



## Spring Conference

2025년도 한국소성 · 가공학회

# 춘계학술대회 초록집

ISSN 3059-1929

2025. 5. 22.(목)~23.(금)  
창원 그랜드 머큐어 앰배서더 호텔

주 최

사단법인 한국소성·가공학회  
The Korean Society for Technology of Plasticity and materials processing

전시후원사

POSCO

FMK  
FORGE MISTER KOREA

Hanwha Aerospace

JINHAP

KIMS  
한국재료연구원  
Korean Institute of Materials Science

재료공정연구분부  
항공우주재료연구센터

solution lab

MTDI

MFRC  
Metal Forming Research Corporation

OMA

AUTOFORM  
Forming Reality

CAETECH  
(주)씨에이티에프놀러지

## 제1발표회장

**2025년 5월 22일(목)**

**그랜드볼룸A (2F)**

**특별세션 4 : 초고온 고강도 · 고내부식 금속소재 공정 및 시험평가 기술 (한국재료연구원)**

**좌장 : 박현일 (한국재료연구원)**

09:00~09:20	KSTP_2025A_174	초고온 고강도 · 고내부식 금속소재 신뢰성 평가 기술 권용남*(한국재료연구원), 석무영, 박현일
09:20~09:40	KSTP_2025A_191	항공용 소재 환경시험을 위한 요소기술개발 이창희*((재)포항산업과학연구원), 이정훈, 강 성, 정세훈, 배동화, 기수빈
09:40~10:00	KSTP_2025A_201	고온(1200°C 이상) 환경 대응을 위한 우주 · 항공용 소재 기계적 물성평가 기술과 국가 연구소의 지원 필요성 민기득*(주)피레타), 장현수, 최현선
10:00~10:20	KSTP_2025A_208	항공우주 분야 적용을 위한 고내열성 첨단합금의 신뢰성 기반 평가 기술 박상규*(주)에이치브이엠), 나혜성, 최재영
10:20~10:40		<i>Break</i>

**특별세션 4 : 초고온 고강도 · 고내부식 금속소재 공정 및 시험평가 기술 (한국재료연구원)**

**좌장 : 강 성 (포항산업과학연구원)**

10:40~11:00	KSTP_2025A_179	항공용 패스너 제조 기술과 국내 개발 현황 정우석*(테스코(주))
11:00~11:20	KSTP_2025A_206	타이타늄 판재소재 열간성형 공정 제조 기술 지성범*(삼우금속공업(주))
11:20~11:40	KSTP_2025A_207	MW급 수소전소 가스터빈 고온핵심부품(1100도급) 소재 및 적층기술 개발 김균섭*(주)휴니드 테크놀러지스)
11:40~12:00	KSTP_2025A_193	Clad Metel의 제조방법과 그 응용 박철민*(한국클래드텍), 김민중, 이태엽
12:00~12:50		<i>Break</i>

**특별세션 3 : 7kN급 기계적 체결강도 기반 경량 이종소재 차체부품기술개발 ((주)진합)**
**좌장 : 최정묵 ((주)진합)**

5월 22일(목)

12:50~13:05	KSTP_2025A_070	이종소재 차체부품 체결용 합금강 선재 제조기술 개발 손동민*(주)세아창원특수강), 한승희, 임영택
13:05~13:20	KSTP_2025A_020	유한요소해석을 이용한 인발 공정에서의 와이어의 표면 거칠기 예측 홍현빈*(국립한밭대학교), Raj Narayan Hajra, 김정한, 조훈휘
13:20~13:35	KSTP_2025A_063	기계적 체결용 FDS 및 FEW 소재의 Wire rod 선재 열간 압연 공정 최적화를 위한 고온 압축 거동 및 선재 열연 미세조직 분석 홍창완*(대구기계부품연구원), 윤국태, 이락규, 김주업, 전효원, 서창희, 손동민
13:35~13:50	KSTP_2025A_051	다종소재 경량차체 조립을 위한 기계적 체결용 하드웨어(FDS, FEW) 국산화 개발 김지훈*((주)진합), 최정묵
13:50~14:05	KSTP_2025A_107	Steel 하판이 Aluminum-Steel FEW 접합부의 성능에 미치는 영향 김재훈*(한국생산기술연구원), 추우인, 주원중, 김지훈, 이승환, 감동혁
14:05~14:20	KSTP_2025A_111	기계적체결부의 비파괴검사 방안 연구 박주현*(고등기술연구원), 김 용
14:20~14:35	KSTP_2025A_088	FDS 하드웨어 형상에 따른 마찰열 저감 가능성에 대한 구조해석 기반 평가 이찬희*(서강대학교), 최성훈, 김동철
14:35~14:50	KSTP_2025A_205	전기차 차체용 기계적 접합 하드웨어의 접합 특성에 관한 연구 정우영*(한국자동차연구원), 김효성, 허영준, 최정묵
14:50~15:05		<i>Break</i>
15:05~15:20	KSTP_2025A_011	FDS 나사 소재의 TME 관찰 및 확산 코팅 분석 박지니*(국립한밭대학교), 김선진, 최지성, 박준식
15:20~15:35	KSTP_2025A_061	7kN급 기계적 체결 하드웨어를 적용한 경량 이종소재 차체부품 개발 및 실증 강상민*((주)일지테크), 배기만
15:35~15:50	KSTP_2025A_046	로봇기반 편방향 RFSSW 시스템 국산화 최영배*(엠디티(주)), 손은영, 정근호 이광원
15:50~16:05	KSTP_2025A_036	RFSSW 용접툴 국산화 및 검사시스템 개발 정윤철*(디엔엠항공), 황재욱, 김경규
16:05~16:20	KSTP_2025A_078	고인성 및 고내마모 동시 구현 RFSSW용 용접툴 소재의 개발 강재영*((재)포항소재산업진흥원), 정야호, 김한수, 김대하
16:20~16:35	KSTP_2025A_048	리필 마찰 교반 점 용접 공정의 마모 저감을 위한 유한 요소 해석 구인환*(충북대학교), 전종호, 백승민, 이윤수, 조성채, 탁우현, 진인종, 한채훈, 조정호
16:35~16:50	KSTP_2025A_097	RFSSW 적용 알루미늄-스틸 경량 하이브리드 차체 부품 개발 김종윤*((주)세원정공)
18:00~18:30		임시총회 및 시상식 (그랜드볼룸 A/B 2F)
18:30~		Banquet (그랜드볼룸 A/B 2F)

## 제2발표회장

2025년 5월 22일(목)

빌라드룸 (2F)

## 특별세션 8 : 대형 선박 혼소엔진의 고내식성 배기 밸브 기술 개발 ((주)케이에스피)

좌장 : 우영윤 (한국재료연구원)

10:00~10:20	KSTP_2025A_166	Ni-Cr-Al계 합금의 마찰용접 시 온도 및 변형 시뮬레이션 이욱진*(부산대학교), 조해주, 정종욱
10:20~10:40	KSTP_2025A_171	환경하중에 따른 선박용 배기밸브 스판들 작동상태 검출용 유도형 근접센서에 대한 구조특성평가 정호승*(국립한국해양대학교), 노동현, 이상민, 조종래
10:40~11:00	KSTP_2025A_177	700 °C Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 혼합 용융염 환경에서 DSA760의 고온 부식 거동 장희진*(조선대학교), 정 이, 강창민
11:00~11:20	KSTP_2025A_182	선박 혼소엔진용 고강도 고내식성 고Cr 함유 Ni-Cr-Al 합금 개발 이제인*(부산대학교), 윤성민, 최윤석
11:20~11:40	KSTP_2025A_183	선박엔진에 적용되는 초내열합금 배기밸브 스판들 연구 조재현*(주)케이에스피), 조두식, 우영윤, 윤은유, 신재우
11:40~12:00	KSTP_2025A_203	Ni-Cr-Al계 합금용 유도형 근접센서개발 윤영규*(화진기업(주))
12:00~13:00		Break

## 일반구두발표 : 단조

좌장: 송재선 (대구기계부품연구원)

13:00~13:15	KSTP_2025A_004	철도 차륜 열간 단조 해석 기술 개발 이정용*(한국재료연구원), 윤은유, 흥종화
13:15~13:30	KSTP_2025A_109	냉간단조용 탄소강의 유동특성 김남현*(경상국립대학교), 이현민, 김민철, 전만수
13:30~13:45	KSTP_2025A_113	금속 재료의 유동 거동을 규명하기 위한 튜브 인장 시험 홍보승*(경상국립대학교), 신영빈, 정동섭, 흥석무, 전만수
13:45~14:00	KSTP_2025A_116	필렛 룰링 티타늄 합금 볼트 피로 수명 예측 이현민*(경상국립대학교), 곽희만, 최정묵, 전만수
14:00~14:15	KSTP_2025A_121	임의의 인장시험곡선으로부터 표준 인장시험곡선의 획득 김남윤*(경상국립대학교), 전만수
14:15~14:30	KSTP_2025A_123	ZF7B 합금강의 유동특성 조현준*(경상국립대학교), 김남윤, 조주현, 김진국, 문호근, 전만수
14:30~14:45		Break

**학회연합 교류발표회 : 한국소성 · 가공학회 / 한국생산제조학회 / 한국기계가공학회**  
**좌장: 최태훈 (한국생산기술연구원)**

14:45~15:00	한국소성 · 가공학회 학회소개 이영선 회장*(한국소성 · 가공학회)
15:00~15:15	한국생산제조학회 학회소개 유영은 회장*(한국생산제조학회)
15:15~15:30	한국기계가공학회 국문 논문집 활성화 사례 문두환 교수*(고려대학교, 한국기계가공학회)
15:30~15:45	기계학습 기반 제조 공정 모니터링 윤희택 교수*(한국과학기술원, 한국소성 · 가공학회)
15:45~16:00	롤투롤 공정을 통한 멕신 유연 에너지 저장 필름 제작 전성찬 교수*(연세대학교, 한국생산제조학회)
16:00~16:15	고속 · 고정밀 · 고생산성을 구현한 Wire Arc Direct Energy Deposition 공정 기술 조영태 교수*(국립창원대학교, 한국기계가공학회)
16:15~16:45	<i>Break</i>
16:45~17:50	<b>기조강연</b>

## 제3발표회장

2025년 5월 22일(목)

티파니룸 (B3F)

5월 22일(목)

## 일반구두발표 : 소재응용

좌장 : 박성혁 (경북대학교)

13:00~13:15	KSTP_2025A_096	인공지능 기반 철강 소재 템퍼링 공정에서의 미세조직 및 물성 예측 강준우*(한국재료연구원), 김호혁, 김지훈, 강성훈
13:15~13:30	KSTP_2025A_154	고온 변형 하에서 ZK60 마그네슘 합금의 구성 요소 거동: 데이터 기반 모델링 접근법 Murugesan Mohanraj*(한국재료연구원), 장효선, 조재형
13:30~13:45	KSTP_2025A_196	AA6082-T6 알루미늄 압출재의 극저온 고주기 피로 특성 허정민*(건국대학교), 권종혁, 권대서, 김동규
13:45~14:00	KSTP_2025A_198	스트레칭-벤딩 변형모드의 균형을 갖는 하이브리드 격자구조 메타물질 오호약*(건국대학교), 권종혁, 권대서, 허정민, 정경환, 이호원, 김동규
14:00~14:15	KSTP_2025A_022	다결정 소성 모델을 활용한 동적 재결정 모사 전보혜*(국립창원대학교), Carlos N Tomé, 정영웅
14:15~14:30	KSTP_2025A_172	마그네슘 합금의 회복: 실험적 관찰과 결정소성 해석 정영웅*(국립창원대학교), Jose Victoria-Hernandez, 정영웅
14:30~14:45		Break

## 일반구두발표 : 소재응용

좌장 : 김동규 (건국대학교)

