기 위해 Thermo-Calc 계산을 활용하였으며, 합금 용탕을 사용하여 용탕 온도를 낮추고 계면 확산을 억제하여 고상 뼈대 구조의 미세화를 유

도하였다. 공정 변수로 용탕 내 Ag의 농도, LMD 공정 온도 및 공정 시간에 따른 미세조직 변화와 반응 속도를 분석하였으며, 본 연구는 LMD 공정으로 제작된 3차원 연속연결 다상 헤테로구조 재료의 다기능성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

[P23-4]

형상기억 $(CeO_2\text{-}ZrO_2)_p$ 강화 Al 복합재료의 RVE 모델을 통한 변형 거동 및 입자 형상 효과 분석: 장정혁, 조의제* (국립순천대학교)

Keywords: 형상기억 특성, CZ 입자 강화 Al 복합재료. 미세조직 기반 RVE 모델, 변형 거동, 입자 형상 효과

단결정 또는 올리고결정 입자의 $CeO_2\text{-}ZrO_2$ (CZ)는 400회 이상의 변형 주기를 견딜 수 있는 형상기억 세라믹스로, 열/응력에 의해 tetragonal↔monoclinic 상변태를 일으킨다. 또한, 주기당 ~40 MJ/m^{3}의 에너지를 흡수할 수 있어, 고에너지흡수 소재로 주목받고 있다. 최근 CZ 입자가 강화된 Al 복합재료는 순수 Al 대비 2배 이상의 압축강도와 에너지흡수능이 보고되었다. 이 복합재료의 공정 개선 및 특성 향상을 위해선 변형 거동 및 미세조직 효과를 이해해야 한다. 기지/입자 계면에서 변형 중 하중 전달, 응력 분포 등 분석이 요구되나, 실험적 분석의 한계로 인해 수치해석을 통해 이를 예측하는 것이 효율적이다. 지난 연구에서 CZ 입자 강화 Al 복합재료의 변형 거동 및 강화기구를 이해하기 위해 2D RVE 모델을 활용했지만, 입자에 초점을 맞춘 분석만 이뤄져 변형에 따른 기지 및 입자간 상호작용, 온도 변화에 따른 변형 회복 현상 등 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 복합재료 제조 시 볼 밀링이 수반되는데, 이로 인해 CZ 입자의 형상이 구형에서 다각형으로 변한다. TiB_2, WC, SiC 등으로 강화된 복합재료에서 입자의 형상이 다각형일 때 구형 입자보다 더 우수한 강도를 나타내지만, 계면에서의 응력집중이 더 쉬운 파괴를 야기한다는 결과가 보고된 바 있다. 이에 따라 형상기억 세라믹 입자를 강화재로 사용한 복합재료에서도 입자 형상이 기계적 특성 및 변형 거동에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 연구에서는 형상기억 CZ 입자 강화 Al 복합재료의 미세조직에 기반한 RVE 모델을 개발하고, 이를 통해 변형 거동 및 입자 형상 효과를 조사하였다. 35 vol% 강화재를 가지는 1~10 mm^3 부피의 3D RVE 모델을 랜덤 알고리즘을 통해 생성하고, 예측된 기계적 특성을 실험 결과와 비교하여 최적 모델을 선정하였다. 이 모델을 통해 복합재료의 변형 중 하중 전달에 초점을 맞추어 변형 거동을 분석하였다. 또한, 입자 형상이 형상기억 특성에 미치는 영향도 예측하였다.

[P23-5]

탄소섬유의 배향에 따른 CF/Mg 금속복합소재 특성 변화 연구: 이태호, 박현재 (한국재료연구원, 부산대학교), 신상민, 조승찬, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 김양도 (부산대학교), 김정환* (한국재료연구원)

Keywords: 금속, 탄소섬유, 복합소재, 압출, 배향

인공위성용 구조물은 정확한 치수의 요구와 유지를 위해 우주에서의 온도변화나 다른 환경요인에 의한 형상 변화가 없는 경량의 고강도 재료를 필요로 한다. 특히 우주공간에서 반복적인 태양 노출에 의한 극심한 온도 차이로 인한 열변형을 최소화 하기 위해서는 적절한 재료의 선택과 설계 기술이 필요하다. Mg은 대표적인 산업용 경량금속으로 낮은 밀도 대비 높은 비강도를 가지고 있으며 다양한 제품의 소재로 활용되어진다. 하지만 우주환경에서 사용되기 위해서는 낮은 열팽창 계수와 높은 열전도도를 요구하며, 이를 해결한 방안으로 Al에 강화재를 첨가하여 금속복합소재를 제조하는 방법이 있다. 금속복합소재는 기계적 특성과 가공이 용이한 금속소재를 연속적인 매트릭스로 사용하며 특성이 우수하지만 단일 소재로 사용하기 어려운 세라믹이나 섬유소재와 같은 소재를 첨가하여 서로 다른 두 소재의 장점은 합치면서 단점을 상호보완할 수 있는 소재이다. 금속복합소재의 특성 극대화를 위해 탄소섬유의 배향이 필수적이며, 이러한 배향을 위해 인발 및 압출공정을 통해 배향된 강화재를 가진 금속복합소재를 제조한다. 이 때, 인발과 압출을 분말야금을 통해 제조하기 위해 연성 및 비강도가 우수한 Al을 케이스 소재로 사용하여 만들어진 금속복합소재는 최종적으로 Al과 Mg보다 배향된 방향으로의 특성이 우수한 금속복합소재를 개발하고자 한다. 본 연구에서는 Mg을 금재의 기지재로 사용하며 단탄소섬유를 강화재로 사용하며 동시에 이방성 특성 극대화를 위한 멀티코어 형식으로 압출을 진행하여 강화재가 배향된 금속복합소재 코어들이 우수한 계면결합을 통해 상대적으로 높은 열팽창계수를 가진 Al소재의 열팽창을 억제하며 동시에 열전도도는 코어를 통해 향상시킨 금속복합소재를 개발하여 특성을 분석하였다. 후기: 본 연구는 나노 및 소재기술개발사업(RS-2022-NR068258), (RS-2023-00281508)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[P23-6]

아크 플라즈마 용해공정을 통한 Ti-TiC 복합재료 제조: 김태윤 (부산대학교), 김재혁 (한국재료연구원), 이제인* (부산대학교)

Keywords: Arc-plasma melting, titanium, titanium carbide, compressive test

타이타늄 합금은 높은 비강도와 우수한 내식성을 보인다는 점에서 운송, 항공우주, 에너지 산업으로부터 많은 주목을 받고 있다. 하지만, 철 및 니켈기 합금에 비해 고온에서 기계적 특성 및 상안정성이 상대적으로 낮다는 한계가 존재해 이를 해결하기 위해 타이타늄 기지에 TiC, TiB, SiC와 같은 세라믹 입자를 분산시킨 타이타늄 기지 복합재료가 활발히 연구되고 있다. 타이타늄 복합재료 제조는 타이타늄의 높은 산소친화도로 인해 주로 기지상과 입자상 분말을 균일하게 분산시킨 뒤 소결하는 분말야금 또는 방전 플라즈마 소결과 같은 고상공정법에 국한되어왔다. 이러한 제조방식은 복합재료 내 높은 기공률, 낮은 강화상 분율(~20 vol.%), 기지-강화재 간의 낮은 젖음성으로 인한 약한 계면 결합력과 강화상 응집과 같은 문제점이 존재한다. 본 연구에서는 아크 플라즈마 용해를 통해 고온환경에서 WC 입자와 순수 타이타늄을 반응시켜, 용탕-입자 간의 자발적인 반응을 통해 WC보다 열역학적으로 안정한 TiC를 기지 내 최대 70 vol.%까지 균일하게 분산시킨 Ti(W)-TiC 복합재료를 제조하였다. 또한, 압축 및 삼점굽힘 시험을 통해 강화재 분율의 증가에 따른 Ti 기지의 hcp에서 bcc로의 전이가 압축 및 굽힘 거동에 미치는 영향을 확인하였다. 본 연구를 통해 기계적 특성 평가 전/후 복합재료 시편의 미세조직 분석을 통해 기지 내 TiC 강화상이 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

[P23-7]

고종횡비 TiC/Fe계 금속복합재를 활용한 초고속 가공용 샤프트 소재 개발 및 동적 특성 향상 연구: 박현재 (한국재료연구원, 부산대학교), 신상민 (한국재료연구원), 이태호 (한국재료연구원, 부산대학교), 조승찬, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 김양도 (부산대학교), 김정환* (한국재료연구원)

Keywords: Metal Matrix Composites(MMC), Shaft, Natural frequency, Damping ratio

최근 공작기계 산업에서는 재료제거비율을 향상시킨 고속 가공과 마이크로 수준의 표면 조도를 달성할 수 있는 초정밀 가공에 대한 수요가 증가하고 있다. 산업에서 요구되는 가공속도와 가공 정밀도 수준을 달성하기 위해서는 고속 회전 시 우수한 동적 안정성을 유지할 수 있는 주축 개발이 선행되어야 한다. 동적 안정성의 주요인자로는 1차 고유진동수와 감쇠비가 있다. 또한 샤프트의 밀도는 스핀들의 가공 정밀도에 직접적인 영향을 미치므로 공작기계 스핀들의 동적 특성을 향상시키기 위해서는 샤프트의 무게 절감이 필수적이다. 따라서 동적 안정성 향상을 위해서는 주축 샤프트의 무게 절감 및 1차 고유진동수를 증가시켜 공정의 영향을 최소화하는 것이 중요하다. 한편, TiC/Fe계 금속복합재는 강성이 높은 반면, 기계 가공이 까다로운 단점이 있다. 이러한 가공성 문제를 개선하기 위해 다양한 Fe계 금속기지에 대한 연구를 통해 최적의 기지를 선정하였으며 세밀한 가공이 필요한 부위는 가공성이 우수한 소재로 디자인하였다. 따라서 본 연구에서는 기존 상용 제품으로 사용되고 있는 SUS420J2 소재를 대체하기 위해 저밀도, 고강도, 고강성 특성을 가진 TiC/Fe계 금속복합재를 활용하여 공작기계 주축의 동적 특성을 향상시켰다. 우선, TiC 강화재와 다양한 조성을 가진 Fe 금속기지를 사용하여 용융가압함침공정을 통해 금속복합재를 제조하였다. 해당 소재의 미세조직 및 물성을 측정하고, 1차 고유진동수 및 감쇠비를 측정하여 비교 평가하였다. 이를 통해 복합한 형상 가공이 용이한 최적의 기지 선정 및 우수한 동적 특성을 가진 금속복합재를 제작하였으며 고속 가공용 주축 사프트에 TiC/Fe계 금속복합재를 적용한다면 진동 저감을 통한 우수한 가공성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구는 중소기업혁신개발사업 '수출지향형 (Tech-Bridge)' (RS-2024-00487614)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[P23-8]

주조기반 고방열 저열팽창 마그네슘 금속복합재료 개발 및 열적 특성 평가: 정다운, 김민수, 조은서, 신상민, 김정환, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 김양도 (부산대학교), 조승찬* (한국재료연구원)

Keywords: Metal Matrix Composites(MMC), 마그네슘, 고방열, 열변형특성

반도체 패키징 기술 분야 및 전기차 전력 제어 반도체의 개발로 반도체의 성능이 발전하여 우수한 방열 성능과 열변형 특성을 가진 소재가 요구되고 있다. 현재 발전하는 반도체 성능에 비해 방열 성능과 저열변형 특성을 가진 소재에 대한 연구는 많이 진행되고 있지 않다. 이러한 특성을 만족하기 위해서는 고열전도도 및 저열팽창계수 소재 개발이 필요하다. 마그네슘은 가볍고 우수한 열변형 특성을 가진 소재로 알려져 있다. 또한 cBN은 열전도도가 높고 열팽창계수가 낮은 특성이 있어 마그네슘 기지에 강화재로 사용하였을 때 열전도도를 향상시키고 우수한 물성 및 저열팽창 특성을 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 액상가압공정을 통해 cBN 세라믹 강화재에 용융 마그네슘을 가압하여 cBN/Mg금속복합소재를 제조하고, 강화재 입자 크기에 따른 미세조직 및 열적 특성에 대한 연구를 진행하였다. 제조된 금속복합소재는 FE-SEM 및 EDS를 활용하여 미세조직 및 상분석을 하였다. 열전도도 측정을 위해 아르키메데스 법칙을 활용하여 밀도를 측정하고 LFA장비를 사용하여 열전도도를 계산하였다. 또한 열변형 특성을 측정하기 위해 TMA 및 항절 시험을 활용하여 열팽창계수 및 굽힘강도를 측정하였다. 이를 통해 cBN/Mg 금속복합소재의 물성을 평가하였다. 실험 결과 큰 cBN 입자를 사용하였을 때 열전도도가 향상되는 것을 확인하였다. 반면 작은 cBN 입자를 사용하였을 때 기지/강화재간 계면증가로 인해 계면열저항이 증가하여 열전도도가 감소하였다. 하지만 cBN 입자의 크기가 작을수록 낮은 열팽창계수와 높은 굽힘강도 특성으로 열변형에 대한 저항이 우수하다는 것을 입증하였다. 본 연구는 과학기술정보통신부 나노및소재기술개발사업 (RS-2024-00444649, RS-2022-NR068258)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[P23-9] Canceled

방전 플라즈마 소결법을 이용한 Al-Gr 복합재료의 제조 및 열전도도 특성: 박유균, 양민혁, 김영중 (한국생산기술연구원, 전남대학교), 박현국* (한국생산기술연구원)

Keywords: Al-Gr, 방전 플라즈마 소결, 상대 밀도, 열전도도

본 연구는 방전 플라즈마 소결법(SPS)을 이용하여 Al-Gr 복합재료를 제조하고, 분말 특성과 소결 조건이 복합재료의 상대밀도와 열전도도에 미치는 영향을 조사하였다. 실험은 세 단계로 진행되었으며, Al과 Gr의 혼합비율을 8:2에서 4:6 vol.%까지 변화시켰다. 1차 실험에서는 구형 Al 분말(10 μm 이하)을 사용하다가 구형 Al이 뭉치는 형상으로 보여, 2차와 3차 실험에서는 불규칙한 형상의 Al flake(44 μm)를 사용하였다. Gr는 모든 실험에서 flake 형태(150-200 μm)를 사용하였다. 소결 조건은 480ºC에서 540ºC로, 압력은 20-60 MPa로 변화시켰다. 실험 결과, 불규칙한 형상의 Al flake 분말 사용 시 상대밀도가 증가하였으며, Al과 Gr의 5:5 vol.% 혼합비에서 최종 소결 온도 550ºC일 때 가장 우수한 열전도도를 나타냈다. 승온 속도(30, 60, 80ºC/min)와 압력에 따라 결과값의 변화가 관찰되었으나, 명확한 경향성은 나타나지 않았다. 이 연구 결과는 SPS 공정을 통한 Al-Gr 복합재료 제조 시 분말 특성과 공정 조건의 최적화가 물성 향상에 중요한 역할을 함을 시사한다.

[P23-10]

차량용 PVT 시스템에 의한 열영향도 분석 및 단열성능 접착 조건 확보를 위한 FEM 열전달 해석 평가: 김재웅*, 하을용 (한국생산기술연구원)

Keywords: PVT, 열전달, FEM, 단열성능

파리 기후협약 이후 전 세계적인 온실가스 배출 규제는 다양한 산업 분야에서 친환경 연료 사용에 대한 수요를 증가시켰다. 특히

자동차 산업은 전기 또는 수소와 같은 친환경 자동차의 개발을 위해 자동차 프레임을 포함한 차체의 경량화를 위한 신소재 개발과, 육상에서 사용되고 있는 태양광 발전 시스템 (Photovoltaic System)을 차량에 접한한 PVT(Photovoltaic-Thermal) 시스템등의 개발을 통해 이산화탄소 배출 저감을 위한 연구 개발이 이루어지고 있다. PVT 시스템은 태양광 발전 시스템에서 발생하는 폐열을 회수하고, 회수된 열 에너지를 차량의 주행 효율 개선 또는 냉, 난방용 에너지 공급등에 사용하는 시스템을 의미하며, 주로 차체의 지붕 또는 전, 후면부 일부에 설치되는 방식등에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 PVT 시스템은 열회수 효율을 높이고 차량에 대한 열영향을 최소화하기 위해 방열소재와 단열소재의 개발등이 필수적으로 요구된다. 기존 PV 시스템에 적용되는 소재는 ETFE(Ethylene Tetra Fluoro Ethylene), EVA(Ethylene Vinyl Acetate), PP(Poly Propylene)등의 다양한 소재가 복합적으로 사용되기 때문에, 본 연구에서는 기존 PV 소재와, 방열판, 열회수 채널로 구성되는 PVT 시스템을 기반으로 열전달 효율을 분석하고, 해당 PVT 시스템과 차량 지붕 사이에 단열성 접착제를 구현함으로써, 차량 지붕에 대한 열전달 효과를 추가적으로 분석하고자 하였다.

[P23-11]

난연 성능이 개선된 복합재료 기반 배터리 팩 케이스 내구성 성능 평가: 김재웅*, 김영현 (한국생산기술연구원)

Keywords: 복합재료, 낙하추 시험, 압축 시험, 진동 내구 시험

전기자동차(Electric Vehicle) 시장이 확대됨에 따라 배터리 열폭주로 인한 화재 및 폭발 사고가 발생하고 있으며 난연 성능을 갖춘 배터리 팩 케이스 개발의 중요성이 대두되고 있다. 기존 EPDM(Ethylene Propylene Diene M-Cl ass Rubber) 소재 기반 제품의 경우 난연성능이 부족하고, 기계적 체결 방식은 구조적 안정성이 부족하여 누수 발생 등의 문제가 있다. 이를 개선하기 위해 난연 성능을 강화한 복합재료와 경량화 된 설계 기술이 요구되고 있다. 고강도 경량화 추세에 따른 소재 및 제조 기술 개발은 전기자동차의 주행거리와 안전성 향상에 필수적이다. 또한, 세계적으로 배터리 안전 규제 강화에 따라 관련 기술 개발의 필요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 난연 성능이 개선 된 복합재료 기반 배터리 팩 케이스의 내구성 성능 평가를 위해 7m 원룸형, 구형 낙하추 시험을 수행하고, 낙하추 시험 이후 기밀 시험을 수행하였다. 그리고 압축 시험과 진동 내구 시험을 통해 내구성을 평가하였다. 또한, 실제 시험 평가 조건을 고려한 시뮬레이션을 수행하고, 하고, 실제 시험 결과와 비교 분석 및 검증하였다.

[P23-12]

편상 자성합금 분말/폴리머 복합 필름의 제조와 자기장 차폐 특성: 서지희, 유가인, 주성후, 이명복* (대진대학교)

Keywords: 복합 필름, 극저주파, 자기장 차폐재, 고투자율, FeSiAl 자성분말

전력기기 및 송전선에서 발생하는 전자파의 인체 건강에 대한 영향 및 주변의 전자, 통신기기에 오작동 초래 가능성이 대두되고 있어 극저주파 대역 전력기기 및 송전선 주변의 자기장 흡수·차폐 소재의 개발이 필요하다. 저자들은 고투자율을 갖는 편상 FeSiAl 자성합금 분말이 바인더 수지 내에 혼합·분산된 복합 필름 형태의 극저주파 자기장 흡수 필름을 개발 중이다. 복합 필름은 염화폴리에틸렌 수지를 톨루엔에 녹인 후 소정의 무게비를 갖도록 자성 분말을 혼합하여 코팅액을 합성하고, 이를 필름 도포기를 사용하여 폴리에틸렌 기재 필름 위에 코팅하였다. 이 코팅 막을 자연 건조시킨 후에 핫 프레스를 사용하여 가압 성형함으로써 필름 내부의 기공을 제거하고 밀도를 향상시켰다. 제작된 복합재 필름의 유효투자율은 교류 BH loop tracer에 의해 측정하였다. 자기장 차폐 성능은 극저주파 자기장 차폐율 측정 장치를 사용하여 평가하였다. 본 측정 장치는 자기장을 발생하기 위한 Helmholtz 코일, 코일 중심부에 설치된 자기장 센서 및 이를 둘러싸는 자기장 차폐 쉴드로 구성되며, 자기장 차폐 쉴드의 설치 유무에 따른 중심부의 자기장의 세기를 상대적으로 비교하여 차폐율을 측정하였다. 본 발표에서는 복합재 필름의 제작 공정조건이 필름의 자기적 특성에 미치는 영향 및 자성 분말의 입도, 복합재 필름의 두께, 필름의 적층 수 등에 따른 자기장 차폐 특성의 변화를 체계적으로 조사하고 그 원인에 대하여 고찰하고자 한다.

[P23-13]

전기자동차의 NVH이슈를 최소화하기 위한 제진 접합 기술: 이동준*, 김지훈, 손인아, 박주용 (디에스피)

Keywords: 제진소재, 제진강판, SILENTEEL, 전기자동차, 전기자동차용제진소재

SILENTEEL은 디에스피의 자체 브랜드로 2개의 판재 사이에 고점탄성 수지를 형성시켜 NVH(Noise, Vibration, Harshness) 이슈를 최소화하는 접합기술입니다. *SILENTEEL 종류 1.CR SILENTEEL : 상용 전기차에 적용 2.AL SILENTEEL - 스틸을 AL 대체하여 경량화 실현 - 우수한 내식성으로 도금 불필요 3.컬러STS SILENTEEL - 컬러감을 가진 제진소재로 심미성 추구 - 배면 소재에 따른 강성 유지 및 경량화 선택 *SILENTEEL의 기술력 1.제진성과 접합성 모두 기존 소재 대비 4배 이상의 성능 2.이종접합 제진소재를 생산할 수 있는 전세계 유일 접합기술력 확보 3.광폭 접합이 가능한 국내 유일 접합기술력 확보 *SILENTEEL의 경제산업효과 1.제진소재 국산화를 통한 외화낭비 방지 및 역수출 가능 2.전기자동차 시장 성장에 따른 제진소재 수요 급증 예상 3.친환경 및 경량화, 투입재료비 절감, 공정축소 등으로 사회적 유.무형적 가치 증대

[P23-14]

귀금속 기능화한 산화 텅스텐의 이산화탄소 감응 특성 연구: 김진영, 박현준* (한국생산기술연구원)

Keywords: 이산화탄소, 금, 팔라듐, 산화 텅스텐, 가스 센서

미 국립해양대기관리국(NOAA)에 따르면 2023년 평균 대기 중 이산화탄소 농도는 419.3 ppm으로 산업화 이전보다 50% 증가한 수치이며, 12년 연속 증가세를 이어가고 있다. 그리고 메탄가스 농도도 1,922.6 ppb, 이산화질소는 336.7 ppb를 나타내 산업화 이전보다 각각 160%, 25% 증가했다. 이는 화학연료 사용에 따른 대기오염이 습지와 영구동토층 같은 자연 생태계를 달구고 있어 가

스의 조기 검출 및 대응이 점점 더 중요해지고 있다. 이러한 가스를 검출하기 위한 대표적인 센싱 물질로서 금속산화물반도체(MOS)는 높은 감도와 반응 속도 등으로 가스센서로서 광범위하게 사용되고 있다. 하지만, 안정성 내습성 및 선택성 등의 큰 문제들로 인해 이를 개선하기 위한 연구 또한 활발하게 진행되고 있다. 그 중, 선택성을 개선하기 위한 전략으로 이종 접합, 빔조사, UV 조사 및 귀금속 기능화가 있다. 금속산화물 중 산화 텅스텐(WO_3)은 높은 감도, 다양한 결정구조와 조성을 제어 가능하며, 나노 기술 활용에 용이한 장점 등으로 가스 센싱 물질로서 활발하게 연구되고 있는 물질이다. 따라서, 본 연구에서는 수열 합성을 통해 제작한 산화 텅스텐을 기반으로 귀금속을 기능화한 산화 텅스텐을 제작하고, 이산화탄소(CO_2) 가스에 대한 향상된 감지 특성을 조사하였다. 센서는 순수 산화 텅스텐 및 금(Au), 팔라듐(Pd)을 각각 기능화한 산화 텅스텐 총 3종을 준비하였다. 이들에 대해 이산화탄소에 대한 감지 특성을 확인한 결과, 기능화 전에 비해 기능화한 후 감응도가 증가하였으며, 그 중 Au를 기능화하였을 때 더 크게 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 감지 메커니즘은 귀금속에 의한 촉매효과 및 스필오버 효과로 가스에 대한 감응도가 증가한 것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 금속산화물을 이용한 이산화탄소 센서의 가능성을 보여준다.

[P23-15]

Enhancing High-Voltage Insulation Performance of Polypropylene with Polyvinylidene Fluoride Additive: Seunggun Yu* and Ohuk Lee (Korea Electrotechnology Research Institute)

Keywords: Polypropylene, Polyvinylidene fluoride, Voltage stabilizer, Breakdown strength

A wide range of additives, including inorganic nanoparticles and organic compounds, have been explored to enhance the insulation properties of polymeric materials for high-voltage applications. This study introduces a straightforward approach to incorporating fluorine into polypropylene (PP) by melt-blending isotactic PP (iPP) with a minimal amount of polyvinylidene fluoride (PVDF), utilized as a thermoplastic voltage stabilizer (TVS). Due to its immiscibility with PP, PVDF forms finely dispersed domains within the iPP matrix, particularly at low concentrations. The PVDF-doped iPP exhibited remarkable improvements in direct current (DC) breakdown strength, increasing by 110% at 25 ºC and 149% at 110 ºC compared to pristine PP, while maintaining dielectric permittivity and loss tangent values similar to those of iPP across a broad temperature (25–140 ºC) and frequency (1 Hz–10 MHz) range. Additionally, PP containing less than 1.0 phr of PVDF retained its tensile strength and elongation at break. These results suggest that PVDF-doped iPP holds promise as a high-performance insulation material for next-generation high-voltage applications.

[P23-16]

세라믹 입자 강화 알루미늄 복합소재의 중성자 흡수 및 열전도도 특성 연구: 강민우, 이동현, 김정환, 이상복, 이상관 (한국재료연구원), 권한상 (부경대학교), 이태규 (국립한밭대학교), 조승찬* (한국재료연구원)

Keywords: 복합소재, 사용후핵연료, 열전도도, 중성자 흡수

최근 원자력 발전소 내 사용후핵연료 저장 시설의 포화가 예상됨에 따라 사용후핵연료의 저장 및 운반이 가능한 운반/저장 용기에 대한 수요가 증가하고 있다. 사용후핵연료는 원자로에서 발생하는 방사성 폐기물로 지속적으로 중성자선과 붕괴열을 방출하기 때문에 안전한 저장을 위해 철저한 관리가 필요하다. 특히, 사용후핵연료 저장에 사용되는 중성자 흡수소재의 중성자 흡수 능과 열전도도는 저장 안정성에 큰 영향을 미치므로, 이러한 특성이 우수한 소재의 개발이 필수적이다. 현재 사용되는 중성자 흡수 소재로는 주로 B_4C-Al 복합소재 사용되며, 흡수소재의 성능 향상을 위해 B_4C 대비 중성자 흡수능이 뛰어난 가돌리늄(Gd)과 같은 물질을 적용한 연구가 진행되고 있다. 그러나, Gd_2O_3의 경우 self-shielding 및 neutron channeling 효과로 인해 실제로 얻어지는 성능이 이론적으로 기대되는 수준에 미치지 못하는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 Gd_2O_3를 단순 입자 형태로 B_4C와 혼합하는 대신 B_4C 표면에 Gd_2O_3를 균일하고 얇게 코팅하여 중성자 차폐소재를 개발하고 그에 따른 열전도도 및 중성자 차폐성능을 평가하였다. Gd_2O_3 코팅층 형성을 위해 Metal Organic Framework(MOF) 기반 산화물 코팅 기술을 활용하여 B_4C 표면에 nano 수준의 균일한 Gd_2O_3 코팅층을 형성하고 복합소재를 제조하였다. 제조된 복합소재의 미세구조 분석 결과, Gd_2O_3 상이 B_4C 입자 표면에 균일하게 형성된 것을 확인하였다. 중성자 흡수 단면적 계수(Σ)와 열전도도(T.C.)를 기존 소재 대비 향상된 특성을 나타내었다. 본 연구를 통해 MOF 기반 산화물 코팅을 활용하여 Gd_2O_3를 B_4C 표면에 균일하게 적용함으로써 높은 중성자 흡수 효율을 달성하였으며, 기존 B_4C/Al 복합소재의 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 방안을 제시하였다. 본 연구는 본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업 (20222B10100040) 과 과학기술정보통신부 나노및소재기술개발사업 (RS-2022-NR068258)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[P23-17]

Rapid and Selective Isoprene Detection: The Impact of Polystyrene Template Size and Gold Catalyst on In_2O_3 Gas Sensor Performance: Hwang Junho (Yonsei University), See-Hyung Park (KOREATECH), Sungwoo Sohn (Yonsei University), Jae Han Chung, Yun-Haeng Cho, Young-Seok Shim* (KOREATECH), and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

Keywords: Gas sensors, In_2O_3, polystyrene, nanostructure, catalysts, gas sensor

Polystyrene (PS) templates are widely utilized in gas sensor fabrication due to their processing advantages, including uniform particle size distribution, ease of manipulation, and functionalization potential, enabling the creation of intricate nanostructures. Despite their extensive use, the correlation between PS template particle size and the performance of the resulting gas sensors remains unexplored. This study investigates the impact of PS template sizes (200–3000 nm) on the gas-sensing performance of indium oxide (In_2O_3) hollow hemisphere (HH)-based sensors. The sensors fabricated using the largest template size (3000 nm) exhibited a significantly enhanced

response to ethanol (C_2H_5OH), approximately 132 times higher than In_2O_3 thin films, attributed to a larger surface area when formed in a monolayer. Furthermore, decorating In_2O_3 HHs with gold (Au) nanoparticles drastically improved the selectivity and sensitivity towards isoprene (C_5H_8) at 350 ºC among various volatile organic compounds. The Au-decorated sensor achieved an exceptional response of 483, with a theoretical detection limit as low as 743 parts per trillion (ppt), and an ultrafast response time of less than 2 seconds. These results highlight the dominant role of surface area effects over the double Schottky barrier mechanism in monolayer chemoresistor sensors, particularly when large template sizes are used. The catalytic properties of Au further amplified the gas-sensing performance, enhancing both response and selectivity. This study provides valuable insights into the fundamental factors influencing gas-sensing performance and demonstrates the potential of In_2O_3 HHs-based sensors for health-monitoring applications, particularly for detecting disease-related biomarkers in exhaled breath. These findings contribute to advancing gas-sensor technology through template-based methods, offering a pathway for designing highly sensitive and selective sensors for bioelectronics and medical diagnostics.

P24 : 가공-소성가공
Room 3층 로비, 4월 25일

[P24-1]
철도 차륜 소재 개발 및 고온 기계적 변형 거동 분석: 이정용, 윤은유, 홍종화* (한국재료연구원)
Keywords: Railway Wheels, ER8, Deformation Processing Map, High Temperature Mechanical Deformation, Microstructure Analysis
철도 차륜(Railway wheels)은 운행의 특성상 열과 충격 그리고 반복적인 하중을 받게 된다. 고속철도의 개발로 운행 환경이 가혹해지면서 차륜 소재의 내마모성, 내피로성, 내충격성은 더욱더 크게 요구받고 있다. 일반적으로 저합금강(Low alloy steel)인 ER8은 철도 차륜에 주로 활용되는 소재이다. 본 연구에서는 ER8의 특정 화학적 성분의 함량을 변화시켜 기계적 강도가 개선된 소재를 개발하였다. 개발 소재의 고온 기계적 물성을 측정하기 위하여, 다양한 온도와 변형률 속도(Strain-rate)에서의 고온 압축 시험을 진행하였다. 개발 소재의 최대 압축 응력 강도는 측정된 온도와 변형률 속도 조건에서 기존의 ER8 소재보다 더 우수함을 확인하였다. 시험을 통해 얻은 기계적 물성을 바탕으로 물성 데이터를 제작하였고, 변형 공정 지도(Deformation processing map)를 통한 소재 변형 효율 및 안정화 영역 등을 예측하였다. 추가로 개발된 소재의 미세조직을 분석하여, 기존 ER8 소재와 비교 연구하였다.

[P24-2]
신선 가공이 고탄소 강선의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 이승희, 박형준 (동아대학교), 정진영 ((주)고려제강), 강신곤* (동아대학교)
Keywords: 고탄소 강선, 선재, 신선 가공, 펄라이트, 시멘타이트
고탄소 강선(High Carbon Steel Wire)은 높은 강도와 우수한 피로 저항성을 요구하는 타이어 보강재, 스프링, 와이어 로프 등의 고부하 응용 분야에서 널리 사용된다. 이러한 기계적 성질을 확보하기 위해 일반적으로 0.7~0.9 wt.%의 탄소를 포함하며, 열처리와 신선 가공(Drawing)을 거쳐 완전한 펄라이트(Pearlite) 조직을 형성한다. 신선 가공은 선재의 단면적을 감소시키면서 강도를 증가시키는 변형 가공 공정으로, 가공경화 효과를 통해 기계적 성질을 향상시키는 역할을 한다. 그러나 다이(Die)를 통과하는 동안 발생하는 높은 변형률과 마찰력에 의한 국부적인 온도 상승은 미세조직 변화에 영향을 미칠 가능성이 크다. 특히, 신선 가공 과정에서 펄라이트의 배열 변화 및 층상 간격(Lamellar spacing) 미세화가 일어날 수 있으며, 온도 상승에 따라 시멘타이트(Cementite)가 부분적으로 분해될 가능성이 있다. 이러한 미세조직 변화는 강선의 기계적 성질에 영향을 미쳐 최종 제품의 성능과 내구성에 중요한 변수로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 신선 가공이 고탄소 강선의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 영향을 종합적으로 분석하고자 신선 가공 전 선재, 신선 가공 후 강선, 그리고 온도 상승의 영향을 모사한 열처리 강선을 대상으로 비교 분석을 수행하였다. 미세조직 분석을 위해 OM, SEM, TEM을 활용하여 펄라이트의 층상 구조 변화 및 배열 특성을 관찰하였으며, XRD를 통해 시멘타이트의 분해 여부 및 결정성 변화를 평가하였다. 또한, 기계적 특성 변화는 경도 시험, 인장 시험, 비틀림 시험을 수행하여 정량적으로 분석하였다.

[P24-3]
냉간압연접합공정 및 이주속압연접합공정에 의해 제조된 AA1050/AA5052 층상 판재의 미세조직 및 기계적 성질: 허현준, 조상현, 임기현, 이성희* (국립목포대학교)
Keywords: 알루미늄 합금, 냉간압연접합, 기계적 특성, 미세조직, 불균일 혼합조직
냉간압연을 통한 AA1050/AA5052의 층상판재의 가공 시 표면 산화물의 형성, 압연속도, 마찰계수, 열발생이 결정구조와 접합 특성에 영향을 끼치게 된다. 냉간압연(Cold-roll-bonding)은 금속을 재결정화 온도 이하에서 가공하는 공정으로, 가공경화에 의해 경도, 인장 파괴에 대한 저항 및 기계적 강도를 변화시킨다. 두께1 mm, 폭40 mm, 길이30 mm의 상업용 AA1050과 AA5052 판재를 서로 적층한 후 탈지 및 와이어브러시 등 표면처리를 거쳐 2 pass 냉간압연으로 두께를 0.5 mm로 제조하였다. 압연은 무윤활 조건으로 상온에서 진행하였으며, 5.0 m/ses의 압연속도로 370 mm 워크롤 직경을 가진 4단 압연기를 사용하여 냉간압연접합공정 판재를 제조하였으며, 이후 속도비 2:1비율로 이주속압연접합공정을 적용하여 AA1050/AA5052 층상 판재를 제조하였다. 이후 롤 본딩된 층상판재를 200~400ºC의 온도에서 1시간동안 어닐링 하여 기계적 특성 평가를 진행하였다. 냉간압연 판재 및 250ºC 이하에서 어닐링된 층상알루미늄 판재는 결정립이 압연방향으로 크게 연신된 전형적인 가공조직을 나타내었으나, 300ºC 이상의 어닐링재에서는 재결정이 발생하여 등축의 결정립 조직을 나타내었으며, 결정립은 AA050부위에 비해 AA5052 부위에서 더 미세하였다. 이주속압연접합공정으로 제조된 판재 및 250ºC이하에서 어닐링된 층상 알루미늄 판재는 결정립이 압연방향으로 크게 연신된 가공조직을 나타내었으나, 300ºC 이상의 어닐링재에서는 재결정이 발생하여 미세결정립을 얻을 수 있었으며, 이주속압연판재의 결정립이 더 미세하게 측정되었다. Acknowledgement : This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial technology(KEIT) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. RS-2024-00467981).