14:45~15:00	KSTP_2025A_049	고성능 상용차용 휠 개발 권혁선*(포스코)
15:00~15:15	KSTP_2025A_145	마그네슘 합금 판재의 r-값 및 성형성에 대한 집합조직의 영향과 상관관계 분석 유승윤*(경북대학교), 정영웅, 김영민, 박성혁, 서병찬
15:15~15:30	KSTP_2025A_149	UNSM과 Electropulsing 처리를 통한 마그네슘 합금 판재의 미세조직 제어 및 기계적 물성 향상 홍원표*(경북대학교), 김현지, 이태경, 박성혁
15:30~15:45	KSTP_2025A_178	Y2O3가 분산된 Ti-6Al-4V 합금 제조 및 특성 평가 김우혁*(국립한밭대학교), 고의준, 박형기, 김한수, 이태규, 김정한
15:45~16:00	KSTP_2025A_163	2차 전지 파우치용 AL-8079와 캐스트 폴리프로필렌 간의 직접 결합을 강화하기 위한 새로운 표면 활성화 처리 방법 Appiah Emmanuel Owusu*(국립한밭대학교), 한병준, 박진웅, 강정현, 정소희, 김정한
16:00~16:15	KSTP_2025A_204	음향방출법 기반 Top-hat 압축시험을 통한 냉간압조용 강재의 단조성 평가 권대서*(건국대학교), 권종혁, 허정민, 박현승, 주호선, 오영석, 강성훈, 김동규

## 제4발표회장

2025년 5월 22일(목)

아모르룸 (B3F)

특별세션 7 : 철강산업의 가공.후처리 분야 기술 심포지엄 ((재)포항소재산업진흥원)  
좌장 : 박유수 (한국금속재료연구조합)

09:00~09:10	개회사 및 인사말	
09:10~09:20	포항거점센터 사업추진 현황 박병호*(포항소재산업진흥원)	
09:20~09:40	KSTP_2025A_184	다종소재 접합 및 체결기술을 적용한 1.0GPa급 이상 초고강도강 기반 차체부품 개발 서종덕*(주신영)
09:40~10:00	KSTP_2025A_185	자동차 구조부품용 기가급 저항복비 냉간 비조질강 선재 제조기술개발 서은빈*(부곡스텐レス(주))
10:00~10:20	KSTP_2025A_186	고내식 도금 철강소재의 성형 및 응용기술 개발 김재왕*(주)메가플랜텍)
10:20~10:30	Break	
10:30~11:10	KSTP_2025A_187	해상풍력 하부구조용 강재 시장 동향 및 품질특성 김우겸*(포스코)
11:10~11:30	KSTP_2025A_188	백색도 30이하의 전자제품용 합금도금강판의 흑색 질감 기술 개발 김성진*(국립순천대학교)
11:30~11:50	KSTP_2025A_189	기가급 초고장력강판 제조를 위한 롤 코팅 소재 및 공정기술개발 이태규*(주)성육표면처리부문)
11:50~12:00	KEIT 담당간사 - 과제담당자 간 질의응답 및 간담회	
12:00~13:00	Break	

**특별세션 2 : 국내 항공엔진 소재부품 기술 개발 현황, 한화와 함께하는 엔진 국산화 도전 (한화에어로스페이스(주))**
**1부 : 항공엔진 부품 국산화의 전략과 여정**
**좌장명: 황병철 (서울과학기술대학교)**

13:00~14:00	KSTP_2025A_014	항공엔진 부품 단조 공정 설계의 지능화 김낙수*(서강대학교), 박준희, 김인서
14:00~14:20	KSTP_2025A_195	항공용 가스터빈엔진 소재 개발 현황 및 계획 손인수*(한화에어로스페이스(주))
14:20~14:40	KSTP_2025A_087	항공용 가스터빈엔진 단조품 및 국산화 개발 현황 오승철*(한화에어로스페이스(주)), 황승욱, 권혁준, 김지윤, 손인수
14:40~15:00	KSTP_2025A_095	고성능 항공엔진 부품을 위한 단조 기술과 적용 사례 권혁준*(한화에어로스페이스(주)), 황승욱, 오승철, 김지윤, 손인수
15:00~15:20		<i>Break</i>

**2부 : 산학연이 함께 만드는 항공엔진 부품 기술 생태계**
**좌장명: 이은호 (성균관대학교)**

15:20~15:40	KSTP_2025A_118	Processing Map을 활용한 소성가공 공정 설계 김지윤*(한화에어로스페이스(주)), 권혁준, 황승욱, 오승철, 손인수, 박준희
15:40~16:00	KSTP_2025A_052	항공엔진용 인코넬 718 합금의 결정립 미세화를 위한 단조공정 연구 김종식*(주케이피씨엠), 주경준, 권용혁, 금보경, 이기영
16:00~16:20	KSTP_2025A_167	항공 엔진소재용 니켈합금 단조품 제조를 위한 Delta Phase 기반 공정 최적화 나혜성*(에이치브이엠), P. L Narayana, 김정균, 최재영
16:20~16:40	KSTP_2025A_069	Waspaloy 합금 단조공정 해석 이상곤*(한국생산기술연구원), 이인규, 이성윤, 안지섭, 황선광, 권혁준, 김지윤
16:40~17:00	KSTP_2025A_015	단류선의 건전성 및 기계적 특성을 고려한 단조 공정 설계 박준희*(서강대학교), 박동휘, 한병찬, 김낙수

## 제5발표회장

2025년 5월 22일(목)

발렌티룸 (B3F)

5월 22일(목)

## 일반구두발표 : 적층제조 및 유연공정

좌장 : 심도식 (국립한국해양대학교)

13:00~13:15	KSTP_2025A_099	레이저 분말베드 용융 공정에서의 열 변형 완화를 위한 다중 에이전트 강화학습 기반 영역 분할 공정 변수 최적화 육주찬*(부산대학교), 박석희
13:15~13:30	KSTP_2025A_064	L-PBF 공정에서 비접촉 서포트 적용이 오버행 구조 조형에 미치는 영향 안성현*(한국재료연구원), 김상우
13:30~13:45	KSTP_2025A_175	에너지 제어형 용착 공정을 이용한 적층 공정 및 기계 부품 재제조 기술 개발 이광규*(조선대학교), 안동규
13:45~14:00	KSTP_2025A_100	압출력 데이터를 이용한 conditional LSTM-VAE 모델 기반 3D 프린팅 공정 실시간 워핑 감지 시스템 개발 이승문*(부산대학교), 박석희
14:00~14:15	KSTP_2025A_058	에어포일 형상 스트럿으로 설계된 격자 구조체의 적층제조 및 방열 성능 평가 박근태*(한국재료연구원), 김상우
14:15~14:30		Break

## 일반구두발표 : 적층제조 및 유연공정 / 제조공정 및 장비

좌장 : 전종배 (동아대학교)

14:30~14:45	KSTP_2025A_009	딥러닝을 이용한 적층제조된 18Ni300 마레이징 강의 잔류 응력 완화 예측 김세윤*(한국재료연구원), 김동규, 강성훈, 김지훈, 오영석
14:45~15:00	KSTP_2025A_104	고온 환경에서 Cermet 코팅의 내열성 및 내마모 특성에 관한 연구 하형진*(국립한국해양대학교), 심도식
15:00~15:15	KSTP_2025A_080	CNT 코팅이 적용된 TPMS 구조의 적층 재료 및 셀 형상에 따른 전기 저항 성능 분석 한승현*(조선대학교), 범종찬, 안동규
15:15~15:30	KSTP_2025A_077	WAAM 공정으로 제조된 Al-5356 합금의 미세조직 견전성 및 기계적 특성 평가 전민수*(인하대학교), 황원구, 오민선, 김동혁, 이기안
15:30~15:45	KSTP_2025A_101	Study on the process optimization and properties of nickel-aluminum bronze fabricated by directed energy deposition Changliang Yao*(한국해양대학교), 신광용, 심도식
15:45~16:00	KSTP_2025A_079	배관 용접부 결함 예측을 위한 다중 센싱 시스템 및 머신러닝 알고리즘 개발 정유형*(한양대학교), 장승범, 트루잉반도이, 윤종현

## 제6발표회장

2025년 5월 22일(목)

라티나룸 (B3F)

### 특별초청발표 : IJMTM & JMPT Presentation

13:00~15:00

“Writing Papers for Leading Academic Journals in Manufacturing Science and Engineering : The IJMTM and JMPT approach”  
Prof. Dragos Axinte\*(Editor-in-Chief of IJMTM and JMPT)

15:00~17:00

Paper Surgery for IJMTM & JMPT

5월 22일(목)

## 제7발표회장

2025년 5월 22일(목)

베일리룸 (B3F)

5월 22일(목)

## 일반구두발표 : 재료거동 및 특성화

좌장: 최현성 (한국재료연구원)

13:00~13:15	KSTP_2025A_056	알루미늄 압출재 기계가공 유한요소해석을 위한 이방성, 변형률 속도, 하중경로를 고려한 연성파단 물성 실험 심현보*(한국재료연구원), 신윤우, 정찬욱, 오석근, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성
13:15~13:30	KSTP_2025A_073	소성이방성과 변형률속도가 알루미늄 압출재의 파단물성에 미치는 영향 김형서*(서울대학교), 흥서준, 원정윤, 경준석, 이명규
13:30~13:45	KSTP_2025A_103	형상측정기반 소성 변형 압입 시험 원리 및 금속 소재 적용 연구 권준범*(한국재료연구원), 김용남
13:45~14:00	KSTP_2025A_119	페인트 베이킹 3세대 강판 저항점용접부의 국부 소성 거동에 대한 마이크로 스케일 인장 특성 평가 조동혁*(한국과학기술원), 최두열, 윤정환
14:00~14:15	Break	

## 일반구두발표 : 재료거동 및 특성화

좌장 : 김찬양 (국립군산대학교)

14:15~14:30	KSTP_2025A_127	포타슘이 도핑된 텅스텐의 초기 소성에 대한 연구 김정석*(서울대학교), 민건식, Phu Cuong Nguyen, 이성민, 오연주, 김황선, 김형찬, 류일, 한홍남
14:30~14:45	KSTP_2025A_144	디지털 이미지 상관 기법(DIC)을 이용한 고속 인장 시험 시 표점 거리가 변형률 속도에 미치는 영향 분석 이상민*(국립공주대학교), 김정민, 김원섭, 홍석무
14:45~15:00	KSTP_2025A_072	전자기장을 활용하여 재료의 기계적 물성을 실시간 측정기술 및 이를 기반으로 한 소성가공 자율제조 기술 이은호*(성균관대학교)
15:00~15:15	KSTP_2025A_197	실시간 음향방출 및 중성자 회절 기반 B4C/AA6061 복합재의 미시역학적 손상 기구 규명 권종혁*(건국대학교), 허정민, 권대서, 이호원, 조승찬, 채호병, 우완측, 김동규
15:15~15:30	Break	

## 일반구두발표 : 미세구조 및 응용 / 플라스틱가공

좌장 : 이태경 (부산대학교)

15:30~15:45	KSTP_2025A_050	전단 변형 시험을 통한 초고강도강의 타발 데미지와 구멍확장비 연구 이승호*(서울대학교), 조우진, 정든봄, 이제웅, 김성일, 한홍남
15:45~16:00	KSTP_2025A_081	AlMoV 내열 중엔트로피 합금의 설계 및 기계적 특성 이시우*(포항공과대학교), 김형섭
16:00~16:15	KSTP_2025A_053	초음파 나노표면개질 공정이 이종 마찰용접 Nimonic 80A/SNCrW 소재에 미치는 영향 분석 최언준*(한국재료연구원), 우영윤, 김정기, 신재우, 조재현, 윤은우

## 제1발표회장

2025년 5월 23일(금)

그랜드볼룸A (2F)

**특별세션 1 : 청정복합화력발전 핵심요소기술 및 국산화 전문인재 양성 심포지엄 (경상국립대학교)**  
**좌장 : 김정기 (경상국립대학교)**

09:00~09:15	KSTP_2025A_057	DED(Directed Energy Deposition)공정을 이용한 Inconel 625 및 Ti64 기판 상 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 적층 거동 분석 김태현*(경남대학교), 이진수, 김상인, 배수한, 김세윤
09:15~09:30	KSTP_2025A_055	NiCoCrAlY 조성을 갖는 분말과 용사코팅된 시편의 열성장산화물 및 혼합산화물의 형성 거동 김상인*(경남대학교), 김태현, 배수한, 이진수, 김세윤
09:30~09:45	KSTP_2025A_042	직접용융증착법으로 제조된 Inconel 625 / $\text{Al}_2\text{O}_3$ 경사기능재의 단열 및 기계적 특성 유현용*(경상국립대학교), 유진영, 안성열, 이태경, 김형섭, 김정기
09:45~10:00	KSTP_2025A_031	직접용융증착법을 활용하여 접합한 IN738LC / CM247LC 이종소재의 인장 변형 중 계면 안정성 성예찬*(경상국립대학교), 강호성, 김정기
10:00~10:15		Break

**특별세션 1 : 청정복합화력발전 핵심요소기술 및 국산화 전문인재 양성 심포지엄 (경상국립대학교)**  
**좌장 : 정영웅 (국립창원대학교)**

10:15~10:30	KSTP_2025A_012	Directed energy deposition으로 제조된 IN738LC 합금의 후열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화 강호성*(경상국립대학교), 성예찬, 박기덕, 이형수, 김형섭, 김정기
10:30~10:45	KSTP_2025A_033	Numerical Investigation of Flow and Combustion Characteristics of Hydrogen-Enriched Fuel in a Micromix Combustion Sajan Tamang*(국립창원대학교), 박희성
10:45~11:00	KSTP_2025A_007	이중벽 냉각 구조를 통한 가스터빈 연소기 라이너 냉각 성능 향상 연구 김덕형*(국립창원대학교), 박희성
11:00~11:20		토론 및 질의

## 제2발표회장

2025년 5월 23일(금)

그랜드볼룸B (2F) 09:15~11:30

포스터 발표		좌장: 김용남(한국재료연구원), 노동환(현대자동차)
P01	KSTP_2025A_006	변형을 기반 연성 파단 모델을 적용한 버링 성형성 예측 김기정*(현대제철(주)), 박영철, 전진화, 신건진, 윤승채
P02	KSTP_2025A_008	초고강도강판 크랙 저항성 평가 박영철*(현대제철(주)), 김지영, 임기학, 김기정, 진병극, 전진화, 박형권, 조용희, 유지성
P03	KSTP_2025A_010	합성 토크 데이터를 활용한 AI 기반 조립 공정 불량 판별 모델 개발 곽봉석*(한국생산기술연구원), 김민수, 박지우
P04	KSTP_2025A_013	가변 접착력 및 모션 적응성을 갖춘 피부 패치 설계 및 웨어러블 전자기기 응용 김소미*(울산과학기술원), 최건준, 김재일, 이희진, 장혜진, 정훈의
P05	KSTP_2025A_019	기계학습 기반 계층적 군집화를 활용한 레이저 용접된 DP 강의 상분율 예측 천민준*(국립한밭대학교), Soumyabrata Basak, 홍성태, 조훈휘
P06	KSTP_2025A_021	Cu 침가와 인공 시효 조건에 따른 6xxx계 AI 합금의 미세구조 및 기계적, 전기화학적 특성 분석 홍현빈*(국립한밭대학교), Raj Narayan Hajra, 신은주, 김재국, 이종숙, 김정한, 김재황, 조훈휘
P07	KSTP_2025A_024	이상 결정 방위의 가우시안 분산과 영향 정의찬*(국립창원대학교), 정영웅
P08	KSTP_2025A_025	허브 베어링용 아웃터 링 공정 시뮬레이션 및 성형하중의 실험적 검증 문호근*(주)엠에프알씨), 장성민, 염재근, 조주현, 김진국, 전만수
P09	KSTP_2025A_027	탄성 계수, 변형률 증분 및 속도가 탄점소성 다결정 모델 수치해석 결과에 미치는 영향 강주홍*(국립창원대학교), 정영웅
P10	KSTP_2025A_028	AI 기반 YOLOv8과 다행 회귀 보정식을 이용한 연속공정 압연품의 폭·두께 측정 시스템에 관한 연구 이관규*(주)씨에이이테크놀러지), 김진구, 곽호택
P11	KSTP_2025A_030	적층제조 후가공 효율성 향상을 위한 빌드 플레이트 상 밀링 공정 개발 및 FEA 기반 품질 예측 함민지*(한국생산기술연구원), 문인용
P12	KSTP_2025A_032	트랙 링크 열간단조 공정의 유한요소해석 장성민*(주)엠에프알씨), 문호근, 김병오, 전만수
P13	KSTP_2025A_034	프로그래밍이 가능한 접착력을 위한 미세구조와 비선형 컷 기반의 다중스케일 균열 제어 접착 패치 송현석*(울산과학기술원), 박성진, 강동관, 정훈의

P14	KSTP_2025A_038	316L 스테인리스강 고압수소배관 제조 시 발생하는 인장 물성 및 내수소취성 변화 고재훈*(영남대학교), 홍성모, 강지현
P15	KSTP_2025A_040	성형해석을 통한 주조재용 압입너트 최적화 염승록*(주)풍강), 강성묵, 이광희
P16	KSTP_2025A_045	Cu/Al/Cu 클래드 메탈을 이용한 유연 버스바 제조에 관한 연구 송재선*(대구기계부품연구원), 윤국태, 김동환, 정관효
P17	KSTP_2025A_054	전기자동차 차동장치용 액추에이터 하우징 부품의 공정설계에 관한 연구 이상길*(주)송원하이텍), 송원호, 노태우, 진도훈
P18	KSTP_2025A_059	Direct energy deposition 적층 공정으로 제조된 중탄소 공구강의 우수한 강도-연성 조합에 미치는 계층적 미세조직 영향 박정현*(인하대학교), 전민수, 김대중, 전종배, 구용모, 이기안
P19	KSTP_2025A_062	고내식 Ni-Cr-Mo계 합금의 고온 변형 거동 분석 조주형*(한국재료연구원), 우영윤, 홍종화, 윤은유
P20	KSTP_2025A_065	프레스 특성 가시화 및 형합 보정을 위한 볼스터 변형량 측정 및 시뮬레이션 연구 강희원*(한국자동차연구원), 박건영, 정정봉, 최진영, 김동옥
P21	KSTP_2025A_067	유도국부가열을 적용한 전기차 속업쇼바용 고강도 스프링시트 냉간성형에 관한 연구 권태하*(대구기계부품연구원), 전효원, 송 확, 김은영, 장효정, 서창희
P22	KSTP_2025A_071	냉간압연 및 열처리에 따른 MgLi 합금의 미세조직 및 기계적 특성 연구 정효태*(국립강릉원주대학교), 조유연, 강민성, 김한중, 이현준
P23	KSTP_2025A_076	다이어프램 벨브용 Co계 초합금 냉간 압연재의 인장 특성 및 강화 메커니즘 송노건*(인하대학교), 박정현, 최재호, 강두홍, 이기안
P24	KSTP_2025A_083	강화학습 적용한 SPOT 용접순서에 따른 거동분석 최현범*(주)호원), 이서한, 이정우, 백승엽, 강정길, 이상현
P25	KSTP_2025A_084	알루미늄 플레이트 용접부 염수침수에 따른 강도변화 최현범*(주)호원), 이서한, 이정우, 이상현
P26	KSTP_2025A_086	형상 기억 고분자 소재 기반 4D 구조물의 인장-굽힘 특성 평가 김민성*(서울과학기술대학교), 박 근
P27	KSTP_2025A_091	디지털 이미지 상관법(DIC) 기반 인장시험 시 네킹 이후 물성평가 및 해석적용 문지환*(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김동건, 이명규, 송정한
P28	KSTP_2025A_092	배터리용 알루미늄 커버 부품 프레스 성형 공정 설계 연구 김경민*(한국생산기술연구원), 이상오, 임성식, 배기현, 노건우, 송정한
P29	KSTP_2025A_094	항온변태열처리 온도가 냉간단조용 비조질강의 성형성에 미치는 영향 안민호*(한국재료연구원), 우영윤
P30	KSTP_2025A_117	고온 박막 공정용 AlN 샤프트 및 접합 소재의 특성 평가 하태권*(국립강릉원주대학교), 정준기

P31	KSTP_2025A_124	CFD 기법을 적용한 LNG 이송용 이중배관 시스템의 기화량(BOG)에 관한 연구 윤정현*(동아대학교), 정민근, 박종빈, 지서현, 임현우, 한정연, 김성재
P32	KSTP_2025A_129	Tape Cast한 다공성 Ti 판재의 면저항 특성 분석 박민수*(한국항공대학교)
P33	KSTP_2025A_132	マイ크로 LED용 기판 전도성 잉크 코팅을 위한 노즐 형상 및 기판 모서리 영향 해석 박정연*(한국생산기술연구원), 권승갑, 김지우, 강봉철, 김종수
P34	KSTP_2025A_133	고전단 영역에서 사출기 기반 점도 측정 시 과소 측정 원인 분석 및 수지별 유동 특성 비교 박정연*(한국생산기술연구원), 손종인, 윤언경, 이준한, 손정연, 김상윤, 윤길상
P35	KSTP_2025A_135	조립 응력 및 인장하중에 대한 결합강도를 고려한 핀 없는 케이블체인의 다목적 최적설계 김민제*(국립공주대학교), 홍석무
P36	KSTP_2025A_136	플라스틱 씰의 형상 및 구동 조건 민감도 분석을 통한 접촉 압력 경향 연구 심형준*(국립공주대학교), 오민성, 안수봉, 이희장, 홍석무
P37	KSTP_2025A_137	수소 장입 온도에 따른 pure Ta의 기계적 물성 및 미세조직에 관한 연구 김민호*(국립한밭대학교), 흥현빈, 조민철, 이근호, 박이주, 이상엽, 신중호, 조훈휘
P38	KSTP_2025A_141	마찰교반용접 조건에 따른 Al6061의 기계적 및 미세조직 특성 분석 변성욱*(국립공주대학교), 이강찬, 박옥조, 홍석무
P39	KSTP_2025A_151	기계학습 기반 ZK60 압출재의 재결정 거동 예측 천세호*(부산대학교), 유진영, 이성호, 이태경
P40	KSTP_2025A_152	2D FEM과 비대칭 시편을 이용한 EPT의 열·비열 효과 정량적 규명 송종한*(부산대학교), 이승엽, 천세호, 유진영, 이성호, 박동준, 이정훈, 박성혁, 이태경
P41	KSTP_2025A_153	열처리 공정에 따른 원자력 격납용기 강재의 carbide 미세조직 및 충격 인성 평가 박동준*(부산대학교), 유진영, 천세호, 이성호, 송종한, 이승엽, 이정훈, 이진모, 이채훈, 이태경
P42	KSTP_2025A_161	인공지능 기반 ML-DIC 이미지를 이용한 AI-합금 과대하중 시 피로균열전파 거동 분석 김도현*(한국재료연구원), 최영원, 좌비오, 이승환, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남
P43	KSTP_2025A_162	금속소재의 피로 균열 치유를 위한 펄스전류 인가 공정 설계 홍범락*(한국재료연구원), 최현성, 석무영, 이동준, 권용남, 박현일
P44	KSTP_2025A_165	열간압연 공정으로 제조된 고망간강의 바나듐 함량 및 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화 분석 양승우*(동아대학교), 송호정, 박시욱, 김용진, 박건우, 이동호, 장재훈, 전종배
P45	KSTP_2025A_168	타이타늄 합금 판재의 확산접합/부풀림 성형을 통한 샌드위치 구조체의 제조 및 기계적 특성 연구 반승현*(한국재료연구원), 최현성, 박현일, 석무영, 권용남, 이동준
P46	KSTP_2025A_169	고체냉각소재 La-Fe-Co-Si 합금의 열간 변형 거동 및 자기 열량 특성 분석 양선영*(한국재료연구원), 김민직, 양우석, 김정한, 이광석, 신다슬