[P24-4]
Investigation on the Strain Path Dependency of Non-heat treatment Fe-Cr-Mn Steel for Cold Heading Quality Wire Rod: Lee Jong Hyeok, Park Moon Won (Inha Manufacturing Innovation School), Lim Jae Han (Hyundai-Steel, Inha Univ.), Lee Kyu Ho (Hyundai-Steel), and Jang Byoung Lok* (Inha Manufacturing Innovation School)
Keywords: Non-heat treatment, Bauschinger effect, tensile, compression

In the steel industry, quenched and tempered (Q/T) steel for bolts undergoes spheroidizing heat treatment and Q/T heat treatment during the manufacturing process. The greenhouse gases emitted during these heat treatments cause environmental pollution and result in economic costs. South Korea has declared a goal of achieving carbon neutrality by 2050, and accordingly, the steel industry faces the necessity of reducing carbon emissions. If heat treatment can be omitted from the manufacturing process, it is expected not only to reduce carbon emissions but also to lower economic costs. In this study, the strain path dependency of a Fe-Mn-Cr non-heat treatment steel for cold forging wire rod, developed to eliminate Q/T heat treatment, was investigated to determine the optimal drawing conditions. To analyze the strain path dependency, tensile and compressive behaviors were compared based on the initial drawing amount. First, OM observation and hardness measurements were conducted to analyze the work hardening behavior according to the drawing amount. Then, the tensile and compressive behaviors were observed to evaluate strain path dependency. As a result, when the drawing amount increased up to 52%, the increase in tensile yield strength and compressive yield strength compared to the as-received steel was 488 MPa and 130 MPa, respectively, with the increase in tensile yield strength being approximately 3.75 times higher than that of the compressive yield strength. This confirmed that differences in deformation behavior exist depending on the loading direction after drawing. To investigate this further, the dislocation density after compression following drawing was observed using EBSD, and the dislocation behavior was observed using TEM to compare dislocation states. By analyzing the dislocation density and dislocation behavior after compression following drawing, the strain path dependency of the Fe-Mn-Cr non-heat treatment steel wire rod is evaluated, and the optimal drawing conditions are determined.

[P24-5]

하이퍼캐스팅용 공구강의 고온 변형 거동 및 동적 재결정 거동 연구: 유민기, 곽대영 (한국생산기술연구원), 송민철 (현대IFC), 이진규 (국립공주대학교), 전재열* (한국생산기술연구원)

Keywords: Hyper casting, Constitutive equation, Processing map, Microstructure, Recrystallization

하이퍼캐스팅은 개별 부품을 각각 제조하는 종래의 다이캐스팅 방식과 달리 차체 모듈을 일체 성형하는 첨단 제조 공법으로, 급격한 온도 변화와 높은 하중이 작용하는 가혹한 작업 환경에서 사용되며, 열간 자유 단조를 통해 제작되고 있다. 본 연구에서는 하이퍼캐스팅용 공구강의 열간 자유 단조 공정 최적 설계를 위해 고온 압축 시험을 통한 고온 변형 및 동적 재결정 거동을 분석하였다. 고온 압축 시험은 Gleeble 시험기를 통해 실시하였으며 1250°C에서 5분간 유지 후 압축시험온도 850°C부터 1200°C까지 50°C 간격으로 변형률 속도 0.001 s^{-1}부터 1.0 s^{-1}까지 변형률 50 %로 각각 압축하였다. 고온 압축 시험을 통해 얻은 유동 응력-변형률 곡선을 통해 Processing map을 작성하였고 압축한 시험편의 단면 미세조직 관찰을 통해 Processing map과의 정합성을 도출하였다. 동적 재결정 거동은 EBSD를 통해 분석하였고 압축시험온도 1000°C 이상에서 동적 재결정이 일어남을 확인하였다.

[P24-6]

SS400 일반구조용강의 가공경화(work hardening)에 의한 강도 향상 메카니즘: 백민숙*, 김란 ((주)승산팩), 김병일 (주식회사 에스에스지)

Keywords: 일반구조용강, 가공경화, 반복소성변형, 스틸파레트, 응력해석

가공경화는 금속을 반복적인 소성가공을 통하여 금속내부에 전위밀도를 증가시켜 금속 소성변형에 필요한 전위이동을 방해시켜 금속재료의 변형 저항의 증가로 강도가 향상되는 강화 현상이다. 강도증가 = 원래강도 + ((재료전단계수 × 버거스벡터 × 전위밀도$^{1/2}$)/가공경화 과정) 금속재료의 강도증가는 가공경화로 생기는 전위 밀도증가로 소성변형의 장애가 되어 강도가 증가한다. 이에 본 연구에서는 비열처리 강종에 적용하는 가공경화(work hardening)프로세스(소성변형 roll을 통과하는 반복 소성변형)를 통하여 저강도 SS400 스틸 각 관을 강화시켜 고강도 스틸 파레트 소재로 제조하였다. 소성변형 과정은 3단계로 1단계 탄성역역을 지나 2단계 소성변형 영역으로 진행하면서 반복소성변형으로 가공경화가 진행된다. 상부 roll의 위치가 이동하면서 roll의 이동거리만큼 밴딩이 진행되어 소성변형이 일어난다. 탄성, 소성, 탄성, 소성 변형이 진행하면서 가공경화가 일어난다. 유한요소 해석에 따르면 상단 roll 중앙으로부터 받는 응력은 중앙부위가 26.6% 이상 증가할 것으로 예측하였으며, 실제 기술개발 과정에서 SS400 각 파이프의 가공경화에 의한 응력 증가량을 할 수 있었다.

[P24-7]

니켈도금강판을 이용한 4680 배터리 셀 캔 다단 딥 드로잉 공정 개발: 서예찬 (한국재료연구원), 지수민, 이세동, 성홍석 (LT정밀), 윤은유, 홍종화* (한국재료연구원)

Keywords: 4680 Cylindrical Battery Cell Can, Multi-step Deep Drawing Process, Nickel-Plated Steel Sheets, Finite Element Analysis (FEA), Process Optimization

전기자동차 산업이 발전함에 따라, 높은 에너지 밀도와 내식성을 갖춘 고용량 원통형 배터리가 주목받고 있다. 특히, 테슬라 등 전기자동차 제조 업체는 최근 차세대 배터리로서 원통형 폼팩터(Form factor)의 새로운 형태인 4680을 적극적으로 도입하고 있다. 또한, 배터리 셀 캔 (Battery cell can)의 내식성을 확보하기 위하여 새로운 소재에 대한 요구도 점차 늘어나고 있다. 하지만, 기존 딥 드로잉(Deep drawing) 성형 공정으로는 4680 배터리 캔 제작의 한계가 있으며, 일반적인 냉연강판(Cold rolled steel sheets)은 부식성에 취약하여, 사용시 배터리 안정성과 신뢰성에서의 문제를 안고 있다. 본 연구에서는 4680 배터리 셀의 고강도와 고내식성을 확보하는 동시에 신뢰성 높은 캔 제작을 위하여, 유한 요소 해석(Finite element analysis, FEA)을 활용한 다단 딥 드로잉(Multi-step deep drawing) 공정을 니켈도금강판(Nickel-plated steel sheets)에 적용하여 개발하였다. 이를 위하여, 기계적 시험을 진행하여 니켈도금강판의 재료 물성을 확보하였고, 각 공정마다의 펀치 및 다이 형상 등을 설계 및 개발하였다. 본 연구에서 개발된 유한 요

소 해석 모델을 통해, 니켈도금강판 소재를 활용한 4680 배터리 셀 캔을 최종적으로 제작할 수 있었다. 추후, 개발된 모델을 활용하여 두께 불균일도, 균열, 주름 등 캔 성형 공정에서 발생할 수 있는 결함 등을 예측하고 이를 최소화할 수 있는데 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 본다.

[P24-8]

Taylor 공정으로 제조된 SUS316L 마이크로 금속섬유의 SiO_2 보호층 제거를 위한 에칭 공정 연구: 김민수, 함솔, 김다정, 박성주* ((주)에코파우더)

Keywords: SUS316L, Micro Metal Fiber, Taylor Process, SiO_2, Protective Layer Etching

본 연구는 Taylor 공정으로 제조된 SUS316L 마이크로 금속섬유 표면의 SiO_2 보호층을 효과적으로 제거하기 위한 에칭 공정 개발에 초점을 맞추었다. 주요 연구 목표는 습식 에칭법과 건식 에칭법의 특성을 비교 분석하여 최적의 에칭 방법을 도출하는 것이다. 습식 에칭법으로는 HF를 활용한 화학적 에칭을 고려하였으며, 건식 에칭법으로는 가스와의 화학적 반응 및 물리적 스퍼터링을 이용한 방법을 검토하였다. 에칭 공정의 효율성 평가 기준으로 SiO_2 제거율, SUS316L 모재의 손상 정도, 공정의 균일성 및 재현성을 설정하였다. 본 연구에서는 각 에칭 방법의 장단점을 이론적으로 고찰하고, 예비 실험을 통해 그 가능성을 탐색하고자 한다. 습식 에칭법의 경우 높은 제거 효율이 예상되나 금속 모재의 부식 위험성을, 건식 에칭법의 경우 공정 제어의 용이성과 환경적 이점을 중점적으로 검토할 예정이다. 이를 통해 SUS316L 마이크로 금속섬유의 SiO_2 보호층 제거를 위한 최적의 에칭 공정 조건 확립의 기초를 마련하고, 향후 고품질 금속 섬유 소재의 제조 및 응용 연구 발전에 기여할 수 있는 방향을 제시하고자 한다.

[P24-9]

하나로 핵연료 집합체 압출 공정의 표면불량 발생 및 개선 현황: 김종환*, 이주화, 소원재, 김기남, 정용진 (한국원자력연구원)

Keywords: 압출, 표면불량, 하나로, 핵연료 심재, Uranium Silicide

한국원자력연구원(KAERI)에서는 성형, 가공, 조립 공정을 거쳐 하나로(High-flux Advanced Neutron Application ReactOr)에 사용되는 핵연료 집합체를 생산한다. 압출공정은 압분체(U_3Si/Al)를 표준봉 또는 축소봉 형태의 심재로 성형하는 공정이며, 압출 후에는 심재표면의 건전성이 요구된다. 본 연구에서는 압출심재 표면불량 해결을 위한 개선이력과 최적화 실험에 따른 결과를 분석하였으며, 이를 통해 표면불량의 원인 및 해결점을 확인하였다. 표면불량 개선을 통한 공정조건 최적화 및 합격률 상승을 달성하였고, 하나로 핵연료 심재의 품질 및 압출 안정화를 도모하였다.

[P24-10]

시뮬레이션 프로그램을 통한 알루미늄 전선의 특성 향상을 위한 인발공정 개선: 임기현, 조상현, 허현준, 이성희* (국립목포대학교)

Keywords: Al합금, 인발공정, 공정개선, 시뮬레이션, 기계적 특성

최근 재생에너지 산업의 급속한 확산과 더불어 전력망 구축에 필수적인 전선 소재로서 알루미늄의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히 해상풍력발전과 같은 대규모 전력 계통에서는 송전 효율을 극대화하면서도 경제적이고 환경친화적인 전선 제조 기술이 요구된다. 알루미늄은 구리에 비해 가볍고 경제성이 우수한 소재로, 재생에너지 확대와 고효율 전력망 구축에 적합한 대안으로 각광받고 있다. 그러나 최근 알루미늄 원자재 가격 상승과 기존 생산 공정의 비효율성으로 인해 제조 비용 증가가 중요한 과제로 떠오르고 있다. 이에 따라 공정 단계를 간소화하고 최적의 공정 조건을 도출함으로써 제조 단가를 절감하고 전선 성능을 극대화하는 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 알루미늄 합금 전선 생산 공정의 주요 매개변수를 분석하고, 최적화된 공정 조건을 확립하는 것을 목표로 한다. 특히, 초기 공정 17 pass에서 개선 공정 13 pass로 단선 공정 없이 진행하였고, 초기 직경 2.0 mm에서 최종 직경 0.4 mm로 인발 공정을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제작된 Al 합금 선재에 대해 기계적 특성을 평가하고 미세조직을 분석하여, 시뮬레이션 기반 공정 최적화의 적용 가능성을 검증한다. 또한, 전기 전도도를 통해 실용 가능성을 확인하였다. 기존 생산 공정에서 제조된 Al 전선과 개선된 공정 조건을 적용하여 생산된 시편의 시뮬레이션 데이터를 비교 분석함으로써, 인발 공정의 효율성을 개선하고 시뮬레이션 프로그램의 실무 적용 가능성을 종합적으로 평가하고자 한다.

[P24-11]

연속 와인딩 적용 와이어의 기계적 물성 분석 및 성형공정 유한요소 해석 기법 개발: 조유진, 안지섭 (한국생산기술연구원, 부산대학교), 황선광 (한국생산기술연구원), 조아라 (한국생산기술연구원, 부산대학교), 정명식* (한국생산기술연구원)

Keywords: Continuous Winding Process, Stator Winding, Microstructural Analysis

전기자동차(EV) 시장의 확산으로 인해, 고성능 구동 모터의 생산성과 효율성을 높이기 위한 와인딩 기술의 발전이 요구되고 있다. 연속 와인딩 공정(Continuous Winding Process)은 구리 도체를 코어에 끊김 없이 연속적으로 삽입하는 방식으로, 자동화가 용이하며 최대 90%의 충진율을 달성할 수 있다. 기존 헤어핀 성형 공정과 비교했을 때, 연속 와인딩은 용접 과정이 생략되어 와인딩 헤드의 높이를 낮출 수 있으나, 성형 과정에서 절연층 손상이 발생할 위험이 있다. 공정 중 집중하중으로 인한 와이어의 파단을 방지하기 위해 한계 이하의 변형으로 절연층 손상을 최소화하는 설계가 필요하다. 본 연구에서는 연속 와인딩 공정에 적용되는 와이어의 단면 분석, 경도 및 인장 강도를 측정하고, 주사 전자 현미경(SEM)과 광학 현미경(OM)을 이용하여 절연층 두께 변화 및 미세 구조 차이를 평가하였다. 또한, 성형 과정에서 절연층 손상 여부를 평가하고, 성형부와 미성형부 간의 절연층 두께 변화를 정량적으로 분석하였다. 또한, 열간동적재료물성 시험기(Gleeble 3800)를 사용하여 인장 시험을 수행하였으며, 디지털 영상 상관법(Digital Image Correlation, DIC)을 활용하여 와이어의 변형 거동을 정밀하게 분석하였다. 시험 결과, 연신율 변화에 따른 와이어 시편의 변형 및 파단 메커니즘을 분석하였고, 이를 성형 해석의 입력 데이터(Input Data)로 활용하였다. 이후 연속 와인딩 공정에서 벤딩 펀치의 형

상과 가동 방식에 따른 와이어의 성형 양상을 비교 분석하였다. 단계별(STEP-BY-STEP)로 펀치를 가하는 방식과 2개의 펀치를 동시에 가하는 방식을 비교하여 응력분포, 변형률, 데미지에 수치에 따른 와이어의 절연 코팅층 손상 여부에 미치는 영향을 연구하여 신뢰도 높은 연속와인딩 공정 조건을 도출하고자 한다.
Acknowledgments: 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비지원에 의한 연구임(No.RS-2024-00445670)

[P24-12]
이속압연 속도비 제어를 통한 알루미늄 합금 판재 기계적 물성 향상: 허우로, 정영민, 양해웅* (포항소재산업진흥원)
Keywords: Aluminum, Speed Ratio, Differential Speed Rolling, EBSD, Mechanical Properties

본 연구는 이속압연(DSR, Differential Speed Rolling) 공정을 통해 알루미늄 합금 판재의 기계적 물성에 대한 롤 속도 비율의 영향을 조사하였다. 이속압연은 극한의 소성 변형을 유도하여 초미세결정립 구조를 형성하는 강소성가공(SPD, severe plastic deformation) 중 하나로 상하 롤의 속도 차이를 이용하여 전단변형을 유도하는 공정으로, 미세조직을 균일하게 미세화하고 기계적 등방성을 향상시키는 장점있다. 따라서 본 연구에서는 이속압연과 비교재로 등속압연을 수행하는 비교연구를 수행하였다. 실험에서는 이속압연을 통해 전단변형(shear-deformation)을 유도하여 전반적으로 약 3 μm수준의 균일한 결정립 미세화를 달성하였고, 전단변형 시 대표적으로 나타나는 전단 집합조직인 H {001}<110>와 재결정 집합조직인 Cube {001}<100> 및 Goss {110}<001>가 형성되는 것을 후방산란전자회절(EBSD, Electron Backscatter Diffraction)를 통해 관찰하였다. 비교재로 관찰한 등속압연 시편에 대해서는 Brass {011}<211>와 같은 단순 압연 집합조직만 관찰되었다. 또한, 인장시험을 통해 약 30% 강도가 증가함을 함께 확인하였다. 따라서 본 연구를 통해 이속압연시 전단 집합조직의 발달로 인해 기계적물성이 향상함을 확인할 수 있었다.

[P24-13]
철강材의 친환경 전처리 목적 유기산 기반 산세 용액 개발: 허은주, 하유리, 김경훈* (포항소재산업진흥원)
Keywords: 표면처리, 도금, 유기산, 친환경

도금처리는 금속 표면에 보호막을 형성하여 부식을 방지하고 제품의 수명을 연장하는 데 효과적인 방법이며, 아연 도금은 철강 제품의 부식을 방지하는 데 널리 사용한다. 공정내 산세 과정은 소재 표면의 산화막, 녹, 스케일 등을 제거하는 단계로, 염산, 황산, 질산 등의 유해화학물질인 산 용액을 사용한다. 사용된 산액은 폐수 처리 과정에서 지속적인 인증 비용과 폐기 처리를 위한 추가적인 시간과 비용이 발생하여 작업비용 외 기회비용이 발생하며, 영세 업체들에게는 더욱 큰 부담으로 작용한다. 본 연구는 현재 도금업종 전처리시 사용하는 산세 용액의 친환경 용액 개발을 통한 폐기처리 비용에서 발생하는 기회비용을 저감하고 유사업종에서 유해화학 인증 없이 활용가능한 기술 개발을 수행함.

P25 : 재료분석
Room 3층 로비, 4월 25일

[P25-1]
Stress Corrosion Cracking Behavior of 316L Pressurizer Heater Sheath in Nuclear Power Plant: Ho Jung Lee* (KHNP CRI)
Keywords: 316L stainless steel, Heater sheath, SCC

316L austenitic stainless steel is widely used in primary circuits of nuclear power plant due to high allowable stress, fracture toughness, and corrosion resistance. In this study, axial crack generated in pressurizer heater sheath was investigated. It has been found that the crack was initiated and generated by intergranular mode indicating stress corrosion cracking (SCC). Despite superior SCC resistance of stainless steel in PWR condition, it would be generated by residual stress, water chemistry such as high dissolved oxygen(DO) and ppm order of particular impurities (Cl and S). In this case, SCC was generated by cold working during manufacturing process.

[P25-2]
Crystallographic Evolution of Electroplated Cu Pillar Bumps and Its Impact on Interfacial Delamination: Taek-Soo Shin (Sungkyunkwan University, Samsung Institute of Technology), Jaejun Yoon, Minjae Sung, and Seung-Boo Jung* (Sungkyunkwan University)
Keywords: Microstructural evolution, Cu pillar bump, Electroplating, Electronic packaging, Interfacial Delamination

Cu pillar bump technology has emerged as a critical component in advanced semiconductor packaging, offering superior electrical, thermal, and mechanical properties. However, as semiconductor devices scale down with increasing interconnect density, the reliability of Cu pillar bump structures has become a significant concern. In particular, interfacial delamination of Cu pillars remains a primary challenge, compromising the structural integrity and long-term reliability of semiconductor packages. Interfacial delamination is a complex failure mechanism influenced by multiple factors, including material properties, thermal expansion coefficient (CTE) mismatch, stress induced by structural defects, and electrochemical effects. Among these, one critical failure mechanism is the undercut phenomenon occurring during the seed etching process after Cu pillar electroplating. This phenomenon significantly alters interfacial stress distribution and degrades mechanical adhesion. Although undercut formation is a well-known reliability concern in Cu pillar bump technology, its correlation with electroplating parameters and stress-induced delamination remains insufficiently understood. This study systematically investigates the effect of electroplating current density on Cu grain orientation and grain size through experimental validation and establishes the correlation between these crystallographic characteristics, undercut formation, and interfacial stress. Fine-pitch Cu pillar bumps (diameter: 25 μm, pitch: 55 μm) were fabricated on Al pads under varying electroplating current densities. The crystallographic characteristics (grain orientation and grain size) of electroplated Cu were analyzed to evaluate their impact on the severity of undercut formation. Mechanical properties corresponding to different undercut conditions were assessed via shear testing, while TCAD simulations were employed to quantitatively analyze stress concentration effects induced by undercut formation. By elucidating the fundamental interrelationship among electroplating parameters, microstructural evolution, undercut, and interfacial stress concentration, this study provides a critical process optimization guideline for improving Cu pillar bump reliability. The findings are expected to contribute to the development of more robust Cu pillar bump structures, thereby enhancing the reliability of next-generation semiconductor packaging technologies.

[P25-3]
Solid-State Carbon Diffusion for Controlled Growth of Graphitic Nanostructures: Dongwook Kwak (Institute for Basic Science (IBS)), Minhyeok Kim, Dong Ho Jeon, Yongqiang Meng (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong* (Institute for Basic Science (IBS)), and Rodney S. Ruoff* (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))
Keywords: Solid-state carbon diffusion, bottom-up growth, diffusion rate of carbon, high-quality carbon nanomaterials

This study investigates the controlled 'bottom-up' growth of graphitic nanostructures on metal foils (Co, Fe, Ni, W) via solid-state carbon diffusion at 1000°C. 200μm carbon films were diffused into 50μm metal foils for varying annealing times (1-18 hours). Theoretical carbon diffusion rates were calculated using established relationships between solubility, diffusion coefficient, and activation energy for each metal. Experimental diffusion rates were determined by measuring the volume of carbon films formed. Comparison of theoretical and experimental results elucidated the diffusion behavior of carbon in each metal. Synthesized films, characterized by SEM, EDS, EBSD, AFM, and Raman spectroscopy, exhibited predominantly graphitic structures with low defect concentrations. This approach enables the synthesis of high-quality carbon nanomaterials and will be further developed for advanced architectures and substrates (h-BN, sapphire, SiC). We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[P25-4]

Ti-6Al-4V 합금의 가공경화 미세조직 분석을 위한 에칭 기법 개발: 김학현*, 이정훈, 배동화, 정수진 (포항산업과학연구원)

Keywords: Ti합금, 에칭, 미세조직

Ti-6Al-4V 합금은 우수한 기계적 강도, 경량성, 그리고 뛰어난 내식성을 바탕으로 항공우주, 생체재료, 자동차 및 에너지 산업 등 첨단 기술 분야에서 핵심적인 구조 재료로 각광받고 있다. 특히, 철강소재 대비 높은 비강도로 인해 다양한 산업에서 기존 금속 소재를 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 소재 국산화와 자립화의 중요성이 부각됨에 따라, Ti-6Al-4V 합금의 제조 공정 및 품질 관리 기술 개발이 필수적 과제로 대두되고 있다. 이러한 기술 개발의 일환으로, 합금의 미세조직 특성화는 소재의 기계적 성질 및 신뢰성 평가에 있어 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 가공경화된 Ti-6Al-4V 합금의 α+β 이중상 구조를 명확하게 관찰할 수 있는 새로운 에칭 방법을 개발하였다. 최적화된 에칭 조건을 통해 미세조직 현출의 재현성을 확보하였으며, 기존 방법 대비 분석 시간을 단축하고, 보다 선명한 조직 관찰이 가능함을 확인하였다. 본 연구의 결과는 Ti-6Al-4V 합금의 미세구조 분석 효율성을 향상시키고, 향후 소재 국산화 및 품질 관리 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[P25-5]

초저온/대기 비개방 cryo-APT/cryo-EM 연계분석 플랫폼 구축 및 활용: 박재경, 신원상, 박재현, 주재선, 양철웅* (성균관대학교)

Keywords: 초저온 분석, 대기비개방 시편 홀더, 빔 데미지

Atom Probe Tomography(APT)는 원자 수준의 고 해상도 3차원 공간 이미징과 원소 분포 분석이 동시에 가능한 첨단 나노 분석 기술이며, 전자현미경(electron microscopy) 또한 뛰어난 공간 분해능, 이미지 분해능과 화학분해능을 갖춘 첨단 분석 장비로 재료분석에서 필수적인 장비이다. 그러나 APT는 결정학적 정보 획득에 취약하고 TEM(STEM)은 projection artifact가 존재하는 단점을 가지고 있다. 한편 최근 산·학계의 관심을 크게 모으고 있는 에너지 관련 소재의 경우 열이나 전자빔 조사에 민감해 분석에 어려움을 겪고 있다. 시편제작 단계에서부터 이송까지 초저온/초고진공 환경을 유지할 수 있도록 시편 이송시스템을 갖추고 cryo-APT와 cryo-EM을 상호보완적으로 연계하여 분석을 진행한다면 초저온환경에서 원자 확산 억제와 열 진동으로 인한 공간 분해능 손실 최소화가 가능하며, 열적으로 민감하거나 전자빔에 취약한 시료를 본래 상태 그대로 분석할 수 있어 기존 분석법으로 분석이 어려운 페로브스카이트 광전소재, 배터리 소재, 반도체 소재/소자, 수소저장 합금, 고엔트로피 합금, 유기/바이오 재료 등의 원자 구조와 화학적 구성을 밝히는데 매우 유용하다. 장비간 연계분석은 각 장비에 적합한 셔틀, 어댑터시스템, 환경제어를 위한 제반 시설 등 여러 가지 현실적 문제의 해결을 필요로 하며 본 발표에서는 이러한 정보와 분석 활용 사례를 공유하고자 한다.

[P25-6]

분말제조 공정 일체형을 위한 이동형 분말 분석기기 개발 연구: 권용범, 이정훈, 조인희* (한국생산기술연구원)

Keywords: 이동형 분말 분석기기, 분말제조 지능화 공정, 분말 실시간 계측 및 분석, 광학 분석기

가스 아토마이저 등 금속분말 제조공정을 통해 나온 제품의 품질을 검정하기 위하여는 사용처에 따른 입도 수율을 평가하기 위하여 반드시 "분말 입도 분석기기(PSA, Particle Size Analyzer)"를 활용한다. 하지만, 이 장치는 가스 아토마이저 등 제조공정 장비와는 별도의 시스템으로 구성되어 있을 뿐만 아니라, 제품 회수·포집·검체선별 과정에서 도차가 발생할 수 있는 가능성이 있다. 또한, 이러한 시스템은 별도의 분석룸안에 배치되어 있어, 높은 정밀도의 성과물을 담보로 하지만, 작업자의 빠른 피드백을 통한 제품 검증 시스템 등 손쉬운 결과를 얻기가 힘든 단점이 있다. 본 발표에서는 이러한 시스템의 한계점을 보완하는 "이동형 분말 분석기기"를 제조하는 것은 물론, 일반적인 광학계 설치 방식을 따라 "이미지 분석" 기법을 활용하여 in-situ로 원하는 시간에 분말 입도데이터를 쉽게 획득할 수 있도록 구성하였다. 또한, 분말 취득 공정에 대한 공정데이터를 동시에 송출하는 것은 물론이고, 모터구동을 통하여 투입 분말의 양을 제어가 가능하도록 설치되었다. 이러한 이동형 분말 평가기기는 단순히 데이터 취득을 위한 장치 구동 기능을 넘어서, 공정장치의 View Point에 접합을 통한 공정-분석 일체형 시스템이 가능하며, 지능공정을 통한 디지털 전환도 가능할 것으로 보인다.

[P25-7]

국내 매설 배관의 손상 사례 분석: 김진원, 이만재, 김성남* (포항산업과학연구원)

Keywords: 매설배관, 철강, 토양부식환경, 손상분석, 스테인리스강

국내 매설 배관의 손상으로 인해 해마다 많은 비용이 발생하고 있다. 연간 누수량 관점으로 볼 때 손실 비용은 약 5,200억원으로 추산된다. 매설 배관은 자연 재해, 인프라 노후화, 건설 작업 등으로 인해 손상이 발생하는데 2020년에는 집중호우로 인해 침수와 토사 유출로 배관이 손상되는 사례가 많았고, 그 외에도 지진, 건설현장 사고, 노후화된 배관의 누수와 같은 사고들이 계속해서 발생하고 있다. 배설 배관의 손상은 단순한 물리적 피해를 넘어 큰 경제적 손실로 연결되기 때문에 이를 예방하는 것은 매우 중요하다. 특히 수돗물 공급, 하수 처리, 가스 공급 등의 일상 생활에 밀접한 영역에 영향을 끼치기 때문에 이로 인해 발생하는 불편함과 경제적 손실이 상당하다. 따라서 손상된 매설 배관을 분석하는 것은 매우 중요하다. 손상 사례를 분석함으로써 유사한 사고를 예방할 수 있는 방안을 빠르게 모색할 수 있으며, 특정 지역에서 자주 발생하는 손상 유형을 파악하여 해당 지역의 배관을 강화하거나 정기적인 예방 작업을 실시할 수 있다. 손상 분석을 통해 발생할 수 있는 손실비용을 사전에 예측하고, 이를 줄이기 위한 조치를 취함으로써 장기적으로 비용을 절감할 수 있다. 그리고 배관 손상으로 인한 사고는 인명 피해로 이어질 수 있기 때문에 손상 분석을 통해 안전성을 높이고 시민들의 생명과 재산을 보호하는 데 기여할 수 있다. 본 연구에서는 탄소강, 아연도금강관, 스테인리스강의 매설 배관 손상 사례를 분석하였다. 손상 분석 대상에 대한 형상, 소재의 조성, 미세 조직 및 물리적 특성 등을 평가하여 손상이 발생한 원인을 추정하였고, 이를 예방하기 위한 사전 조치들에 대해 소재 관점에서 고찰하고자 한다.

[P25-8]

7000계 알루미늄 합금의 석출물 및 미세조직 분석 방법: 이만재, 김진원, 김성남* (포항산업과학연구원)

Keywords: 알루미늄합금, 7000계, 연마방법, 조직분석, 석출물

알루미늄 및 그 합금은 항공 우주 산업뿐만 아니라 일반 공업용 차량, 토목, 건축, 조선, 화학 및 식품 산업 등 다양한 공업 분야에서 널리 활용되는 소재이다. 특히, 알루미늄은 가벼운 무게와 우수한 내식성을 가지며, 기계적 가공이 용이하기 때문에 산업 전반에서 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 장점 덕분에 알루미늄 합금은 구조용 소재뿐만 아니라 내열성, 내마모성이 요구되는 다양한 용도로도 활용된다. 알루미늄 합금은 그 구성 원소의 함량 및 성분 조성에 따라 1000계부터 7000계까지 네 자리의 숫자로 구분된다. 그 중 7000계 합금은 아연(Zn)을 주 첨가 원소로 하며, 여기에 마그네슘(Mg)을 추가하여 강도를 극대화한 열처리 가능 합금으로 잘 알려져 있다. 이처럼 Al-Zn-Mg을 기본으로 하는 7000계 알루미늄 합금은 높은 비강도와 우수한 피로 특성을 지니며, 특히 2000계 합금과 비교할 때 더욱 뛰어난 부식 저항성을 갖고 있어 항공기 기체 구조용 소재로 널리 사용된다. 7000계 알루미늄 합금 중 대표적인 예로는 1943년에 개발된 7075 합금이 있으며, 이는 높은 강도와 내구성을 바탕으로 항공 및 우주 산업을 비롯한 다양한 산업에서 사용되고 있다. 이후 7075 합금의 초기 단점을 보완한 4575, 7050, 7140 등의 개량형 합금들이 개발되었으며, 이러한 합금들은 항공기 부품뿐만 아니라 고성능 스포츠 장비, 자동차 및 방산 분야에서도 활용되고 있다. 또한, 기존 7000계 합금에 망간(Mn), 규소(Si), 마그네슘(Mg), 구리(Cu), 아연(Zn), 크롬(Cr) 등의 원소를 추가로 첨가하여 미세 조직을 조정하고 석출 강화를 유도함으로써 기계적 특성을 더욱 향상시킨 합금들도 존재한다. 알루미늄 합금의 성능을 평가하기 위해서는 합금 내 석출물의 기지조직과 경도를 측정하는 것이 필수적이다. 이를 위해 전통적으로 물을 이용한 연마 방법이 사용되어 왔다. 그러나 Al-Mg계 합금의 경우, 연마 과정에서 Mg 성분이 부식될 가능성이 크며, 그로 인해 1g의 경도 하중에도 불구하고 석출물이 탈락하는 문제가 발생하여 정확한 경도 측정이 어려운 한계가 있다. 이는 소재의 특성을 정확하게 분석하는 데 있어 중요한 제약으로 작용하며, 특히 7000계 합금의 경우 조직을 명확하게 구분하고 결함 없이 물리적 특성을 측정할 수 있는 평가 방법이 필요하다. 따라서, Al-Zn-Mg 기반의 7000계 알루미늄 합금의 특성을 평가할 때에는 기존 방법의 한계를 극복할 수 있는 새로운 연마 기법과 미세 조직 분석 기술이 요구된다. 본 연구에서는 알루미늄 합금의 조직을 명확하게 구분하여 결함없이 물리적 특성의 측정이 가능한 연마 방법에 대해 발표하고자 한다.

[P25-9]

In Situ Gas Cell TEM Study on Temperature-dependent Growth of Carbon Nanofiber and Nanotube from Ethanol Vapor: Handolsam Chung, Myeonggi Choe, Younggeun Jang, Wonjun Kim, and Zonghoon Lee* (Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: in situ TEM, carbon nanotube, active state, activation energy, ethanol vapor

Carbon nanofibers (CNFs) and carbon nanotubes (CNTs) are utilized across various fields such as energy storage, chemical sensors, photonics, thermal interfaces, and wearable electronics due to their remarkable physical and chemical properties. However, the well-controlled synthesis of CNF/CNT for specific applications is hampered by the lack of nanoscale experiments regarding how growth temperature impacts the growth mechanism under real-world conditions. Here, for the first time, we performed and directly observed the temperature-dependent growth of CNF and CNT from ethanol vapor at near atmospheric pressure within in situ gas cell TEM. We extensively studied the effect of growth temperature on the structure of the resulting nanofibers or nanotubes. To introduce ethanol vapor into a micro-electromechanical system (MEMS) based closed cell, we designed and implemented a homebuilt bubbler system. This system enables precise control of flow rate and pressure, ensuring highly reproducible results across multiple in situ gas cell TEM experiments. Thus, we successfully achieved real-time TEM experiments and observations of the temperature-dependent transition from CNFs to CNTs under near-atmospheric pressure conditions. By analyzing selected area electron diffraction (SAED) patterns, we precisely identified the active state of the catalyst and the dissolved carbon concentration at various stages of the growth process. Lattice parameter measurements revealed an expansion of the Ni lattice at elevated temperatures, which is attributed to the increased solubility of carbon. Furthermore, employing complementary spectroscopic techniques, we demonstrated how temperature influences the degree of graphitization in CNFs and CNTs during their growth. Through detailed analyses using electron energy loss spectroscopy (EELS), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and Raman spectroscopy, we gained a comprehensive understanding of the temperature-induced structural changes. Our findings suggest that these changes are predominantly driven by the enhanced carbon solubility within the catalytic particles and the increased sp^2 fraction in the growing graphitic walls. At last, based on the activation energies calculated from the measured growth rates, we conclude that the rate-determining step for the growth of both CNFs and CNTs is the subsurface bulk diffusion of carbon. Our new findings are expected to significantly advance the understanding of the growth mechanisms governing the formation of CNF and CNT under diverse environmental conditions. Moreover, they establish a foundational framework for investigating catalytic activity of nanomaterials in dynamic environments. This in-dept insight into growth mechanisms acquired from in situ gas cell TEM experiments is anticipated to enable precise control over the structural properties of CNFs and CNTs, as well as the development of guidelines for designing optimized structures tailored to specific applications.