P47	KSTP_2025A_173	인공지능 기법을 이용한 ML-DIC 이미지 기반 알루미늄 합금의 피로 균열 거동 분석 최영원*(한국재료연구원), 좌비오, 김도현, 신윤우, 이승환, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남
P48	KSTP_2025A_176	롤 라미네이션 공정 조건에 따른 장길이 연성회로기판의 충진 특성 분석 한준세*(한국기계연구원), 이찬우, 곽은지, 최두선
P49	KSTP_2025A_180	열간압연강에서 형성된 산화물 스케일의 잔류 응력 수치 분석을 위한 준해석적 방법 개발 강선아*(국립경국대학교), 전웅제, 윤지강, 이재민, 김선호, 김영천, 남승훈, 이명규, 노우람
P50	KSTP_2025A_181	LZ91 합금의 냉간 압연 시 미세조직 변화에 대한 연구 서위걸*(국립순천대학교), 고경민, 이은세, Khushahal Thool, 최시훈
P51	KSTP_2025A_190	쇼트피닝 처리된 알루미늄 합금의 피로 하중 중 압축 잔류 응력 이완 및 균열 성장 거동 분석 조윤지*(한국재료연구원), 이승환, 최현성, 박현일, 권용남, 이동준, 흥종화
P52	KSTP_2025A_192	PMMA 진공 성형에서 두께 균등성을 위한 변형 거동 분석 백민재*(한국재료연구원), 신윤우, 조윤지, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 김덕성, 정대호, 송민환, 정유인, 최현성
P53	KSTP_2025A_194	다상조직강의 충격 특성 개선을 위한 열처리 공정 최적화 김상현*(한국재료연구원), 윤은유, 이영선, 우영윤
P54	KSTP_2025A_199	열처리형 알루미늄 합금 2014 및 6061의 이축교번단조 비교: 미세조직과 기계적 거동 하성호*(한국생산기술연구원), 신영철
P55	KSTP_2025A_209	항공엔진 케이싱용 링 부품 제작을 위한 단조/링단조 공정 설계 김진용*(주태상), 이인환, 김지윤, 주병돈

## 제3발표회장

**2025년 5월 23일(금)**

**티파니룸 (B3F)**

**일반구두발표 : 박판성형**

**좌장 : 송정한 (한국생산기술연구원)**

09:00~09:15	KSTP_2025A_170	46mm 직경 철강재 원통형 이차전지 용기 성형 시험용 딥-드로잉 금형 개발과 이를 활용한 성형 특성 연구 박기철*(포스코), 안강환
09:15~09:30	KSTP_2025A_003	통합 인공 신경망 평가 함수를 활용한 다단 딥 드로잉 공정 설계 최적화 한성식*(국민대학교), 김홍규
09:30~09:45	KSTP_2025A_140	최적화 모델에 따른 GISSMO 손상계수 결정 비교 연구 오민성*(국립공주대학교), 박상규, 흥석무
09:45~10:00	KSTP_2025A_035	롤포밍 및 3차원 벤딩을 적용한 1.7G 초고강도 강판의 폐단면 튜블라빔 부품 개발 남기석*(현대자동차(주)), 박상천, 조성민
10:00~10:15	KSTP_2025A_029	자동차용 1.8GPa 핫스탬핑 강판 개발 및 적용 기술 윤승채*(현대제철(주)), 박계정, 박재명, 공제열, 손경주
10:15~10:30		<i>Break</i>

**특별세션 6 : 플라스틱 성형 공정에서의 디지털트윈/시뮬레이션 최신 동향 (서울과학기술대학교)**

**좌장 : 박 근 (서울과학기술대학교)**

10:30~10:50	KSTP_2025A_125	압출스크류 파단 문제 해결 및 공 압출 (Coextrusion) 사례 이돈규*(디에프엠에이코리아)
10:50~11:10	KSTP_2025A_108	소재 물성 신뢰성 확보를 위한 Moldex3D DT 활용 황병관*(이티에스소프트), Joe Wang
11:10~11:30	KSTP_2025A_060	사출성형 해석기반의 XR/AI 응용 소프트웨어를 활용한 Ramp-up 프로세스 개선에 관한 연구 황순환*(이디앤씨), 오준호, 황수진, 이재훈, 안영수, 강동훈
11:30~11:50	KSTP_2025A_016	사출금형 냉각 효율 향상을 위한 적층제조 메타물질 활용 박 근*(서울과학기술대학교), 오서현, 유정희

## 제4발표회장

2025년 5월 23일(금)

아모르룸 (B3F)

## 일반구두발표 : 공정계산역학

좌장 : 홍종화 (한국재료연구원)

09:00~09:15	KSTP_2025A_074	결정소성 유한요소법과 In-situ EBSD 분석을 이용한 CP Ti 판재의 기계적 거동 분석 김경표*(부산대학교), 강주희, 오창석, 김지훈
09:15~09:30	KSTP_2025A_023	베이지안 추론과 유한 요소 해석을 활용한 기계적 물성 역추정: 핵연료 피복관 응용 사례 전보혜*(국립창원대학교), Carlos N Tomé, Laurent Capolungo, 정영웅
09:30~09:45	KSTP_2025A_150	PMMA기반 투명체 성형공정 설계 및 유한요소해석 모델링 최현성*(한국재료연구원), 백민재, 신윤우, 박현일, 이동준, 석무영, 권용남, 정대호
09:45~09:55		Break

## 제14회 신진학술상 수상 기념 강연

09:55~10:15		물리 기반 머신러닝을 활용한 피로수명 예측 이태경*(부산대학교), 유진영, 박성혁
10:15~10:35		마찰교 반접합을 이용한 알루미늄 합금의 물성 개선 및 합금 자체의 부식 특성에 관한 연구 조훈휘*(국립한밭대학교)
10:35~10:45		Break

## 특별세션 5 : 인공지능 및 디지털트윈 기반 자율 제조 공정 기술 (한국과학기술원)

좌장 : 이종섭 (한국생산기술연구원)

10:45~11:00	KSTP_2025A_128	스마트 사출성형 시스템 기술의 현재와 미래 소현우*(LG전자), 이승찬
11:00~11:15	KSTP_2025A_017	공정 모니터링 기반 판재성형 지능화 기술 개발 배기현*(한국생산기술연구원), 송정한, 이종섭, 장인제, 김태훈, 김경환, 이주은, 김보익, 정영수
11:15~11:30	KSTP_2025A_093	물리 정보 신경망을 이용한 절삭력과 절삭에너지 예측 맹상진*(홍익대학교), 김병민
11:30~11:45	KSTP_2025A_018	기계학습 기반 밀링 공구 마모 예측 모델 분석 윤희택*(한국과학기술원), Matteo Ramella
11:45~12:00	KSTP_2025A_082	미세조직 역설계를 위한 다중충실도 데이터 기반 잠재 확산 모델 학습 방법 정재면*(한국재료연구원), 오세혁, 김호혁, 나주원, 김세종, 이호원

## 제5발표회장

**2025년 5월 23일(금)**

**발렌티룸 (B3F)**

**일반구두발표 : 압출 및 인발**

**좌장 : 신다슬 (한국재료연구원)**

09:00~09:15	KSTP_2025A_120	다파스 인발공정에서 주요변수가 인발에 미치는 영향 신영빈*(경상국립대학교), 홍보승, 정동섭, 전만수
09:15~09:30	KSTP_2025A_114	원주방향 잔류응력을 고려한 후관 인발 공정의 최적화 강민성*(경상국립대학교), 허윤, 이강희, 전만수
09:30~09:45	KSTP_2025A_112	유한요소해석을 통한 인발 공정 중 표면 균열의 변형 거동 분석 이석의*(중앙대학교), 이영석
09:45~10:00	KSTP_2025A_110	튜브 인발 공정에서의 최적 공정 설계 허윤*(경상국립대학교), 전만수
10:00~10:15	KSTP_2025A_098	QForm UK 기반 압출 금형 설계 및 결함 예측 장창순*(주)씨에이이테크놀러지), Ivan Kulakov, 곽호택
10:15~10:30		<i>Break</i>

**일반구두발표 : 압출 및 인발 / 압연**

**좌장 : 윤은유 (한국재료연구원)**

10:30~10:45	KSTP_2025A_047	2단 압출을 통한 생분해성 마그네슘 미세튜브 제조와 압출비 및 Mn, Sr 첨가 효과에 관한 연구 김재성*(한국재료연구원), 김재연, 임창동, 서병찬, 김하식, 이상은, 서종식
10:45~11:00	KSTP_2025A_139	압출비가 Mg–5Bi–3Al 합금의 동적 재결정 거동, 미세조직 변화 및 기계적 특성에 미치는 영향 안건웅*(경북대학교), 진상철, 박성혁
11:00~11:15	KSTP_2025A_089	롤의 탄성 변형을 고려한 선재 압연 공정에서 소재 단면 형상 및 롤에 걸리는 물리량 예측 김규태*(중앙대학교), 이영석
11:15~11:30	KSTP_2025A_090	간이등가회로를 이용한 모터 전류 기반 토크, 를 힘 예측 연구 전진표*(중앙대학교), 남규한, 이동윤, 이영석
11:30~11:45	KSTP_2025A_164	바나듐이 첨가된 고망간강 열간압연재의 미세조직 분석 및 항복강도 예측 모델 개발 송호정*(동아대학교), 박시욱, 김용진, 박건우, 이동호, 장재훈, 정재석, 전종배

## 제6발표회장

2025년 5월 23일(금)

라티나룸 (B3F)

## 일반구두발표 : 모델링 및 시뮬레이션

좌장 : 김지훈 (부산대학교)

09:00~09:15	KSTP_2025A_075	심리스 파이프 제조 공정에서 맨드렐 마모에 영향을 미치는 공정 변수의 영향 분석 윤용석*(주솔루션랩), 이정화, 조의열, 홍성모, 이경훈
09:15~09:30	KSTP_2025A_066	소성 및 크리프를 고려한 하이브리드 본딩 계면 상호작용 및 잔류응력 분석 전형주*(서울대학교), 김사라은경, 장혜진, 이명규
09:30~09:45	KSTP_2025A_005	유한요소법을 이용한 축방향 자속 영구자석 모터용 각형 와이어 권선 공정의 굽힘성 평가 김진수*(한국재료연구원), 윤은유, 권용남, 홍종화
09:45~10:00	KSTP_2025A_002	니켈도금강판을 이용한 4680 배터리 셀 캠 다단 딥 드로잉 공정 최적화 서예찬*(한국재료연구원), 지수민, 이세동, 성홍석, 윤은유, 홍종화
10:00~10:15	KSTP_2025A_138	베어링 레이스웨이의 고주파 열처리 유한요소해석 송정우*(한국재료연구원), 강성훈, 오영석, 강종훈
10:15~10:30		Break

## 일반구두발표 : 금속 성형 분야의 디지털화, 가상화 / 표면 및 인터페이스 / 자율 제조

좌장 : 우영윤 (한국재료연구원)

10:30~10:45	KSTP_2025A_134	ALE 기법을 이용한 유체가 담긴 그릇의 낙하 및 충돌 거동 시뮬레이션 및 실험 검증 황순재*(국립공주대학교), 홍석무
10:45~11:00	KSTP_2025A_202	전위 소성에 기반한 계산 합금 설계 류 일*(서울대학교)
11:00~11:15	KSTP_2025A_147	디지털트윈 및 AI를 통한 제조 혁신 문명수*(오토품엔지니어링코리아주)
11:15~11:30	KSTP_2025A_115	대면적 전자빔 공정에서 발생하는 크레이터의 형성 최소화를 위한 GAN 기반 예측 모델 개발 오민기*(한국재료연구원), 윤준석, 오영석, 강성훈, 이호원, 오세혁, 김지수
11:30~11:45	KSTP_2025A_026	알루미늄 박판의 표면결함 검출 시스템 개발을 위한 AI 기반 합성 데이터 생성 기법에 관한 연구 김진구*(주씨에이이테크놀러지), 이관규, 곽호택

## 제7발표회장

2025년 5월 23일(금)

**베일리룸 (B3F)**

<b>일반구두발표 : International Session - Material / Process</b>	<b>좌장 : 김찬양 (국립군산대학교)</b>
--	---------------------------

09:00~09:15	KSTP_2025A_105	Simulating Spheroidization Kinetics during Heat Treatment M. K. Razali*(MFRC), S. H. Chung, M. C. Kim, M. S. Joun
09:15~09:30	KSTP_2025A_037	A fully coupled VPSC-dDRX(CA) model for predicting microstructure evolution during deformation of magnesium alloys Wenjie Wu*(Seoul Nat'l Univ.), Wenzhen Chen, Myoung-Gyu Lee
09:30~09:45	KSTP_2025A_039	Shear strain evaluation under nonideal simple shear deformation G. F. Han*(KAIST), J. W. Yoon
09:45~10:00	KSTP_2025A_043	Stress-Aware Graph Neural Network for Springback Prediction Considering Material Variations H. Wang*(KAIST), H. Lim, J. W. Yoon
10:00~10:15		<i>Break</i>

<b>일반구두발표 : International Session - Process</b>	<b>좌장 : 노우람 (국립안동대학교)</b>
---	---------------------------

10:15~10:30	KSTP_2025A_044	Lode-dependent stress-invariant-based yieldfunction for anisotropic-differential hardening of pressuresensitive materials S. C. Wang*(KAIST), J. W. Yoon
10:30~10:45	KSTP_2025A_142	Anisotropic Compression Behavior of 316L Stainless Steel at Room and Cryogenic Temperatures: The Influence of Twinning and Transformation Mechanisms Saurabh Pawar*(Sunchon Nat'l Univ.) K. U. Yazar., Khushahal Thool, Wi-Geol Seo, Chang-Gon Jeong, Yoon-Uk Heo, Shi-Hoon Choi
10:45~11:00	KSTP_2025A_143	Evolution of Microtexture in the Friction Stir Processed AA6xxx Sheets using Visco-Plastic Self Consistent Simulations Preetham Alluri*(Sunchon Nat'l Univ.), Lalit Kaushik, Kushahal Thool, Aman Gupta, Abhishek Kumar Singh, Shi-Hoon Choi
11:00~11:15	KSTP_2025A_200	Magnetohydrodynamic effects on melt pool dynamics and defect reduction in laser powder bed fusion Dac-Phuc Pham*(Konkuk Univ.), Zhengtong Shan, Kyung-Hwan Jung, Dong-Kyu Kim
11:15~11:30	KSTP_2025A_085	A novel asynchronous double-sided underwater friction stir processing for enhanced strength-ductility synergy in hetero-structural duplex steel Renhao Wu*(POSTECH), Fujun Cao, Peihao Geng, Zaigham Saeed Toor, Hyoung Seop Kim

# 목 차

## ○ 기조강연

- Plastic deformations induced on the workpiece surface when machining aerospace materials: From Macro to Nano studies  
..... Dragos Axinte\*(Manufacturing Engineering, University of Nottingham, UK) / 35

## 1. 특별세션 4 / 특별세션 3 (제 1 발표회장)

### ○ 초고온 고강도·고내부식 금속소재 공정 및 시험평가 기술

- 항공용 소재 환경시험을 위한 요소기술개발  
..... 이창희\*((재)포항산업과학연구원), 이정훈, 강 성, 정세훈, 배동화, 기수빈 / 37
- 고온(1200℃ 이상) 환경 대응을 위한 우주·항공용 소재 기계적 물성평가 기술과 국가 연구소의 지원 필요성  
..... 민기득\*(㈜피레타), 장현수, 최현선 / 38

### ○ 7kN급 기계적 체결강도 기반 경량 이종소재 차체부품기술개발

- 유한요소해석을 이용한 인발 공정에서의 와이어의 표면 거칠기 예측  
..... 홍현빈\*(국립한밭대학교), Raj Narayan Hajra, 김정한, 조훈희 / 39
- 기계적 체결용 FDS 및 FEW 소재의 Wire rod 선재 열간 압연 공정 최적화를 위한 고온 압축 거동 및 선재 열연 미세조직 분석  
..... 홍창완\*((재)대구기계부품연구원), 윤국태, 이락규, 김주업, 전효원, 서창희, 손동민 / 40
- Steel 하판이 Aluminum-Steel FEW 접합부의 성능에 미치는 영향  
..... 김재훈\*(한국생산기술연구원), 추우인, 주원중, 김지훈, 이승환, 감동혁 / 42
- 전기차 차체용 기계적 접합 하드웨어의 접합 특성에 관한 연구  
..... 정우영\*(한국자동차연구원), 김효성, 허영준, 최정묵 / 43
- FDS 나사 소재의 TME 관찰 및 확산 코팅 분석  
..... 박지니\*(국립한밭대학교), 김선진, 최지성, 박준식 / 44
- 7kN급 기계적 체결 하드웨어를 적용한 경량 이종소재 차체부품 개발 및 실증  
..... 강상민\*(㈜일지테크), 배기만 / 45
- 로봇기반 편방향 RFSSW 시스템 국산화  
..... 최영배\*(엠디티㈜), 손은영, 정근호, 이광원 / 46
- RFSSW 용접툴 국산화 및 검사시스템 개발  
..... 정윤철\*(디엔엠항공), 황재우, 김경규 / 47
- 고인성 및 고내마모 동시 구현 RFSSW용 용접툴 소재의 개발  
..... 강재영\*((재)포항소재산업진흥원), 정야호, 김한수, 김대하 / 48
- 리필 마찰 교반 점 용접 공정의 마모 저감을 위한 유한 요소 해석  
..... 구인환\*(충북대학교), 전종호, 백승민, 이윤수, 조성채, 탁우현, 진인종, 한채훈, 조정호 / 50

## 2. 특별세션 8 / 일반 논문 발표 / 학회연합 교류발표회 (제 2 발표회장)

### ○ 대형 선박 혼소엔진의 고내식성 배기 밸브 기술 개발

- Ni-Cr-Al계 합금의 마찰용접 시 온도 및 변형 시뮬레이션  
..... 이우진\*(부산대학교), 조해주, 정종욱 / 52
- 환경하중에 따른 선박용 배기밸브 스판들 작동상태 검출용 유도형 근접센서에 대한 구조특성평가  
..... 정호승\*(국립한국해양대학교), 노동현, 이상민, 조종래 / 53
- 700 °C  $Na_2SO_4 + V_2O_5$  혼합 용융염 환경에서 DSA760 의 고온 부식 거동  
..... 장희진\*(조선대학교), 정 이, 강창민 / 54
- 선박 혼소엔진용 고강도 고내식성 고Cr 함유 Ni-Cr-Al 합금 개발  
..... 이제인\*(부산대학교), 윤성민, 최윤석 / 55
- 선박엔진에 적용되는 초내열합금 배기밸브 스팬들 연구  
..... 조재현\*(주)케이에스피, 조두식, 우영운, 윤은유, 신재우 / 56

### ○ 단조

- 철도 차륜 열간 단조 해석 기술 개발  
..... 이정용\*(한국재료연구원), 윤은유, 홍종화 / 57
- 냉간단조용 탄소강의 유동특성  
..... 김남현\*(경상국립대학교), 이현민, 김민철, 전만수 / 58
- 금속 재료의 유동 거동을 규명하기 위한 튜브 인장 시험  
..... 홍보승\*(경상국립대학교), 신영빈, 홍석무, 전만수 / 59
- 필렛 롤링 티타늄 합금 볼트 피로 수명 예측  
..... 이현민\*(경상국립대학교), 곽희만, 최정목, 전만수 / 60
- 임의의 인장시험곡선으로부터 표준 인장시험곡선의 획득  
..... 김남윤\*(경상국립대학교), 전만수 / 61
- ZF7B 합금강의 유동특성  
..... 조현준\*(경상국립대학교), 김남윤, 조주현, 김진국, 문호근, 전만수 / 62

### ○ 학회연합 교류발표회

- 롤투롤 공정을 통한 멕신 유연 에너지 저장 필름 제작  
..... 전성찬 교수\*(연세대학교, 한국생산제조학회) / 63
- 고속·고정밀·고생산성을 구현한 Wire Arc Direct Energy Deposition 공정기술  
..... 조영태 교수\*(국립창원대학교, 한국기계가공학회) / 64

## 3. 일반 논문 발표 (제 3 발표회장)

### ○ 소재응용

- 인공지능 기반 철강 소재 템퍼링 공정에서의 미세조직 및 물성 예측  
.....강준우\*(한국재료연구원), 김호혁, 김지훈, 강성훈 / 66
- 고온 변형 하에서 ZK60 마그네슘 합금의 구성 요소 거동: 데이터 기반 모델링 접근법  
.....Murugesan Mohanraj\*(한국재료연구원), 장효선, 조재형 / 68
- AA6082-T6 알루미늄 압출재의 극저온 고주기 피로 특성  
.....허정민\*(건국대학교), 권종혁, 권대서, 김동규 / 69
- 스트레칭-벤딩 변형모드의 균형을 갖는 하이브리드 격자구조 메타물질  
.....오호약\*(건국대학교), 권종혁, 권대서, 허정민, 정경환, 이호원, 김동규 / 70
- 다결정 소성 모델을 활용한 동적 재결정 모사  
.....전보혜\*(국립창원대학교), Carlos N Tomé, 정영웅 / 71
- 마그네슘 합금의 회복: 실험적 관찰과 결정소성 해석  
.....정영웅\*(국립창원대학교), Jose Victoria-Hernandez, 정영웅 / 72
- 고성능 상용차용 휠 개발  
.....권혁선\*(포스코) / 73
- 마그네슘 합금 판재의 r-값 및 성형성에 대한 집합조직의 영향과 상관관계 분석  
.....유승윤\*(경북대학교), 정영웅, 김영민, 박성혁, 서병찬 / 74
- UNSM과 Electropulsing 처리를 통한 마그네슘 합금 판재의 미세조직 제어 및 기계적 물성 향상  
.....홍원표\*(경북대학교), 김현지, 이태경, 박성혁 / 75
- Y2O3 가 분산된 Ti-6Al-4V 합금 제조 및 특성 평가  
.....김우혁\*(국립한밭대학교), 고의준, 박형기, 김한수, 이태규, 김정한 / 76
- 2 차 전지 파우치용 AL-8079 와 캐스트 폴리프로필렌 간의 직접 결합을 강화하기 위한 새로운 표면 활성화 처리 방법  
.....Appiah Emmanuel Owusu\*(국립한밭대학교), 한병준, 박진웅, 강정현, 정소희, 김정한 / 77
- 음향방출법 기반 Top-hat 압축시험을 통한 냉간압조용 강재의 단조성 평가  
.....권대서\*(건국대학교), 권종혁, 허정민, 박현승, 주호선, 오영석, 강성훈, 김동규 / 78

#### 4. 특별세션 2 (제 4 발표회장)

##### ○ 국내 항공엔진 소재부품 기술 개발 현황, 한화와 함께하는 엔진 국산화 도전

- 항공엔진 부품 단조 공정 설계의 지능화  
.....김낙수\*(서강대학교), 박준희, 김인서 / 80
- 항공용 가스터빈엔진 단조품 및 국산화 개발 현황  
.....오승철\*(한화에어로스페이스㈜), 황승욱, 권혁준, 김지윤, 손인수 / 81
- 고성능 항공엔진 부품을 위한 단조 기술과 적용 사례  
.....권혁준\*(한화에어로스페이스㈜), 황승욱, 오승철, 김지윤, 손인수 / 82
- Processing Map을 활용한 소성가공 공정 설계  
.....김지윤\*(한화에어로스페이스㈜), 권혁준, 황승욱, 오승철, 손인수, 박준희 / 83