[P25-10]

항공기용 경량 TiAl 합금 미세 조직 및 조성 분석: 이원형, 이창기, 노이준, 김세호* (고려대학교)

Keywords: TiAl 합금, APT

최근 항공기 엔진용 소재로 TiAl 합금이 주목받고 있다. TiAl 합금은 고온 및 고압 환경에서의 성능을 확보하기 위해, 티타늄

(Ti)과 알루미늄(Al) 이원계에 해당하는 다양한 금속 간 화합물 상이 복합적으로 존재한다. 그 중, γ 상(TiAl), α2 상(Ti3Al)이 주로 존재하게 되며, 주요 구성 원소가 티타늄과 알루미늄이기에 가볍고, 고온 특성이 우수하다. 본 연구에서는 TiAl 합금의 조성과 미세 구조를 심층적으로 분석하는 데 중점을 두었다. TiAl 합금의 미세 구조 분석에는 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 활용하였으며, 이를 통해 합금의 표면 형태와 미세 구조를 관찰하였다. 추가적으로, 에너지 분산 X선 분광법(Energy-dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)을 통해 합금의 주요 성분을 분석하였고, 더 나아가, 원자단층현미경(Atom Probe Tomography, APT)을 활용하여 각 상의 조성과 불순물의 분포를 보다 면밀히 분석하였다.

[P25-11]

Atomic Characterization of Li Incorporation in Amorphous SiO_2: 정두효, 박규민 (고려대학교), 김원일 (서울대학교), 김세호* (고려대학교)

Keywords: Li incorporation, amorphous SiO_2, stober method

Amorphous silica plays an important role in various industrial and scientific applications. In particular, the incorporation of lithium into amorphous silica has attracted interest in the field of energy materials. Amorphous silica has a high surface area and porosity due to its nanostructure, which can be utilized to maximize lithium storage capacity. In addition, it is attracting attention as a next-generation lithium ion battery material that will replace existing graphite-based anode materials due to its abundant resources and economic feasibility. Therefore, characterizing the distribution and composition of lithium in amorphous silica presents new possibilities for industrial and research applications. In this study, we induce Li incorporation into 800nm SiO_2 synthesized by stober method. Then, we characterize particle size and elemental composition by SEM/EDS analysis. Also, the specimen is fabricated by electroplating the synthesized particles to a Cu substrate through Ni plating, and APT analysis is performed to identify the atomic distribution within the specimen. This study allows us to analyze the presence and distribution of lithium in amorphous silica by confirming the potential of Li incorporation under specific conditions at the atomic scale. Therefore, it presents new prospects for future energy storage material applications.

[P25-12]

The Long-Term Degradation of Zeolite 13X Desiccant in Glove Box with Atom Probe Tomography: Chang-Gi Lee, Won-Hyoung Lee, and Se-Ho Kim* (Korea university)

Keywords: Zeolite, Atom probe tomography

Zeolites consist of an aluminosilicate framework, with cations such as Na, Ca, K, and Mg incorporated into the structure, and contain micropores capable of sieving molecules so that zeolite is primarily used for material separation and purification. Since zeolites are effective at trapping moisture, they are widely employed in industries such as petroleum refining, semiconductor manufacturing, and food processing. Zeolites are also thermally stable, which allows them to be recycled through regeneration processes after use. However, the continuous regeneration process can lead to a degradation in moisture adsorption performance. To gain a fundamental understanding of this degradation process, the atomic scale analysis is important. Herein, the degradation of zeolite was examined by using atom probe tomography (APT) which offers atomic-scale resolution characterization. Through statistical analysis in APT, the clustering of atoms such as Na, Al, Si within the zeolite structure was observed and Na was loss after degradation.

[P25-13

노출 환경에 따른 Zn-Mg-Al 용융 합금 도금 강판의 내식성 분석: 이수민, 이대희 (국립부경대학교), 김현식 (한국세라믹기술원), 최용규 (한국산업기술시험원), 이정훈* (국립부경대학교)

Keywords: Zn-Mg-Al 합금 도금, 내식성, 염수분무시험, PosMAC, 환경시험

도금(Plating)은 다양한 산업 분야에서 발생할 수 있는 주요 문제인 강철 부식을 방지하기 위한 기술이다. Zn-Mg-Al 합금 도금 강판은 아연(Zn)에 소량의 알루미늄(Al)과 마그네슘(Mg)을 첨가하여 부식 저항성을 향상시킴으로써 제품의 수명을 연장하고 자원 소비를 줄일 수 있다. 포스코(POSCO)에서 개발 및 상용화한 PosMAC 강판은 Zn-Mg-Al 용융 도금 합금 강판으로, 우수한 부식 저항성을 갖추고 있어 자동차 및 가전제품 등에 널리 활용되고 있다. 그러나 이러한 강판이 다양한 환경 노출 조건에서 나타내는 부식 저항성에 대한 종합적인 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 PosMAC 강판을 고온 건조(high-temperature dry) 및 고온 고습(high-temperature humid) 환경에 장기간 노출시켜 부식 거동을 평가하였다. 표면의 화학 조성 변화를 분석하기 위해 에너지 분산형 분광법(EDS) 및 X선 광전자 분광법(XPS)을 활용하였으며, 3.5 wt.% NaCl 용액에서 동전위 분극 실험(potentiodynamic polarization test)을 통해 부식 저항성을 평가하였다. 연구 결과, 장기간 고온 건조 환경에 노출된 강판은 부식 저항성이 감소한 반면, 고온 고습 환경에서는 시간이 지나도 안정적인 부식 저항성을 유지하는 것으로 나타났다. 염수 분무 시험(salt spray test) 결과 또한 이러한 경향과 일치하였으며, 고온 건조 조건에 비해 고온 고습 조건에서의 강판이 우수한 부식 저항성을 나타냄을 확인하였다. 이러한 부식 저항성 향상은 수증기와의 반응을 통해 표면에 $Mg(OH)_2$가 형성됨으로써 보호 효과가 강화된 것으로 판단된다. 본 연구는 Zn-Mg-Al 합금 도금 강판의 성능이 환경 조건에 따라 크게 달라질 수 있음을 강조한다.

P26 : 가공-열처리
Room 3층 로비, 4월 25일

[P26-1]
염수 분무 환경에서 STS304의 공식 형상 및 전기화학적 특성에 대한 열처리의 영향 분석: 김지현, 남서우, 서희창, 함주빈, 김영천* (국립경국대학교)
Keywords: 공식 부식, STS304, 열처리, 염수 분무 시험
스테인리스강은 뛰어난 내식성과 고온 성능, 우수한 기계적 성질을 갖추고 있어 다양한 산업 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 이는 다양한 화학 조성을 가지며, 산화 피막(부동태 피막)에 의해 높은 내식성을 유지하는 것으로 알려져 있다. 그러나 열처리, 용접 공정 및 고온 환경에서 장기간 사용될 경우 미세구조 변화로 인해 재료의 특성이 변해 국부 부식(공식, pitting corrosion)을 유발하며, 다양한 부식 문제가 야기될 수 있다. 본 연구에서는 염수 분무 시험(Salt Spray Test, SST)을 활용한 공식의 양상과 전기화학적 거동을 분석하였다. 시험편의 예민화(Sensitization) 온도를 설정하여 시효 열처리를 진행하였으며, 염수 분무 시험은 100시간 간격으로 총 5개의 조건(100, 200, 300, 400, 500시간)에서 수행되었다. 해당 조건별 공식(pitting)의 폭과 깊이를 3D 공초점 현미경으로 측정하여 부식 진행 양상을 정량화하였다. 실험을 통해 열처리 여부와 관계없이 STS 304 시편은 염수 분무 시간이 증가할수록 폭과 깊이가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 열처리된 시편에서 공식 발생 빈도가 상대적으로 많았으며, 공식의 폭은 더 넓게 형성되는 것으로 나타났다. 염수 환경에서의 내식성을 평가하기 위해 양극 분극 시험과 개방 회로 전위(Open Circuit Potential, OCP) 시험을 수행하였다. 두 시험 결과, 열처리된 시편의 부식 저항성이 감소하고 전위는 증가하는 경향을 보였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업

[P26-2]
적층 제조된 $AlSi_{10}Mg$ 합금의 후열처리에 따른 미세조직 제어: 김준혁, 한재연 (국립창원대학교), 이종훈, 이지원, 최용혁 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)
Keywords: $AlSi_{10}Mg$, Selective Laser Melting (SLM), Si nano-precipitation, Heat treatment, Tensile properties
$AlSi_{10}Mg$ 합금은 항공 및 방산 부품을 비롯한 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 최근에는 효율 향상과 제작비 절감을 위해 부품제조에 있어 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM)등과 같은 적층 제조 공정이 접목되고 있다. 그러나 현재까지 적층 제조 후 요구되는 미세조직 및 적정 물성치 달성을 위한 열처리 조건이 확립되어 있지 않은 상황으로, 다양한 열처리 조건에 대한 미세조직과 물성치의 상관성에 대한 심층분석이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 적층 제조된 $AlSi_{10}Mg$ 합금의 후열처리 조건에 따른 미세조직 변화거동과 상온 인장 특성에 대해 고찰하였다. 이를 위해 주조 합금에 일반적으로 적용되는 T6 열처리와 생산성 향상을 목적으로 T6 열처리 대비 열처리 시간을 저감한 modified stress relief (SR) 열처리를 수행하였다. As-built 합금은 5.6 μm–13.8 μm 폭을 갖는 수지상 α-Al 결정립과 Si-eutectic 입자에 의한 network 구조(지름 380 nm)의 형성이 나타나며 Al 기지 내부 Si의 미세 석출은 확인되지 않았다. 통상의 SR 열처리 시 as-built와 동일한 network 구조의 유지가 확인되며 Al 기지 내부 Si 미세 석출은 확인되지 않았다. SR+T6 열처리의 경우 용체화 시 Si 입자의 조대화로 인한 Si-network 구조의 붕괴 및 침상의 β-AlFeSi 금속간화합물이 나타났으며, 시효처리 중 Al 기지 내부 2–5 nm 크기의 Mg_2Si 천이상으로 추정되는 석출물이 새롭게 관찰되었다. Modified SR 열처리 결과 Si-network 구조의 일부가 사라지고 Al 기지 내부 10–20 nm 크기의 Si 나노석출물이 형성되었다. 열처리 조건에 따른 인장 시험 결과, As-built 대비 후열처리재의 연신율 향상이 확인되며, SR+T6와 modified SR 사이에서 유사한 인장강도 및 연신율이 확인되었다. 또한, plasticity 측면에서도 modified SR 열처리가 더 우수한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 두 열처리 조건에 따라 변형 메커니즘이 변화하였으며, 이에 영향을 미치는 주요인자는 Si-network 구조 붕괴 정도와 미세 석출물 크기로 확인되었다. 상기 결과를 바탕으로 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있는 추가적인 최적 열처리 설계 방안에 대해서도 토론하고자 하였다.

[P26-3]
열처리 조건에 따른 Invar 36 합금의 미세구조 및 물성 변화 분석: 장준호, 한상윤, 류채우* (홍익대학교)
Keywords: Invar alloy, coefficient of thermal expansion, residual stress, texture
Fe-36%Ni(wt.%) 합금은 1897년 Guillaume에 의해 발견된 이후 넓은 온도 범위에서 낮은 열팽창계수(coefficient of thermal expansion, CTE)를 가지는 특성으로 Invar 합금으로 알려져 있으며, 레이저 부품, LNG 탱크, 정밀 금속 마스크(Fine metal mask, FMM) 등 다양한 산업 분야에서 핵심 소재로 활용되고 있다. 그러나 Invar 합금은 높은 연성으로 인해 가공성이 낮고, 얇은 판재로 적용 시 공정 과정에서 waviness 등의 문제가 발생하는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하고 복잡한 형상 가공을 위해서는 Invar 합금의 기계적 물성과 열팽창 특성 제어를 위한 미세구조 변화의 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 고온 균질화 열처리를 진행한 후 냉간 압연된 판재를 대상으로 다양한 온도에서의 열처리를 수행하였다. 열처리에 따른 미세구조 변화가 CTE 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 synchrotron X-ray diffraction 실험을 통해 결정 구조 및 잔류 응력을 평가하였으며, 전자 후방 산란 회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD)과 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM) 분석을 통해 결정 방위 및 미세구조 변화를 관측하였다. 또한, 인장 실험을 통해 기계적 물성 변화를 측정하고, 열팽창 계수와, 미세구조와의 상관관계

를 규명하였다. 본 연구는 압연 후 열처리 조건에 따른 미세구조 제어를 통해 Invar 합금의 기계적 신뢰성과 열팽창 특성을 최적화하는 방법을 제시하며, 향후 Invar 합금의 성형성 및 실용적 적용 가능성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

[P26-4]

Ti-6Al-4V 단조재의 단계별 열처리에 따른 Bi-Modal 조직 형성 및 Lamellar 조직 변화 거동 분석: 김종훈, 한재연 (국립창원대학교), 김치원 (한국재료연구원), 구지호 (두산에너빌리티), 홍현욱* (국립창원대학교)

Keywords: Ti-6Al-4V, Primary α, α+β lamellar, Stabilization treatment, Tensile property

Ti-6Al-4V 합금은 우수한 비강도와 인성 그리고 내식 특성 때문에 터빈 블레이드에 적합한 소재로 널리 사용되고 있다. Ti-6Al-4V는 α-stabilizer Al과 β-stabilizer V 첨가에 의해 후열처리 조건에 따라 Equiaxed α, α+β lamellar, Bi-modal 구조가 형성될 수 있으며, 그중 primary α와 α+β lamellar 조직이 혼재된 Bi-modal 구조는 우수한 강도와 연성을 가져 고성능의 제품을 생산하는 데에 적합한 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 AMS(Aerospace Material Specification)규정에서, Ti-6Al-4V 단조재의 후열처리 공정은 용체화 이후 시효 처리를 통해 Bi-modal 조직을 확보하는 방향으로 권장되고 있다. 산업적인 측면에서, 대형 부품 소재의 경우 용체화 열처리와 시효 열처리 사이 안정화 열처리가 필수적으로 여겨지지만, 현재 Ti-6Al-4V 합금에서 안정화 열처리의 영향에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 단조재의 안정화 열처리 유무에 대한 미세조직 변화 거동과 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 이를 위해 동일한 용체화 처리 이후 안정화 열처리를 수행한 시편과 수행하지 않은 시편에 대해 시효 처리를 진행하고 해당 미세조직을 비교하였다. 첫째로, 용체화 열처리를 수행한 경우 α+β lamellar가 생성됨에 따라 Bi-modal 구조가 형성되었다. 이 과정에서 용체화 온도가 높아질수록 primary α 상의 분율이 감소하는 결과가 나타났으며, 냉각속도가 증가함에 따라 lamellar colony의 미세화 및 일부의 α' 마르텐사이트가 생성된 것으로 확인되었다. 둘째로, 안정화 및 시효 열처리를 진행한 결과, 용체화 처리 대비 lamellar 폭이 증가하였으며 lamellar colony 내부 lath 조직의 segmentation이 다수 확인되었다(α lath=576 nm, β film=95.2 nm). 이후 안정화 열처리가 미세조직 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해, 안정화 열처리를 생략한 시편을 동일한 방법으로 시효 처리하였다. 그 결과 안정화 열처리를 수행하지 않은 시편에서는 시효 처리를 진행하였음에도 상대적으로 α+β lamellar 폭이 좁고 lamellar colony 내부 segmentation의 경향이 다소 감소한 것으로 확인되었다(α lath=493 nm, β film=64.1 nm). 위 연구 결과들을 통해 Ti-6Al-4V 단조재의 안정화 열처리는 lamellar 폭의 증가 및 시효 열처리 과정에서 lamellar의 segmentation 발달에 영향을 주는 것으로 판단되었다. 추가적으로 후열처리 조건에 따른 기계적 특성의 변화를 확인하기 위해, 상온과 압축 블레이드의 운행 온도인 260ºC에서 인장 시험을 진행하였다. 그 결과 용체화 처리의 조건을 달리하였을 때에는 인장 강도의 변화가 다소 확인되었으나, 안정화 열처리의 경우 진행 유무에 관계없이 상온과 260ºC 모두 유사한 특성이 확인되었다. 상기 연구 결과를 통해 Ti-6Al-4V 단조재의 안정화 열처리는 Bi-modal 미세조직에 일부 영향을 미치지만, 인장 특성을 비롯한 기계적 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

[P26-5]

용융염 원자로 적용을 위한 Alloy 709의 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 분석: 남승주, 이원찬, 김정한* (국립한밭대학교)

Keywords: 열처리, 스테인리스

Alloy 709는 고온 및 부식 환경에서 우수한 기계적 특성과 내산화성을 갖춘 오스테나이트계 스테인리스강으로, 차세대 원자로 및 발전 시스템의 구조 소재로 주목받고 있다. 특히, 고온 원자로와 같은 가혹한 환경에서의 적용을 위해 고온 기계적 특성 평가 및 부식·방사선 환경에서의 안정성 검증이 필수적이다. 본 연구에서는 열처리된 Alloy 709의 미세조직 및 기계적 특성 분석을 수행하였다. 열간압연된 Alloy 709를 1250ºC에서 1시간 열처리 후 급랭하여 기본 샘플을 제작하였으며, 이후 두 개의 샘플을 추가로 550ºC 및 900ºC에서 각각 30분, 1시간 열처리하여 비교 시편을 제작하였다. 또한, 고온 인장 실험을 위한 시편을 제작하고 실험을 수행하였다. 미세조직 및 기계적 특성 분석을 위해 주사전자현미경(SEM), X선 회절 분석(XRD), 전자 후방산란 회절(EBSD) 분석을 진행하였으며, 이를 통해 열처리에 따른 상 변태 및 미세조직 변화, 기계적 특성의 변화를 평가하였다.

[P26-6] Canceled

중장비용 대형 주행 감속기 베어링의 열처리 변형률 감소와 물성 확보를 위한 최적 열처리 공정 개발: 홍성준* (한국생산기술연구원, 순천대학교), 김태범 (한국생산기술연구원), 이동근 (순천대학교), 조균택* (한국생산기술연구원)

Keywords: 베어링, 열변형, 플러그 퀜칭, 변형제어

중장비용 대형 주행 감속기 베어링 (LACBB, Large Angular Contact Ball Bearing)은 열처리 후 동반되는 열 변형을 줄이기 위해 플러그 퀜칭 공정을 적용하였으나, 여전히 변형 제어의 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 열처리 조건 별 데이터를 통해 최적 열처리 공정을 도출하였으며, 도출된 공정에서 물성을 평가하였다. 열처리 조건은 가열온도 및 가열시간으로 설정하였고, 조건에 따른 유효변수(진원도, 평면도)를 통해 최적 열처리 공정을 도출하였다. 그 결과, 높은 가열온도에서 유효변수가 증가하였고 최대 변형량은 0.3%이었으며, 오랜 시간 가열했을 경우 유효변수가 감소하였고 최대 변형량은 0.17%로 확인되었다. 가열온도가 높고 가열시간이 짧을수록 변형량이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 열처리 시 변태가 일어나며 발생하는 열응력으로 인해 항복강도보다 낮은 응력에서도 소성변형이 발생하는 변태소성에 기인한 것으로 사료된다. 분석한 데이터를 토대로 가열온도 890ºC, 가열시간 22s의 최적 열처리 공정을 도출하였으며, 도출된 공정에서 열처리 후 미세조직을 분석한 결과 표면과 심부에서 큰 차이 없이 martensite와 carbide 상이 관찰되었다. 경도는 표면과 심부에서 각각 62.4 HRC, 61.81 HRC로 균일한 물성이 측정되었으며, SUJ2 Q/T 경도 예측식을 통한 62.17 HRC와 상응하는 결과를 얻었다. 최종적으로, 도출된 열처리 공정은 제품의 변형을 최소화하고 균일한 물성을 확보함으로써 생산 단가 절감과 품질 향상을 통한 산업 경쟁력 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[P26-7]
마레이징강 소재의 특성 극대화를 위한 열처리 연구: 최지원, 임병용, 김대근, 박재량* (고등기술연구원)
Keywords: Maraging steel Aging Heat treatment
제품을 정확한 치수 및 원하는 형상으로 대량 생산하기 위해 금형이 사용된다. 금형의 경우, 생산되는 제품의 품질 및 생산성을 위하여 정밀성 및 내구성이 요구된다. 기존 금형으로는 SKD61 합금이 주로 사용되었으나, 제품의 복잡성 및 소재의 변경에 따라 금형 제조 기술의 고도화를 요구하게 되었다. 본 연구에서는 알루미늄 열간 압출 공정에서 사용되던 기존 SKD61 합금 대신에 마레이징강을 적용하기 위한 연구를 진행하였다. 마레이징강(Maraging steel)은 금속의 전성을 잃지 않고 강도와 인성을 우수하게 만든 철계 합금이다. 해당 특성을 적용해 로켓 케이트, 제트기관 부품, 항공기 기체 부품 등 다양한 특수 산업에 적용되고 있는 소재이다. 이는 저탄소강·고니켈강으로서 풀림·서랭 처리하여 마르텐사이트(Martensite) 상으로 상변태 시킨 후, 시효 처리하여 강도를 확보하게 된다. 이에 최적의 조건을 찾기 위해 620~920ºC에서의 용체화 처리와 420~500ºC에서의 시효 처리를 통한 열처리 실험을 진행하였다. 열처리 실험을 위하여 5*20*20 mm 크기의 시편을 사용하였다. 전기로의 승온 속도는 10ºC/min으로 하였으며, 분위기 제어를 하지 않고 실시했다. 열처리 후 발생되는 산화 피막은 물성 측정 전, 표면 폴리싱을 이용하여 제거하였다. 이후 XRD, SEM, ICP 분석을 통하여 열처리 시료의 특성을 평가하였다. 분석 결과로는 820ºC 이상에서는 용체화 처리 시 Austenite 상이 사라지고, Martensite 상이 확인되었다. 시효 처리 온도 및 시간에 비례하여 경도가 증가하는 거동과 500ºC, 7 시간의 시효처리 결과로 57.5 HRC를 확인하였다.

[P26-8]
열간금형 공구강 STD61 소재의 열처리 공정에 따른 잔류오스테나이트 분율 변화에 관한 연구: 손석원*, 강헌, 최유리 (한국생산기술연구원)
Keywords: 정밀 금형, 진공 열처리, STD61, 퀜칭 템퍼링, 잔류오스테나이트
금형공구강은 퀜칭/템퍼링 열처리에 의해 강도 및 경도를 향상시고 사용환경에 맞춰 다양한 산업분야에 이용되고 있다. 특히, 반도체 및 정밀 단조 금형과 같은 정밀 부품을 제조하는 금형은 치수 정밀도를 향상시키고 내구성을 유지하는 열처리 기술이 필요한 상황이다. 금형공구강은 합금원소에 의해 퀜칭 열처리 후 경도가 향상되지만, 마르텐사이트 종점(Mf) 온도가 낮아져, 잔류오스테나이트 형성에 의해 마르텐사이트 분율이 감소된다. 본 연구에서는 열간금형 공구강 STD61 소재를 열처리 공정에 따라 형성되는 잔류오스테나이트 분율을 예측하고, 냉각 속도와 Mf 온도 이하의 서브제로 처리 효과, 그리고 템퍼링 온도에 따른 잔류오스테나이트의 분율 변화와 감소에 관한 연구를 진행하였다.

[P26-9]
열에너지 수치를 이용한 다이아몬드 공구의 소결품질 예측 제어 장치 현장 적용 기술: 전동술*, 안경준 (한국생산기술연구원)
Keywords: 열에너지수치, 저항소결, 소결밀도 제어, 활성화에너지, Master Sintering Curve
본 연구에서는 다이아몬드 절삭 공구의 금속복합분말과 다이아몬드 입자의 저항 소결 제조 공정에서 소결 제품에 동일한 누적열에너지를 가하면 동일한 소결밀도 품질을 확보할 수 있다는 개념의 열에너지수치를 이용한 소결밀도 예측 제어 기술을 생산 현장에 적용시키기 위해서 소결 공정 모델링 실험을 통해서 소결 반응에 필요한 활성화에너지값(Q)과 누적열에너지수치에 따른 소결밀도 유일함수 모델인 Master Sintering Curve(MSC)를 개발하였다. 또한, 개발된 MSC 예측 모델을 이용하여 저항 소결 공정 중 실시간으로 제품의 소결온도를 감지한 후 누적열에너지수치로 연산하여 실시간으로 소결밀도 품질을 예측 제어할 수 있는 소결밀도 예측 add-on 제어 장치를 제작하여 생산 현장에 탑재 적용한 후 MSC 예측 제어 소결밀도와 생산 제품의 실측 소결밀도를 비교한 결과 ±1.08% 이내의 예측 정확도를 확인하였으며, 본 기술을 적용 후 생산 기업에서는 소결 불량률 4% 개선, 제조원가 3% 절감 효과를 확인하였다.

[P26-10]
플라즈마 질화층 두께 예측 제어 장치 현장 적용 기술: 전동술* (한국생산기술연구원)
Keywords: 플라즈마 질화, 질화층 예측, Master Nitriding Curve, 에너지수치, 활성화에너지
열처리 시 제품에 열에너지를 가할 경우 이에 비례하는 열처리 품질을 얻을 수 있다는 열에너지수치를 이용한 열처리 예측 기술을 SCM415 강종의 플라즈마 질화 공정에 적용하여 열에너지수치에 따른 플라즈마 질화층 두께 예측 모델(Master Nitriding Curve(MNC))을 개발하였다. MNC 개발을 위해서 질화 온도와 공정 시간을 변화시켜 플라즈마 질화 공정 실험을 진행하였으며, 제품이 받은 열에너지수치를 측정하기 위해서 제품의 표면온도를 실시간으로 측정하여 제품에 가해진 누적 열에너지수치를 연산한 후 질화 온도, 공정 시간에 따른 누적 열에너지수치와 질화층 두께 분석을 통하여 질화층 두께가 누적 열에너지수치에 따라 단일 곡선의 유일함수로 나타나는 MNC를 개발하였다. 또한, MNC 질화층 두께 예측 함수를 적용한 제어 프로그램과 구동 장치를 제작한 후 기존 플라즈마 질화 생산 장비에 ADD-ON 장치로 탑재 및 연동화하여 실시간으로 제품에 가해지는 누적열에너지 수치를 측정하고 MNC 예측 함수로 실시간으로 예측된 질화층 두께가 목표치로 설정된 질화층 두께에 도달 시 공정을 종료 제어하는 방식으로 생산 현장에 적용하였다. 생산 현장에 적용 후 MNC 예측 질화층 두께와 생산 제품의 실측 질화층 두께를 비교한 결과 ±4.6% 이내의 예측 제어 정확도를 확인하였다.

[P26-11]
고합금계 초고장력강 도금 품질 확보를 위한 열처리 기술 연구: 황석민, 라정현, 강재욱, 박민서, 한성경*, 권태우 (현대제철기술연구소)
Keywords: 초고장력강, 열처리, 표면산화제어기술, 도금품질

최근 자동차 연비 규제 및 차체 충돌 규정 강화로 차체 초고장력강 적용 비율은 지속적으로 증가 하는 추세이다. 이에 강도를 유지하면서 성형성 및 연신율을 확보하기 위해 규소(Si) 및 알루미늄(Al) 등 다양한 합금 원소가 다량 첨가된 신규 강종이 개발되고 있다. 규소가 다량 첨가된 강종의 경우 연속 도금 라인의 열처리 과정에서 강판 표면에 치밀한 규소계 산화물이 형성되어 아연 도금 품질의 저하를 유발할 수 있기 때문에, 고합금계 초고장력강의 도금 품질 향상을 위한 다양한 기술이 개발되고 있다. 본 연구에서는 1.0 wt.% 이상의 Si이 첨가된 초고장력강의 도금 품질 확보를 위해 로내 노점 제어, 산화/환원 열처리, Pre-coating 기술의 유효성을 검증하고자 하였다. 열처리 도금 모사 장비를 활용하여 연속 도금 라인의 열처리 및 도금 공정을 재현하였고, 제작된 도금 시편의 분석을 통해 도금 품질 개선 효과 검증 및 개선 메커니즘을 도출하였다. 상기 기술된 도금 품질 향상 기술 적용 결과, 로내 노점 상향 적용 시 규소의 내부 산화를 유도함에 따라 아연 도금의 젖음성이 개선되었고 합금화가 촉진되었다. 또한 산화/환원 열처리를 적용한 경우 산화 공정에서 형성된 표면 철 산화물이 환원 공정 중 청정한 강판 표면을 형성하였고, 규소는 내부에 산화물로 잔존함에 따라 도금 품질 향상 효과가 나타났다. Fe Pre-coating을 적용한 경우에는 열처리 중 표면 규소 산화물의 형성이 억제됨에 따라 도금 품질이 향상되었다. 결과적으로 고합금계 초고장력강의 도금 품질 확보를 위해서는 기존의 열처리 공정과는 차별화된 강판 표면 규소 산화물 형성 제어 기술이 필수적이며, 해당 기술의 양산 적용을 통해 향후 신규 강종의 개발 및 확대에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

[P26-12]

마르텐사이트 패킷 제어를 통한 저탄소강의 특성 변화 연구: 이용환, 하유리, 양해웅* (포항소재산업진흥원)

Keywords: Martensite packet, Microstructure, 저탄소강, 열처리기술

저탄소강은 비교적 저렴한 가격과 넓은 범위의 성질로 인해 다양한 용도로 사용할 수 있으나, 무른 성질로 인해 가공 및 열처리로 기계적 물성을 높여 사용되고 있다. 저탄소강을 고온으로 가열 후 급랭 시 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태하게 되는데, 이러한 열처리를 통해 저탄소강이 가지는 기존의 무른 특성을 보완할 수 있다. 마르텐사이트 조직의 형성은 고가의 합금원소 첨가 없이도 열처리 공정을 통해 우수한 기계적 물성을 구현할 수 있으며, 본 연구에서는 상용 저탄소강을 사용하여 열처리 시 승온 속도(100ºC/s, 300ºC/s)와 유지 시간(1s, 10s) 공정 조건에 따라 변화되는 특성을 미세조직과 기계적 물성을 통해 연구하고자 하였다. 주사전자현미경을 통하여 마르텐사이트 패킷 미세조직을 관찰하였으며 EBSD 분석결과 열처리 조건에 따른 마르텐사이트 패킷 크기 변화를 통해 고경계각 결정립계의 증감을 확인하였다. 비커스 미소경도기 및 만능물성측정기를 통해 경도시험(ASTM E384) 및 인장시험(ASTM E8)을 수행하여 마르텐사이트 패킷 크기에 따른 기계적 물성 변화를 관찰하였다.

P27 : 고온재료
Room 3층 로비, 4월 25일

[P27-1]
DED 제조된 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 합금의 미세조직 및 인장 변형에 따른 slip transfer 특성 고찰: 한재연, 김준혁 (국립창원대학교), 권영삼 (㈜씨타텍), 박정효, 김규식 (국방과학연구소), 홍현욱* (국립창원대학교)
Keywords: Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo, Direct energy deposition (DED), α+β lamellae, Tensile properties, Slip transfer

Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo 합금은 기존 Ti-6Al–4V 합금의 고온 기계적 특성을 향상시키기 위해 개발된 near-α 합금으로 항공우주 분야 등에 활용되고 있다. Ti–6Al–4V 합금과 마찬가지로 Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo 합금 또한 복잡한 형상 제조 및 Ti 합금의 비싼 공정 비용 절감을 위해 선택적 레이저 용융(Selective laser melting. SLM), 직접 용착 방식(Directed energy deposition. DED)등과 같은 적층제조 공정이 접목되고 있다. 그러나 적층제조 공정의 빠른 냉각 속도로 인해 α' 마르텐사이트의 생성이 유도되어 강도는 높지만 연신율이 약 5 % 정도로, 실제 제품 적용에 있어 걸림돌이 되는 낮은 연성을 초래한다. 따라서, 적층제조된 Ti합금은 산업에 활용될 수 있을 수준의 연성 확보가 필수적이며 주로 성형 이후 열처리 과정이 수행된다. 그러나, 현재까지 후열처리 설계에 대한 연구 및 변형 기구 등에 대한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 DED 공정에 의해 제조된 Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo 합금에 대해 후열처리 전후에 따른 인장 특성 및 미세조직 기반 변형 기구에 대해 분석하고자 하였다. As-DEDed 샘플의 미세조직은 일부 α' 마르텐사이트와 다량의 basket-weave 및 Widmanstäten 형태의 α+β 라멜라 조직이 혼재하였으며, 후열처리 이후 α+β 라멜라 lath 폭이 소폭 증가하였다. 타 문헌에서 나타난 입자(particle) 형태의 β상은 나타나지 않아, 후열처리 전후 미세조직은 서로 유사한 것으로 확인되었다. 인장 시험 결과, As-DEDed 샘플의 강도와 연신율의 조합이 매우 우수하게 나타났으며 후열처리를 겪은 샘플보다도 우수한 인장 특성이 확인되었다. 인장 파면 분석 결과, 모든 시편에서 dimple이 지배적으로 관찰되었으며, lack of fusion 및 un-melted powder 등과 같은 적층제조 결함은 관찰되지 않았다. 인장 변형 기구 고찰을 위한 TEM 분석 결과, 모든 샘플에서 α lath 내에 높은 전위 밀도가 관찰되었고, β상 내에 다수의 slip line이 관찰되었다. 이는 인장 변형 중 slip transfer의 발생에 의한 결과로, 인장 특성이 우수하였던 As-DEDed 샘플에서 β상 변형 정도가 더 많은 것을 확인하였다. 상기 연구 결과를 통해 인장 시험 시, 연질의 β상이 인장 변형을 수용하여 DED 성형체의 우수한 강도-연성 특성의 구현이 나타난 것으로 판단된다.

[P27-2]
Inconel 718의 입내 δ상 석출을 위한 열처리 연구 및 기계적 특성 분석: 여승현, 안지섭, 조아라 (한국생산기술연구원(KITECH), 부산대학교), 허수빈, 정명식, 황선광* (한국생산기술연구원(KITECH))
Keywords: Inconel 718, Heat treatment, Precipitated phase, Delta process, Microstructure

Inconel 718은 주로 고온, 고압 환경에서 사용되는 초내열합금이다. 이러한 극한 환경에서의 구동은 소재의 결정립 조대화를 야기하여 기계적 물성을 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 결정립 미세화를 위한 새로운 열처리 기법을 제안하고자 한다. 균질화 열처리(Homogenization, Ho)를 기본 열처리로 적용한 Inconel 718에 delta process(DP), pre-aging treatment(PAT), 그리고 PAT+DP 열처리를 각각 적용하여 석출상 분석 및 기계적 물성을 비교하였다. 각 열처리가 적용된 소재의 SEM 분석 결과, PAT는 γ``상 석출을, DP는 결정립계의 δ상 석출에 관여하였으며, PAT+DP 열처리 시 전 영역에서 γ``상과 δ상이 석출됨을 확인하였다. 기계적 물성 평가를 위해 수행한 고온압축시험(Gleeble-3800 GTC)에서 PAT+DP 열처리 조건이 가장 높은 peak stress를 보인 후 조기 연화되어 다른 열처리 조건들보다 낮은 유동응력을 나타냈다. 이는 δ상의 pinning effect로 인한 전위 이동 방해로 초기 높은 peak stress가 발생하고, 이후 전위 밀도의 균일 분산과 재결정 에너지가 낮아짐으로 인해 dynamic recrystallization(DRX)이 촉진된 결과로 판단된다. 압축시험을 통해 δ상의 석출 유무를 확인하였고, 압축된 소재의 미세조직을 관찰하기 위해 EBSD를 측정하였다. 측정 결과 Ho와 PAT 열처리는 유사한 결정립 분포를 보였으나, DP를 적용한 소재에서는 Ho에 비해 결정립 주변에서 미세한 결정립의 활발하게 생성됨을 확인하였다. PAT+DP의 경우 결정립 주변뿐만 아니라 내부에서도 미세한 결정립들이 형성되었다. 따라서 본 연구를 통해 PAT+DP 열처리는 Inconel 718 소재의 결정립 미세화를 촉진하고 결정립 사이즈의 편차를 줄일 수 있는 효과적인 방법임을 확인하였다.