- 항공엔진용 인코넬 718 합금의 결정립 미세화를 위한 단조공정 연구  
..... 김종식\*(주)케이피씨엠), 주경준, 권용혁, 금보경, 이기영 / 84
- 항공 엔진소재용 니켈합금 단조품 제조를 위한 Delta Phase 기반 공정 최적화  
..... 나혜성\*(에이치브이엠), P. L Narayana, 김정균, 최재영 / 85
- Waspaloy 합금 단조공정 해석  
..... 이상곤\*(한국생산기술연구원), 이인규, 이성윤, 안지섭, 황선광, 권혁준, 김지윤 / 86
- 단류선의 건전성 및 기계적 특성을 고려한 단조 공정 설계  
..... 박준희\*(서강대학교), 박동희, 한병찬, 김낙수 / 87

## 5. 일반 논문 발표 (제 5 발표회장)

### ○ 적층제조 및 유연공정

- 레이저 분말베드 용융 공정에서의 열 변형 완화를 위한 다중 에이전트 강화학습 기반 영역 분할 공정 변수 최적화  
..... 육주찬\*(부산대학교), 박석희 / 89
- L-PBF 공정에서 비접촉 서포트 적용이 오버행 구조 조형에 미치는 영향  
..... 안성현\*(한국재료연구원), 김상우 / 90
- 에너지 제어형 용착 공정을 이용한 적층 공정 및 기계 부품 재제조 기술 개발  
..... 이광규\*(조선대학교), 안동규 / 91
- 압출력 데이터를 이용한 conditional LSTM-VAE 모델 기반 3D 프린팅 공정 실시간 워핑 감지 시스템 개발  
..... 이승문\*(부산대학교), 박석희 / 92
- 에어포일 형상 스트 Można으로 설계된 격자 구조체의 적층제조 및 방열 성능 평가  
..... 박근태\*(한국재료연구원), 김상우 / 93
- 딥러닝을 이용한 적층제조된 18Ni300 마레이징 강의 잔류 응력 완화 예측  
..... 김세윤\*(한국재료연구원), 김동규, 강성훈, 김지훈, 오영석 / 94
- 고온 환경에서 Cermet 코팅의 내열성 및 내마모 특성에 관한 연구  
..... 하형진\*(국립한국해양대학교), 심도식 / 95
- CNT 코팅이 적용된 TPMS 구조의 적층 재료 및 셀 형상에 따른 전기 저항 성능 분석  
..... 한승현\*(조선대학교), 범종찬, 안동규 / 97
- WAAM 공정으로 제조된 Al-5356 합금의 미세조직 건전성 및 기계적 특성 평가  
..... 전민수\*(인하대학교), 황원구, 오민선, 김동혁, 이기안 / 98
- Study on the process optimization and properties of nickel–aluminum bronze fabricated by directed energy deposition  
..... Changliang Yao\*(한국해양대학교), 신광용, 심도식 / 100

### ○ 제조공정 및 장비

- 배관 용접부 결함 예측을 위한 다중 센싱 시스템 및 머신러닝 알고리즘 개발  
..... 정유형\*(한양대학교), 장승범, 트루엉반도이, 윤종현 / 101

## 6. 일반 논문 발표 (제 6 발표회장)

### ○ 재료거동 및 특성화

- 알루미늄 압출재 기계가공 유한요소해석을 위한 이방성, 변형률 속도, 하중경로를 고려한 연성파단 물성 실험  
..... 심현보\*(한국재료연구원), 신윤우, 정찬욱, 오석근, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성 / 103
- 소성이방성과 변형률속도가 알루미늄 압출재의 파단물성에 미치는 영향  
..... 김형서\*(서울대학교), 홍서준, 원정윤, 경준석, 이명규 / 104
- 형상측정기반 소성 변형 압입 시험 원리 및 금속 소재 적용 연구  
..... 권준범\*(한국재료연구원), 김용남 / 105
- 폐인트 베이킹 3 세대 강판 저항접착부의 국부 소성 거동에 대한 마이크로 스케일 인장 특성 평가  
..... 조동혁\*(한국과학기술원), 최두열, 윤정환 / 106
- 포타슘 이 도핑된 텅스텐의 초기 소성에 대한 연구  
..... 김정석\*(서울대학교), 민건식, Phu Cuong Nguyen, 이성민, 오연주, 김황선, 김형찬, 류 일, 한홍남 / 107
- 디지털 이미지 상관 기법(DIC)을 이용한 고속 인장 시험 시 표점 거리가 변형률 속도에 미치는 영향 분석  
..... 이상민\*(국립공주대학교), 김정민, 김원섭, 홍석무 / 108
- 전자기장을 활용하여 재료의 기계적 물성을 실시간 측정기술 및 이를 기반으로 한 소성가공 자율제조 기술  
..... 이은호\*(성균관대학교) / 109
- 실시간 음향방출 및 중성자 회절 기반  $B_4C/AA6061$  복합재의 미시역학적 손상 기구 규명  
..... 권종혁\*(건국대학교), 혀정민, 권대서, 이호원, 조승찬, 채호병, 우완측, 김동규 / 110

### ○ 미세구조 및 응용

- 전단 변형 시험을 통한 초고강도강의 타발 데미지와 구멍확장비 연구  
..... 이승호\*(서울대학교), 조우진, 정든봄, 이제웅, 김성일, 한홍남 / 111
- AlMoV 내열 중엔트로피 합금의 설계 및 기계적 특성  
..... 이시우\*(포항공과대학교), 김형섭 / 112

### ○ 플라스틱가공

- 초음파 나노표면개질 공정이 이종 마찰용접 Nimonic 80A/SNCrW 소재에 미치는 영향 분석  
..... 최언준\*(한국재료연구원), 우영윤, 김정기, 신재우, 조재현, 윤은유 / 113

## 7. 특별세션 1 (제 1 발표회장)

### ○ 청정복합화력발전 핵심요소기술 및 국산화 전문인재 양성 심포지엄

- DED(Directed Energy Deposition)공정을 이용한 Inconel 625 및 Ti64 기판 상  $Al_2O_3$  적층 거동 분석  
..... 김태현\*(경남대학교), 이진수, 김상인, 배수한, 김세윤 / 115
- NiCoCrAlY 조성을 갖는 분말과 용사코팅된 시편의 열성장산화물 및 혼합산화물의 형성 거동  
..... 김상인\*(경남대학교), 김태현, 배수한, 이진수, 김세윤 / 116

- 직접용융증착법으로 제조된 Inconel 625 /  $Al_2O_3$  경사기능재의 단열 및 기계적 특성  
..... 유현용\*(경상국립대학교), 유진영, 안성열, 이태경, 김형섭, 김정기 / 117
- 직접용융증착법을 활용하여 접합한 IN738LC / CM247LC 이중소재의 인장 변형 중 계면 안정성  
..... 성예찬\*(경상국립대학교), 강호성, 김정기 / 119
- Directed energy deposition으로 제조된 IN738LC 합금의 후열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화  
..... 강호성\*(경상국립대학교), 성예찬, 박기덕, 이형수, 김형섭, 김정기 / 120
- Numerical Investigation of Flow and Combustion Characteristics of Hydrogen-Enriched Fuel in a Micromix Combustion  
..... Sajan Tamang\*(국립창원대학교), 박희성 / 121
- 이중벽 냉각 구조를 통한 가스터빈 연소기 라이너 냉각 성능 향상 연구  
..... 김덕형\*(국립창원대학교), 박희성 / 122

## 8. 포스터 발표 (제 2 발표회장)

- 변형율 기반 연성 파단 모델을 적용한 베링 성형성 예측  
..... 김기정\*(현대제철㈜), 박영철, 전진화, 신건진, 윤승채 / 124
- 초고강도강판 크랙 저항성 평가  
..... 박영철\*(현대제철㈜), 김지영, 임기학, 김기정, 진병극, 전진화, 박형권, 조용희, 유지성 / 125
- 합성 토크 데이터를 활용한 AI 기반 조립 공정 불량 판별 모델 개발  
..... 곽봉석\*(한국생산기술연구원), 김민수, 박지우 / 126
- 가변 접착력 및 모션 적응성을 갖춘 피부 패치 설계 및 웨어러블 전자기기 응용  
..... 김소미\*(울산과학기술원), 최건준, 김재일, 이희진, 장혜진, 정훈의 / 127
- 기계학습 기반 계층적 군집화를 활용한 레이저 용접된 DP 강의 상분율 예측  
..... 천민준\*(국립한밭대학교), Soumyabrata Basak, 홍성태, 조훈휘 / 128
- Cu 첨가와 인공 시효 조건에 따른 6xxx계 AI 합금의 미세구조 및 기계적, 전기화학적 특성 분석  
..... 홍현빈\*(국립한밭대학교), Raj Narayan Hajra, 신은주, 김재국, 이종숙, 김정한, 김재황, 조훈휘 / 129
- 이상 결정 방위의 가우시안 분산과 영향  
..... 정의찬\*(국립창원대학교), 정영웅 / 130
- 허브 베어링용 아웃터 링 공정 시뮬레이션 및 성형하중의 실험적 검증  
..... 문호근\*(㈜엠에프알씨), 장성민, 염재근, 조주현, 김진국, 전만수 / 131
- 탄성 계수, 변형률 증분 및 속도가 탄점소성 다결정 모델 수치해석 결과에 미치는 영향  
..... 강주홍\*(국립창원대학교), 정영웅 / 133
- AI 기반 YOLOv8 과 다행 회귀 보정식을 이용한 연속공정 압연품의 폭·두께 측정 시스템에 관한 연구  
..... 이관규\*(㈜씨에이이테크놀러지), 김진구, 곽호택 / 134
- 적층제조 후가공 효율성 향상을 위한 빌드 플레이트 상 밀링 공정 개발 및 FEA 기반 품질 예측  
..... 함민지\*(한국생산기술연구원), 문인용 / 135
- 트랙 링크 열간단조 공정의 유한요소해석  
..... 장성민\*(㈜엠에프알씨), 문호근, 김병오, 전만수 / 136

- 프로그래밍이 가능한 접착력을 위한 미세구조와 비선형 컷 기반의 다중스케일 균열 제어 접착 패치  
.....송현석\*(울산과학기술원), 박성진, 강동관, 정훈의 / 138
- 316L 스테인리스강 고압수소배관 제조 시 발생하는 인장 물성 및 내수소취성 변화  
.....고재훈\*(영남대학교), 홍성모, 강지현 / 139
- 성형해석을 통한 주조재용 압입너트 최적화  
.....염승록\*(주)풍강), 강성묵, 이광희 / 140
- Cu/Al/Cu 클래드 메탈을 이용한 유연 버스바 제조에 관한 연구  
.....송재선\*(대구기계부품연구원), 윤국태, 김동환, 정관효 / 141
- 전기자동차 차동장치용 액추에이터 하우징 부품의 공정설계에 관한 연구  
.....이상길\*(주)송원하이텍), 송원호, 노태욱, 진도훈 / 142
- Direct energy deposition 적층 공정으로 제조된 중탄소 공구강의 우수한 강도-연성 조합에 미치는 계층적 미세조직 영향  
.....박정현\*(인하대학교), 전민수, 김대중, 전종배, 구용모, 이기안 / 144
- 고내식 Ni-Cr-Mo계 합금의 고온 변형 거동 분석  
.....조주형\*(한국재료연구원), 우영윤, 홍종화, 윤은유 / 146
- 프레스 특성 가시화 및 형합 보정을 위한 볼스터 변형량 측정 및 시뮬레이션 연구  
.....강희원\*(한국자동차연구원), 박건영, 정정봉, 최진영, 김동욱 / 147
- 유도국부가열을 적용한 전기차 속업쇼바용 고강도 스프링시트 냉간성형에 관한 연구  
.....권태하\*(대구기계부품연구원), 전효원, 송 확, 김은영, 장효정, 서창희 / 148
- 냉간압연 및 열처리에 따른 MgLi 합금의 미세조직 및 기계적 특성 연구  
.....정효태\*(국립강릉원주대학교), 조유연, 강민성, 김한중, 이현준 / 149
- 다이어프램 벨브용 Co계 초합금 냉간 압연재의 인장 특성 및 강화 메커니즘  
.....송노건\*(인하대학교), 박정현, 최재호, 강두홍, 이기안 / 150
- 강화학습 적용한 SPOT 용접순서에 따른 거동분석  
.....최현범\*(주)호원), 이서한, 이정우, 백승엽, 강정길, 이상현 / 152
- 알루미늄 플레이트 용접부 염수침수에 따른 강도변화  
.....최현범\*(주)호원), 이서한, 이정우, 이상현 / 153
- 형상 기억 고분자 소재 기반 4D 구조물의 인장-굽힘 특성 평가  
.....김민성\*(서울과학기술대학교), 박 근 / 154
- 디지털 이미지 상관법(DIC) 기반 인장시험 시 네킹 이후 물성평가 및 해석적용  
.....문지환\*(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김동건, 이명규, 송정한 / 155
- 배터리용 알루미늄 커버 부품 프레스 성형 공정 설계 연구  
.....김경민\*(한국생산기술연구원), 이상오, 임성식, 배기현, 노건우, 송정한 / 156
- 항온변태열처리 온도가 냉간단조용 비조질강의 성형성에 미치는 영향  
.....안민호\*(한국재료연구원), 우영윤 / 157
- 고온 박막 공정용 AlN 샤프트 및 접합 소재의 특성 평가  
.....하태권\*(국립강릉원주대학교), 정준기 / 158