[P27-3]
등온 열화 시험 데이터 기반 TBC 열피로 수명 예측 모델링: 이상림, 최윤석* (부산대학교), 명상원, 김훈희 (두산에너빌리티(주))
Keywords: TBC, TGO, 등온 열화 시험, 열 피로 수명 모델링

가스터빈 엔진은 항공기 추진과 발전 분야의 핵심 동력원으로서 고온 작동이 필수적이다. 이러한 극한 환경에서 내부 부품을 보호하고, 연료 효율 증가를 위해 낮은 열전도도를 가진 세라믹 소재의 열 차폐 코팅(TBC)이 사용된다. TBC의 신뢰성 평가는 등온 열화 시험과 열 피로 시험으로 각각 연구되어 왔으나, 실제 운전 조건을 모사하는 열 피로 시험은 높은 비용이 소요되는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 비교적 단순한 등온 열화 시험 결과를 활용하여 열 피로 수명을 예측하는 기법을 개발하였다. 본 연구는 크게 세 단계로 진행되었다. 먼저 등온 열화 실험 데이터를 바탕으로 조건별 열생성산화물(TGO; Thermally Grown Oxide) 두께 예측 모델의 파라미터를 최적화하여 성장 두께 데이터베이스를 구축하였다. 다음으로 유한요소해석을 통해 온도와 TGO 두께 변화에 따른 열응력 예측 모델을 개발하였으며, 최종적으로 온도, 유지시간, TGO 두께, 열응력을 변수로 하는 모델을 통해 열 피로 수명 선도를 도출하였다.

[P27-4]

단결정 니켈기 초내열합금의 크리프 변형율별 수명 예측: 이태주, 최윤석* (부산대학교)

Keywords: 니켈기 초합금, Larson-Miller parameter, 기계학습, 크리프 수명 예측

단결정 니켈기 초내열 합금은 고온, 고압의 환경에서 장시간 운용되는 항공기 엔진용 터빈 및 발전용 터빈의 블레이드에 주로 사용되는 재료이다. 본 재료는 극한의 사용 환경에서 장기적인 안정성을 유지하기 위하여 크리프 물성을 예측하는 것이 매우 중요하다. 한 편, 제품의 고온 내구성 평가를 위한 크리프 시험은 고온, 고응력의 실험 환경을 장기간 유지하여야 하므로 비용 소모가 상당하다. 따라서, 최근에는 과거에 수행된 크리프 시험 데이터를 활용하여 실제 사용 환경에서의 크리프 물성을 계산하고 예측하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 특정 크리프 변형율 도달 시간 및 파단 시간을 예측하기 위하여 물리 기반 크리프 수명 예측 모델인 Larson-Miller Parameter에 인공지능 기법을 결합한 복합 모델을 활용하였으며, 인공지능 기법을 결합함에 따라 예측 성능 향상을 도모하였다. 본 연구는 문헌 조사로 수집한 32개의 2세대 단결정 니켈기 초내열 합금(CMSX-4 합금)의 크리프 곡선 데이터를 사용하였으며, 이를 복합 모델 학습 및 검증에 활용하였다.

[P27-5]

Constitutive Modeling of Fir-Tree Root Deformation of Single Crystal Superalloy Turbine Blades under Different Temperatures: Tae Yang Bang, Yoon Suk Choi* (Pusan National University), and Taejun Yun (Doosan Enerbility)

Keywords: Superalloy, Finite Element Analysis, Crystal Plasticity, Fir-tree Structures, Anisotropic Elasto-viscoplasticity

Turbine engines, essential in aviation and power generation, employ fir-tree connections to attach Ni-based single crystal superalloy turbine blades to turbine disks. Due to the temperature-dependent deformation mechanisms of superalloys, accurately characterizing stress and strain evolution in fir-tree structures under different temperatures is essential for structural analysis. This study investigates the deformation behavior of fir-tree structures through tensile testing and finite element analysis (FEA) at 25 ºC and 500 ºC. Two constitutive models, one based on continuum mechanics and the other on crystal plasticity, were implemented in the FEA. The results revealed distinct plastic deformation behaviors at different temperatures, governed by temperature-dependent deformation mechanisms. The crystal plasticity model effectively captured these behaviors qualitatively, highlighting the importance of anisotropic elasto-viscoplasticity constitutive modeling in enhancing the reliable temperature-dependent deformation analysis for the fir-tree structure.

[P27-6]

650°C NaCl-$MgCl_2$ 환경에서 Ni-201 부식 거동 연구: 김정한*, 이원찬, 남승주 (국립한밭대학교), 윤지현, 황성식, 전순혁 (한국원자력연구원)

Keywords: 용융염,Ni,침지

용융염 원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 높은 열효율과 우수한 안전성을 제공하는 차세대 원자로로, 연료 및 냉각제로 용융염을 활용한다. 그러나 MSR의 실용화를 위해 해결해야 할 주요 기술적 과제 중 하나는 고온 용융염 환경에서 발생하는 구조 재료의 부식 문제이다. 특히, 염화물(Cl^-) 및 불화물(F^-) 이온은 합금 내 불안정한 원소를 용해시켜 재료의 내구성을 저하시킬 수 있다. 따라서 MSR 환경에서 장기적인 안정성을 확보하기 위해 부식 저항성을 갖춘 구조 재료의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 중성자 취화에 강하며 염소 이온에 대한 저항성이 우수한 Ni-201을 선정하여, 650°C NaCl-$MgCl_2$ 용융염 환경에서 장시간 부식 거동을 평가하였다. 실험을 통해 Ni-201의 부식 속도를 정량적으로 분석하고, 부식 메커니즘을 규명하였다. 본 연구 결과는 MSR의 장기 운전을 위한 부식 저항성 재료의 선정 및 부식 억제 전략 수립에 기여할 것으로 기대된다.

[P27-7]

Life Assessment of an 8% Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) Thermal Barrier Coating (TBC) Through Isothermal and Thermal Cycling Tests: Measnimol Kong, Yujin Kim, DongO Kim (Seoul National University of Science and Technology), Sanghun Kim, Younghun Choi, Kisoo Jang (KEPCO KPS), and Jaiwon Byeon* (Seoul National University of Science and Technology)

Keywords: Thermal Barrier Coating(TBC), Yttria-Stabilized Zirconiz(YSZ), Thermal Cycling Test, Isothermal Test

In the rapidly advancing world of technology, energy production plays a crucial role in meeting the growing global demand. To generate sufficient energy, the Turbine Inlet Temperature (TIT) must be raised, increasing gas turbine efficiency and power output. However, higher operational temperatures accelerate the deterioration of Thermal Barrier Coating (TBC) materials. Therefore, evaluating the lifespan of TBCs in the harsh high-temperature environment of gas turbines is essential. This study assesses the life of an 8% Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) TBC at 1100ºC using two methods: (1) Isothermal Testing in a Chamber Furnace, with heating durations up to 1400 hours, and (2) Thermal Cycling Testing in a CM Furnace at 1100ºC, with cycles of 10 minutes heating, 40 minutes dwell, and 10 minutes air cooling. The oxidation behavior, degradation mechanisms, and durability of TBCs were evaluated through both test methods. Similar Thermally Grown Oxide (TGO) growth trends were observed in both methods. At 1100ºC, TGO thickness increased with thermal exposure time, accompanied by an increasing number of internal cracks. Full Aluminum depletion in the bond coat occurred before 200 hours in both tests. However, while no spallation was observed in the isothermal test, full top coat delamination appeared after 520 cycles in the thermal cycling test, indicating a difference in spallation rates between the two methods. Differences in TGO growth and top coat spallation between the tests were analyzed. Ultimately, this research is expected to contribute to proposing an appropriate methodology for TBC reliability assessment.

[P27-8]

초내열합금 Nimonic 80A의 열처리를 통한 파형입계 제어 및 크립 특성 평가: 김가영 (부산대학교), 김연승 (LG 화학), 정희원, 윤대원, 이형수 (한국재료연구원), 이제인* (부산대학교)

Keywords: Ni based superalloy, grain boundary serration, creep test

최근 발전 산업에서는 복합화력발전의 터빈 입구 온도를 높여 발전 효율을 향상시키고, 이를 통해 친환경 발전으로 전환하려는 시도가 진행되고 있다. 터빈 입구 온도가 높아짐에 따라 증기터빈 블레이드에 사용되는 소재 또한 고온 특성이 개선되어야 할 필요가 있다. 현재 사용되고 있는 니켈기 초내열합금은 고온의 환경에서 결정립계를 따라 균열이 생성 및 전파되며 파단에 이르는 것으로 알려져 있기 때문에, 합금의 결정립계 안정화를 통한 고온 특성 향상이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 증기 터빈 블레이드에 쓰이는 니켈기 초내열합금 Nimonic 80A를 열처리를 통해 결정립계의 형상을 파형으로 제어함으로써 고온의 환경에서 균열의 전파를 억제하고, 크립 특성을 향상시키고자 하였다. 80A 합금을 용체화 처리 후 서냉하는 방식으로 다단 열처리하여 결정립계를 파형으로 변화시켰으며, 고속 푸리에 변환을 이용해 파형입계를 정량적으로 분석하여 열처리 조건이 입계 파형에 미치는 영향을 확인하였다. 750°C, 260 MPa의 조건에서 수행된 크립 시험 결과 결정립계가 파형화 된 합금의 수명이 기존 합금 대비 약 20 % 긴 크립 수명을 가졌다. 파형입계가 생성된 80A 합금은 입계 강화 효과로 인해 결정립계에 발생하는 변형 집중 현상을 억제하고, 균열의 전파를 지연시킴으로써 크립 수명이 향상된 것을 확인하였다.

[P27-9]

CM247LC 적층재의 Strain age cracking 균열 형성에 미치는 Ta, Ti, W 합금원소의 영향 분석: 김봉철 (한국재료연구원, 동아대학교), 이상원, 정중은, 최백규, 김인수 (한국재료연구원), 전종배* (동아대학교), 도정현* (한국재료연구원)

Keywords: CM247LC, Laser powder bed fusion, Heat treatment, Strain age cracking, Lattice misfit

CM247LC는 높은 고온 강도와 내산화성을 갖춘 주조용 Ni계 초내열합금으로, 항공우주 및 발전 산업에서 터빈 블레이드와 같은 고온 부품에 널리 사용된다. 석출강화 효과를 극대화하기 위해 비교적 높은 함량의 Al, Ti, Ta 가 첨가되며, 강화상 γ′상의 부피분율이 60~70%에 달해 고온에서 우수한 강도를 유지할 수 있다. 최근 적층제조(Additive Manufacturing, AM)에 대한 요구가 증가함에 따라, 기존 주조용 CM247LC를 적층제조 공정에 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 그러나, 적층 공정 중 급속 응고 및 후열처리 과정에서 Strain Age Cracking (SAC)이 발생하여 기계적 특성을 저하시키는 문제가 발생한다. SAC는 γ기지와 γ′상의 정합계면에서 격자상수 차이로 인해 형성되는 탄성응력장이 느린 잔류응력 완화 및 γ′상에 의해 유도된 응력과 중첩되어 균열이 발생하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 CM247LC 적층재에서 열처리 공정 중 발생하는 SAC 균열 형성에 미치는 Ta, Ti, W 합금원소의 영향을 분석하였다. Ta, Ti, W 함량을 조절하여 격자부정합(lattice misfit)을 제어하여 합금을 설계하고, 설계한 합금들에 적층제조 공정을 모사하기 위한 레이저를 조사하였다. 조사된 시편에 열처리를 수행하여 열처리 전 후에 따라 발생한 균열과 합금원소의 영향을 분석하였다. 또한, X-ray diffraction (XRD) 분석을 통해 격자상수을 측정하여 격자부정합과 SAC 균열 완화 효과를 정량적으로 분석하였다.

[P27-10]

LPBF 공정에서 CM247LC의 고온 균열 형성에 영향을 미치는 공정 조건과 Zr의 영향: 안동혁 (한국재료연구원, 부산대학교), 윤대원, 정희원, 유영수, 서성문 (한국재료연구원), 최윤석 (부산대학교), 이형수* (한국재료연구원)

Keywords: CM247LC, Laser powder bed fusion, Hot cracking, Zr effect

CM247LC는 우수한 고온 강도와 내산화성을 갖춘 Ni 기반 초합금으로, 항공 및 발전용 가스터빈 블레이드 소재로 사용된다. 최근, 냉각 유로와 같은 복잡한 내부 구조를 기존보다 효율적으로 구현하기 위해 기존 주조 공정보다 형상 자유도가 높은 적층 제조 공정을 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 그러나 CM247LC는 본래 주조용 합금으로 개발되었기 때문에, 난용접성 합금으로 분류되어 적층 제조 과정에서 고온 균열이 발생하여 제조에 어려움이 있다. 또한 Ni 기반 초합금에서의 용접성은 일반적으로 Al과 Ti의 함량으로 평가되지만 균열은 수지상 간 영역의 원소 편석에 의해 좌우된다는 연구 결과도 보고되고 있다. 본 연구에서는 공정 조건이 고온 균열 형성에 미치는 영향을 분석하고, CM247LC와 ZrH_2 분말을 활용하여 미량 원소인 Zr이 용접성에 미치는 영향을 평가하였다. 먼저, 상용 CM247LC 합금 판재의 레이저 조사 실험에서 균열 밀도가 낮은 공정 조건을 선별한 후, 동일한 선 에너지 밀도에서 공정 조건의 변화와 Hatch Distance의 영향을 추가적으로 평가하였다. 실험 결과, 특정 에너지 밀도 이하에서는 균열 발생이 감소하는 경향을 보였으며, 높은 레이저 파워 및 빠른 스캔 스피드 조건보다 낮은 레이저 파워 및 느린 스캔 스피드 조건이 균열 억제에 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 적층 형상의 정밀도를 저해하는 형상 무너짐 현상을 분석하고, 이를 방지할 수 있는 공정 조건을 최적화하였다. 마지막으로, Zr을 첨가하여 수지상 간 영역으로의 편석을 극대화하여 Ni 기반 초합금의 용접성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구는 LPBF 공정을 활용한CM247LC의 적층 품질 향상과 고온 균열 억제를 위한 기반 연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P27-11]

니켈기 초내열합금의 용체화 처리시 Incipient Melting에 미치는 B, Zr, Hf의 영향: 여준기, 이형수, 윤대원, 정희원, 유영수 (한국재료연구원), 강남현 (부산대학교), 서성문* (한국재료연구원)

Keywords: CM247LC, Segregation, Homogenization, Incipient Melting

니켈기 초내열합금은 니켈 기지에 Al, Ta, Ti, Cr, Co, W, Mo, Hf 등 다양한 원소가 첨가되어 γ′ (Ni_3Al) 상의 석출 강화 및 고용 강화 등의 강화 효과를 통해 고온 부식 및 크리프에 대한 저항성을 향상시킨다. 그러나 이러한 합금 원소들은 응고 도중에 니

켈 기지에서의 용질원소 고용도 차이에 따른 편석 현상을 일으켜, 결과적으로 수지상 코어 영역과 수지상간 영역에 불균질한 조직이 형성된다. 따라서 니켈기 초내열합금은 주조 후 발생하는 응고 편석을 완화하고 수지상 코어 영역과 수지상간 영역 사이의 조직적 불균질성을 해소하여 균질한 γ-γ′ 미세조직을 얻기 위해 용체화 (균질화) 열처리가 필수적이다. 아울러 응고 편석된 미세조직의 충분한 균질화 효과를 얻기 위해 니켈기 초내열합금은 주로 γ′ 상의 고용온도와 합금의 고상선 온도 사이의 고온에서 용체화 처리를 수행하고 있다. 하지만, 응고 도중 지속적으로 용질원소가 축적된 수지상간 영역에서는 국부적으로 융점이 저하된 영역이 생기게 되고, 용체화 처리 시에 이 같은 국부 영역이 재용융되는 Incipient Melting (IM) 현상이 종종 발생하여 많은 연구자들이 용체화 처리 온도를 설계하는데 어려움을 겪고 있다. 용체화 처리 도중 형성된 IM 영역은 이후 냉각 과정에서 국부적으로 용융 영역의 재 응고에 따른 수축공 (미세기공) 형성을 야기하여 고온 크리프 및 피로 응력 하에서 균열의 개시 부위로 작용할 수 있다. 그럼에도 불구하고 IM 미세조직이 합금의 고온 기계적 특성에 미치는 영향에 대해서는 국내외적으로 아직 충분한 연구가 진행되지 않은 상태이며, IM 형성에 미치는 합금원소의 영향 또한 명확히 밝혀진 바 없다. 본 연구는 니켈기 초내열합금의 IM 발생 기구를 분석하기 위한 기초 연구로 우선 니켈기 초내열합금에 첨가되는 다양한 합금원소 중 편석이 특히 심한 것으로 알려진 B, Zr 및 Hf 첨가에 따른 IM 형성에 대한 연구를 진행하고, 각 합금원소가 IM 형성 정도에 미치는 영향을 정량화 하고자 하였다. 실험에는 일방향응고용 초내열합금인 CM247LC 합금을 사용하였으며, 이 합금의 기본 조성을 바탕으로 B, Zr, Hf 함량을 변화시킨 합금을 소형 진공유도용해로를 사용하여 제조한 후 분석에 사용하였다.

[P27-12]

관류보일러 증기관에서의 고온 부식 현상과 내식성 향상 방안에 관한 연구: 김민지* (한국폴리텍대학)

Keywords: 고온 부식, 증기관, 보일러, 산화, 스케일

관류보일러의 증기관은 연료의 연소 열을 활용해 물을 증기로 변환하는 장치로, 이때 생성된 고온과 고압의 증기는 발전소의 중요한 에너지원으로 사용된다. 특히 증기관은 고온과 고압의 극한 환경에서 작동하기 때문에 높은 효율성과 안전성이 필수적인 핵심 설비로 꼽힌다. 이 장치는 발전소 내에서 열에너지를 효율적으로 전환하며, 전체 성능, 에너지 효율성 및 안정성에 큰 영향을 미친다. 따라서 증기관의 성능 저하는 발전소의 에너지 생산 효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 운전 중 안전사고를 일으킬 위험도 증가시킨다. 이와 같은 이유로 증기관은 설계 및 운영에서 매우 중요한 기술적 요소로 여겨진다. 증기관의 핵심 기능은 연료의 연소에서 발생한 고온의 열을 물에 전달하여 고압 증기를 생성하는 것이다. 이 고압 증기는 발전소의 터빈을 돌리거나 산업 공정에 필요한 에너지를 공급하는 데 사용된다. 그러나 증기관은 고온 환경에서 운전되므로 다양한 외부 요인, 예를 들어 연료의 종류, 연소 온도, 환경적 조건 등이 그 성능에 영향을 미친다. 시간이 지나면서 부품의 내구성이 약해지고, 특히 고온에서 발생하는 금속 부식이 증기관의 주요 문제로 대두된다. 이러한 부식은 증기관의 수명을 단축시키고, 고장 확률을 높이며, 장기적으로는 유지보수 비용을 증가시키는 주요 원인으로 작용한다. 본 연구는 관류보일러 증기관에서 사용되는 탄소강의 고온 부식 거동과 부식 생성물의 형성을 분석하였다. 600ºC에서 800ºC 범위의 온도에서 50시간에서 200시간 동안 대기 중 부식 시험을 진행한 결과, 600ºC에서 부식은 초기에는 빠르게 진행되었지만 시간이 경과함에 따라 부식 속도가 둔화되는 포물선 형태의 거동을 보였다. 반면 700ºC와 800ºC에서는 부식 속도가 지속적으로 증가하며 선형적인 거동을 나타냈다. 또한, 구리(Cu) 코팅을 적용한 시편은 비코팅 시편에 비해 낮은 부식 속도를 보였으며, 코팅층이 부식 저항성을 향상시키는 중요한 역할을 함을 확인하였다. 온도가 상승할수록 부식 속도는 증가하는 경향을 보였으며, 이는 온도에 따른 화학 반응 속도의 증가로 해석된다. 본 연구는 고온 환경에서 발생하는 부식의 특성을 이해하고, 향후 발전소 및 고온 설비의 내구성 향상에 기여할 수 있는 기술적 해결책을 제시하는데 중점을 두었다.

P28 : 반도체
Room 3층 로비, 4월 25일

[P28-1]
Ultra-Sensitive Hydrogen Detection Using a Redox-Reactive Concentration-Sensitive Metal Oxide Capacitive Sensor: Joonho Lee, Sang-Kil Lee, Jiwoo Hong, and Wooyoung Lee* (Yonsei University)
Keywords: hydrogen sensor, capacitive, metal oxide, electron, carrier concentration change

Hydrogen is a promising fuel for the transition to sustainable energy, but its high flammability and leakage risks pose significant challenges to safe utilization. This study focuses on the development of a next-generation hydrogen sensor with high sensitivity, selectivity, and rapid response capabilities. We developed an advanced hydrogen sensor capable of exceptional performance by monitoring changes in electron concentration within a capacitive system. Experimental results demonstrated that the sensor achieved precise hydrogen sensing with a detection limit of 300ppb and a response time of less than 10 seconds, significantly outperforming existing technologies. Furthermore, Stability tests under various temperatures demonstrated a wide range of operation from room temperature to 140ºC, and even after prolonged aging, the sensor consistently exhibited excellent repeatability at 10ppm, confirming its potential for practical applications. This research introduces a novel approach to hydrogen sensing, contributing to enhanced safety and efficiency in the era of hydrogen energy.

[P28-2]
Validation of Finite Element Modeling Using Infrared Thermography and Temperature Prediction with Graph Convolutional Networks: Min-Jun Chun (Hanbat National University), Seong-Jin Kim, Jae-Yong Song (Pohang University of Science and Technology), Jung-Won Lee, Lewis Kang (Nepes Co.), Sung-Mo Kang (Asicland Co.,Ltd), In-hak Han (Baum Design and Systems Co.,Ltd), and Hoon-Hwe Cho* (Hanbat National University)
Keywords: Finite element analysis, System-on-Chip, Thermal distribution, Deformation, Graph convolution neural network

The rapid advancement of AI semiconductors necessitates strategies to effectively manage the adverse impact of heat generation on system performance. This study presents a simulation-based approach to analyze heat distribution and the corresponding mechanical deformation considering the complexities of System-on-Chip (SoC) architectures. Using COMSOL software, thermo-mechanical behavior is analyzed by precisely setting boundary conditions, thermal/mechanical properties, and processing parameters. This study validates the computed temperature distribution by comparing it with measurement data obtained from an infrared thermal camera. Multiple measurement points are selected across the chip, and their temperatures are compared with the computed results to ensure the reliability of the thermal distribution. The findings confirm that the model accurately captures both specific regions and the overall temperature distribution. Subsequently, a power cycling process is applied to observe mechanical deformation due to thermal expansion. Additionally, the computed thermal distribution data is extracted and trained using a graph convolutional neural network (GCN), enabling faster temperature predictions. These findings provided critical insights into heat management and structural stability in SoC semiconductor architectures. This integrated approach makes a substantial contribution to advancing semiconductor packaging technology by analyzing the critical challenges of heat dissipation management and structural stability in high-performance computing.

[P28-3]
레이저 비전도성 페이스트를 적용한 레이저 기반 상온 접합과 열 압착 접합의 인듐 솔더 신뢰성 분석: 김성철, 이가은 (한국전자통신연구원, 국립한밭대학교), 주지호, 엄용성, 최광문, 신정호, 이찬미, 장기석, 오진혁 (한국전자통신연구원), 이승윤 (국립한밭대학교), 최광성* (한국전자통신연구원)
Keywords: 인듐 솔더, 상온 레이저 기반 접합, 신뢰성, 열 압착 접합

마이크로 LED, 광전자 소자, 유연 소자 등 다양한 응용 분야에서 저온 접합 공정의 필요성이 증가하고 있다. 특히, 열에 민감한 소자들의 성능 저하를 방지하기 위해 낮은 온도에서 접합할 수 있는 기술이 필수적이다. 인듐 솔더는 156.6ºC의 낮은 융점, 우수한 전기·열 전도성, 뛰어난 연성을 갖추고 있어 이러한 요구를 충족하는 대표적인 저온 솔더링 소재로 주목받고 있다. 또한, 인듐은 레이저 다이오드, 광 스위치와 같은 광소자뿐만 아니라, 플렉서블 디스플레이 및 웨어러블 전자기기와 같은 유연 소자에도 적용될 수 있다. 본 연구에서는 인듐 솔더를 활용하여 레이저 비전도성 페이스트를 이용한 레이저 기반 상온 접합 공정과 열 압착 접합 공정을 수행하였다. 레이저 비전도성 페이스트는 급속한 승온 속도와 짧은 접합 시간을 제공하며, 후경화를 통해 언더필 역할을 수행하여 추가적인 세척 및 언더필 공정을 줄일 수 있다. 동일한 피크 온도에서 레이저 파워와 조사 시간을 최적화하여 접합을 진행하였으며, 동일한 조건에서 열 압착 접합을 수행하였다. 접합부의 신뢰성 분석을 위해 금속간화합물(IMC) 두께, 솔더 범프 저항, 전단 강도를 비교하였으며, 이를 통해 접합 공정의 생산성을 향상시키고 레이저 기반 접합과 열 압착 접합의 특성을 평가하였다. 본 연구 결과는 인듐 솔더를 활용한 저온 접합 공정의 효율성과 신뢰성을 높이는 데 기여할 것으로 기대할 수 있다.

[P28-4]

상온 레이저 기반 접합 공정을 이용한 30μm-pitch SnAg 솔더 인터커넥션의 금속간화합물(IMC) 및 미세조직 신뢰성 분석: 이가은 (한국전자통신연구원, 국립한밭대학교), 최광성, 엄용성, 최광문, 신정호, 이찬미, 장기석, 오진혁 (한국전자통신연구원), 김성철 (한국전자통신연구원, 국립한밭대학교), 이승윤 (국립한밭대학교), 주지호* (한국전자통신연구원)

Keywords: 레이저 기반 접합 (LAB), 레이저 비전도성 페이스트 (LNCP), 금속간화합물 (IMC), 미세조직, 신뢰성

반도체 패키징의 고집적화가 가속됨에 따라, 고밀도 초정밀 접합 기술의 신뢰성 확보가 필수적이다. 최근 레이저 기반 접합 (Laser-Assisted Bonding, LAB) 공정이 반도체 후공정에 적용되는 사례가 증가하고 있으며, 이를 활용한 고밀도 패키징 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 연구에서는 LAB 기술을 적용하여 30μm-pitch SnAg 솔더 인터커넥션을 형성하고, 미세조직 및 신뢰성을 평가하였다. 상온 LAB 기술은 공정 온도를 낮추면서도 정렬 정밀도를 향상시키고, 레이저의 빠른 가열·냉각 속도를 활용하여 저전력·친환경 공정을 가능하게 한다. 본 연구에서 사용한 레이저 비전도성 페이스트(Laser Non-Conductive Paste, LNCP)는 솔더 산화막을 제거하는 환원제와 공정 안정성을 높이는 첨가제를 포함한 신소재로, 휘발성 성분이 없어 유해한 흄(Fume) 발생을 방지하고, 후경화 후 언더필 역할을 수행해 공정 단순화 및 생산성 향상이 가능하다. 본 연구에서는 LAB 공정을 통해 형성된 30 μm-pitch 인터커넥션의 미세조직을 주사전자현미경(SEM) 및 에너지분광분석(EDS)으로 분석하였으며, 금속간화합물(Intermetallic Compound, IMC)의 성장 속도 및 두께 변화를 정량적으로 평가하였다. 신뢰성 시험(온도 사이클 시험) 후, 접합부의 미세조직 및 전기적 특성 변화를 비교하여 상온 레이저 기반 접합 기술이 미세 피치 솔더 인터커넥션의 신뢰성을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

[P28-5]

전해 조건에 따른 Cu 전기도금층의 (111) 면 우선 성장 제어: 안성민, 남승주, 김정한* (한밭대학교)

Keywords: 구리 전해도금, (111)면 성장, 결정방위 제어

구리(Cu) 전기도금에서 특정 결정면의 우선 성장은 전자소자 및 배선 공정의 성능 향상에 중요한 요소이다. 본 연구에서는 전해조건을 조절하여 Cu 전기도금의 (111) 면 우선 성장을 제어하는 방법을 탐색하였다. 황산구리(Sulfate-based Cu electrolyte) 기반 전해질을 사용하여 전류 밀도, 첨가제(예: 염화물, 억제제, 계면활성제) 조성, pH 및 온도 변화가 결정립 성장에 미치는 영향을 분석하였다. X-선 회절(XRD)을 활용하여 도금층의 결정방위 변화를 정량적으로 평가하였으며, 표면 및 단면 미세구조 분석을 통해 결정립 성장 기구를 검토하였다. 연구 결과, 특정 전류 밀도 및 첨가제 조합에서 (111) 면의 우선 성장이 촉진됨을 확인하였으며, 이는 계면 에너지 최소화 및 응착 효과에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구는 고집적 배선용 Cu 도금의 결정제어 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[P28-6]

Complementary Lattice Phases in SnO_2/NiO Heterostructure Toward Extremely High Formaldehyde Selectivity: Jihyun Lee and Wooyoung Lee* (Yonsei University)

Keywords: Metal oxide gas sensor, SnO_2/NiO heterostructure, SnO_2/NiO nanoparticle, Formaldehyde gas sensor, Formaldehyde selectivity

A SnO_2/NiO heterostructure that is comprised of ca. 10 nm-sized nanoparticles was designed and demonstrated extremely high selectivity toward formaldehyde detection. A simple blending process with a low operating temperature of 80 ºC enables the SnO_2/NiO blend morphology with a complementary lattice structure. The SnO_2/NiO morphology showed an intermixing formation without tens- or hundreds-sized aggregation, whereas the internal structure was organized into crystal phases that SnO_2 and NiO lattices were separately kept. The complementary lattice phase of the SnO_2/NiO heterostructure, in particular at a blend ratio of 2.5 mM/2 mM, was determined from the solution state with small aggregations of SnO_2 and NiO crystal domains. The heterostructure provides a high number of oxygen vacancy sites in the crystal frame, internal formaldehyde interaction by the nanometer-sized interdigitated structure, and a reduction of the electronic band gap through the semiconductor blending. This lattice phase effect in the heterostructure allows for ultra-selective formaldehyde detection (10 ppm concentration) with a response value of approximately 7,000 including a transient time of ca. 3 s. The realization of the complementary lattice structure of the SnO_2/NiO blend achieves the record value of sensing performance in formaldehyde gas detection.

[P28-7]

Enhanced Ethanol Gas Sensing Using Noble Metal-Decorated SnO_2 Nanorods: Seung Hyun Lee, Hyun Sook Lee, and Woo Young Lee* (Yonsei University)

Keywords: Metal oxide semiconductor, Glancing angle deposition, Novel metal catalyst, Ethanol gas sensor, Nanorods

Tin dioxide (SnO_2) nanorods (NRs) decorated with noble metal catalysts (Pd, Pt, Ag, Au) were investigated for their ethanol (EtOH) gas sensing performance under varying temperatures and EtOH concentrations. The sensor responses were evaluated over a temperature range of 50ºC to 500ºC and EtOH concentrations from 20 ppm to 1000 ppm. Among the tested catalysts, Ag-decorated SnO_2 (Ag-SnO_2) exhibited the highest response, making it a strong candidate for applications requiring high sensitivity at elevated temperatures, such as industrial gas monitoring. In contrast, Pd-SnO_2 demonstrated superior performance in concentration-dependent tests, showing a strong response across a wide range of EtOH levels and the fastest recovery time. This suggests its suitability for real-time breath analysis and

portable alcohol sensors. Response time analysis revealed that Ag-SnO_2 had the fastest reaction speed, while Au-SnO_2 exhibited the slowest. These findings underscore the importance of selecting appropriate catalysts based on specific sensing conditions. We focus on optimizing catalyst concentrations to enhance selectivity and stability, as well as further investigating Ag-$SnO_2$and Pd-SnO_2 for targeted gas sensing applications.

[P28-8]

Al_2O_3 as a Dipole Shift Layer in Logic Devices for Enables Operational Evaluation through Large-Fine Vt Tuning in Multi - Vt Strategies: Won Jae Choi, Sang Kuk Han, Hyun Jin Lim, Hyo Jin Ahn, Yeh Been Im, Young Seo Na, and Chang Hwan Choi* (Hanyang Univ.)

Keywords: effective work function, multi Vt tuning, hafnium precursor, Flat band shift, leakage current

Interface dipole engineering is a volume-less Effective Work Function (EWF) tuning technique as compared to Work Function Metal (WFM) engineering, there are still many challenges to be solved. Among the various technologies to tackle these problems, Interface Dipole Engineering (IDE) is an effective method to improve the performance, particularly, modulating the effective work function of metal gates. Among IDE techniques, Dipole-First (DF) and Dipole-Last (DL) methods exhibit distinct advantages depending on the required threshold voltage (Vt) shift and thermal budget considerations. Experimental comparisons between Multi-Vt tuning configurations reveal that dipole-first enables a greater EWF shift under identical annealing conditions, making it suitable for aggressive scaling. In this study, Trimethylaluminium (TMA) is selected as the dipole shifter material for Multi-Vt, and experiments will be conducted to apply DF and DL. Several models for the origin of the dipole layer formation have been proposed so far. The electronegativity difference between cation atoms in each oxide has been taken into account in some models. Also oxygen density difference model, which was based on the phenomenologically obtained relationship between the areal oxygen density and the dipole strength. When Al_2O_3 is applied as a dipole-first layer at the angstrom level, it exhibits a relatively small flat band shift of approximately 200 mV. However, when high-density SiO_2 is formed through standard cleaning processes (SC-1, SC-2) and thermal oxidation, a positive shift exceeding 400 mV is observed. In contrast, when applied as a dipole-last layer, a fine positive shift of less than 150 mV is achieved. This fine-tuning capability enables flexible device operation. Additionally, the electrical properties of dipole formation will be examined by analyzing the leakage current density and density of states (Dit) based on CET at temperatures ranging from 200ºC to 350ºC using different hafnium precursors: Tetrakis (ethylmethylamino) hafnium (TEMAH) and Tris (dimethylamido)cyclopentadienyl hafnium (CpHf). Furthermore, Vt modulation will be evaluated under a thermal budget constraint of 450ºC or lower. Acknowledgments : This work was supported by Korea Institute for Advacnement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (No. RS-2024-00410066. HRD Program for Industrial Innovation). Reference : [1] H. Arimura, L-Å. Ragnarsson, Y. Oniki et al. 10.1109/IEDM19574.2021.9120527 (2021), [2] H. Arimura, H. Mertens, J. Franco et al. 10.1109/VLSITechnologyandCir46793. 2024.10631442 (2024)

[P28-9]

Effects of Post-Annealing in $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Film-based Phase-Change Memory for the improvement of Reliability by Extreme High Unbalanced Magnetron Sputtering: JiSu Park, San Park, and Changhwan Choi* (Hanyang University)

Keywords: PCM, GST, Annealing

With the accelerated advancement of AI technologies, the production and processing of data have significantly increased, highlighting the need for effective data processing solutions. Storage-Class Memory (SCM) has attracted considerable attention as it effectively bridges the performance gap between DRAM and 3D NAND Flash, facilitating more efficient data processing[1]. Among various SCM candidates, Phase-Change Memory (PCM) is considered a promising emerging memory due to its high-speed operation and exceptional durability. However, the high reset current of PCM needs to be reduced to improve power efficiency. To overcome this issue, approaches like heterojunction structures and doping have been Extensively studied; but these often lead to compromises in device reliability[2]. This issue is primarily caused by phase segregation phenomena, which continue to attract significant research attention in phase-change material thin films. Therefore, to achieve the practical application of PCM, it is essential to accurately understand degradation mechanisms to improve device performance. In this study, we fabricated Ge2Sb2Te5 (GST)-based PCM and improved the reliability of the phase change memory without trade-off based on the suppression of atomic diffusion through increasing heat treatment time. The GST thin film was deposited using an Extreme High Unbalanced (EHU) magnetron sputtering system from AP Systems. As the heat treatment time increased, the endurance characteristics improved by a factor of ten, while the set drift coefficient decreased by approximately 60% and the reset drift coefficient by about 11%. Furthermore, physicochemical analyses of thin films and devices confirmed the effectiveness of this performance enhancement. This is expected to contribute to the improvement of PCM reliability in future memory applications.

Acknowledgments: This work was supported by HRD Program for Industrial Innovation (No. RS-2024-00410066) References
[1] Xinyi Guo, et al. Institute of Electrical and Electronics Engineer (2024)
[2] W Zhou, et al, Applied Physics Letters (2014).

[P28-10]

Fabrication and Characterization of UVC Photodetectors Using Triple Cation Perovskite: Junseo Kim* (Gachon university)

Keywords: perovskite, triple cation, photodetector

While research on double-cation perovskites ($FAMAPbI_3$) has been actively pursued, this study aims to enhance the performance of UVC photodetectors using triple-cation perovskite ($CsFAMAPbI_3$). Although double-cation perovskites exhibit excellent electronic properties, they face limitations in long-term stability and performance improvement. In contrast, triple-cation perovskites, by incorporating multiple cations, offer advantages such as enhanced crystallinity, reduced lattice defects, and improved stability. Therefore, this study investigates the optimization of triple-cation perovskite properties through the introduction of cesium (Cs). A precursor solution containing CsI, FAI, PbI_2, and MACl was prepared, and perovskite thin films were deposited using a two-step post-treatment process. The results showed that the $CsFAMAPbI_3$ films with 0.05 Cs content demonstrated excellent crystallinity, high current density, and improved voltage response. Under UVC light exposure, the films exhibited high sensitivity and fast response times, making them suitable for efficient photodetector applications. Additionally, the incorporation of Cs improved the thermal and mechanical stability of the perovskite, contributing to its overall robustness. This study highlights the potential of Cs addition in improving the performance and stability of triple-cation perovskite-based photodetectors, offering a promising approach for the development of high-performance UVC sensors and detectors. The findings have significant implications for the application of this technology not only in UVC detection but also in various sensor and optoelectronic fields

[P28-11]

광펄스 솔더링을 사용한 Sn-58Bi 솔더 조인트의 일렉트로마이그레이션 신뢰성 평가: 고혜리, 손윤철* (조선대학교)

Keywords: Intense pulsed light, Electromigration, Sn-58Bi

본 연구에서는 Sn-58Bi 솔더 조인트의 일렉트로마이그레이션 거동을 평가하기 위해 광펄스 솔더링(IPL)을 적용하였다. 서로 다른 조사 횟수(80회, 140회)로 샘플을 제작하고, 비교하기 위해 리플로우 솔더링 샘플을 준비하였다. 900A/cm^2 전류밀도로 설정한 후 컨벡션 오븐의 온도를 80ºC 및 100ºC로 설정하여 시간에 따른 일렉트로마이그레이션 실험을 진행하였으며, 그에 따른 미세구조 변화를 분석하였다. 솔더 내부는 전형적인 Sn-Bi eutectic 구조가 관찰되었으며, 칩과 기판의 계면에서는 Ni_3Sn_4 금속간화합물(IMC)이 형성되었다. 실험 시간이 증가함에 따라 양극에 Bi-rich 층이 점진적으로 축적되었으며, Ni_3Sn_4 화합물 상부에 Sn-Ni-Bi-Au 화합물이 추가로 형성되었다. 2500시간 이내에는 보이드와 힐락 형성이 확인되지 않았으나, 80ºC에서 2500시간, 100ºC에서 2300시간 이후 Ni_3Sn_4 와 Sn-Ni-Bi-Au 금속간화합물 경계면에서 균열이 발생하였다. Bi-rich 층은 시간이 지남에 따라 80ºC에서 최대 20.12μm, 100ºC에서 최대 22.95μm가 축적되었다. 본 연구는 광펄스 솔더링을 활용한 저온 솔더 조인트의 신뢰성을 평가하는 데 기여할 것으로 기대된다.

[P28-12]

Thermal Interface Material 적용을 위한 인듐 합금의 계면반응 연구: 최정환, 손윤철* (조선대학교), 윤정원, 이동복 (충북대학교)

Keywords: Transient liquid phase, In-Ag, Thermal interface material

본 연구에서는 In 및 In-Ag 합금 (In-3Ag, In-10Ag)을 이용하여 Ni/Au 표면처리된 Cu와 transient liquid phase (TLP) 접합을 수행하고, 이에 따른 계면 반응 및 금속간화합물(intermetallic compound, IMC) 성장 거동을 조사하였다. 접합공정은 180ºC, 210ºC, 240ºC의 온도에서 각각 10분, 30분, 60분 동안 2 MPa의 압력을 가하여 수행하였다. 실험 결과, 접합계면에서 $Ni_{28}In_{72}$ IMC가 형성되었고, 접합면 중앙부에서는 $Ni_{28}In_{72}$와 함께 $AgIn_2$ 및 Ag_2In IMC가 형성되었다. 접합온도와 시간에 따른 IMC의 형성과 성장거동을 SEM, EDX 분석 등을 활용하여 면밀히 분석하여 정리하였다. 본 연구는 In-Ag계 합금을 thermal interface material로 적용하는 경우 유용한 참고자료로 활용될 수 있다.

P29 : 역학측정
Room 3층 로비, 4월 25일

[P29-1]
유한요소해석을 통한 압입각에 따른 하이브리드 본딩의 계면박리 모사: 남서우, 김영천* (국립경국대학교)
Keywords: 하이브리드 본딩, 나노압입시험, 유한요소해석, 계면
하이브리드 본딩 기술은 3D IC 및 첨단 패키징에서 사용되는 접합방식으로, 웨이퍼 간 직접 접합을 통해 연결층을 제거하여 소형화 된 폼팩터와 고밀도 연결을 가능하게 한다. 이러한 기술은 차세대 반도체 패키징에서 집적도를 높이는데 중요한 역할을 하며, 계면접착에너지는 하이브리드 본딩의 성능과 신뢰성을 결정하는 중요한 요소이다. 접착 에너지가 낮을 경우 계면 박리가 발생하여 신뢰성을 저하시킬 수 있어 계면접착 에너지 평가를 통해 최적화하는 것이 필요하다. 일반적으로 하이브리드 본딩의 계면접착 에너지 평가를 위해 DCB(Double Cantilever Beam), 굽힘 시험을 통해 분석하는 방법을 사용해왔다. 기존 연구방법의 경우 계면의 평균적인 접착력을 평가할 수 있으나, 평가를 위한 시편 제작과 더불어 국부적인 부분의 접착력을 평가하는 것에 어려움이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석(FEA)을 이용하여 나노압입시험을 통해 발생하는 Cu-Cu 하이브리드 본딩의 계면 박리를 분석하였다. 유한요소해석을 이용하여 압입 각도에 따른 계면 박리 경향을 보기위해 서로 다른 세 개의 압입자 반각으로 모델링하여 수행하였다. 압입 후 압흔 주변에서 발생하는 계면 박리 현상을 관찰하였으며, 원형으로 발생하는 박리의 투영면적 크기와 계면접착에너지 간의 상관관계를 분석하였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업

[P29-2]
압입자 형상이 반영된 압입시험의 유한요소해석과 머신러닝 기법을 이용한 인장 특성 예측: 함주빈, 김동엽 (국립경국대학교), 김종형 (국립부경대학교), 김영천* (국립경국대학교)
Keywords: 머신러닝, 전이학습, 유한요소해석, 압입시험, 인장물성
금속 재료의 기계적 물성을 측정하기 위한 연속압입시험법은 인장 특성 및 잔류 응력과 같은 고급 물성을 예측하기 위한 연구로 점차 그 범위가 확장되고 있다. 최근 전산 해석을 위한 하드웨어와 소프트웨어의 발달로, 이론적 배경에 기반한 기존의 수학적 모델링 방식에서 벗어나 딥러닝과 머신러닝을 활용하려는 시도가 주목받고 있다. 여기서 활용되는 많은 데이터는 대부분 유한요소해석 기반의 전산모사 기법으로 생성되어, 다양한 기계적 특성을 가진 가상 소재에 대한 정보를 비교적 쉽게 확보하고 단기간 내 빅데이터 기반 예측 모델을 구축할 수 있는 장점을 제공한다. 그러나 실제 압입자의 불완전한 형상이나 실제 시편 표면 상태 등 실사용 환경을 고려한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 실제 구형 압입자의 공초점 레이저 현미경으로 스캔하여 획득한 3D 프로파일을 기반으로 유한요소해석을 수행하였다. 기존 완벽한 구형 압입자 기반 해석결과로 구축된 딥러닝 모델을 확보하여, 실제 압입자의 프로파일 기반 해석결과로 전이학습을 실시하였다. 학습된 모델의 성능과 유효성을 검증하기 위하여 금속시편 10종에 압입실험을 수행하였고, 실험결과에 대하여 논의하였다.

[P29-3]
평탄 압입시험을 이용한 리튬이온전지용 Ni-Rich NCM 양극재의 파괴 거동 및 전기화학적 성능 분석: 서세덕, 박지현 (국립경국대학교), 남승훈 (명지대학교), 김영천* (국립경국대학교)
Keywords: 나노압입시험, 충·방전 시험, NCM, 압연 공정, 포토리소그래피 공정
리튬 이온 배터리의 주요 양극재로 사용되는 Ni-Rich NCM은 높은 용량을 제공할 뿐만 아니라 비용 효율성 측면에서도 경쟁력을 갖춘 소재로 평가된다. 전극 제조 과정에서 에너지 밀도를 극대화하기 위해 수행하는 압연 공정 과정에서 과도한 압력이 가해지면 입자가 손상될 가능성이 있으며, 이로 인해 전해질과의 반응이 촉진되어 성능이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 평탄 압입시험을 활용하여 NCM 양극재 단일 입자의 기계적 파괴 특성을 정량적으로 평가하였다. 입자를 일정한 패턴으로 실리콘 웨이퍼 표면 배치하기 위하여 다양한 크기의 원형 패턴을 갖는 PR(Photo Resist)을 도포하였다. 평탄 압입자를 이용하여 나노압입시험을 수행하고, 하중-변위 곡선 중 최대 압입하중과 압입깊이를 분석하여 입자의 파괴 거동을 정량화하고자 하였다. 또한, 충·방전 테스트 결과로부터 기계적 및 전기화학적 특성의 상관관계 분석과 유한요소해석을 통하여 압입시 발생할 수 있는 파괴 거동을 함께 살펴보았다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

[P29-4]
스트레처블 태양전지 및 디스플레이용 이축 변형 제어 신축 기판 제조 공정 개발: 곽지윤 (UNIST), 전은채 (울산대학교), 김주영* (UNIST)
Keywords: 이축 변형 제어, 리엔트런트 허니컴 구조, 음의 포아송비, 스트레처블 기판
스트레처블 태양전지 및 디스플레이용 소재는 소자의 면적이 성능에 비례하는 특성을 보이며, 최소한의 소재 사용으로 최대 면적을 구현하여 효율을 높이는 것이 핵심 개발 목표 중 하나이다. 그러나 대부분의 소재는 인장 시 인장 방향과 수직한 방향으로 수축하는 특성을 보이며, 이는 스트레처블 소자에 주로 사용되는 폴리머 기반 기판에서 특히 문제가 된다. 이를 해결하기 위해 소자의 효율을 향상시키고 소재 소모량을 감소시킬 수 있는 '이축 변형 제어 신축 기판(biaxial strain-controlled stretchable

substrate)'이 제안되었다. 본 연구에서는 음의 포아송비(negative Poisson's ratio)를 갖는 리엔트런트 허니컴 구조(re-entrant honeycomb structure)를 적용한 이축 변형 제어 신축 기판의 설계 및 제조 공정을 제시한다. 리엔트런트 허니컴 구조가 음각 정밀 가공된 금속 몰드와 복제 공정을 사용하여 500 마이크로미터 두께의 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS) 기판을 성공적으로 제작하였으며, 이를 통해 수직방향 수축률을 19.1% 감소시킬 수 있었다. 스트레처블 소자의 기판으로 이를 활용하면 소자 효율을 9.44% 향상시킬 수 있으며, 기판 제작에 사용되는 소재 소모량은 8.60% 절감할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 이축 변형 제어 신축 기판 설계 및 제조 공정을 태양전지 및 디스플레이와 같은 고효율 스트레처블 소자 제조에 적용 가능함을 입증하였다.

[P29-5]

일축 주름 구조를 적용한 고신축성 실리카 봉지 재료 개발: 조지현, 유현지 (UNIST), 황경석 (Harvard University), 김주영* (UNIST)

Keywords: 봉지 재료, 주름 구조, 신축성, 수분 투습도, 실리카

수분과 산소에 취약한 유기 전자 소자의 수명을 보장하기 위해서 봉지 재료가 필수적이다. 유기 전자 소자의 수명을 보장하기 위해서는 10^{-4} g/m^2 day 수준 이하의 수분 투습도를 요구하게 되는데, 이는 무기 재료를 통해서 달성 가능하다. 무기 봉지 재료를 유기 전자 소자에 적용하게 되면 장수명 보장이 가능하지만, 신축성은 제한하게 된다. 고신축 무기 봉지 재료를 사용하게 되면 이를 해결할 수 있을 것이라 예측한다. 따라서 무기 봉지 재료에 구조적으로 변형을 주어 신축성을 향상시킨 후에 유기 전자 소자에 적용하려고 한다. 주름 구조를 가지는 봉지 재료를 통해서 신축성을 향상시킬 수 있다. 신축 기판에 사전 변형을 가한 후, 딱딱한 박막을 전사하여 사전 변형을 제거하면 주름 구조 형성이 가능하다. 이 방법을 활용하여 고신축성 무기 봉지 재료를 개발하였다. 본 연구에서는 무기 봉지 재료로 플라즈마를 활용한 저온 원자층 증착법으로 제작한 고밀도의 실리카 박막을 선택하였다. 고분자 박막에 실리카를 증착하고, 일축으로 사전 변형을 가한 신축 기판에 고분자와 실리카 박막을 전사한다. 신축 기판에 걸려 있는 사전 변형을 제거함으로써 균일한 일축 주름 구조를 가지는 고신축성 무기 봉지 재료를 제작하였다. 전기적 마그네슘 실험을 통해서 10^{-4} g/m^2 day 수준 이하의 수분 투습도를 가지는 것을 평가하였다. 고신축 봉지 재료의 신뢰도를 평가하기 위해 반복 신축 실험을 진행한 결과, 반복 신축 이후에도 수분 투습도가 유지되는 것을 바탕으로 고신뢰성, 고신축성, 고불투습성 봉지 재료를 개발한 것을 확인하였다. 추후 유기 전자 소자에 적용하여 수명을 보장할 수 있는 봉지 재료로써 활용 가능성을 기대한다.

[P29-6]

자가 전개 특성을 활용한 최소 침습형 전자소자의 구조 최적화: 김수민 (UNIST), 황경석 (Harvard University), 배재영, 강승균* (서울대학교), 김주영* (UNIST)

Keywords: 최소 침습형 전자소자, 자가 전개 특성, 생분해성, 형상기억고분자

최소 침습형 전자소자는 절개 부위를 최소화하여 수술 후 통증을 줄이고 환자의 회복 시간을 단축하는 동시에, 합병증 발생 위험을 낮추면서도 정밀한 신호 측정이 가능하다는 장점으로 인해 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 대면적에서 발생하는 신호를 측정하기 위해 사용된 기존 소자는 크고 단단한 구조적 특성으로 인해 연부 조직과의 기계적 불일치가 발생하여 조직 손상을 유발할 뿐만 아니라 추후 제거 수술이 필요하다는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 조직과의 기계적 불일치를 최소화하면서도 장기간 체내에서 안정적으로 구동될 수 있도록 생체적합성과 생분해성이 우수한 재료를 활용한 전자소자에 대한 연구가 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 체내에서 자연스럽게 분해 및 흡수되는 생분해성 형상기억고분자를 활용하여, 미세 침습 방식으로 삽입된 소자가 체온에 의해 유발된 형상기억 효과를 통해 사전에 설계한 구조로 형태 변형을 이루어, 대면적에 걸쳐 생체 신호를 정밀하게 측정할 수 있는 전자소자를 제작하고자 한다. 유한요소해석을 기반으로 변형 과정에서 전자소자에 가해지는 변형률이 최소화되는 구조를 설계하고, 이에 따라 기판 표면에 국부적인 트렌치를 형성하여 접는 방식을 적용함으로써 부피를 최소화하고자 한다. 또한, 체온에 의해 형태 변형이 유발되는 생분해성 형상기억고분자를 활용하여 미세 침습성과 자가 전개 특성을 구현함과 동시에 구조적 설계를 최적화하고자 한다.

[P29-7]

유연 태양전지용 고신축 저투습 비정질 알루미나 봉지 재료의 기계적 신뢰성: 유현지 (UNIST), 우정현 (한국원자력연구원), 황경석 (Harvard University), 김주영* (UNIST)

Keywords: 플렉서블, 봉지재료, 원자층 증착법, 기계적 신뢰성

재료적·구조적 방법에 기반하여d 우수한 기계적 유연성을 갖는 유기물 기반의 광전자소자는 소자의 폼팩터에 큰 발전을 가져왔지만, 공기 중의 수분과 산소에 취약하여, 장시간 안정적으로 작동하기 위해서는 견고한 봉지막이 필수적이다. 하지만 절충 관계에 있는 고신축성과 저투습성을 동시에 갖춘 봉지막을 개발하는 데 어려움이 있어 유연 전자소자의 상용화가 지연되고 있다. 본 연구에서는 산소 플라즈마를 활용한 원자층 증착법을 통해 성장시킨 비정질 알루미나 박막을 고신축 봉지막으로서 유연 태양 전지에 적용하였다. 원자층 증착법을 통해 형성된 알루미나 박막은 저온에서도 낮은 불순물 함량과 높은 밀도를 가지며, 이에 기반하여 우수한 기계적 신축성과 수분 차단 특성을 동시에 가짐을 확인하였다. 나노스케일 박막의 기계적 특성은 주사전자현미경 내에서의 실시간 인장 시험법을 통해 평가하였으며, 다양한 온도/습도 환경에서의 수분 투습도는 전기적 칼슘 테스트를 통해 정량적으로 분석하였다. 봉지막의 기계적 신뢰성을 평가하기 위하여 탄성 변형 한계 내에서의 반복굽힘실험 후의 수분투습도를 평가한 결과, 실험 후에도 우수한 수분 차단 성능을 유지함을 확인하였다. 최종적으로 단일 층의 고유연성 알루미나 봉지막이 유연 태양 전지의 작동 수명과 기계적 유연성을 효과적으로 보장함을 확인하였다.

[P29-8]

나노스크래치 시험을 통한 나노다층박막 광학 소자의 buffer층 유무에 따른 계면 접합력 및 박리 양상 분석: 박태원, 박민지, 박연경, 손슬미, 전은채* (울산대학교)

Keywords: 나노스크래치 시험, 나노다층박막, 광학 소자, 접합력, 박리

디스플레이 기술 발전의 고도화로 인하여 고해상도, 고명암비, 높은 색재현성이 필수적인 요구사항으로 자리 잡았으며, 이에 따라 광학적 성능을 최적화하기 위한 다양한 광학 소자의 역할이 더욱 중요해지고 있다. 디스플레이 내 광학 소자는 빛의 투과 및 반사를 조절하여 원하는 이미지를 구현하거나 효율을 향상시키는 등의 역할을 수행하는데, 최근 제품의 다층화 및 박막화가 가속화되어 광학 소자는 다양한 구조의 나노다층박막 형태로 개발되는 추세이며 이를 통해 제품의 성능을 극대화 하고자 하는 연구가 많이 진행 중에 있다. 그러나 다층 구조는 불가피하게 여러 계면(interface)을 가지며 단 한 계면에서라도 박리(delamination)가 발생하면 전체 부품이나 제품의 불량으로 이어져 신뢰성 측면에서 문제가 따른다. 또한 각 층의 두께가 수십 나노미터 이하로 얇아짐에 따라 층간 접합력이 더 취약해져 박리가 더욱 쉽게 발생할 가능성이 높다. 따라서 신뢰성 및 내구성의 확보를 위해서는 다층 구조를 이루는 박막 간 계면의 접합력이 정량적으로 평가되어야 한다. 이때 Cross-hatch test, Peel test 등 기존 접합력 분석법의 경우, 다층 박막에서의 층별 접합력 저하 지점을 판단하기 쉽지 않고, 극저하중 인가에 한계가 있어 나노스케일에서 적용하기 매우 어렵다. 반면 나노스크래치 시험은 수직 하중을 극저하중에서 강제로 박리에 이르는 하중까지 선형적으로 증가시키며 수평 방향으로 긁어내어 weakest interface를 특정함으로써 나노스케일 소재의 각 층간 접합력을 정량적으로 분석할 수 있다. 이에 본 연구에서는 나노다층박막을 활용한 서로 다른 구조의 광학 소자를 대상으로 나노스크래치 시험을 실시하였으며, 이를 SEM(Scanning Electron Microscope)을 통해 관찰한 박리 지점 및 스크래치 트랙 변화와 연계하여 정량적 및 정성적 분석을 진행하였다. 광학 소자는 기본 모재 위 유전체 나노다층박막이 바로 적층된 시편과, 같은 종류의 모재와 나노다층박막 사이에 buffer층이 형성된 시편을 사용하였다. 그 결과, 유전체 나노다층박막이 바로 적층된 시편의 경우에는 명확한 박리 현상은 관찰되지 않았고 스크래치 트랙 주변 영역에서 연성 거동 및 국부적인 파손 등 약간의 취성 양상이 나타난 반면, buffer층이 코팅된 시편의 경우 박리 현상이 발생하였고, 전체적으로 완전 취성 파괴 양상이 두드러지게 나타났다. 이와 같이 buffer층 유무에 따른 광학 소자의 박리 및 파괴 양상을 관찰함으로써 유전체 나노다층박막이 바로 적용된 시편의 접합력이 더 우수한 것을 확인하였으며, 추후 개발 예정인 다른 구조의 광학 소자 대상으로 접합력 평가 및 비교 분석을 진행할 예정이다. 이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (과제번호: 20019400, 과제명: 초고해상도 구현을 위한 OLED 디스플레이용 메타 표면 구조 설계제조 기술 개발)

[P29-9]

중엔트로피 합금의 나노압입 거동 연구: FCC vs. BCC: 이시연, 최재혁, Zhe Gao, 장재일* (한양대학교)

Keywords: medium-entropy alloy, nanomechanical property, nanoindentation

중엔트로피 합금(medium-entropy alloy)은 고엔트로피 합금에 이어, 다양한 분야에 적용 가능한 새로운 구조 재료로서 주목받고 있다. 본 연구에서는 면심입방구조(FCC)를 가지는 CoCrNi 중엔트로피 합금과 체심입방구조(BCC)를 가지는 NbTiZr 중엔트로피 합금 각각에 대해 나노압입시험을 수행하고, 이 두가지 중엔트로피 합금이 나타내는 미세역학적 거동을 비교 분석하였다.

[P29-10]

계층구조 다공성 형성에 따른 다공성 금의 기계적 거동 및 형상학적 분석: 전한솔* (계명대학교)

Keywords: 다공성 금속, 계층구조, 압축시험, 3D 형상 분석

나노 크기의 금 리가먼트 (Au ligament)와 기공을 가진 이중-연속 구조 (bi-continuous structure)인 다공성 금 (nanoporous gold, NPG)은 높은 비표면적 특성과 화학 안정성으로 인해 촉매, 센서, 엑추에이터와 같은 민감한 표면 반응성을 요구하는 분야에서 주목받고 있는 소재이다. 최근, 뼈대인 리가먼트 구조 안에 또다른 기공이 형성되어 있는, 즉, 계층구조 다공성 금 (hiearchical nanoporous gold, HNPG)이 개발되었다. 계층구조 다공성 금은 기존의 추가적인 다공성 구조가 형성된 것으로, 기존의 다공성 금에 비해 더 높은 비표면적 특성을 가지면서 더 빠른 표면 반응성을 보이고 있다. 하지만 계층구조 다공성 금의 기계적 물성에 대한 심층적인 연구는 미비하며, 계층구조의 형상학적 분석 역시 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 일한 상대밀도를 가지는 HNPG와 NPG에 대한 기계적 물성 분석 및 형상학적 분석 연구를 진행하였다. 동일한 Ag-Au 모합금으로부터, 디얼로잉 조건을 제어하여 HNPG와 NPG 샘플을 제조한 후, FIB 기법을 이요한 압축 필라 시험편을 제작하여, 전기화학 환경 속에서 마이크로 스케일 압축 시험을 수행하였다. 3D 재건축 (3D reconstruction) 기법을 이용하여, 다공성 구조에 대한 기하학적 형상학적 분석을 리가먼트 크기 분포, 계면 정규분포 (interfacial normal distribution, IND), 연결성 (connectivity) 측면에서 진행하여 논의하였다.

P30 : 마그네슘
Room 3층 로비, 4월 25일

[P30-1]
Mg–Ga 합금 압출재의 기계적 특성 및 부식 거동: 민두원, 권재호, 김정기, 박성수* (울산과학기술원)
Keywords: 금속, 마그네슘, 기계적특성, 내식성
Mg은 인체 내에서 쉽게 분해되는 특성과 더불어 우수한 생체적합성을 갖기 때문에 차세대 생체분해형 임플란트용 소재로 주목받고 있다. 관련 임상 사례에 의하면 이식되는 임플란트가 환자에게 흡수되어 미치는 장기적 영향이 매우 중요하게 고려되고 있으며, 이에 따라 인체에 무해한 원소로만 구성된 Mg 합금 개발에 대한 수요가 늘어나고 있다. 최근 생체용 마그네슘 소재에 첨가되는 후보 원소로서 Ga이 주목받고 있는데, Ga은 생체적합성이 우수한 금속으로 알려져 있을 뿐만 아니라 Mg 내 최대 고용량이 8.5wt% 수준으로 높고 열간 가공 시 석출상 형성이 가능해 기계적 특성 확보의 측면에서도 장점이 있다. 그러나, Ga을 포함하는 석출상의 분율이 증가할수록 내식성이 악화된다고 알려져 있기 때문에 본격적인 소재 개발에 앞서 Ga이 포함된 Mg 합금의 다양한 특성에 대한 체계적인 이해가 필요하다. 본 연구에서는 다양한 이원계 Mg–Ga 합금 압출재의 기계적 특성 및 부식 거동을 평가함으로써 향후 Mg–Ga계 합금 개발의 기반을 마련하고자 한다.

[P30-2]
비대칭 시편과 2D FEM을 활용한 EPT의 열/비열 효과 정량 분석: 송종한, 이승엽, 유진영, 천세호, 이성호, 박동준, 이정훈 (부산대학교), 박성혁 (경북대학교), 이태경* (부산대학교)
Keywords: 마그네슘, EPT, 쌍정
전류펄스 인가법(electropulsing treatment, EPT)은 금속 소재에 전류를 펄스 형태로 인가하여 줄 가열 효과(Joule heating effect)에 의한 발열을 통한 급속 가열을 유도하는 공정으로, 기존의 노 열처리(furnace heat treatment, FHT) 대비 높은 에너지 효율과 가공성을 제공한다. 최근 연구에서는 EPT가 단순한 열 효과(thermal effect)뿐만 아니라 비열 효과(athermal effect)를 유발할 수 있음이 보고되었으나, 두 효과를 정량적으로 분리하여 분석하는 방법은 확립되지 않았다. 이에 본 연구에서는 비대칭 형상을 가지는 시편을 활용하여 EPT에 따른 열/비열 효과를 정량적으로 분석하는 새로운 방법을 제안하였다. 전류가 특정 영역만 통과하도록 설계된 시편을 이용함으로써 동일한 공정 조건에서 열/비열 효과가 동시에 작용하는 영역과 열 효과만 작용하는 영역을 비교 분석할 수 있도록 설계하였으며, 이렇게 설계한 시편 형상을 바탕으로 2차원 유한요소해석을 진행하여 온도 분포 및 가열 양상을 모사하고 실험 데이터를 통해 이를 검증하였다. 본 연구의 결과, EPT를 적용한 시편에서 특정 구간에서 전류에 의해 미세조직 변화가 촉진됨을 확인하였으며, 구체적으로는 60초간 EPT 단계에 도달 시에 결정립 성장은 약 40%p, 쌍정 경계 분율 감소는 약 20%p, 저각 경계 분율 감소는 약 28%p의 정량적인 촉진 현상을 확인하였다. 이를 통해 비열 효과의 유무에 대해 정확히 분석하였다. 본 연구는 기존의 방법론이 갖는 한계를 극복하고, EPT의 열/비열 효과를 더욱 정밀하게 분석할 수 있는 새로운 접근법을 제시한다.

[P30-3] Canceled
Age hardening behaviors of extruded SEN6, SEN9, and SEN11 magnesium alloys: Ji-Yoon Lee (Kyungpook National University), Jun Ho Bae (Korea Institute of Materials Science), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)
Keywords: SEN alloy, Al content, Aging, Precipitation, Hardness
Magnesium (Mg) alloys are characterized by low density, high specific strength, and excellent vibration damping, making them highly attractive for weight-sensitive industries such as automotive, aerospace, and future mobility. However, conventional Mg alloys suffer from poor corrosion and ignition resistance, limiting their broader application. To address these shortcomings, stainless, environmentally friendly, and nonflammable Mg alloys (SEN alloys) have been developed by incorporating small amounts (<1 wt%) of Ca and Y into commercial Mg–Al-based alloys. Extensive research has been conducted on the chemical (e.g., oxidation, ignition, and corrosion resistance) and mechanical (e.g., tensile strength, extrudability, ductility, and formability) properties of SEN alloys. Nevertheless, despite the crucial role of alloying elements in precipitation behavior, studies on the age-hardening response and precipitation kinetics of SEN alloys with varying Al content remain scarce. This study systematically investigates the age-hardening behavior of three SEN alloys with Al contents of 6, 9, and 11 wt.% (denoted as SEN6, SEN9, and SEN11). Extruded SEN6, SEN9, and SEN11 materials were subjected to a two-step homogenization process at 400 ºC and subsequently at 440 ºC to maximize the dissolution of second-phase particles. The homogenized materials were then aged at 180 ºC for durations ranging from 1 to 64 h. To elucidate the microstructural evolution and mechanical performance, optical microscopy (OM), field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM), and electron backscatter diffraction (EBSD) analyses were performed on the ED–TD plane, alongside Vickers hardness measurements. The age-hardening response of each alloy was correlated with the size, distribution, and morphology of precipitates, providing critical insights into the optimization of SEN alloys for enhanced mechanical performance.

[P30-4]
Simultaneous Improvement in Strength and Ductility of Rolled AZ31 Mg Alloy via Combined UNSM and Electropulsing

Treatment: Won Pyo Hong (Kyungpook National University), Hyun Ji Kim (Agency for Defense Development), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)
Keywords: AZ31 alloy, Ultrasonic nanocrystalline surface modification, Electropulsing, Gradient microstructure, Mechanical properties.

This study investigates the effects of ultrasonic nano-crystalline surface modification (UNSM) and subsequent electropulsing treatment on the microstructure and mechanical properties of a rolled AZ31 Mg sheet. The UNSM process induces severe plastic deformation on the material surface through ultrasonic impacts, refining surface grains to the nanoscale and enhancing hardness and strength. However, the excessive dislocation density generated by UNSM significantly reduces ductility. To address this, electropulsing treatment was applied as a post-processing method, converting electrical energy into thermal energy to provide rapid heating, thereby reducing residual stress and dislocation density. The UNSM-treated material exhibited a gradient microstructure to a depth of approximately 600 μm, characterized by nanoscale grains and a high density of {10–12} twins. Upon subsequent electropulsing treatment for 2 min, static recrystallization occurred in the nanoscale grain regions, while grain boundary migration and dislocation recovery were observed in the twinned regions. This combined treatment resulted in a new gradient microstructure with low internal strain energy, leading to simultaneous improvements in tensile strength and elongation. These findings demonstrate that the combined UNSM and electropulsing treatment offers a promising approach for enhancing both strength and ductility of Mg alloys.

[P30-5]

Dual phase를 갖는 초경량 Mg-Li 합금의 Zn 함량 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화: 이병권*, 고은찬 (한국생산기술연구원, 전남대학교), 김용호, 유효상, 손현택* (한국생산기술연구원), 홍성길 (전남대학교)
Keywords: magnesium, lithium, zinc, mechanical properites, microstructure

가장 가벼운 금속 구조 재료인 마그네슘은 철강의 22%, 알루미늄의 64%의 밀도를 갖는다. 우수한 비강도, 비탄성계수, 진동 흡수능, 전자파 차폐성을 갖는 마그네슘 합금은 전자제품, 의료기기, 자동차 및 항공우주 분야 등 다양한 산업에 활용되고 있다. 그러나 마그네슘 합금은 육방밀집구조(HCP)의 결정구조로 인해 제한된 슬립 시스템을 가져 상온에서의 성형성이 떨어진다는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 리튬을 첨가하면 리튬 함량에 따라 다른 결정 구조를 갖게 된다. 리튬 함량이 5.7 wt.% 미만일 때 α-Mg(HCP), 5.7~10.3 wt.%일 때 α-Mg(HCP)+β-Li(BCC), 10.7 wt.% 이상일 때 β-Li(BCC) 구조를 형성한다. BCC 구조의 β-Li상은 더 많은 독립적인 슬립계를 가져 변형이 용이하며, 리튬의 낮은 밀도(0.534 g/cm^3)로 인해 더 가벼운 합금 개발이 가능하다. 마그네슘-리튬 합금은 성형성이 향상되지만 강도가 저하되는 문제가 있어, 기계적 특성 개선을 위한 다양한 합금원소 첨가 연구가 필요하다. 일반적인 마그네슘 합금에 아연을 첨가하면 고용강화 및 석출강화 효과로 강도가 향상된다. 그러나 마그네슘-리튬 합금은 이중상(Dual phase)을 가지므로 아연 첨가에 따른 특성 변화가 일반적인 마그네슘 합금과 다를 수 있다. 본 연구에서는 이중상을 갖는 Mg-8Li 합금에 아연을 2, 4, 6 wt.% 첨가하여 미세조직 및 기계적 특성 변화를 조사하였다. 각 합금은 고주파유도로를 이용하여 SF6+CO2 가스 분위기에서 용해한 후, 200ºC로 예열된 금형(ø75 × 280 mm)에 주입하여 중력주조법으로 빌렛을 제조하였다. 주조 빌렛을 적절한 크기로 절단한 뒤 200ºC에서 14:1의 압출비로 열간압출하여 4 mm 두께의 판형 압출재를 제작하였다. Mg-8Li 합금의 아연 함량 변화에 따른 상 분석(XRD), 미세조직 변화 및 기계적 특성 변화를 분석하였다.

[P30-6]

Li 함량 변화에 따른 Mg 합금의 미세조직 및 기계적 특성 연구: 고은찬*, 이병권 (한국생산기술연구원, 전남대학교), 유효상, 김용호, 손현택* (한국생산기술연구원), 김태훈 (전남대학교)
Keywords: 마그네슘, 리튬, 미세조직, 기계적 특성

리튬(Li)을 첨가한 마그네슘(Mg) 합금은 1.4~1.6 g/cm^{3}의 낮은 밀도로 인해 상용 합금 중 가장 가벼운 소재로 주목받고 있다. 특히 비강도와 전자파 차폐 효과가 우수하여 노트북, PC, 모바일 기기와 같은 전자 제품뿐만 아니라 우주항공 소재로도 활용 가능성이 크다. 그러나 마그네슘 합금은 HCP(Hexagonal Close-Packed) 구조로 인해 성형성이 부족한 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 리튬을 0, 1, 3, 5 wt% 첨가한 마그네슘 합금을 제조하고, 미세조직과 기계적 특성을 분석하였다. 미세조직 분석 결과, FE-SEM 이미지를 통해 리튬 함량 변화에 따른 뚜렷한 조직적 차이는 관찰되지 않았으나, 합금 내 첨가된 원소의 석출상을 확인할 수 있었다. XRD 분석에서는 마그네슘의 주요 peak인 (100), (002), (101), (102)에서 리튬 함량 증가에 따라 peak가 점진적으로 shift되는 현상이 관측되었다. 이를 통해 리튬이 마그네슘 합금 내 고용됨을 확인하였다. 기계적 특성 분석에서는 리튬 함량에 따라 최대 인장강도가 0, 1, 3, 5 wt%에서 각각 221, 217, 204, 208 MPa로 나타났으며, 3 wt%까지 감소하다가 이후 소폭 증가하였다. 연신율은 18.8%, 20.3%, 20.5%, 24.2%로, 리튬 5 wt% 첨가 시 기존 합금 대비 25% 이상 증가하는 성형성 개선 효과가 관측되었다. 본 연구 결과는 리튬 첨가가 마그네슘 합금의 성형성과 기계적 특성 간 균형을 최적화하는 데 기여할 수 있음을 시사한다.