- CFD 기법을 적용한 LNG 이송용 이중배관 시스템의 기화량(BOG)에 관한 연구  
..... 윤정현\*(동아대학교), 정민근, 박종빈, 지서현, 임현우, 한정연, 김성재 / 160
- Tape Cast한 다공성 Ti 판재의 면적항 특성 분석  
..... 박민수\*(한국항공대학교) / 161
- 마이크로 LED용 기판 전도성 잉크 코팅을 위한 노즐 형상 및 기판 모서리 영향 해석  
..... 박정연\*(한국생산기술연구원), 권승갑, 김지우, 강봉철, 김종수 / 162
- 고전단 영역에서 사출기 기반 점도 측정 시 과소 측정 원인 분석 및 수지별 유동 특성 비교  
..... 박정연\*(한국생산기술연구원), 손종인, 윤언경, 이준한, 손정언, 김상윤, 윤길상 / 163
- 조립 응력 및 인장하중에 대한 결합강도를 고려한 편 없는 케이블체인의 다목적 최적설계  
..... 김민제\*(국립공주대학교), 홍석무 / 164
- 플라스틱 씰의 형상 및 구동 조건 민감도 분석을 통한 접촉 압력 경향 연구  
..... 심형준\*(국립공주대학교), 오민성, 안수봉, 이희장, 홍석무 / 165
- 수소 장입 온도에 따른 pure Ta의 기계적 물성 및 미세조직에 관한 연구  
..... 김민호\*(국립한밭대학교), 홍현빈, 조민철, 이근호, 박이주, 이상엽, 신중호, 조훈휘 / 166
- 마찰교반용접 조건에 따른 Al6061 의 기계적 및 미세조직 특성 분석  
..... 변성우\*(국립공주대학교), 이강찬, 박옥조, 홍석무 / 167
- 기계학습 기반 ZK60 압출재의 재결정 거동 예측  
..... 천세호\*(부산대학교), 유진영, 이성호, 이태경 / 168
- 2D FEM과 비대칭 시편을 이용한 EPT의 열·비열 효과 정량적 규명  
..... 송종한\*(부산대학교), 이승엽, 천세호, 유진영, 이성호, 박동준, 이정훈, 박성혁, 이태경 / 169
- 열처리 공정에 따른 원자력 격납용기 강재의 carbide 미세조직 및 충격 인성 평가  
..... 박동준\*(부산대학교), 유진영, 천세호, 이성호, 송종한, 이승엽, 이정훈, 이진모, 이채훈, 이태경 / 170
- 인공지능 기반 ML-DIC 이미지를 이용한 AI-합금 과대하중 시 피로균열전파 거동 분석  
..... 김도현\*(한국재료연구원), 최영원, 좌비오, 이승환, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남 / 171
- 금속소재의 피로 균열 치유를 위한 펠스전류 인가 공정 설계  
..... 홍범락\*(한국재료연구원), 최현성, 석무영, 이동준, 권용남, 박현일 / 172
- 열간압연 공정으로 제조된 고망간강의 바나듐 함량 및 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화 분석  
..... 양승우\*(동아대학교), 송호정, 박시옥, 김용진, 박건우, 이동호, 장재훈, 전종배 / 173
- 타이타늄 합금 판재의 확산접합/부풀림 성형을 통한 샌드위치 구조체의 제조 및 기계적 특성 연구  
..... 반승현\*(한국재료연구원), 최현성, 박현일, 석무영, 권용남, 이동준 / 174
- 고체냉각소재 La-Fe-Co-Si 합금의 열간 변형 거동 및 자기 열량 특성 분석  
..... 양선영\*(한국재료연구원), 김민직, 양우석, 김정한, 이광석, 신다슬 / 175
- 인공지능 기법을 이용한 ML-DIC 이미지 기반 알루미늄 합금의 피로 균열 거동 분석  
..... 좌비오\*(한국재료연구원), 김도현, 신윤우, 이승환, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남 / 176
- 를 라미네이션 공정 조건에 따른 장길이 연성회로기판의 충진 특성 분석  
..... 한준세\*(한국기계연구원), 이찬우, 곽은지, 최두선 / 178

- 열간압연강에서 형성된 산화물 스케일의 잔류 응력 수치 분석을 위한 준해석적 방법 개발  
..... 강선아\*(국립경국대학교), 전용제, 윤지강, 이재민, 김선호, 김영천, 남승훈, 이명규, 노우람 / 179
- LZ91 합금의 냉간 압연 시 미세조직 변화에 대한 연구  
..... 서위걸\*(국립순천대학교), 고경민, 이은세, Khushahal Thool, 최시훈 / 180
- 쇼트피닝 처리된 알루미늄 합금의 피로 하중 중 압축 잔류 응력 이완 및 균열 성장 거동 분석  
..... 조윤지\*(한국재료연구원), 이승환, 최현성, 박현일, 권용남, 이동준, 홍종화 / 181
- PMMA 진공 성형에서 두께 균등성을 위한 변형 거동 분석  
... 백민재\*(한국재료연구원), 신윤우, 조윤지, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 김덕성, 정대호, 송민환, 정유인, 최현성 / 182
- 다상조직강의 충격 특성 개선을 위한 열처리 공정 최적화  
..... 김상현\*(한국재료연구원), 윤은유, 이영선, 우영윤 / 183
- 열처리형 알루미늄 합금 2014 및 6061 의 이축교변단조 비교: 미세조직과 기계적 거동  
..... 하성호\*(한국생산기술연구원), 신영철 / 184

## 9. 일반 논문 발표 / 특별세션 6 (제 3 발표회장)

### ○ 박판성형

- 46mm 직경 철강재 원통형 이차전지 용기 성형 시험용 딥-드로잉 금형 개발과 이를 활용한 성형 특성 연구  
..... 박기철\*(포스코), 안강환 / 186
- 통합 인공 신경망 평가 함수를 활용한 다단 딥 드로잉 공정 설계 최적화  
..... 한성식\*(국민대학교), 김홍규 / 187
- 최적화 모델에 따른 GISSMO 손상계수 결정 비교 연구  
..... 오민성\*(국립공주대학교), 박상규, 홍석무 / 188
- 롤포밍 및 3 차원 벤딩을 적용한 1.7G 초고강도 강판의 폐단면 튜블라빔 부품 개발  
..... 남기석\*(현대자동차(주)), 박상천, 조성민 / 189
- 자동차용 1.8GPa 핫스탬핑 강판 개발 및 적용 기술  
..... 윤승채\*(현대제철(주)), 박계정, 박재명, 공제열, 손경주 / 190

### ○ 플라스틱 성형 공정에서의 디자일트윈/시뮬레이션 최신 동향

- 압출스크류 파단 문제 해결 및 공 압출 (Coextrusion) 사례  
..... 이돈규\*(디에프엠에이코리아) / 191
- 소재 물성 신뢰성 확보를 위한 Moldex3D DT 활용  
..... 황병관\*(이티에스소프트), Joe Wang / 192
- 사출성형 해석기반의 XR/AI 응용 소프트웨어를 활용한 Ramp-up 프로세스 개선에 관한 연구  
..... 황순환\*(이디앤씨), 오준호, 황수진, 이재훈, 안영수, 강동훈 / 193
- 사출금형 냉각 효율 향상을 위한 적층제조 메타물질 활용  
..... 박 근\*(서울과학기술대학교), 오서현, 유정희 / 194

## 10. 일반 논문 발표 / 특별세션 5 (제 4 발표회장)

### ○ 공정계산역학

- 결정소성 유한요소법과 In-situ EBSD 분석을 이용한 CP Ti 판재의 기계적 거동 분석  
.....김경표\*(부산대학교), 강주희, 오창석, 김지훈 / 196
- 베이지안 추론과 유한 요소 해석을 활용한 기계적 물성 역추정: 핵연료 피복관 응용 사례  
.....전보혜\*(국립창원대학교), Carlos N Tomé, Laurent Capolungo, 정영웅 / 197
- PMMA기반 투명체 성형공정 설계 및 유한요소해석 모델링  
.....최현성\*(한국재료연구원), 백민재, 신윤우, 박현일, 이동준, 석무영, 권용남, 정대호 / 198

### ○ 인공지능 및 디지털트윈 기반 자율 제조 공정 기술

- 스마트 사출성형 시스템 기술의 현재와 미래  
.....소현우\*(LG전자), 이승찬 / 199
- 공정 모니터링 기반 판재성형 지능화 기술 개발  
.....배기현\*(한국생산기술연구원), 송정한, 이종섭, 장인제, 김태훈, 김경환, 이주은, 김보익, 정영수 / 200
- 물리 정보 신경망을 이용한 절삭력과 절삭에너지 예측  
.....맹상진\*(홍익대학교), 김병민 / 201
- 기계학습 기반 밀링 공구 마모 예측 모델 분석  
.....윤희택\*(한국과학기술원), Matteo Ramella / 202
- 미세조직 역설계를 위한 다중충실도 데이터 기반 잠재 확산 모델 학습 방법  
.....정재연\*(한국재료연구원), 오세혁, 김호혁, 나주원, 김세종, 이호원 / 203

## 11. 일반 논문 발표 (제 5 발표회장)

### ○ 압출 및 인발

- 다파스 인발공정에서 주요변수가 인발에 미치는 영향  
.....신영빈\*(경상국립대학교), 홍보승, 정동석, 전만수 / 205
- 원주방향 잔류응력을 고려한 후판 인발 공정의 최적화  
.....강민성\*(경상국립대학교), 허윤, 이강희, 전만수 / 206
- 유한요소해석을 통한 인발 공정 중 표면 균열의 변형 거동 분석  
.....이석의\*(중앙대학교), 이영석 / 207
- 튜브 인발 공정에서의 최적 공정 설계  
.....허윤\*(경상국립대학교), 전만수 / 208
- QForm UK 기반 압출 금형 설계 및 결합 예측  
.....장창순\*(㈜씨에이이테크놀러지), Ivan Kulakov, 곽호택 / 209
- 2 단 압출을 통한 생분해성 마그네슘 미세튜브 제조와 압출비 및 Mn, Sr 첨가 효과에 관한 연구  
.....김재성\*(한국재료연구원), 김재연, 임창동, 서병찬, 김하식, 이상은, 서종식 / 211