[P30-7]

Mg-SiC 복합재의 부식 특성과 열전도도 변화: 기지 합금 종류의 영향: 강동현, 배준호, 김영민, 문영훈, 김재연* (한국재료연구원)
Keywords: 마그네슘, 복합소재, 열전도도, 부식, UAM

마그네슘은 낮은 밀도와 높은 비강도로 인해 수송기기용 경량 소재로 사용되어 왔다. 특히, UAM 등 미래 모빌리티에 적용성을 확대하기 위해 기계적 특성, 열적 특성, 내식성 등의 다중 물성이 요구되고 있다. 이러한 요구 물성의 고도화에 따라 특성의 한계를 극복하기 위해 강화재를 사용한 마그네슘 복합재료가 많은 관심을 받고 있다. 강화재는 복합재의 기계적 특성과 열적 특성을 향상시

키지만, 기지와의 극심한 갈바닉 부식을 유발하는 것으로 알려져있다. 강화재의 종류 및 분율이 마그네슘 복합재료의 내식성에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나, 복합재의 내식성 저하를 최소화하기 위한 기지 합금의 최적화 연구는 수행되지 않았다. 본 연구에서는 합금 기지의 종류가 Mg-SiC 복합재의 내식성에 미치는 영향을 연구하였으며, 동시에 열전도도의 변화를 평가하였다. 기지 합금으로는 Mg-Y, Mg-Al, Mg-Zn등의 2원계 합금을 사용하였으며, 강화상으로서 40 μm 크기의 SiC 강화상을 사용하였다. 복합재는 교반 주조법을 활용하여 제조되었으며, 10 vol%의 SiC 강화상이 첨가되었다. 부식 전위 및 부식 속도는 동전위 분극 시험 및 전기화학 임피던스 분광법을 활용하여 평가되었다. 그 결과, 기지의 부식전위가 증가함에 따라 부식 속도가 감소하는 경향을 보였으며, 기지의 합금원소 최적화를 통해 기지의 부식전위를 향상시킴으로서 복합재의 내식성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

[P30-8]

저압주조 공정을 통한 고내식 마그네슘 wheel 제조: 김중훈 (한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 김정기, 오재영 (울산과학기술원), 전종배 (동아대학교), 김병구 (한국생산기술연구원), 박성수* (울산과학기술원)

Keywords: 마그네슘, 저압 주조, 부식 특성, 자동차용 휠, 미세조직

전 세계적으로 강화되고 있는 환경 규제 정책에 따라 친환경 모빌리티 시장이 급격하게 성장하고 있으며 이에 따라 경량 금속 소재의 중요성이 더욱 증가하고 있다. 마그네슘은 티타늄, 알루미늄과 같은 타 경량 금속 대비 경량성이 우수할 뿐만 아니라 비강도, 진동 감쇠능 및 전자파 차폐능 측면에서도 부가적인 장점을 가지고 있기 때문에 차세대 엔지니어링 산업에 활용될 핵심 소재로 주목받고 있다. 그러나, 마그네슘은 수분 및 염분을 포함한 환경에서 빠르게 부식되어 적용 부품의 장기적인 수명과 신뢰성을 저하시키기 때문에 차세대 부품용 소재로서 보다 활발히 적용되기 위해서는 이러한 단점이 개선된 고내식 마그네슘 합금 개발이 필수적이다. 최근 미량의 희토류 원소 첨가에 의한 부식 특성 향상 효과에 대한 여러 연구가 보고되고 있으며, 본 연구에서는 주조용 AZ91 Mg 합금에 미량의 희토류 첨가를 통해 미세조직 내 부식 구동력을 억제하는 연구를 시도하였다. 본 연구진은 개발한 AZ91계 고내식 마그네슘 합금의 특성을 부품 스케일에서 평가하기 위해 저압 주조를 통해 자동차용 휠을 제작하였으며, 제작된 휠의 미세조직과 부식특성을 기존 AZ91 합금 적용의 경우와 비교 평가하였다.

[P30-9]

Influence of Pre-Deformation on Precipitation Behavior of Mg–8.0Al–0.5Zn–0.2Mn Alloy: Comparison of Slip- and Twinning-Dominant Deformation: Hyun Ji Kim (Agency for Defense Development) and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

Keywords: AZ80 alloy, Slip, Twinning, Precipitation, Hardness

This study investigates the effect of the deformation mode on the precipitation behavior of an extruded Mg–8.0Al–0.5Zn–0.2Mn (AZ80) alloy. The alloy samples are compared after the application of 3.5% tension and 3.5% compression along the extrusion direction to induce slip-dominant and twinning-dominant deformation modes, respectively. The pre-compressed (PC) sample, which contained numerous {10–12} tension twins, has a reduced grain size and a higher internal strain than the pre-tensioned (PT) sample, which is attributed to the inherent internal strain that occurs during the formation and growth of the twins. As a result, the precipitation behavior of the PC sample is accelerated, leading to its short peak aging time of 32 h, which is lower than those of the PT and as-extruded samples (48 and 100 h, respectively). Furthermore, fine continuous precipitates (CPs) rapidly form within the {10–12} twins, contributing to the enhanced hardness. Discontinuous precipitates (DPs), which have a hardness comparable to the CP-containing twinned regions, in the PC sample experience less coarsening during aging than those in the PT sample due to growth inhibition by the {10–12} twins. Ultimately, the {10–12} twins generated under the twinning-dominant deformation condition lead to enhanced precipitation behaviors, including the preferential formation and refinement of CPs and the suppressed coarsening of DPs. Consequently, pre-deformation that occurs {10–12} twinning exhibits more pronounced effects on precipitation acceleration and microstructural modification than slip-inducing pre-deformation.

[P30-10]

Variations in microstructural characteristics and deformation behavior of pre-twinned Mg alloys with annealing temperature: Ye Jin Kim (Agency for Defense Development), Jong Un Lee (Korea Institute of Materials Science), and Sung Hyuk Park* (Kyungpook National University)

Keywords: Rolled Mg alloy, {10-12} twinning, Annealing, Texture, Deformation behavior.

This study investigates the microstructural evolution and deformation behavior of pre-twinned Mg alloys according to subsequent annealing temperature. For this, rolled AZ31 samples are subjected to the precompression (PC) along the rolling direction (RD) and subsequent annealing at various temperatures. A fully twinned microstructure of PC-treated samples remains unchanged during annealing at 200°C. At annealing temperatures above 250°C, the area fraction of twin-free grains increases with increasing the annealing temperature. Consequently, the increase in annealing temperature results in a gradual microstructural transition from the fully twinned grain structure to a completely twin-free grain structure. The microstructural change of PC-treated samples during annealing is governed by the grain growth via strain-induced boundary migration of high angle grain boundaries. In the sample with the fully twinned grain structure, detwinning of the existing {10-12} twins occurs during tension along the RD. In the sample with the completely twin-free grain structure, {10-12} twins with several twin variants are newly formed during tension. In the sample with a partially twinned grain

structure, the formation of new {10-12} twins and disappearance of existing {10-12} twins occur simultaneously during tension. Consequently, the yield strength, strain hardening rate, and elongation of the annealed samples significantly vary with the annealing temperature.

[P30-11]

제강용 경소돌로마이트 대체를 위한 폐내화재 활용연구: 왕제필*, 정평재, 허준성, 김창정, 정창호, 박정훈 (국립부경대학교)

Keywords: MgO-C 내화재, 경소돌로마이트, EAF Slag, Slag foaming

본 연구에서는 제강 전기로에 사용되는 폐 MgO-C 내화재를 Flux로 이용해 경소돌로마이트를 대체하는 실험을 진행하였다. 우선 상용되는 EAF(Electric arc furnace) Slag의 조성을 XRF(X-ray Florescence spectroscopy)를 이용해 분석하였다. 분석 결과로부터 Target EAF Slag 조성을 CaO(34 wt%), MgO(10 wt%). SiO2(14 wt%), Al2O3(4 wt%), FeO(22 wt%)로 설정하였다. Pre-melt base slag를 수직관상로를 이용하여 1450°C에서 SiO2, FeO, Al2O3 조성을 맞춘 후 제조하였다. 100% 경소돌로마이트를 첨가하였을 때와 MgO-C 내화물을 80% 첨가해 대체하였을 경우의 EAF Slag의 상과 조성을 비교하였다. 각 상들을 토대로 원료들이 충분히 용융되었고, 각각 조성 내 MgO함량은 11.49 wt%, 11.29 wt%로 유사한 것을 확인하였다. 이후 EAF Slag 내에서 MgO-C 내화물의 탄소 성분(2.83 wt%)에 의한 Slag foaming 현상을 확인하기 위해 도가니와 Powder의 이론적 계산값과 비교하여 Slag foaming 높이 측정을 하였다. 100% 경소돌로마이트를 첨가하였을 경우 Slag foaming 현상이 발생하지 않았고, MgO-C 내화물을 80% 첨가해 대체하였을 경우 초기 Powder 높이에 비해 9 mm 높게 측정되었다. 이는 탄소 성분에 의한 Slag foaming 현상임을 확인하였다.

P31 : 집합조직
Room 3층 로비, 4월 25일

[P31-1]
전해도금 용액 유기첨가제에 따른 반도체 패키징 기판 Via의 Filling 거동과 미세조직/집합조직 분석: 오은기, 이기영, 신한균, 박현, 김정한* (동아대학교)
Keywords: 반도체 패키징, via, Cu 도금, 유기첨가제, 집합조직
반도체 패키징 기술은 2D에서 2.5D, 3D로의 발전을 거듭하고 있으며, 최근 2.xD 패키징이 차세대 고성능, 저비용 기술로 주목받고 있다. 2.xD 패키징은 고비용의 Si 인터포저 (interposer)의 적용 없이 redistribution layer (RDL)를 형성함으로써, 고속 신호처리 능력 확보와 비용 절감을 동시에 실현할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 2.xD 패키징용 기판의 미세 Cu 배선 제조 공정 개발을 목표로, 30 μm 크기의 via 패턴에 대해 구리 전해도금 시 유기첨가제에 따른 Cu filling 거동과 도금층의 미세조직 및 집합조직의 발달에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 도금 용액에 포함되는 유기첨가제인 가속제 (accelerator), 억제제 (suppressor), 그리고 평활제 (leveler) 각각의 전기화학적 거동을 rotating disk electrode (RDE)를 이용한 정전류 실험 (galvanostatic measurement)을 통해 확인하였고, 그 결과를 바탕으로 via 패턴 도금에 사용할 유기첨가제의 조합 및 첨가량을 1차 결정하였다. 이후 각 첨가제의 일정 범위 내 변화에 따른 via 패턴에 대한 Cu filling 거동을 광학현미경 및 focused ion beam (FIB) 분석기술을 이용하여 관찰하였다. 그리고, via 및 그 주위 구리 도금층의 결정립 크기 및 형상, 그리고 각 결정립의 결정방위 및 결정립계 특성을 electron backscatter diffraction (EBSD) 기술을 이용하여 분석하였다. 이러한 결과들을 바탕으로, 수 십 μm급 via 패턴에 대한 전해도금 시 위치별 Cu 도금층 형성 거동에 미치는 각 유기첨가제의 역할을 설명하였다.

[P31-2]
페라이트계 스테인리스 강 표면에 Co-Ni 합금 전기 도금된 박막의 고온 산화 특성 평가 및 기계적 물성과 미세조직의 상관관계 분석: 이기영, 신한균, 박현, 김정한* (동아대학교)
Keywords: 고체산화물연료전지, 분리판, 전기도금, EBSD, 미세조직, 산화
고체 산화물 연료전지(solid oxide fuel cell or SOFC)의 분리판은 개별 셀 간의 전기 이동을 담당하는 동시에 연료와 공기 흐름을 분리하는 역할을 한다. 600~800ºC에서 작동하는 SOFC에서는 Cr 함량이 높은 페라이트계 스테인리스강 분리판 표면에 CrO_3 및 $CrO_2(OH)_2$ 등의 산화물이 형성되면서 Cr이 휘발하는 문제가 발생하며, 이는 전지의 성능 저하와 내구성 감소로 이어진다. 이를 억제하기 위해 금속 코팅을 적용한 후, 스피넬 산화물을 형성하여 우수한 전기전도도와 높은 열적 안정성을 갖춘 분리판을 제조하는 기술이 제안되고 있다. 본 연구에서는 전기도금 공정을 활용해 금속 분리판 표면에 기계적 물성이 우수한 Co-Ni 합금 코팅을 형성하고, 이에 대한 고온 산화 특성을 분석하였다. 먼저, 인장 시험 및 마이크로 경도 시험을 통해 합금 원소 함량에 따른 기계적 물성을 평가하였으며, 이러한 물성과 미세조직 및 집합조직과의 상관관계를 분석하기 위해 EBSD 분석 기술을 사용하였다. 또한, 800ºC에서 산화 처리를 수행하여 Co-Ni 기반 스피넬 구조의 산화막을 형성한 뒤, 면적 비저항(area specific resistance or ASR)과 Cr 휘발량을 시간에 따라 측정하였다. 그 결과, Co 함량이 증가할수록 합금 박막의 강도가 증가했으며, 60 wt%Co에서 인장강도 1800 MPa, 경도 500 HV 이상으로 최대값에 도달한 후 감소하는 경향을 보였다. 또한, 합금 박막의 ASR은 산업적 기준(100 $m\Omega \cdot cm^2$ 이하)보다 약 70% 낮았으며(500시간 산화), Cr 휘발 속도는 순수 Co 박막 대비 약 74% 감소하였다(300시간 산화). 따라서 본 연구 개발을 통해 얻어진 Co-Ni 합금 코팅을 적용하여 높은 기계적 강도 및 우수한 고온 산화 특성을 가지는 SOFC 금속 분리판 제조에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P31-3]
초미세전극 기반 이종 금속간 부식 거동에 대한 연구: 최재훈, 조영준, 김영서, 신한균, 김정한* (동아대학교)
Keywords: 전기화학, 부식, SECM (Scanning Electrochemical Microscopy), UME (Ultramicroelectrode)
부식은 다양한 산업에서 구조적 안정성 저하, 유지 비용 증가, 환경 오염 및 안전사고를 초래하며, 반도체 및 정밀 제조 분야에서는 제품 성능과 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다. 이에 대처하기 위해 부식 거동의 정밀한 메커니즘 분석이 점점 중요해지고 있다. 금속의 부식은 전해질 내에서 발생하는 환원 반응과 금속의 이온화 반응 간 전위차로 인해 전자가 이동하면서 금속이 원래의 형태나 성질을 잃고 변형되는 현상이다. 부식 환경에서 반응의 전위 차이는 부식 반응의 열역학적 자발성을 평가하는 지표로 활용될 수 있다. 부식 속도는 환원 반응에 필요한 화학종의 금속 표면으로의 물질 전달 및 흡착, 그리고 금속의 이온화 반응과 짝을 이루는 금속 표면에서의 환원 반응에서 율속 단계가 무엇인지를 판단하는 등 속도론적 평가를 통해 더욱 면밀하게 분석할 수 있다. 현재까지의 부식 연구는 한 시편에 대해 분극 실험 및 전기화학적 임피던스 분광법(EIS) 등을 활용하여 시편 표면 전체의 평균적인 부식 특성과 저항성을 평가하는 방식이 주를 이루었다. 또한, 실제 사용 환경에서 시편을 장기간 노출한 후 감량된 무게를 측정하거나, 부식이 진행된 이후 표면을 분석하는 방법을 통해 부식 거동을 연구해왔다. 그러나 이러한 접근 방식은 주로 벌크(Bulk) 특성을 기반으로 하며, 계면에서의 전기화학적 상호작용이 복잡하게 일어나기 때문에 보다 정밀한 국부 분석 기법이 필요하다. 본 연구에서는 초미세전극(Ultramicroelectrode, UME)을 기반으로 한 주사전기화학현미경(Scanning Electrochemical Microscopy, SECM) 기술을 활용하여 이종 금속 표면에서 국부적으로 발생하는 부식 반응을 실시간으로 분석하고자 하였다. 이를 통해 전위 차이에 따른 특성뿐만 아니라, 부동태 형성을 통한 전자 이동 속도의 변화를 정량적으로 평가하여 이종 금속의 속도론적 부식 거동을 보다 정밀하게 규명하고자 하였다. 본 연구는 SECM 기법의 실용성을 높이고, 국부 부식 거동 분석 분야의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

[P31-4]

온간 압축 과정에서 Zn-Al-Mg 합금의 동적 연화 거동에 미치는 Y 원소의 영향: 서위걸, 이은세 (국립순천대학교), 양동주 ((주)하나스틸), 최시훈* (국립순천대학교)

Keywords: Zn alloy, Yttrium, Dynamic Softening, Compression, Recrystallization

최근 Zn 합금은 인체에 무해하고, 마그네슘과 철 사이의 중간 정도의 연화 거동을 보여 바이오 소재로 주목받고 있다. 또한, 철강 소재의 내식성을 향상시키기 위한 도금 소재로도 사용되고 있다. 빌렛을 제조하기 위해, Zn-2wt%Al-1wt%Mg-xwt%Y 합금을 높이 100 mm, 직경 75 mm의 원형으로 주조하였으며, 여기서 Y의 함량은 0.2wt%, 0.6wt%, 1.0wt%로 설정하였다. 주조된 시편의 조성을 균일화하기 위해 250°C에서 3시간 동안 균질화 열처리를 수행하였다. 열처리된 소재는 높이 15 mm, 직경 10 mm 크기로 가공하여 Gleeble 압축 시험 시편을 제작하였다. Gleeble 압축 시험은 100°C의 온도와 1/sec의 변형률 속도에서 수행되었다. 압축 중 동적 연화 거동을 분석하기 위해, 변형률에 따라 중단 시험을 실시하였다. 중단된 시편의 미세조직 분석은 SEM과 EBSD를 사용하여 수행되었으며, GAM 분석을 통해 동적 재결정 분율을 계산하였다. 이러한 결과를 바탕으로 Zn-Al-Mg 합금에서 Y 함량이 동적 재결정 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

[P31-5]

WO_3/WS_2 코어/셸 나노와이어의 합성과 네거티브 광반응 특성 분석: 송유진, 김정한* (동아대학교)

Keywords: WO_3/WS_2, 코어/셸, 나노와이어, 광반응

WO_3/WS_2 코어/셸 나노와이어는 습식 화학 에칭과 화학 기상 증착법(CVD)을 결합한 공정을 통해 합성되었다. 먼저, KOH 용액을 이용한 습식 화학 에칭과 650°C에서의 산화 반응을 통해 WO_3 나노와이어를 형성하였으며, 이후 900°C에서 황화 반응을 진행하여 WS_2 셸을 형성하였다. 합성된 나노와이어는 직경 90~370 nm 범위로 형성되었으며, 주사전자현미경(SEM), 라만 분광분석, 에너지 분산형 X-선 분광(EDS), X-선 회절(XRD) 드리고 투과전자현미경(TEM)을 활용하여 미세구조 및 결정학적 특성을 분석하였다. 분석 결과, WO_3/WS_2 코어/셸 나노와이어는 육방정계 WO_3 코어와 원자적으로 정렬된 2D WS_2 셸로 구성되어 있으며, 두 물질 간의 인터페이스가 명확하게 형성됨을 확인하였다. 특히, 합성된 WO_3/WS_2 이종구조 나노와이어는 가시광(405 nm) 조사 시 뚜렷한 네거티브 광반응을 나타내었다. 이러한 현상은 코어/셸 구조 내에서의 전하 이동 특성과 인터페이스 엔지니어링의 중요성을 시사하며, 향후 광검출기 및 광전자 소자 응용에서의 활용 가능성을 제시한다.

[P31-6]

Ta-10W합금의 재결정 거동에 미치는 압하율 및 압연 온도의 영향 연구: 박기성, 고경민 (국립순천대학교), 전재열 (한국생산기술연구원), 최시훈* (국립순천대학교)

Keywords: Ta-10W Alloy, Cryo Rolling, Cold Rolling, Deformation, Recrystallization

BCC 결정 구조를 갖는 Ta-10W 합금은 화학적 안정성이 우수하고, 높은 연성을 갖는 고융점 금속이다. 하지만 Ta 및 W은 희유금속(rare metal)이기 때문에 벌크 형태로 활용하는데 있어 높은 가격 부담으로 인해 상용분야에서의 활용이 매우 제한적이다. 그럼에도 불구하고 Ta-10W 합금은 높은 밀도와 빠른 변형률 속도에서 우수한 연신율을 가지고 있어 선진국에서는 국방 무기 소재로 많이 활용되고 있다. Ta-10W 합금의 경우 합금 판재 및 관재를 제조하기 위해서 소둔 열처리가 필수적으로 요구되나, 높은 재결정 온도(>1,400)와 열처리 중 산화 방지를 위한 고진공(<2.0E-5 Torr)이 요구되어 양산을 위해 높은 사양을 가진 열처리로가 필요하다. 또한 대형 Ta-10W 합금 판재 및 관재(길이 3M이상)의 경우 완전 재결정 열처리를 수행하기 위한 고사양 열처리로는 국내 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 고사양 열처리로 인프라의 부재를 극복하기 위해 극저온(-175 ~ -100) 범위에서 극저온 압연(cryo-rolling, CR)을 통해 완전 재결정을 위한 재결정 온도를 감소시키고자 하였다. 초기 5mm의 두께를 갖는 Ta-10W 합금 판재를 4단롤 압연기를 이용하여 각각 20%, 40%, 60% 및 80% 압하율로 상온 압연(room temperature rolling, RTR) 및 극저온 압연을 수행하였다. 60% 및 80% 압하율로 상온 및 극저온 압연된 Ta-10W 합금 판재는 고진공 열처리로(high vacuume furnace)에서 1,200 ~ 1,500까지 100 간격으로 1시간 소둔하였다. EBSD를 활용하여 상온 및 극저온 압연된 Ta-10W 합금의 변형 미세조직과 소둔 후 Ta-10W 합금의 재결정 미세조직을 관찰하였다. 상온 및 극저온 압연 시 압하율에 따른 Ta-10W 합금의 축적 에너지(stored energy, SE), KAM 및 GND 맵을 비교 분석하여 압연 온도에 따른 변형 거동을 이해하였다. 상온 및 극저온 압연재의 소둔 열처리 온도에 따른 재결정 거동을 분석하기 위해 비커스 경도(Vickers hardness, HV) 및 GOS 분포를 분석하였으며, 이를 통해 재결정 온도(recrystallization temperature) 및 재결정 분율(recrystallization fraction)을 비교하였다.

[P31-7]

고해상도 전기화학 분석을 위한 초미세전극 제작 및 응용: 조영준, 김영서, 신한균, 김정한* (동아대학교)

Keywords: 반도체, 촉매, 전기화학, 초미세전극, 분해능

최근 반도체, 이차전지, 금속 부식, 촉매 반응 등 다양한 분야에서 전기화학 반응 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 전기화학 반응 연구는 금속 표면의 미세구조 및 결정학적 특성을 고려하지 않고, 화학적 조성에 의해 결정되는 반응으로 간주되어 왔다. 그러나 반도체 및 이차전지의 크기가 나노미터(nm) 혹은 마이크로미터(μm) 수준으로 축소됨에 따라, 전기화학적 특성이 결정립의 크기 및 결정방위에 의해 크게 영향을 받을 것으로 예상된다. 이에 따라, 기존의 flat cell 및 rotating disk electrode (RDE)와 같이 다수의 결정립을 포함하는 넓은 영역을 분석하는 방법보다, 보다 높은 분해능을 갖춘 전기화학적 측정 기법이 요구된다. 초미세전극은 낮은 IR 전압강하, 높은 감도, 낮은 전기 이중층 충전 전류 등 여러 장점을 보유하고 있어, 고해상도 전기화학 분석에 적합한 도구로 주목받고 있다. 본 연구에서는 전기화학 분석의 공간적 분해능을 향상시키기 위한 초미세전극 제작 및 활용에

대해 연구하였다. 레이저 풀러(Laser Puller)의 매개변수(Heat, Filament, Velocity, Delay, Pull)를 최적화하여 초미세전극을 제작하였으며, 이를 이용하여 고분해능 전기화학 분석의 가능성을 검증하였다. 본 연구는 향후 나노 및 마이크로 스케일 전기화학적 특성 연구에 기여할 것으로 기대된다.

P32 : 타이타늄
Room 3층 로비, 4월 25일

[P32-1]
Ti-Nb-Zr-X 합금에서의 Gum metal 특성 평가: 이혜미, 김재일* (동아대학교)
Keywords: Gum metal, β형 Ti-based 합금, 타이타늄 합금, cycle test

Saito et al. (2003)에 의해 처음 제안된 Ti-23Nb-0.7Ta-2Zr-0.12O(at%)로 구성된 β-Ti 합금인 Gum metal은 독성이 없는 IVa 및 Va족 원소와 산소로 구성되어 있으며 비선형적 탄성거동, 고강도, 초탄성, 저탄성계수의 물성을 지닌 합금이다. 일반적인 금속재료에서 보기 힘든 독특한 특징으로 인해 생체재료 및 항공우주산업에서의 잠재적 응용 가능성으로 인해 주목받고 있다. Gum metal은 다음의 조건을 만족한다. (i) 평균 화학 조성에 따른 원자가 전자 수(e/a 비율) 약 4.24~4.30, (ii) 결합 강도를 나타내는 결합차수(Bo 값) 약 2.80~2.87, (iii) 전기음성도를 나타내는 "d" 전자-orbital 에너지 수준(Md 값) 약 2.40~2.50 eV. Gum metal의 기계적 물성 향상을 위해 조성 변화 및 제6원소 첨가 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 기존 합금 구성을 대체하여 다른 원소를 첨가할 때의 특성 재현성에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다. Ta는 고융점 원소로서 대용량 용해 및 응고 시 조성 불균일이 발생할 우려가 있고, 가격 상승의 주된 원인으로 산업현장에서의 적용 측면에서 어려움이 있다. O는 함량이 증가할수록 탄성계수를 높이는 반면 고용강화 효과를 통해 강도를 향상시키는 데 기여하며, Gum metal의 고유한 특성을 구현하는 데 핵심적인 역할을 한다. 본 연구에서는 기존의 Gum metal에서 Ta을 대체하여 산소를 포함한 제4원소를 첨가한 Ti-Nb-Zr기 합금에서의 Gum metal 특성을 평가하고자 하였다. βsp 안정화 원소만을 첨가하여 Ti 합금에서 βsp 영역을 넓히고, αsp 석출을 억제하여 안정적인 고강도 및 초탄성을 조사하였다. 진공 아크 용해로를 통하여 Ti-20Nb-5Zr-X (X= Mn, Co, V, Mo) 합금을 용해하였고 냉간압연 후 방전가공을 통해 시편을 커팅하였다. Ar 분위기에서 진공 봉입 후 다양한 온도에서 열처리 진행 후 퀜칭하였고, 합금의 초탄성 및 강도를 조사하기 위하여 Tensile Test (Fracture Test, Cycle Test) 수행하였다. 이후 EBSD를 통해 집합조직을 분석하였다.

[P32-2]
The Microstructural and Mechanical Evolution of $Ti_{80}Cr_{20}$ Alloy During Cold Rolling: Muhammad Aoun Abbas, Dilshodbek Yusupov, Gyeol Chan Kang, Ga Eun jo, Yu Jin Lee, Dong sung Hong, Sung Hwan Hong, Hae Jin Park, and Ki Buem Kim* (Sejong University)
Keywords: Titanium Alloy, Deformation, Rolling, precipitation hardening

Titanium alloys are widely utilized across various industries, including biomedical, automotive, and aerospace applications, due to their exceptional mechanical properties. These materials offer advantages such as corrosion resistance, biocompatibility, low density, and high strength-to-weight ratio. Compared to other titanium alloys, beta-titanium alloys exhibit several key benefits, including lower density, heat treatment adaptability, superior plasticity, and enhanced corrosion resistance. Furthermore, they demonstrate high mechanical strength and excellent cold workability. In this study, $Ti_{80}Cr_{20}$ alloys were synthesized using a Ti-gettered arc melting process under a high-purity argon atmosphere. The raw materials, comprising high-purity titanium, and chromium (99.95 wt% purity), were melted and cast into a copper mold with dimensions of 5 mm × 5 mm × 50 mm. The resulting samples were subjected to cold water quenching at 900ºC for one hour, followed by cold rolling at deformation levels of 20%, 40%, 60%, and 80%. The phase composition and microstructural characteristics of the as-cast samples were analyzed using X-ray diffraction (XRD) with Cu Kα radiation and scanning electron microscopy (SEM). Mechanical properties were evaluated using Rockwell hardness testing. SEM analysis revealed that the as-cast alloy exhibited a coarse microstructure, while cold water quenching promoted the formation of dark precipitates. The volume fraction of these precipitates increased with higher deformation levels. However, XRD analysis was unable to conclusively detect these precipitates, likely due to their small volume fraction. Additionally, an increase in hardness and dislocation density was observed with increasing deformation, indicating a direct relationship between cold rolling and microstructural refinement. In summary, the cold rolling process significantly enhanced the hardness of the $Ti_{80}Cr_{20}$ alloy, primarily due to increased dislocation density and the progressive formation of precipitates, thereby confirming the metallurgical transformations induced by deformation.

[P32-3]
저비용 고강도 Metastable β 타이타늄 합금 설계 및 미세조직 제어 연구: 주재성 (한국재료연구원, 고려대학교), 홍재근, 김재혁* (한국재료연구원), 손석수* (고려대학교)
Keywords: 타이타늄, metastable β, 단조, 압연, 열처리

타이타늄은 높은 비강도와 우수한 내식성으로 인해 국방, 항공우주, 에너지 등 다양한 산업에서 핵심 구조재료로 사용되고 있다. 특히, 최근에는 타이타늄 상의 안정성을 조절하여 다양한 미세조직을 구현하고 기계적 특성을 극대화할 수 있는 metastable β 타이타늄 합금에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전통적으로 βsp 안정성 제어를 위해 Mo, Nb, V 등의 β-isomorphous 원소가 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 β-eutectoid 원소(Fe, Mn 등)를 첨가하여 결정립 미세화를 유도하고 강도를 향상시키는 연구가 증가하고 있다. 하지만, β-eutectoid 원소는 eutectoid 반응을 통해 높은 분율의 2차상을 형성하므로, 이를 효과적으로 제어하기 위해서는

적절한 합금 원소 선정, 조성 범위 설계, 맞춤형 용해 공정, 소성가공 공정 및 후열처리 설계가 필수적이다. 본 연구에서는 타이타늄 합금 내에서 결정립 미세화 효과가 크고, eutectoid 반응을 통해 형성되는 2차상을 효과적으로 제어할 수 있으며, 경제성이 뛰어난 Co를 주 합금 원소로 선정하였다. 또한, β상 안정성 조절과 강도향상을 위해 Al 및 Si을 함께 첨가하여 Ti-Al-Co-Si 합금계를 설계하였다. 합금 개발을 위해 Plasma Arc Melting을 이용하여 시험편을 용해한 후, 합금 원소의 편석을 최소화하고 2차상 분율을 효과적으로 조절하기 위해 최적의 단조 및 압연 공정을 설계하였다. 이후, 후열처리 온도를 조절하여 full martensite, metastable β, bimodal, equiaxed 조직을 구현하였으며, 각각의 미세조직 변화가 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, β-eutectoid 원소인 Co의 첨가가 결정립 미세화를 유도하여 강도를 향상시키는 동시에, β상의 안정성과 α/β상의 형상 및 분율 변화에 따라 높은 강도 및 연신율을 구현할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 저비용 metastable β 타이타늄 합금은 기존 고강도 Ti 합금 대비 경제성과 기계적 특성을 동시에 향상시킬 수 있는 새로운 가능성을 제시하며, 향후 타이타늄 기반 부품의 강도 향상 및 산업적 응용 범위를 확대하는 데 기여할 것으로 기대된다.

[P32-4]

적층제조 Ti-6Al-4V 합금의 격자 구조 및 제조 공정이 압축 특성에 미치는 영향: 박윤지 (국민대학교), 강성규 (경상국립대학교), 성효경* (국민대학교)

Keywords: Ti-6Al-4V, 적층제조, 격자구조, 압축거동

Ti-6Al-4V 합금은 높은 강도 대비 낮은 밀도, 우수한 내식성 및 생체적합성 등 우수한 특성을 갖추고 있어 항공, 생체 의료 및 첨단 산업에서 폭넓게 활용되고 있다. 특히 적층 제조 기술의 발전과 함께 격자 구조를 적용한 경량화 설계가 주목받고 있다. 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금을 L-PBF(Laser Powder Bed Fusion) 및 EBM(Electron Beam Melting) 방식을 이용하여 Auxetic, Dode-thin, Tesseract 격자 구조체를 제작하고, 제조 공정 및 격자 형상에 따른 기계적 특성을 비교·분석하였다. 압축 실험을 통해 두 공정에서 제조된 격자 구조체의 압축 하중에 따른 변형 거동을 평가하였다. Auxetic 구조는 음의 푸아송비를 기반으로 굽힘과 신축 변형을 균형적으로 활용하며, 우수한 에너지 흡수 성능을 나타냈다. Dode-thin 구조는 초기 하중 구간에서 굽힘 우세 거동을 보이다가 하중이 증가함에 따라 신축 우세 거동으로 전환되면서 점진적으로 강도와 강성이 향상되었다. Tesseract 구조는 내부 스트럿의 축 하중 전달이 효율적으로 이루어져 초기 변형 단계부터 하중을 효과적으로 견디며, 균일한 응력 분포를 통해 높은 항복 강도를 보였다. 압축 변형 후에는 SEM 및 EBSD 분석을 통해 미세조직 변화를 평가하고, 공정에 따른 조직 차이를 정량적으로 비교하였다. 본 연구를 통해 적층 제조 방식과 격자 구조에 따른 Ti-6Al-4V 합금의 압축 특성에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였으며, 이를 바탕으로 항공 및 고성능 구조체 설계에 필요한 최적의 격자 설계 전략을 제시하며 격자 구조를 활용한 항공기 부품 개발에 중요한 기초 데이터를 제공할 것으로 기대된다.

[P32-5]

낮은 탄성계수를 가지는 Ti-(14-2x)Nb-(6+x)Sn (x=0.5, 1, 1.5) (at.%) 합금 설계: 남태현*, 구태균, 김수영 (경상국립대학교)

Keywords: 타이타늄, 생체재료

TiNi 합금은 우수한 형상기억효과 및 초탄성을 가지는 합금으로 생체재료분야에서 많이 활용되고 있다. 그러나 TiNi 생체재료를 체내에 삽입했을 때 발생하는 Ni 이온의 용출이 알러지 및 염증반응을 일으킬 수 있는 가능성이 있다. 또한, 뼈의 탄성계수에 비해 상대적으로 높은 탄성계수로 인하여 응력차폐효과가 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 생체재료로 사용가능한 Ni-free β Ti 합금이 연구되었다. 그 중 Ti-Nb 합금은 상온에서 초탄성과 형상기억특성을 보였다. 해당 합금계에 Sn을 첨가할 경우 Ms 온도를 낮추고 ω 상의 형성을 억제한다는 보고가 있었고, 이에 따라 상온에서 초탄성을 보이며 낮은 탄성계수를 가질 것이라 예상되는 Ti-(14-2x)Nb-(6+x)Sn (x=0.5, 1, 1.5) 합금을 설계하였다. 따라서 본 연구에서는 설계된 합금의 탄성계수를 조사하고 낮은 탄성계수를 가지는 원인에 대한 다양한 분석을 하였다. Ti 합금계에서 탄성계수에 미치는 다양한 원인을 조사하였다.

[P32-6]

PEM 연료전지 분리판용 티타늄 판재의 전도성 탄소코팅 특성: 김성욱*, 장경현, 천창근 (포항산업과학연구원(RIST)), 고성훈, 김대성 (테라릭스), 이동준 (디에스피)

Keywords: PEM fuel cell, Titanium sheet, Bipolar plate, Carbon coating, Press forming

PEM(Proton Exchange Membrane) 연료전지는 자동차를 비롯한 모빌리티, 전력 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 분리판은 MEA, GDL 등과 함께 연료전지를 구성하는 중요한 구성요소이며, 연료와 산화제가 전극 표면으로 균일하게 분포되도록 돕고, 전기적인 연결을 제공하며, 열 분산을 통하여 셀의 온도를 일정하게 유지하는 역할을 한다. 기존 분리판은 탄소 소재를 주로 사용하였으나, 강도 및 두께, 대량생산의 용이성 등으로 금속 분리판이 많이 적용되고 있으며, 특히 경량화 및 내식성 향상의 목적으로 티타늄 판재도 활용 중이다. 금속 분리판에 전도성을 부여하기 위한 방안으로 스테인리스강은 표면에 금도금을 하거나, 티타늄은 백금도금을 하여 사용 중이나, 귀금속 코팅의 비용증가로 인하여 저가 전도성 물질로의 대체를 시도하고 있다. 탄소는 전도성을 부여하는 경제적인 코팅물질로 티타늄의 표면에 PVD 진공증착을 통하여 박막을 구현할 수 있다. 본 연구에서는 분리판용 티타늄 판재 표면에 PVD공정을 통하여 탄소를 진공증착한 후 프레스 후가공을 통하여 전도성 및 내식성과 함께 코팅의 박리특성 등을 파악하고자 하였다. 적용된 티타늄 판재의 두께는 80 um이며, 탄소 코팅층은 시간제어를 통하여 30~70 nm의 두께를 형성하고 있는 것으로 확인하였다. 코팅판재에 대한 접촉저항 및 내식성 측정결과, 연료전지 특성을 만족하는 것으로 평가되었다.

[P32-7]

유효변형량 및 열처리 조건에 따른 Ti-62222S 합금의 미세조직 평가: 허형민, P.L. Narayana, 최재영* ((주)에이치브이엠)

Keywords: Ti62222S, 열처리, 유효 변형량, 미세조직, 기계적 물성

Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.2Si (Ti-62222S) 합금은 Ti-6Al-4V (Ti-64) 합금보다 고온 및 상온에서 우수한 기계적 특성을 보이며, 항공기 엔진 부품 및 가스 터빈 블레이드와 같은 항공 우주 및 발전소 부품에 유망한 소재로 평가받고 있다. 그러나 Ti-62222S 합금에 대한 연구는 상대적으로 부족하며, 미세조직과 기계적 물성 간의 관계는 아직 명확하게 규명되지 않았다. 본 연구에서는 Ti-62222S 합금의 유효 변형량과 열처리 조건이 미세조직 및 경도에 미치는 영향을 조사하였다. 연구에 사용된 소재는 β 단조 후 α-β 영역에서 열간 압연하였으며, 용체화 열처리는 α-β 상 영역 내에서 수행하였다. 압연 및 열처리에 따른 유효 변형량(단면 감소율)과 미세조직의 변화를 체계적으로 조사하였다. 그 결과, 합금은 primary α 상과 transformed α-β 층상 구조를 가지는 듀플렉스 미세조직을 형성하였다. 그러나 유효 변형량의 감소 함에 따라 primary α 상의 형태가, 구형에서 판상형으로 변화하는 것이 관찰되었다. 또한, 시효 온도가 미세조직과 경도에 미치는 영향도 평가하였다. 이러한 결과는 Ti-62222S 합금의 가공-미세조직-물성 관계를 최적화하는 데 중요한 기초 데이터를 제공할 것으로 기대된다.

[P32-8]

전자빔 용해 공정변수 제어를 통한 타이타늄 스크랩 불순물 제어 기술 개발: 임연민, 김정균 ((주)에이치브이엠), 원종우, 현용택 (한국재료연구원), 최재영* ((주)에이치브이엠)

Keywords: 타이타늄, 스크랩, 전자빔 용해, 재소재화

타이타늄은 높은 비강도, 내부식성 및 생체적합성으로 인해 항공우주, 국방, 화학플랜트, 의료 및 기타소비재에 많이 사용되고 있다. 하지만 국내 타이타늄 매장량 및 제련기술 부족으로 인해 타이타늄 원재료는 전량 수입에 의존하고 있으며, 우주 항공 분야 수요가 크게 늘어나면서 수입단가 또한 가파르게 상승하고 있다. 또한 타이타늄은 제조원가가 타 구조 재료와 비교하여 매우 고가이며, 1 kg의 타이타늄을 생산하는데 철강재 보다 상대적으로 더 많은 에너지가 소요되므로 외국의 경우 타이타늄 스크랩 재소재화 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 국내의 경우 용해기술 및 설비 부재로 인해 타이타늄 스크랩의 경우 재소재화 되지 못하고 해외로 역수출이 일어나고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 타이타늄 스크랩을 재소재화 하는 용해기술 개발이 반드시 필요한 실정이다. 전자빔을 활용한 용해공정은 높은 열원 및 고 진공하에서 용해가 진행되므로 타이타늄 스크랩 내 가스 및 불순물을 제어하여 고순도의 잉곳으로 재 소재화 할 수 있는 용해 기술로 알려져 있다. 따라서 전자빔 용해공정 변수 제어를 통하여 타이타늄 스크랩 내 가스 및 금속 불순물 제어기술 개발을 진행하고자 한다. 본 연구에서는 전자빔 용해 공정변수 제어(전류, 용해시간)를 통해 300(W) X 550(L) X 40(T)의 잉곳을 제조 하였으며, 전자빔 용해 전과 후의 대표적인 가스불순물인 N/O 함량 분석을 진행 하였다. 또한 용해공정 변수 제어(전류, 용해시간)를 통해 제조된 타이타늄 잉곳의 금속 불순물 함량 변화를 GDMS(Glow Discharge Mass Spectrometry)를 통하여 분석 하였다.

P33 : 가공-주조 및 응고
Room 3층 로비, 4월 25일

[P33-1]
열간 단조에 의한 고망간 주조재의 미세구조 및 기계적 특성 변화 분석: 이승희, 박지원 (동아대학교), 김용래 ((주)영신특수강), 강신곤* (동아대학교)
Keywords: 고망간강, 편석, 탄화물, 열간 단조, 오스테나이트

고망간강(High Mn Steel)은 비자성 오스테나이트계 철강 소재로 우수한 극저온 인성과 인장 강도를 제공하며, 니켈 합금강 및 스테인리스강 대비 경제성과 연성을 갖추고 있어 극저온 저장 탱크 및 해양 구조물 등 다양한 분야에서 활용된다. 극저온 환경에서의 구조적 신뢰성을 확보하기 위해서는 균질한 미세조직과 우수한 기계적 특성이 필수적이다. 현재 고망간강은 주로 판재 형태로 제조되지만, 판재로 가공할 수 없는 일부 부품은 주조 공정을 통해 생산된다. 그러나 주조 공정으로 제조된 고망간강은 원소 편석 및 불균일한 미세조직이 형성될 가능성이 있다. 특히, 원소 편석은 탄화물(Chromium Carbide)의 석출을 촉진하고 오스테나이트 안정성을 저하시켜 입실론(ε) 마르텐사이트 형성을 유도하여 극저온 환경에서 인성 저하로 인한 취성 파괴를 초래할 수 있다. 이에 본 연구에서는 고망간 주조재를 열간 단조하여 미세조직의 균질화 및 기계적 특성 향상을 확인하였다. 미세구조 분석을 위해 XRD, OM, SEM/EDS, EBSD, EPMA를 활용하였으며, 기계적 특성은 경도시험 및 인장시험을 통해 평가하였다. 연구 결과, 주조재와 단조재 모두 오스테나이트 단상 조직을 유지하나, 상이한 미세구조를 가지는 것으로 관찰되었다. 주조재는 주상정 수지상(Columnar Dendritic) 조직을 나타낸 반면, 단조재는 열간 단조에 따른 회복 및 재결정으로 등축정(Equiaxed) 조직을 형성하였다. 또한, 주조재의 수지상간(Interdendritic) 영역에서 망간(Mn)과 크로뮴(Cr) 등에 의한 원소 편석이 발생하였고, 이로 인한 크로뮴 탄화물이 형성도 확인하였다. 그러나 열간 단조를 수행한 단조재의 경우에는 크로뮴 탄화물이 관찰되지 않았는데, 이는 확산에 의해 원소 분포가 균일해지면서 탄화물이 해소된 것으로 보인다. 더불어, 재결정으로 인한 Hall-Petch 효과 및 편석 완화에 따라 단조재는 주조재 대비 경도 및 강도가 향상됨을 확인하였다.

[P33-2]
주철의 몰드 재질 및 냉각 속도에 따른 미세조직과 기계적 특성 변화 연구: 홍지우, 하진수, 장진석, 최창영, 송혜진, 정유현, 조용재* (한국생산기술연구원)
Keywords: 주철, 몰드재질, 냉각속도, 미세조직

주조 공정에서 몰드 재질 및 냉각 속도는 미세조직과 기계적 특성에 중요한 영향을 미친다. 몰드 재질은 열전도율 및 열확산 계수와 같은 열물성에 의해 주철 내부의 열 흐름과 온도 구배를 조절하며, 이에 따라 응고 과정에서 구상 흑연의 형성과 성장 속도가 달라진다. 결과적으로 몰드의 열전달 특성이 흑연의 형상, 크기 및 분포에 직접적인 영향을 미치게 된다. 낮은 열전도율을 보이는 몰드는 완만한 냉각을 유도하여 흑연이 큰 입자로 형성되고 불규칙하게 분포할 가능성이 있는 반면, 열전도율이 높은 몰드는 빠른 냉각을 유도하여 미세한 흑연 입자가 구상화된 형태로 균일하게 분포되도록 한다. 이러한 미세조직의 변화는 주철의 인장 강도와 연성 등 기계적 특성에 큰 영향을 미치며, 일반적으로 냉각 속도가 빠를수록 인장 강도와 연성이 향상되는 경향을 보인다. 다만, 지나치게 빠른 냉각은 내부 잔류 응력을 초래하거나 조직 결함을 유발할 수 있으므로 최적의 냉각 조건을 도출하는 것이 중요하다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 자연사와 인공사의 비율 변화에 따른 냉각 거동 및 흑연의 형상, 크기, 분포 변화를 평가하였다. 실험은 자연사 100%, 자연사 50% + 인공사 50%, 인공사 100%의 세 가지 조건에서 수행되었으며, 각 조건에 대해 두께가 5~25 mm인 계단 시편을 제작하여 두께에 따른 냉각 속도의 변화를 관찰하였다. 또한, 몰드 재질에 따른 열전도율 차이를 분석하기 위해 열전대(Thermocouple)를 설치하여 시편 내부의 온도 변화를 실시간으로 측정하였고, 인장시험을 통해 기계적 특성을 평가하고 SEM 및 광학현미경을 이용하여 냉각속도와 미세조직 간의 상관관계를 분석하였다.

[P33-3]
아크멜팅 공정을 통한 3원계 불활성 전극 소재 제조 및 분석: 이세영, 김현우, 김기홍, Ri Vladislav, 우화영, 김완규* ((주)케이에스엠테크놀로지)
Keywords: 불활성 전극, Inert electrode, 전해제련, 3원계합금

마그네슘은 구조용 금속 중에서 가장 가벼운 금속으로 높은 비강도, 우수한 주조성과 기계 가공성, 전자파 차폐능 등 뛰어난 특성으로 인해 수송기기, 전자제품, 군수용품 등 다양한 분야에 널리 사용되고 있다. 마그네슘 상용 제련기술은 크게 피쥬법과 전해법으로 구분할 수 있다. 피쥬법은 환원 시 다량의 CO_2가 발생하여 환경부하가 큰 공정이다. 이에따라 친환경적인 전해제련 기술이 대두되고 있다. 전해제련의 핵심기술 중 하나는 양극 개발에 있다. 기존 전해제련법에 사용되는 양극 소재는 고가의 소재이며, 열충격에 약하고, 용융염에 용해된 마그네슘 금속과의 반응 및 용융염에 의한 침식 등으로 인해 열화되는 단점이 있다. 따라서 불활성 전극(inert electrode) 소재를 개발하려는 다양한 시도가 있다. 불활성 전극소재는 전기화학 반응에 직접 참여하지 않고 전자만 운반하는 소재로 백금 및 금 등 안정적인 소재가 주로 쓰여왔고, 최근에는 1,000 K 이상의 높은 온도에서 전기화학적 반응이 가능한 불활성 전극 소재 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 알루미늄 용융염 전해에 사용되는 대표적인 불활성 전극인 Fe-Ni 합금 시스템을 기반으로 전기적 특성과 안정성을 갖는 3원계 전극을 2종을 설계하였다. 설계한 3원계 합금 전극을 상용공정과 아크멜팅을 통해 제조하여 전극의 표면 및 단면을 SEM-EDS 분석을 통해 전극 미세조직 및 합금 균일도를 평가하였다.

[P33-4]

Ti 전해정련용 CuTi 합금 전극 제조를 위한 열환원 공정에서 발생되는 잉곳-몰드 간 융착 연구: 박선영, 이세영, 김가민, 이병건, 김현우* ((주)케이에스엠테크놀로지)

Keywords: 열환원, 주조, 금속몰드, CuTi합금, 융착

크롤 공정은 60년대에 개발되었으며 티타늄 생산의 주요 상업적 공정으로 남아 있다. 티타늄 스펀지의 대량 생산은 확립되었지만 높은 에너지 소비, 독성 및 높은 온실가스 배출, Fe 오염 티타늄 스크랩 발생 등의 단점은 여전히 해결되지 않았다. 따라서 지난 수십 년 동안 많은 연구자들이 티타늄 생산을 위한 대체 방법을 개발하려고 시도했으며, 전기 정련도 이러한 방법 중 하나이다. 당사에서 수행중인 친환경 티타늄 생산 공정은 크게 CuTi 열환원, $TiCl_2$ 전해질 제조, Ti 전해정련 3단계로 나누어지며, CuTi 열환원은 TiO_2 산화물로부터 금속 환원제를 적용하며 CuTi 합금을 만들고, 전해질은 $TiCl_2$-NaCl-$CaCl_2$를 직접 제조하여 사용한다. 마지막으로 Ti 전해정련에서는 CuTi 열환원 합금을 양극으로 사용하고, $TiCl_2$ 전해질 조건에서 전류를 인가하여 음극에 Ti metal powder를 전착시키는 공정이다. 이후 후처리를 통해 Grade 1 수준의 Ti powder를 회수한다. 본 연구에서는 위 공정 중 열환원 공정에서 발생되는 CuTi 합금 잉곳과 금속 몰드 간의 융착 현상에 대해 실험을 진행하였다. 실험 조건은 Ti의 weight 함량을 5%, 7%, 10%, 20%로 구분하여 합금 출탕 후 몰드에서 냉각시켜 각 함량별 융착여부를 확인하였고, 합금-몰드 융착 단면부를 SEM-EDS를 통해 분석하였다. 이를 통해 CuTi 합금과 금속 몰드간의 융착 발생 조건을 도출하였다.

[P33-5]

진공정밀-원심주조 방식으로 제작된 항공기용 TiAl 저압 터빈 블레이드 부품의 Flow-3D를 이용한 주조해석: 이강래* (한국생산기술연구원(KITECH))

Keywords: 진공정밀원심주조, 저압터빈블레이드, TiAl, 주조해석, Flow-3D

터보팬 항공엔진 일부 부품들은 가동 시 고온, 고압, 고속 운전환경에서 내구성과 내열성, 경량화 등의 요구사항을 충족시키기 위해 주로 TiAl 합금 소재의 적용이 필요하다. TiAl합금은 비중이 4.0~4.5 g/cm^{3}로 Ni 대비 45% 수준으로 낮아 가볍고, 비강도가 구조용 소재 중 월등히 높아 해외 항공엔진의 압축기 및 저압터빈 블레이드, 압축기 케이스 등 항공소재로 적용하기 위한 연구개발 및 적용이 이루어지고 있다. 그러나, TiAl합금의 높은 고온반응, 상온취성 및 난가공성 소재로 제작 난이도가 매우 높아 국내에서는 기술부재로 항공엔진 부품에 적용 사례가 전무하다. 본 연구에서는 TiAl 소재를 터보팬 항공엔진용 저압터빈블레이드 제작에 적용하기 위하여, 진공정밀-원심주조 방식으로 TiAl 터빈블레이드를 제조하고자 하였다. 실제 주조 전에 공정조건 등에 대한 기초자료를 확보하기 위하여 다양한 주조방안에 대한 주조해석을 실시하였다. 이를 통해 주요 공정조건을 설정할 수 있었고, 주조용탕의 충전양상 및 불량발생 요인을 먼저 파악할 수 있었다. 주조해석은 Flow-3D를 이용하였으며, 주조해석에 필요한 TiAl 소재의 물성치를 조사하여 적용하였고, 터빈 블레이드 정밀주조모형의 모델링을 Flow-3D Cast 모듈로 제작하였다.

P34 : 항공재료
Room 3층 로비, 4월 25일

[P34-1]

단결정 초내열합금 CMSX-8의 결정방위에 따른 크리프 거동: 장익제, 조대현 (국립창원대학교), 구지호 (두산에너빌리티(주)), 정중은, 김인수 (한국재료연구원), 이재현* (국립창원대학교)

Keywords: Superalloy, Creep anisotrophy, Single Crystal, CMSX-8

니켈기 초내열합금은 우수한 고온 특성으로 인해 가스터빈 블레이드나 고온 부품에 활용되며, 특히 Re(레늄)는 합금의 세대를 구분할 정도로 중요한 원소이다. 그러나 높은 비용과 공급 불안정성으로 인해 Re의 함량을 줄이면서도 합금의 성능을 유지하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 3.0wt% Re를 함유한 2세대 초내열합금 CMSX-4에서 Re 함량을 절반으로 줄인 CMSX-8이 개발되었다. 터빈 블레이드는 고온/고응력 환경에서 장시간 사용되므로 크리프 특성이 주요 평가 기준이며, 응력 방향에 따라 크리프 수명 차이가 크다. 본 연구에서는 1.5wt% Re를 포함한 CMSX-8 단결정 합금의 <001> 및 <111> 방위에서 크리프 거동을 분석하였다. 저온(750ºC) 조건의 경우 <001> 방위에선 1~3차 크리프 단계 및 긴 수명을. <111> 방위에서는 매우 짧은 1~2차 크리프 단계와 3차 크리프 단계, 그리고 짧은 수명을 확인하였다. 950ºC에서는 두 방위 모두 3차 크리프 거동을 보였지만, <111> 방위의 수명이 <001> 방위보다 길었음을 확인하였다.

[P34-2]

Inconel 718 격자 구조의 기계적 특성 평가를 위한 압축 거동 및 미세조직 분석: 정다은, 성효경* (국민대학교), 이경준, 강성민 (가천대학교)

Keywords: Ni-base superalloy, Lattice structure, Laser powder bed fusion, Additie manufacturing

Inconel 718은 Ni 기반 초합금으로서 우수한 내식성과 내열성을 보유하고 있어 항공 엔진 및 터빈 블레이드 등 고온 환경에서 널리 활용되는 소재이다. 그러나, 벌크 형태로 사용될 경우 중량 증가로 인해 연료 효율이 저하될 수 있어 경량화가 필수적이다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 Laser Powder Bed Fusion(LPBF) 적층 제조 공정을 활용하여 격자(Lattice) 구조를 적용한 부품을 제작하였다. LPBF 기술을 사용함으로써 기존의 주조 및 절삭 가공 방식과는 달리 복잡한 형상의 격자 구조를 정밀하게 구현할 수 있었으며, 이를 통해 미세조직을 조절하여 기계적 성질을 향상시킬 수 있었다. 또한, Lattice 구조를 적용함으로써 기계적 강도를 유지하면서도 중량을 감소시킬 수 있었으며, 내부 기공률을 조절하여 열 방출 성능을 최적화할 수 있음을 확인하였다. 압축시험을 통해 Dode-thin, Tesseract, Auxetic의 세 가지 격자 구조를 비교 분석한 결과, 초기 강도는 Tesseract, Auxetic, Dode-thin 순으로 높게 나타났다. 추가적으로, EBSD(전자 후방 산란 회절) 분석을 수행하여 각 구조의 파단면 미세조직을 확인하고 변형 메커니즘을 규명하였다. 또한, 극한 환경에서의 응력 분포 및 변형 거동을 정량적으로 예측하기 위해 FEM(유한요소해석)을 수행하였다. 해석 결과, 일부 구조에서는 실험값과 FEM 결과가 높은 일치도를 보였으나, 좌굴 및 파단이 발생한 경우 추가적인 조정이 필요하였다. 좌굴에 의한 차이는 마찰계수 및 경계 조건을 조절하여 강제 좌굴 현상을 모사함으로써 보정하였으며, 파단의 경우 Fracture Strain 및 Fracture Energy 값을 조정하여 실험과 유사한 결과를 도출하였다. 본 연구를 통해 LPBF 공정을 이용하여 제작된 Inconel 718 격자 구조가 항공기 부품으로 적용 가능함을 입증하였다. 연구 결과는 항공 엔진 및 고온 환경에서 요구되는 구조재의 경량화와 기계적 성능을 동시에 충족하는 설계 전략을 제시하며, 향후 실제 부품 적용을 위한 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

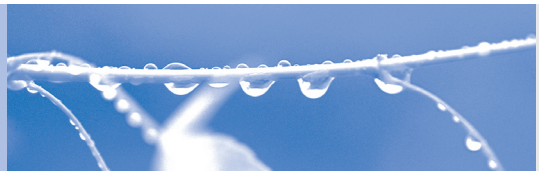
[P34-3]

항공용 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Ingot/Billet 국산화에 대한 연구: 주경준*, 손희영, 이기영* (케이피씨엠), 손인수, 주영규, 오승철 (한화에어로스페이스)

Keywords: 항공용 엔진소재, 타이타늄, Ti-6242, Ingot, Billet

정부는 항공엔진 국산화의 선결조건으로 관련 소재부품 개발을 추진하고 있다. 타이타늄 및 타이타늄 합금은 높은 비강도와 우수한 내식성 등 다양한 열처리 조건을 적용하여 항공용 엔진 소재로 많이 사용되어 지고 있다. 특히 Ti-6242 합금은 높은 고온강도와 우수한 크립 저항성으로 인해 항공엔진 핵심소재로 사용되어 지고 있다. 본 과제에서는 항공용 Ti-6242 소재 국산화를 위해 Ingot/Billet 제조기술 선행연구를 수행하였다.

발표자 색인



ㄱ

강결찬 P6–7,상변태3–5
강다연 P7–8
강동현 P30–7
강민우 P23–16
강민재 적층5–7
강민정 P21–1
강민지 P10–9
강민철 계층구조1–1
강석우 P12–39
강성 분석1–1
강성규 역학2–5
강성훈 소프트3–3
강순형 P16–12
강승연 P2–11
강재동 수소3–2
강정신 희소1–2,전략1–2
강종윤 정책1–1
강주희 집합1–5, 융복합1–2
강창민 적층1–3
강청아 알루미늄4–1
강태욱 P5–16
강태훈 P9–9
강헌 순환2–2
강현기 계층구조1–6
강현수 항공엔진4–3
강현식 표면계면1–3
강호성 적층2–4
강홍구 P14–5
강효주 피로1–2
강희재 고온3–1
고성철 타이타늄2–4
고세진 용접1–4
고원석 전략4–3
고은비 P12–23
고은찬 P30–6,P1–7
고의준 비철2–2
고재훈 P5–2
고준우 P12–19
고태영 P17–4
고혜리 P28–11
공 미즈니몰 P27–7
공종판 철강A3–4
곽다희 철강B4–5
곽대영 P18–11
곽동욱 P25–3
곽륜호 수소2–5
곽윤서 P4–10
곽정훈 광전자3–3
곽종민 적층6–6,P13–13
곽지윤 P29–4
곽태준 철강B4–6
구본우 고엔1–3
구태균 P32–5
구현수 항공3–1
권경중 재활용1–2
권남훈 희소2–8
권도훈 P11–5,역학2–3
권동영 P8–6
권민지 P4–11,P3–3
권시은 P13–5
권영제 철강A2–4
권예진 소형3–4
권용남 KC3–1
권택규 복합1–4
권한솔 표면처리2–5
권혁민 P10–5
권혁준 피로4–1
권홍기 P9–13
권희준 표면처리1–4
금동일 P6–1
길희진 P8–13
김가영 P27–8
김강휘 마그넷1–3
김건욱 피로2–5
김경인 P18–9
김경일 P13–36
김관호 P3–4
김광수 인공4–3
김규림 P3–21
김규원 P12–42
김규헌 철강A2–2
김기수 기술3–3
김기연 SS3–7
김기원 철강B2–5
김기현 P16–11
김나영 P7–3
김다흰 광전자2–1
김대욱 P1–28
김대원 재활용1–3,용접3–6
김대현 P5–13,적층1–4
김대환 P14–10
김덕 저탄소2–4
김도현 항공3–2
김동경 P17–13
김동권 항공엔진3–3
김동수 탄소중립1–2, PM–HIP1–1
김동영 PM–HIP4–3, P19–8
김동오 수소1–7
김동우 P12–4
김동욱 P6–17
김동익 집합2–1
김동진 기술2–1
김동혁 피로3–2
김동현 역학1–6
김동환 고온2–4,P2–25
김두현 P4–8
김래언 재료강도2–4
김려현 P13–17
김마가 P3–24
김마로 P12–30
김명균 순환2–1
김명석 비철3–7
김무성 P15–13
김민규 재료강도2–2
김민기 P13–8
김민서 용접1–1
김민수 P24–8,복합1–8
김민정 P11–4
김민종 고엔2–6
김민주 인공1–3
김민준 P12–33
김민중 저탄소1–4
김민지 P27–12
김민철 P3–17,P4–12
김민호 P4–21
김범준 P13–25
김범철 수소1–1
김병찬 반도체1–7
김병철 순환1–2
김보경 P3–11
김봉준 용접4–7
김봉철 P27–9
김상규 철강A1–4
김상우 P21–28
김서현 SS5–3
김선구 P11–8
김선기 P1–20,P1–21
김선민 P14–13
김선진 P15–1
김성남 P25–7,P25–8
김성수 생체1–4
김성욱 P32–6
김성종 P14–20
김성준 기술1–3,P22–8, 분석1–5
김성줄 철강B6–2
김성진 철강B1–4
김성찬 P22–3
김성철 P28–3
김성환 인공2–3,수소1–6
김성훈 소형2–3
김소연 P22–1,P3–16
김송이 P13–33
김수민 SS5–2,P29–6, 역학1–1
김수빈 적층1–1
김수성 비철1–2
김수영 타이타늄1–5
김수정 P4–4
김승우 재료강도1–7
김승현 SS1–1
김시연 P14–22,P4–13, P9–3
김신일 용접1–3
김연범 SS1–2
김연석 철강A4–6
김연수 소프트4–3
김연우 적층2–5
김영겸 P13–29
김영경 적층4–6
김영균 계층구조2–4
김영득 소형2–1
김영민 KC3–3
김영석 P7–16
김영원 항공엔진1–4
김영재 희소1–5,재활용2–3
김영주 기술2–2
김영찬 P1–18
김영협 P12–1
김영호 기술3–2
김영훈 재료강도2–7
김예리 반도체1–6
김예림 인공1–2,SS5–4
김예진 P30–10
김예희 P18–1
김오섭 적층1–5
김완규 P22–15
김완배 P6–9
김용신 순환1–1,저탄소3–4
김용우 철강B4–2
김용유 비철1–3
김용진 P4–23,소프트1–3, PM–HIP2–3

김용호 저탄소3-3
김우중 P3-2
김우진 니켈2-2
김우혁 SS4-5
김우현 P10-11
김유경 P6-19
김유나 표면계면1-7
김유석 P19-3
김유섭 융복합3-3
김유신 SS5-6
김유진 P18-4,이차전지2-1
김윤진 P19-4
김은비 P12-3
김은주 철강B5-2
김은혁 니켈2-4
김응균 PM-HIP2-1
김인서 고온1-1
김인아 P16-16
김인향 SS6-6
김재겸 전산1-2
김재권 알루미늄1-2,P6-13
김재동 철강B1-2
김재득 비철1-4
김재민 광전자1-3
김재승 전산1-5
김재연 마그네슘2-7
김재웅 P23-11,P23-10
김재철 PM-HIP1-3
김재혁 P22-12
김재황 KC4-1
김재훈 재료강도2-8
김정기 마그네슘1-3,전략4-2
김정민 P6-14,P8-9
김정우 P4-16
김정준 P22-16
김정한 전략1-3
김정환 수소경제1-3
김종민 에너지2-1
김종식 항공엔진2-4
김종형 역학3-1
김종환 P24-9
김종훈 P26-4
김종희 기술2-5
김주영 융복합2-2
김준서 P28-10
김준영 P21-7
김준혁 P26-2
김중훈 P30-8,P8-1
김지석 비철3-4
김지수 P1-12,적층2-3
김지연 표면계면1-5
김지용 이차전지2-4
김지원 P3-5
김지은 인공3-2
김지현 소형4-4,P21-8,PM-HIP4-2,P26-1
김지혜 P21-25
김진관 저탄소1-1
김진범 표면처리2-2
김진섭 P2-5
김진수 인공4-1
김진영 P23-14
김진우 P2-3
김진하 P15-23
김진호 생체2-5
김진희 열전1-4
김철우 P1-14
김태경 P13-3,고온1-4,P13-2
김태영 P12-18,마그넷2-3
김태윤 P23-6,복합1-6
김태철 철강A4-1
김태형 고엔2-4
김태훈 소프트1-2
김하늘 P1-9,P12-6
김하은 철강B3-1
김학현 P25-4
김해탄 표면계면2-1
김향아 PM-HIP4-1
김혁중 P22-11
김현길 계층구조1-5
김현아 P10-7
김현정 표면계면1-11
김현지 P30-9
김현진 철강B3-6
김형규 피로1-1
김형섭 계층구조1-3,적층3-4
김형욱 P12-38
김형준 마그네슘1-4
김호정 P22-13
김호준 P18-7,생체1-6
김홍민 타이타늄2-2
김홍석 피로3-3,용접2-1
김효진 항공엔진3-4
김희원 P16-13

ㄴ

나태욱 수소2-1
나혜성 항공엔진2-3
남서우 P29-1
남세현 이차전지1-1
남수민 SS2-2
남승주 P26-5
남승진 고엔3-1
남승훈 고온3-5
남연우 타이타늄1-2
남월일 SS4-6
남지민 알루미늄4-4
남형진 P22-6
넬선 P2-22
노광동 광전자2-2
노구원 적층3-7
노이준 분석2-4
노주림 P15-6

ㄹ

라하만 생체2-4
류명신 지능화4-1
류욱하 전략4-4
류재종 P10-6
류호진 계층구조1-4

ㅁ

마호진 고엔3-3
맹성규 P14-19
멩 용창 분석1-3
명다빈 P16-4
명상원 소형1-1
명재욱 P16-2
몬젤라 거트루드 무웨 고엔1-2
문광현 P2-1
문민석 전산2-4
문시은 생체1-5
문종언 계층구조2-3
문준오 PM-HIP3-2,소형3-1
문준혁 P1-6,SS3-9
문진욱 인공4-4
문채현 P17-12
민두원 P30-1
민병현 P1-3
민현기 상변태3-2,P15-17

ㅂ

바이람무하메트 안나겔디예프 P12-13
박강현 P14-18
박건우 P13-20
박경민 P21-38
박경태 재활용2-2,희소2-1
박광석 니켈2-1
박교광 철강B2-2
박규민 P12-8
김민철 P4-12
박기덕 전략2-3
박기성 P31-6
박동준 P8-2
박민수 P13-6
박민우 역학3-4
박민지 역학2-4
박보근 P17-3
박보현 마그네슘1-6
박봉천 철강A1-5
박상규 P21-22
박상원 P13-37
박상준 P10-1
박상현 P5-14,표면처리2-1
박서준 에너지1-2
박석민 P12-16
박선영 P33-4
박성민 상변태2-6,P15-3
박성욱 SS4-7
박성주 차체부품1-2
박성준 소프트4-4
박성현 적층3-3,고온2-5,P6-12
박성환 이차전지1-4
박성훈 희소2-4
박세진 인공3-4
박소연 적층6-4
박수빈 타이타늄1-4
박수정 소형1-2,P2-10
박승재 철강B2-3
박시온 P12-10
박시훈 마그네슘2-4
박연경 역학2-2
박영도 탄소중립2-2
박영준 이차전지1-3,철강B1-5
박원규 인공4-2
박원범 철강B3-5
박유균 P23-9
박윤지 P32-4
박은진 P22-5
박재범 니켈1-1
박재정 P20-8
박재현 P4-14
박재호 P12-32
박정빈 P9-2,재료강도1-1
박정수 P12-31
박정웅 P13-19
박정현 P9-1,P4-9
박종민 열전1-1
박종욱 광전자4-3
박종현 전산2-3
박종호 P14-9
박종훈 상변태3-3
박주혁 소프트4-2
박주현 PM-HIP3-1
박주호 철강B4-1
박준엽 P1-1
박준희 고온1-2
박중철 표면계면1-9
박지니 상변태4-4
박지수 P28-9
박지영 P13-9
박지욱 알루미늄4-5,철강B1-1
박지원 타이타늄1-3
박지현 SS3-1
박지환 희소1-4
박진수 적층5-6
박진호 P21-18
박찬근 철강B2-1
박찬우 P3-7
박창수 PM-HIP2-4
박충효 P7-6
박태연 P4-15,P2-12
박태원 P29-8
박태윤 수소4-2

박태준 P16–14
박태창 분석2–1
박하음 적층6–5
박한지 수소1–2
박현 집합2–2
박현우 P23–1
박현재 P23–7
박형권 표면처리2–4
박효진 고엔2–2
박희진 P21–29
방태양 P27–5
배규열 재료강도2–1
배동화 P5–19
배병진 P1–30
배상현 P9–7
배성욱 비철3–6
배성준 철강B3–4
배은혁 표면계면1–1
배지홍 P12–43
배진희 열전1–5
배찬희 소성2–1
백건우 적층5–5
백민숙 P24–6
백민아 수소2–3
백민재 항공1–3
백승주 P21–13
백종민 P9–6,P9–4,용접2–4
백주현 수소2–8
백하성 집합1–4, 타이타늄2–5
변근우 P16–10

ㅅ

서강훈 표면계면1–6
서기완 P20–5,SS3–8
서남혁 P13–24
서동우 소형3–2, 수소경제2–2
서동철 P12–48
서동화 지능화2–2
서민석 니켈1–3
서민영 소프트1–5
서보성 비철2–1
서세덕 P29–3
서승원 P16–3
서예진 적층4–2
서예찬 P24–7
서위걸 P31–4
서정민 SS5–5
서정원 에너지2–3
서정훈 항공엔진4–4
서종식 마그네슘2–6
서형석 소형4–2
서혜진 P20–1
서훈철 P17–9
서희창 P12–26
석경찬 수소2–2
선정윤 소프트4–5
성민찬 분석1–6
성시영 저탄소1–2
성연수 표면계면1–2
성예찬 적층2–2
성원경 분석1–7
성지원 P13–10
성준호 재료강도1–5
성효경 항공엔진3–5
소원재 P9–8
소윤지 P6–20
손가영 P3–12
손명숙 고온2–1
손석원 P26–8
손성우 P12–11
손인수 전략3–1,항공엔진1–1
손정호 P15–7
손진일 항공엔진4–5
손호상 희소1–1
송기안 융복합3–2
송노건 SS3–2
송민호 철강B6–3
송상윤 집합1–3
송세라 알루미늄4–2
송수민 표면처리1–2
송연균 표면계면1–8
송영주 비철2–3,P6–18, 희소2–6
송유진 P31–5
송은효 SS3–3
송재인 P21–3
송종한 P30–2
송현직 이차전지1–2
송호섭 차체부품2–4
송호정 P4–19
술탄가지예프 알리셰르 분석2–5
신건진 수소3–3
신동준 P21–23
신동현 에너지1–1
신동희 P3–6
신봉근 P4–24
신상훈 철강A3–2,분석1–4
신석진 계층구조1–2
신선호 P17–5
신세연 인공3–3
신세환 P3–18
신수홍 타이타늄1–1
신승혁 수소1–5
신승환 P2–18
신욱선 P17–2
신은경 수소4–1
신재호 용접1–2
신재홍 니켈2–3
신정호 지능화1–2
신준호 P12–14
신중호 소형4–5
신지용 알루미늄2–5
신찬선 탄소중립2–4
신충식 항공엔진4–2
신택수 P25–2
신현승 P13–34
신현우 철강B3–2
신형섭 수소경제1–4
신희철 P5–10
심승현 P16–8
심영래 고온1–3
심영주 역학1–3
심재혁 수소경제1–2
심준석 P11–2,생체2–6
심현보 항공1–4
심현석 항공엔진1–2
심현우 재활용1–1

ㅇ

안건웅 마그네슘2–3
안경빈 알루미늄2–2
안동혁 P27–10
안성민 P28–5
안성열 적층1–6
안성철 항공엔진4–1
안수빈 상변태2–3,P22–14
안수진 항공2–1
안영조 P13–1
안재우 P6–16
안제형 마그네슘1–1
안지섭 고온2–2
안찬울 복합1–5
안혜현 마그네슘2–5
안효주 P16–6,철강B5–6
안효찬 전산1–4
양대규 피로2–3
양비룡 P21–32,P21–31, P21–30
양상선 PM–HIP2–2
양승우 P8–7
양정우 P20–10
양조화 P12–36
양지민 피로2–4
양철웅 P25–5
양현석 P1–29,P7–17
양희평 P9–5
여승현 P27–2
여준기 P27–11
여준수 P14–8
연경미 역학3–5
염종택 전략3–2
염지훈 P12–20
예정원 P2–24,철강A2–3
오광명 저탄소2–1
오동규 P8–3
오동훈 P3–10
오상민 전산2–6
오상호 수소3–1
오세빈 P7–4
오승환 저탄소1–3
오은기 P31–1
오인환 P17–7
오정석 P15–2
오진우 P17–14
오현식 P10–4
오혜민 P10–2
왕은찬 P7–2
왕제필 P18–12,P30–11
우두현 P4–18
우완측 융복합1–3
우주윤 P14–25
원경운 P13–18
원정훈 P8–10
원종범 P12–41
위정섭 P12–49
유동엽 P19–2
유민기 P24–5
유성훈 용접4–6
유소현 P21–10
유승건 P23–15
유승원 P21–2
유영근 항공엔진2–2
유일현 고온2–3
유재석 용접4–5
유정환 P14–6
유진영 인공3–5
유창열 탄소중립2–3
유채은 용접3–3
유하영 반도체1–2
유한준 P5–21
유혁준 인공2–4
유현용 P13–7
유현재 소프트1–1
유현지 역학1–5,P29–7
유효상 P6–15,P1–24
윤국태 차체부품2–3
윤누가 P16–9
윤다혜 P21–4
윤민석 P5–6
윤병현 P9–12,P9–10
윤상민 P1–19
윤상일 저탄소3–2
윤샘 P12–40
윤성민 P15–5,용접4–2
윤성준 P4–17
윤승채 소성1–3,소성1–2
윤영준 항공1–2
윤영철 수소3–6
윤은섭 PM–HIP1–2
윤제인 P20–9,상변태2–5
윤주희 P2–2
윤준원 철강A2–5
윤지강 소성1–6
윤지현 P7–11
윤진호 희소2–2

윤철환 P19–1
윤태환 P18–5
윤하은 P5–15
윤현준 마그네슘1–5
윤혜진 P21–11
이가은 P28–4
이강건 SS3–6
이강래 P33–5
이강진 P2–16
이건호 P11–1
이경미 P22–9
이계만 철강A4–3
이광석 기술1–1
이광희 차체부품2–1
이권영 소형3–3
이근재 P1–2
이근형 P4–6
이기영 P31–2
이기혁 P6–10
이나경 P16–1
이나윤 SS2–5
이도성 P5–17
이도훈 항공엔진2–5
이동윤 SS5–1
이동준 P23–13
이동현 P22–2
이동희 P6–4
이두형 P14–27
이마태 적층6–3
이만길 항공엔진3–2
이명규 수소경제2–4
이명복 P23–12
이명준 P15–16,상변태2–2
이목영 용접3–5
이미경 Nano3–2
이미영 알루미늄3–5
이민수 분석1–2,수소3–4
이민우 P12–44
이민주 P16–15
이병권 P30–5
이병호 철강A3–6
이보람 광전자1–1
이봉상 피로1–4
이봉희 철강A3–7,용접4–3
이빈 희소2–7
이상관 정책2–1
이상길 수소4–3
이상림 P27–3
이상민 SS3–5
이상봉 집합2–4, 마그네슘2–1
이상엽 비철2–5
이상용 P12–22
이상원 P2–9,전략2–2
이상화 고엔3–2
이상훈 P19–5
이서연 P11–9
이석규 소성1–5
이석호 P17–10
이선규 철강A3–3
이선영 AW1–3
이선화 인공3–1
이성민 복합1–7
이성용 고온3–3
이성호 철강A1–2
이세영 P33–3
이소영 고엔1–1,P15–18
이소현 P4–7,재료강도2–5
이수민 P20–2
이수진 P7–7
이수형 P3–15
이슬 항공엔진3–1
이슬이 SS6–2
이승민 P10–3
이승엽 마그네슘1–2
이승우 표면처리1–1
이승준 수소경제2–1
이승한 P5–8
이승현 P28–7
이승희 P24–2,P33–1
이시연 P29–9
이시온 역학3–2
이시환 P3–20
이아름 P4–2
이영국 정책3–1
이영호 P13–23
이예원 SS6–1
이용건 SS4–3
이용환 P26–12
이우영 SS2–6
이우진 적층3–6
이욱진 전략4–1
이운재 철강B1–3
이원찬 P27–6
이원형 P25–10
이원희 P11–6
이유나 용접1–6
이유림 P3–13
이유진 P7–5,상변태4–6, P8–5
이윤선 P13–32
이윤승 고온3–4
이윤호 알루미늄3–3
이은솔 P12–9
이인효 SS4–1
이자성 철강B3–3
이재웅 P22–17
이재정 복합1–1
이재헌 소형2–4
이재현 항공엔진1–3
이재흥 고엔2–5
이정규 P12–5
이정민 P2–7
이정섭 철강A3–1
이정용 P24–1
이정은 P12–45
이정훈 P7–9,P25–13, 적층5–4,표면계면2–3, 생체1–3,마그네슘2–2, 전산3–4
이종원 알루미늄2–3
이종혁 P24–4
이주상 인공2–2
이주희 고엔2–1
이준엽 광전자4–1
이준재 표면계면2–2, 표면계면2–5
이준호 탄소중립1–1, P28–1
이지선 철강B2–4
이지수 P17–8
이지언 P16–7
이지원 SS2–4
이지윤 P30–3
이지은 P12–29, 상변태3–6
이지현 P28–6
이진관 용접4–1
이진수 P13–35
이진영 철강A2–6
이진우 기술1–2
이창선 인공1–1
이창환 P18–10
이창훈 탄소중립1–3, 마그넷2–2
이초현 적층4–1
이충현 P13–11
이태규 적층3–5
이태선 순환3–2
이태주 P27–4
이태혁 비철2–6,희소2–3
이태호 P23–5,재료강도2–3, 융복합2–3
이태훈 P11–3
이한상 피로4–3
이한찬 소성2–3
이현석 전산2–2,재활용2–4, 타이타늄2–1
이현주 P1–27,P21–12
이현준 P14–26
이현지 P14–7
이형도 P14–3
이혜미 P32–1
이혜인 P1–25
이호중 P25–1
이호혁 피로3–4
이홍철 피로3–1
이효선 P12–35
이효연 P18–2
이희상 P1–4
이희승 인공2–5
임건우 P12–15
임광혁 재료강도1–3
임규석 P6–3
임기현 P24–10
임민혁 P13–27
임상엽 P21–21,P21–20
임성진 P15–10
임승온 적층5–1
임시은 P13–14
임시헌 나노융합2–3
임연민 P32–8
임연수 재료강도1–2
임예빈 반도체1–4
임용수 철강A2–1
임윤서 반도체1–3
임익범 P1–23
임재선 알루미늄2–1
임재철 저탄소2–3
임재한 철강A3–5
임재훈 광전자1–2
임지우 P3–22
임진수랑 상변태4–1,P2–17
임채림 P14–4
임태원 P5–20
임하윤 P1–10
임현빈 P20–4
임현태 P13–30
임효균 P18–6
임효정 에너지2–4
임희대 소형4–1

ㅈ

장경익 표면처리1–5
장경현 P9–11
장동민 적층6–2
장문호 피로2–2
장민관 SS1–3
장성문 P15–8
장성혁 P2–23
장세진 P15–15
장예령 P22–10
장익제 P34–1
장재철 알루미늄1–3
장정아 P15–22
장정혁 P23–4
장준호 P26–3,P15–4
장지은 복합1–2
장진혁 P1–22
장태진 P2–8
장형욱 전산3–5
전동술 P26–9,P26–10
전동호 분석2–6
전민수 적층5–3
전보혜 소성2–5,집합1–2
전서연 SS2–7
전석우 AW1–4

전선영 P17–6
전예진 P14–14
전정민 P1–11
전지헌 재료강도1–8
전태성 전략3–3
전한솔 P29–10
전해원 P1–17
전희연 P21–24
정경재 KC2–3
정근완 항공2–4
정다운 P23–8
정다은 P34–2
정대엽 나노융합2–4
정대한 P1–8
정대호 항공1–1
정동율 철강B4–4
정두효 P25–11
정든봄 SS2–3
정민섭 SS2–1
정민지 피로2–1
정범준 표면계면1–4
정설빈 용접2–5
정소진 P5–4
정수호 열전1–3
정아호 P8–12
정양진 소성1–4
정연식 소프트4–1
정영길 P1–15
정영석 소형1–3,계층구조2–6
정영웅 KC2–1,집합2–5
정영훈 항공2–2,항공2–5
정용수 철강B6–5
정용주 P7–10
정우상 AW1–2
정우철 수소경제2–3
정은주 철강B1–4
정은진 철강B6–4,희소1–6
정이화 P15–21
정인호 저탄소3–1
정재규 기술3–1
정재석 소형2–2
정재우 P13–28
정재한 나노융합2–5
정재훈 P14–15,P21–15, 용접3–4
정종건 P3–1
정종욱 P13–16
정주리 고엔1–4
정준모 P21–14
정준영 순환3–1
정준오 P21–6
정지윤 역학2–1
정지혁 P14–16
정진성 분석2–2
정차희 P5–5
정찬 알루미늄1–4
정찬원 열전1–2,생체1–1
정창곤 철강A1–1
정창현 P13–4
정하국 P21–35,P21–34
정하영 전산1–3
정한돌샘 P25–9
정현 P5–11,P8–4
정현우 비철1–1
정현종 P22–7
정현주 표면계면1–10
정혜은 소형3–5
정혜지 P2–14
정회성 피로4–5
정회연 재료강도1–4
정휘근 P8–11
정휘윤 P5–12,상변태4–2
정희재 P2–6
정희태 P21–5
조가은 상변태3–4,P6–8
조규현 P12–21
조근기 마그넷2–1
조다한 철강B5–5
조덕현 P13–21
조민서 P16–5,SS6–5
조성근 P12–24
조성민 용접3–1
조성현 P14–12
조영래 SS1–4
조영준 P12–46,P31–7
조영희 저탄소2–2
조용훈 적층4–5
조원희 상변태2–7
조유정 P7–15
조유진 P24–11
조은준 항공1–5
조인식 피로4–2, 재료강도1–6
조인희 P25–6
조재형 집합2–3
조지현 P4–3,P29–5
조창훈 P4–20
조창희 P15–14
조태현 SS4–2
조한울 철강B4–3
조해주 적층2–1
조현산 비철3–2
조현석 전산3–6,기술2–4
조현수 광전자3–1
조현중 P14–23
조현철 계층구조2–7
조형진 피로4–4
조호근 P23–3
조환희 광전자3–2
조훈민 P17–1
조휘재 전산3–7
주경석 순환2–3
주경준 P34–3
주수빈 적층5–2
주신형 P6–2
주재성 P32–3
주종흥 기술2–3
주하연 적층4–3
주현빈 마그넷1–2
주효문 적층3–2
지민기 집합2–6
진광혁 P7–12
진봉민 철강B5–3
진시원 P5–18
진형하 소형4–3,융복합3–1
진혜승 항공2–3

ㅊ

차다은 P13–22
차석준 P3–23
차은빈 수소4–4
채준영 상변태2–4
채호병 P1–16
천민준 P28–2
천세영 표면처리2–3
천세호 P20–3
천승현 P12–37
천정민 철강B1–6
천하은 P5–7
최가영 철강A4–5
최가현 P21–36
최경한 차체부품2–2
최광수 P6–21
최다은 P12–47
최다인 집합1–1
최동인 적층4–4
최동현 용접3–2
최문기 소프트2–2
최미선 기술3–4
최민혁 P17–11
최병욱 용접2–3
최병찬 P21–17
최선연 SS6–4
최성규 순환1–3
최세원 P1–13
최수환 P5–3
최순원 P2–19
최순호 표면처리1–3
최승규 차체부품1–1
최언준 소성2–4
최영원 항공3–3
최예원 P1–26,SS3–4
최우석 P6–5
최원재 P28–8
최원창 마그넷1–1
최윤형 P21–33
최은애 여성1–2
최장훈 P3–8
최재영 전략2–1
최재혁 P3–9
최재훈 P31–3,P6–6
최재휘 P14–11
최정원 복합1–3
최정환 P28–12
최정현 철강A1–3
최종원 재활용2–1
최주미 P4–1
최중길 인공2–1, 재료강도2–6
최지석 차체부품1–4
최지원 P26–7
최지환 P2–26
최진욱 에너지2–5
최진형 수소2–6
최태훈 탄소중립2–1
최하늘 반도체1–1
최혁재 P2–13
최현욱 에너지1–3
최혜성 P15–12
최홍 P3–14
추헌호 피로1–3

ㅎ

하륜 P18–3
하민정 소프트3–4
하성준 P21–19
하수빈 P2–4
하재영 P14–2
하정우 P22–4
하태준 전략3–4
하태현 에너지1–4
하헌영 철강A4–4
하효정 수소2–4
한규미 적층6–1
한도경 용접4–4
한도석 차체부품1–3
한상수 지능화1–1
한상윤 상변태4–3
한성수 니켈1–2
한솔 P18–8
한수빈 P7–1
한수지 고온3–2
한승준 P13–12
한영우 나노융합1–3
한재연 P27–1
한정훈 수소2–7
한지수 P14–17
한지훈 P12–17
한흥남 AW1–1
한희준 P19–11
함주빈 P29–2
허민아 P2–20
허석하 SS4–4
허성보 P7–14,P7–13
허성준 P20–7,인공1–4
허성호 PM–HIP3–3
허영진 지능화3–1

허우로 P24–12
허유민 표면계면2–4
허윤욱 융복합1–1
허은주 P24–13
허재 전산2–5
허현재 비철3–1
허현준 P24–3
허형민 P32–7
현명우 P15–11
현세미 P4–22
홍동성 P2–21,상변태4–5
홍명표 계층구조2–5
홍문희 철강A4–2
홍민기 P13–31
홍민성 P8–8
홍범락 항공3–4
홍석원 P4–5
홍순직 계층구조2–1
홍원표 P30–4
홍은표 분석2–3
홍재근 전략1–1
홍재완 집합1–6
홍정범 P22–18
홍지우 P33–2,P5–9
홍현빈 알루미늄3–4
홍현욱 탄소중립1–4
황규빈 P5–1
황보혁 P13–15
황석민 P26–11
황세훈 P19–10,P19–9
황수민 비철3–5
황승욱 항공엔진2–1
황우섭 소프트1–4
황원구 P13–26
황유정 이차전지2–2
황재윤 용접2–2
황재호 비철2–4
황정우 타이타늄2–3
황준호 P23–17
황효진 알루미늄2–4

A

ABBAS MUHAMMAD AOUN 고엔2–3, P32–2
Adila Rani Nano3–3
AHMAD ZAMANIAN 알루미늄3–1
Alam Md Mahbubul P23–2
Annisaa Hayya Arundati P21–9
APPIAH EMMANUEL 이차전지2–3
Arsakay Madi P12–7

B

Bo Liu KC4–2
Bumchul Park Nano1–5

C

CAO XUAN TRUONG P10–10
Chang–Gi Lee P25–12

D

Doheon Yoo P14–21
DUISENOVA KORLAN P12–2

E

Enok, Lee 에너지2–2
Eunji Lee 소프트2–3

G

Ga Yeon Kwon P14–24

H

Handriani Lia Saptin 반도체1–5
Hashmi Muhammad Raih 적층1–2
Hong–Joon Yoon 생체2–1
Hye–Jin Kim KC1–2
Hyeri Cho P19–6
Hyeuk Jin Han 나노융합1–2
Hyun Joong Kim SS6–3
Hyunjoo Choi 상변태3–1

I

In–Hyeok Choi 희소2–5
Inhyeok Oh 나노융합1–5

J

Jae Bok Seol 융복합2–1
Jae Wung Bae 계층구조2–2
Jaehwan Lee P14–1
Jahyun Koo 생체2–2
Jihye Kim 생체2–3
Jin–Woo Park 여성1–3
Jiyoung Kim 소성1–1
Jungdae Lee P12–12
Jonghyeon Lee 희소1–3
Jungho Heo P6–22
Junying Min KC1–4
Junying Zhang Nano3–1

K

Kihyun Shin 전산1–1
KUNDU ANIRBAN 역학1–2
Kyeongjae Jeong 전산2–1
Kyungseok Oh KC2–4

L

Leonardo T. da Rocha 철강B6–1
Li Oi Lun Helena 여성1–1
LIU YANG P12–34

M

Min–Jae Choi 나노융합2–2
Moon–Jo Kim 소성2–2
Muhamad Nawawi Alif 비철3–3
MUNISAMY MANIYAZAGAN P21–37
Myoung–Woon moon Nano1–4

N

Nam Heo 상변태1–1, 상변태1–3, 상변태1–2
Nguyen Thanh Dat P1–5
Nguyen Tien Dung 수소3–5
Nguyen Van Tuan P10–8
NGUYEN VU BINH P21–26
NITHYANANDAM P21–16

P

PASCUA RICHARD 수소1–3
Perumal Naveenkumar P21–27

R

Rodney Ruoff Nano1–1
Rui Ge KC2–2

s

saif haider kayani 알루미늄1–1

S

Sam Yoon 지능화3–2
Sang Ouk Kim 소프트2–1
Sergey Stebunov 철강A4–7
Serin Choi P12–28
Seung–Hwan Lee P6–11
Seung Hyun Nam P19–7
SHAILENDRA KUMAR VER 전산3–3
Shintaro Ida Nano1–3
Shinya Hayami Nano2–3
So Yun Jeong P20–6
Seong–Jin Kim 철강B5–4
Soo Young Kim Nano2–2
Soshi Iimura Nano2–1
Su Shuang P15–20, 상변태2–1
Su Yao P2–15
SUDIPTA BAG P16–17
Sun Hwa Lee 나노융합1–1
SUSHIL JOHN 용접1–5

T

Taehoo Chang 생체1–2
Tae–Gyu Wi 철강B5–1

U

Unyong Jeong 소프트3–1

V

VIKAS SHIVAM 고엔3–4

W

Wenhui Yao KC3–4
Wonchul Choi P3–19
Wonyoung Choe 지능화2–1
Wooyoung Shim Nano1–2, 소프트3–2
WORAKAN TONGPRAPAI 수소1–4

X

Xiangxing Deng KC1–3

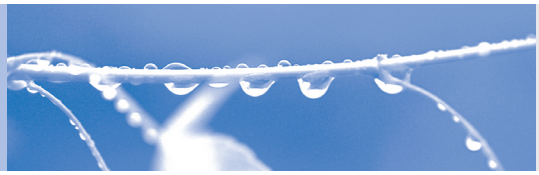
Y

Yanchun Shi KC3–2
Yeonji Yuk P12–25
Yitian Yin P15–19
Yongjin Shin 전산3–1
YongJoo Kim 소프트2–4
Young–Kook Lee 수소경제1–1
Youngmin Kim 나노융합2–1
Youn–Suk Choi 지능화4–2
Yun–Haeng Cho P12–27
Yun–Hi Kim 광전자4–2
Yusupov Dilshodbek 고엔1–5, P15–9
Y.H. Cho P11–7

Z

Zhe Gao 역학3–3
Zijian Wang KC1–1
Zion Lee 역학3–2

2025년도 춘계 학회상 수상자



1. POSCO학술상
◆ 한흥남(서울대학교)

2. 현송공학상
◆ 정우상(한국과학기술연구원)

3. LS학술상
◆ 이선영(한양대학교)

4. POSCO김철우상
◆ 강신곤(동아대학교)

5. 특별공로상
◆ 조문호(포항공과대학교)
◆ 박철민(연세대학교)

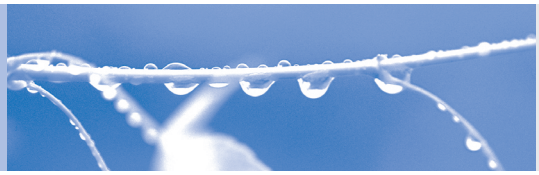
6. 기술상
◆ 김태훈(한국재료연구원)
◆ 백두진(POSCO 기술연구원)
◆ 정재석(두산에너빌리티㈜)

7. 신진학술상
◆ 김세호(고려대학교)
◆ 김정기(경상국립대학교)
◆ 이승용(한양대학교)
◆ 최문기(울산과학기술원)

8. 신진기술상
◆ Sihotang Restu Sejahtera(고려특수선재㈜)
◆ 강동수(한화에어로스페이스)
◆ 김진우(한국과학기술연구원)
◆ 노한섭(POSCO 기술연구원)

9. International Scholar Award (2025년 춘계 TMS에서 수상)
◆ 손석수(고려대학교)

2025년도 춘계 학회상 수상자



10. 논문상

1) 제1부문

◆ 대한금속 · 재료학회지(Korean Journal of Metals and Materials)

산소함량에 따른 Ti-6Al-4V 적층제조 조형체의 미세조직 및 기계적 특성 변화 (Vol.61, No.9, pp.714-720)

강태진[1], P.L.Narayana[2], 최성우[3], 김재혁[4], 홍재근[4,*], 이태경[5,*]

[1]LG전자. [2]㈜HVM. [3]LG에너지솔루션. [4]한국재료연구원. [5]부산대학교.

◆ Metals and Materials International

Recent Advancements in Additive Manufacturing (AM) Techniques: A Forward-Looking Review (Vol.29, No.8, pp.2119-2136)

Netrapal Singh[1], Hafsa Siddiqui[2], Bhavani Srinivas Rao Koyalada[2], Ajay Mandal[2], Viplov Chauhan[3], Sathish Natarajan[2], Satendra Kumar[1], Manoj Goswami[1], Surender Kumar[2,*]

[1]Academy of Scientific and Innovative Research (AcSIR). [2]CSIR – Advanced Materials and Processes Research Institute. [3]Institute for Excellence in Higher Education, Bhopal.

◆ Electronic Materials Letters

Atomic Layer Etching Applications in Nano-Semiconductor Device Fabrication (Vol.19, No.5, pp.424-441)

김재빈[1], 안다원[2], 최진현[1], 김진석[3], 정은규[2], 표성규[2,*]

[1]삼성전자. [2]중앙대학교. [3]LG전자.

2) 제2부문

◆ 대한금속 · 재료학회지(Korean Journal of Metals and Materials)

- Gold: 김상일(서울시립대학교)
- Silver: 이만승(목포대학교)
- Bronze: 김성진(국립순천대학교)

◆ Metals and Materials International

- Gold: 김형섭(포항공과대학교)
- Silver: 손석수(고려대학교)
- Bronze: 이태경(부산대학교)

◆ Electronic Materials Letters

- Gold: 김현우(한양대학교)
- Silver: 장호원(서울대학교)
- Bronze: Sheng Bi(Dalian University of Technology)

11. 굿리뷰어상

◆ 대한금속 · 재료학회지(Korean Journal of Metals and Materials)

- 류학기(아주대학교)

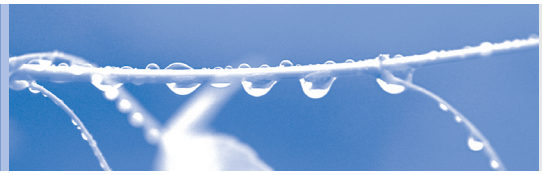
◆ Metals and Materials International

- 김정기(경상국립대학교)

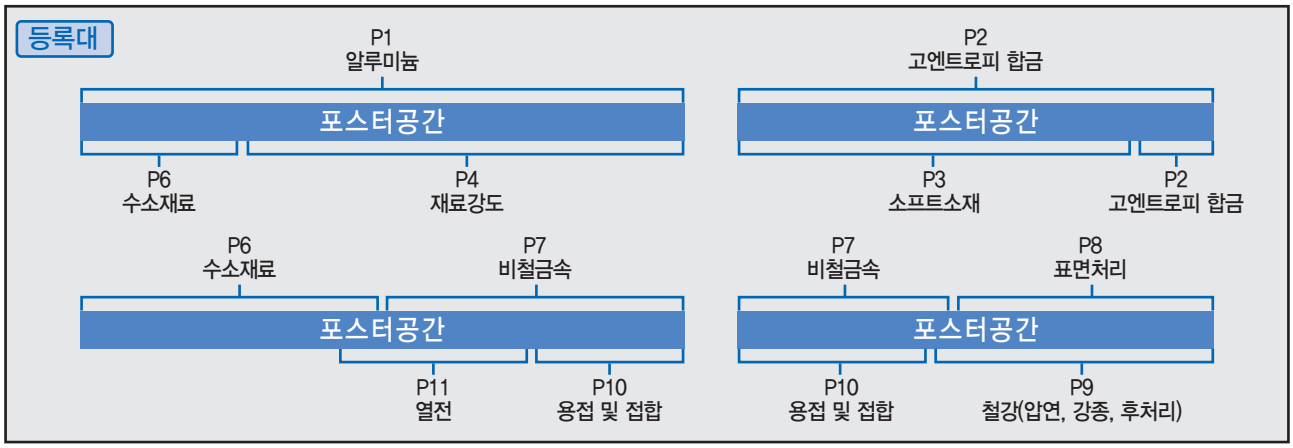
◆ Electronic Materials Letters

- 이상한(광주과학기술원)

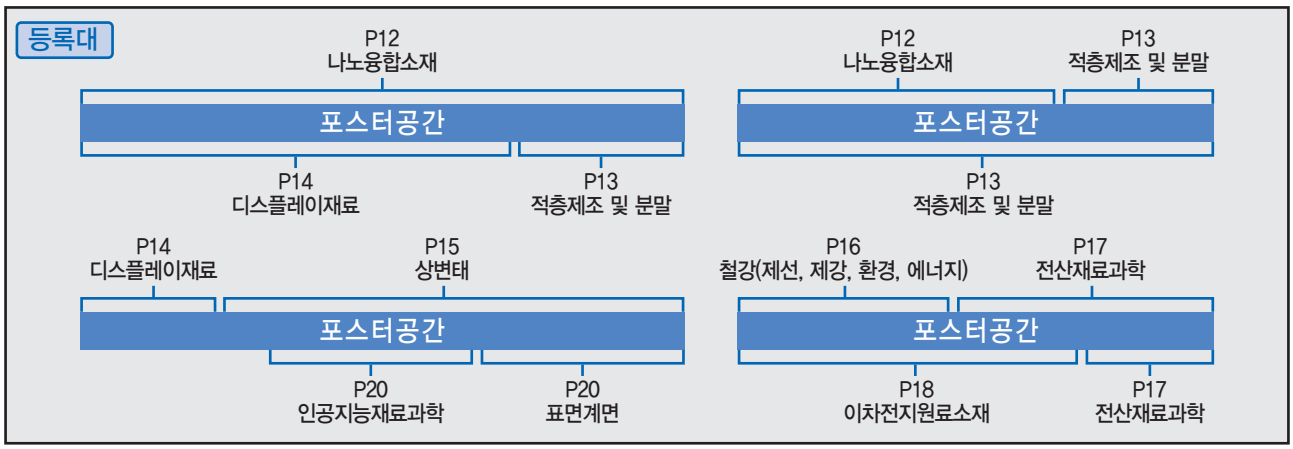
포스터배치



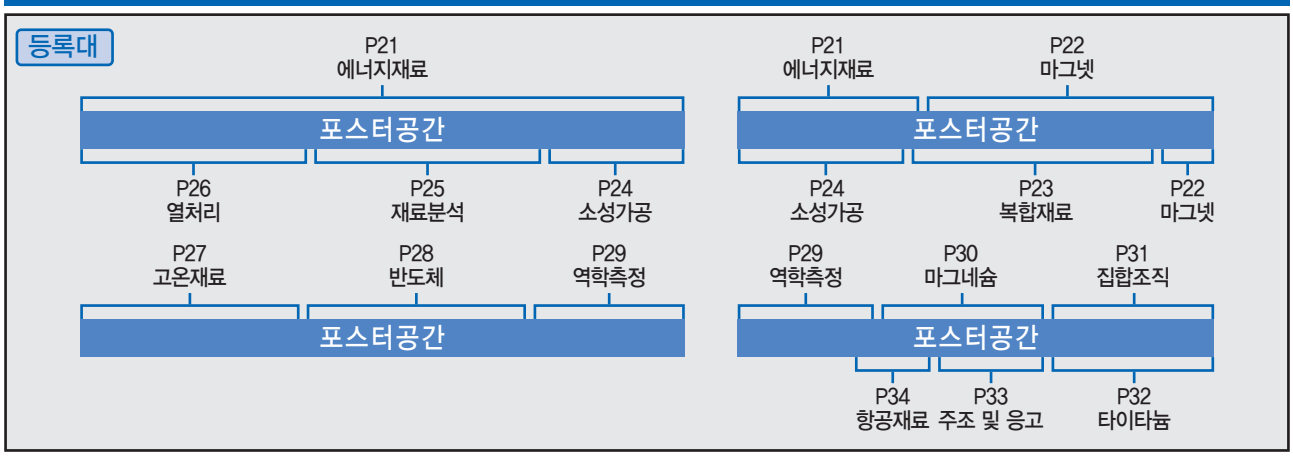
4월 23일(수) 포스터발표 (Poster-I)



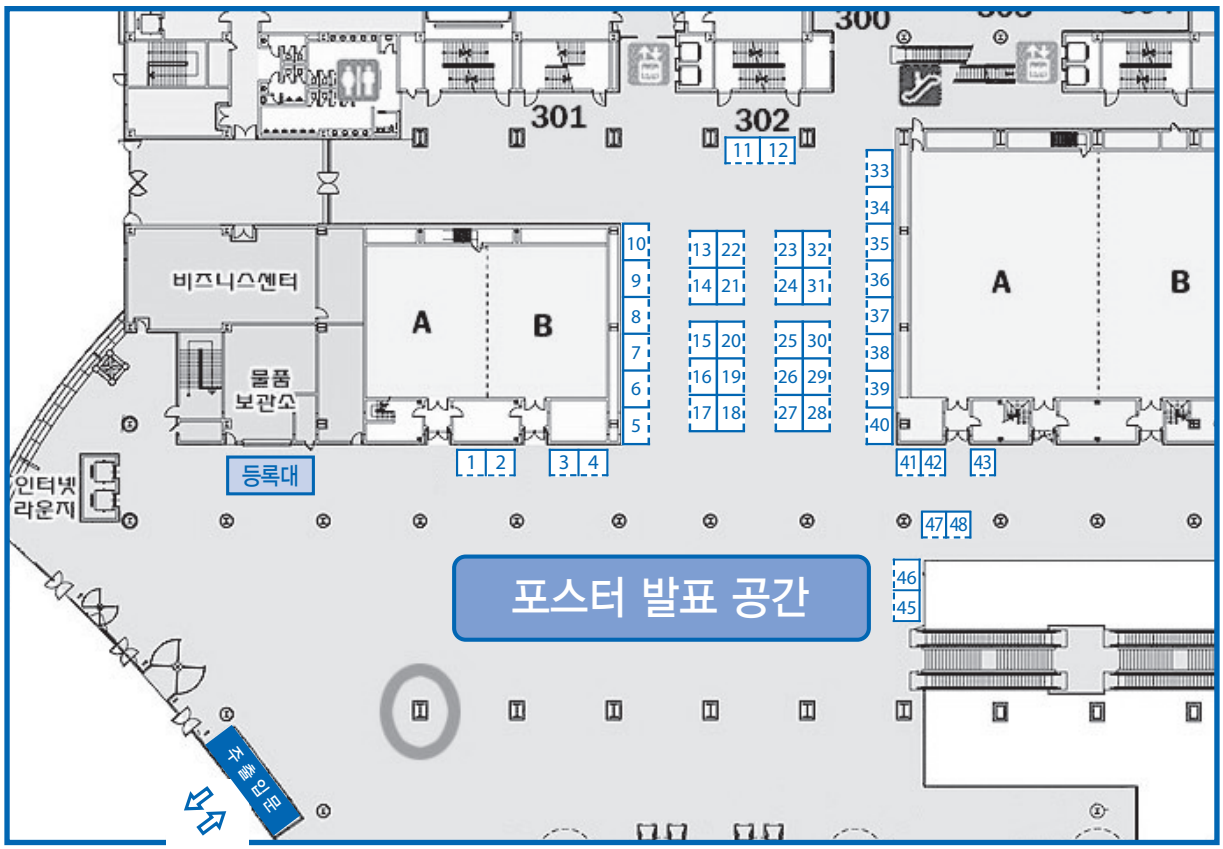
4월 24일(목) 포스터발표 (Poster-II)



4월 25일(금) 포스터발표 (Poster-III)



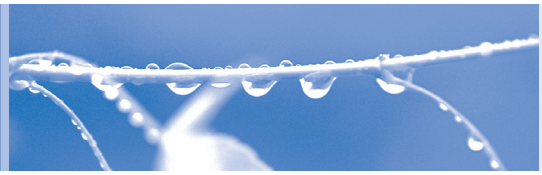
부스배치



학회 부스 참가회사

01	(주)진우테크
02	시편전처리센터
03	ZEISS 코리아
04	(주)신영사이언스
05	(주)만진교역
06	다원소재과학 / 린테크
07	엠티엠코퍼레이션
08	스마트코퍼레이션
09	(주)유로사이언스
10	인실리코
11	주식회사 루안
12	(주)이공교역
13	(주)솔루션랩
14	(주)웨이브센스
15	카메카 코리아
16, 17	(주)알앤비
18	(주)제이에프엠
19	Thermo-Calc Software Korea LLC
20	(주)팜테크
21	(주)아이티브에이아이
22	(주)CAE테크놀러지
23	RIST 분석평가센터
24	신뢰성기반활용지원사업
25	비전플러스 주식회사
26	주식회사 매이드
27	엠티디아이
28	테스코(주)
29, 30	Thermo Fisher Scientific
31	비포스(주)
32	(주)프론틱스
33	(주)에이스이앤지
34	아이에스지(주)
35, 36	두산에너빌리티
37	크라이오에이치앤아이(주)
38	(주)에프엠케이
39	국가소재연구데이터센터 (한국표준과학연구원)
40	라이카마이크로시스템즈
41	(주)테스트원
42	KAI 항공우주시험센터
43	LECO Korea
45	브루커코리아(주)
46	에스제이원트레이딩 (주)
47	(주)나노파이오니아
48	(주) 유로산업

경품 추첨 안내



◆ 학술대회 전시부스 도장 21개 → 응모함(大) 응모 → 4.24(목) & 4.25(금) 1~5등 경품 추첨
◆ 재료과학예술상 투표자 → 응모함(小) 응모 → 4.25(금) 특별 추첨
◆ **경품 추첨 일시 : 4.24(목) 12:30 / 4.25(금) 13:30** ◆ **추첨 장소 : 3층 로비**

	4월 24일 (목)	4월 25일 (금)
1등 (1명)	[다이슨] 슈퍼소닉 뉴럴 헤어드라이어 (재스퍼 플럼)	[다이슨] 슈퍼소닉 뉴럴 헤어드라이어 (빈카블루/토파즈)
2등 (2명)	[Apple] 워치 SE (40mm, 실버) [Apple] 워치 SE (44mm, 미드나이트)	[Galaxy] 워치 7(40mm, 크림) [Galaxy] 워치 7(44mm, 그린)
3등 (3명)	[Apple] 에어팟 4세대 액티브 노이즈(화이트)	[Galaxy] 버즈3 프로 (실버/화이트)
4등 (4명)	[Starbucks] 기프트카드 (15만 원)	[Starbucks] 기프트카드 (15만 원)
5등 (5명)	[신세계] 상품권(10만 원)	[신세계] 상품권(10만 원)
특별 추첨 (3명)		*재료과학예술상 투표 참여자들 중 선정* [Starbucks] 모바일 상품권(3만 원)

◆ 경품 추첨 시, 당첨자가 자리에 있는 경우에만 유효하고 자리에 없는 경우에는 재추첨 하게 됩니다. (예외: 특별 추첨)