## ○ 압연

- 롤의 탄성 변형을 고려한 선재 압연 공정에서 소재 단면 형상 및 롤에 걸리는 물리량 예측  
..... 김규태\*(중앙대학교), 이영석 / 212
- 간이등가회로를 이용한 모터 전류 기반 토크, 롤 힘 예측 연구  
..... 전진표\*(중앙대학교), 남규한, 이동윤, 이영석 / 213
- 바나듐이 첨가된 고망간강 열간압연재의 미세조직 분석 및 항복강도 예측 모델 개발  
..... 송호정\*(동아대학교), 박시옥, 김용진, 박건우, 이동호, 장재훈, 정재석, 전종배 / 214

## 12. 일반 논문 발표 (제 6 발표회장)

### ○ 모델링 및 시뮬레이션

- 심리스 파이프 제조 공정에서 맨드렐 마모에 영향을 미치는 공정 변수의 영향 분석  
..... 윤용석\*(주)솔루션랩, 이정화, 조의열, 홍성모, 이경훈 / 217
- 소성 및 크리프를 고려한 하이브리드 본딩 계면 상호작용 및 잔류응력 분석  
..... 전형주\*(서울대학교), 김사라은경, 장혜진, 이명규 / 218
- 유한요소법을 이용한 축방향 자속 영구자석 모터용 각형 와이어 권선 공정의 굽힘성 평가  
..... 김진수\*(한국재료연구원), 윤은유, 권용남, 홍종화 / 219
- 니켈도금강판을 이용한 4680 배터리 셀 캠 다단 딥 드로잉 공정 최적화  
..... 서예찬\*(한국재료연구원), 지수민, 이세동, 성홍석, 윤은유, 홍종화 / 220
- 베어링 레이스웨이의 고주파 열처리 유한요소해석  
..... 송정우\*(한국재료연구원), 강성훈, 오영석, 강종훈 / 221
- ALE 기법을 이용한 유체가 담긴 그릇의 낙하 및 충돌 거동 시뮬레이션 및 실험 검증  
..... 황순재\*(국립공주대학교), 홍석무 / 222
- 전위 소성에 기반한 계산 합금 설계  
..... 류 일\*(서울대학교) / 223

### ○ 금속 성형 분야의 디지털화/가상화

- 디지털트윈 및 AI를 통한 제조 혁신  
..... 문명수\*(오토품엔지니어링코리아주) / 224

### ○ 표면 및 인터페이스

- 대면적 전자빔 공정에서 발생하는 크레이터의 형성 최소화를 위한 GAN 기반 예측 모델 개발  
..... 오민기\*(한국재료연구원), 윤준석, 오영석, 강성훈, 이호원, 오세혁, 김지수 / 225

### ○ 자율 제조

- 알루미늄 박판의 표면결함 검출 시스템 개발을 위한 AI 기반 합성 데이터 생성 기법에 관한 연구  
..... 김진구\*(주)씨에이이테크놀러지), 이관규, 곽호택 / 227

## 13. 일반 논문 발표 (제 7 발표회장)

### ○ International Session - Material

- Simulating Spheroidization Kinetics during Heat Treatment

.....M. K. Razali\*(MFRC), S. H. Chung, M. C. Kim, M. S. Joun / 229

### ○ International Session - Process

- A fully coupled VPSC-dDRX(CA) model for predicting microstructure evolution during deformation of magnesium alloys

.....Wenjie Wu\*(Seoul Nat'l Univ.), Wenzhen Chen, Myoung-Gyu Lee / 231

- Shear strain evaluation under nonideal simple shear deformation

.....G. F. Han\*(KAIST), J. W. Yoon / 232

- Stress-Aware Graph Neural Network for Springback Prediction Considering Material Variations

.....H. Wang\*(KAIST), H. Lim, J. W. Yoon / 233

- Lode-dependent stress-invariant-based yieldfunction for anisotropic-differential hardening of pressuresensitive materials

.....S. C. Wang\*(KAIST), J. W. Yoon / 234

- Anisotropic Compression Behavior of 316L Stainless Steel at Room and Cryogenic Temperatures: The Influence of Twinning and Transformation Mechanisms

....Saurabh Pawar\*(Sunchon Nat'l Univ.), K. U. Yazar, Khushahal Thool, Wi-Geol Seo, Chang-Gon Jeong, Yoon-Uk Heo, Shi-Hoon Choi / 235

- Evolution of Microtexture in the Friction Stir Processed AA6xxx Sheets using Visco-Plastic Self Consistent Simulations

.....Preetham Alluri\*(Sunchon Nat'l Univ.), Lalit Kaushik, Kushahal Thool, Aman Gupta, Abhishek Kumar Singh, Shi-Hoon Choi / 237

- Magnetohydrodynamic effects on melt pool dynamics and defect reduction in laser powder bed fusion

.....Dac-Phuc Pham\*(Konkuk Univ.), Zhengtong Shan, Kyung-Hwan Jung, Dong-Kyu Kim / 238

- A novel asynchronous double-sided underwater friction stir processing for enhanced strength-ductility synergy in hetero-structural duplex steel

.....Renhai Wu\*(POSTECH), Fujun Cao, Peihao Geng, Zaigham Saeed Toor, Hyoung Seop Kim / 239

# 기 조 강 연

“Plastic deformations induced on the workpiece surface when machining aerospace materials: From Macro to Nano studies”

( 빌라드룸 )

# Plastic deformations induced on the workpiece surface when machining aerospace materials: From Macro to Nano studies

Dragos Axinte

## Abstract

For particular aerospace components made of Ni or Ti based superalloys machining is regarded as a key enabling technology to deliver surfaces at required geometrical accuracies and surface quality. An aspect of particular importance, but often neglected, is the surface integrity resulting from machining operations; this includes the metallurgical and mechanical property alterations of the machined (sub)surface with inherent influence of service life of the components.

The presentation gives an overview of surface quality requirements and possible anomalies that might appear during machining with defined cutting edges (e.g. drilling, milling, grinding) of aerospace superalloys. Particular importance is given on how the process parameters/machining strategies should be conducted so that metallurgical/surface damages are minimised while resultant mechanical properties (e.g. residual stresses, micro-hardness) are favorable for enhancing the life of the components. Here, it will be presented not only standard surface examination techniques (e.g. SEM, XRD) but also advanced material evaluation/testing methods (e.g. TEM, EELS, EBSD, Raman spectroscopy, SEM micro-pillar testing), that are very seldom employed by machining community, to enable in-depth understanding of the governing phenomena for the workpiece surface integrity formation. Particular attention is given on plastic deformations occurring at different scales under the machined surface and link them with the physics of the cutting process.

---

1. Manufacturing Engineering, University of Nottingham, UK  
# Professor and Chair, E-mail: dragos.axinte@nottingham.ac.uk

# 1. 특별세션 4

## / 특별세션 3

초고온 고강도·고내부식 금속소재 공정 및  
시험평가 기술

7kN급 기계적 체결강도 기반 경량  
이종소재 차체부품기술개발

( 제 1 발표회장 )

## 항공용 소재 환경시험을 위한 요소기술 개발

이창희<sup>1,#</sup> · 이정훈<sup>1</sup> · 강 성<sup>1</sup> · 정세훈<sup>1</sup> · 배동화<sup>2</sup> · 기수빈<sup>2</sup>

### Development of element technology for environmental testing of aviation materials

Chang-Hui Lee, Junghoon Lee, Sung Kang, Sehoon Jung, Donghwa Bae, Subin Ki

#### Abstract

고온 부식환경에서 사용되는 항공용 소재의 시험/평가 및 인증을 위해서는 사용 환경하에서의 특성 열화의 평가를 위한 시험법 개발이 필수적으로 요구된다. 본 발표에서는 항공용 소재의 실사용 환경을 고려한 고온환경에서의 동적 피로균열 전파시험법과 in-situ FIB-SEM을 활용하여 고온 온도환경에서의 소재 열화기구의 실시간 분석, 고온환경에서 사용되는 니켈 초합금의 성분분석의 정확도를 확보하기 위하여 GD-MS를 이용한 분석기법을 확보하였다. 우선, 고온 환경/부식환경에서의 피로균열 전파 거동 분석을 위한 시험법은 다양한 사용환경하에서의 소재의 동적 피로특성을 정량화 함으로써, 소재의 손상물성 평가 및 수명 예측에 필요한 물성을 확보할 수 있었다. 다음으로, 고온 분위기하에서 나타나는 형상 및 미세조직 변화를 실시간 FIB-SEM을 통해 관찰함으로써, 금속소재의 열화 기구를 규명하고, 이를 방지할 수 있는 소재 선택이 가능할 것이 기대된다. 마지막으로, 초고온 환경에서 사용되는 니켈 초합금의 경우, 일반적인 ICP법으로는 정확한 성분 분석이 어렵기 때문에, 이를 개선하기 위한 글로우방전 질량 분석기를 이용한 표준 시험법을 개발하여 적용하였다. 상기 소개한 요소기술을 활용하면 초고온용 항공소재의 국산화를 위한 금속소재의 시험/평가 및 인증에 기여할 수 있을 것이라 기대된다.

**Keywords:** Extreme materials, Ultra-High Temperature applicable metallic material, Reliability, Test and Evaluation under actual environmental condition

---

1. (재)포항산업과학연구원, 분석평가센터 수석연구원

2. (재)포항산업과학연구원, 분석평가센터 연구원

# E-mail: changhui.lee@rist.re.kr

# 고온(1200°C 이상) 환경 대응을 위한 우주·항공용 소재 기계적 물성평가 기술과 국가 연구소의 지원 필요성

민기득<sup>1#</sup>· 장현수<sup>1</sup>· 최현선<sup>1</sup>

## Mechanical Property Evaluation of Aerospace Materials for Ultra-High Temperatures and Need for National Support

K. D. Min, H. S. Jang, H. S. Choi

### Abstract

우주 및 항공 산업은 극한 환경에서의 운용을 전제로 하며, 이에 따라 고온에 견딜 수 있는 특수 소재 및 부품의 개발과 검증이 핵심 과제로 떠오르고 있다. 특히 터빈 블레이드, 연소실 라이너 등은 1200°C 이상의 고온에서 장시간 작동하므로, 이러한 환경에서의 기계적 물성평가를 통해 소재의 신뢰성 확보에 필수적이다. 그러나 해당 온도 범위에서의 인장, 폴로, 크리프, 파괴인성 시험은 온도 제어, 열영향 최소화, 정밀 계측 등에서 고난도의 기술을 요구하며, 시험 인프라의 확보 및 유지에 막대한 비용이 수반된다.

현재 국내 민간기업에서는 이러한 고온 시험을 위한 장비나 기술 인력이 제한적이며, 고온 시험 중 시편의 산화 방지, 변형률의 정밀 계측, 파단거동 분석 등에 있어 다양한 기술적 어려움을 겪고 있다. 특히 고온에서의 변형 측정에는 비접촉식 레이저 연신계나 DIC(Digital Image Correlation) 기술과 같은 첨단 계측기술이 요구되며, 이러한 장비는 고가일 뿐 아니라 운용 및 데이터 해석에 전문성이 필요하다.

이에 따라, 고온소재 시험평가에 특화된 국가 연구소의 적극적인 지원이 절실하다. 구체적으로는 고온 기계적 시험 장비의 공동 활용, 표준화된 시험 프로토콜 제공, 소재별 시험데이터 공유, 기술 인력 양성 및 실무 자문 등 다방면의 협력이 요구된다. 또한, 기업과 연구소 간 공동연구 체계를 통해 고온 환경에서의 시험 정확도와 재현성을 높이고, 새로운 고온 내열소재의 실증 평가를 함께 추진하는 것이 필요하다.

국가 연구소의 이러한 지원은 국내 항공우주 산업의 고온소재 기술력 확보에 실질적인 기반이 될 수 있으며, 향후 민간 기술 자립과 국제 경쟁력 강화에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

**Keywords:** High temperature mechanical property, Space materials, Aviation materials

1. (주)피레타

# (주)피레타, 재료시험평가센터, 센터장, E-mail: kideuk.min@pileta.co.kr

# 유한요소해석을 이용한 인발 공정에서의 와이어의 표면 거칠기 예측

홍현빈<sup>1</sup> · Raj Narayan Hajra<sup>1</sup> · 김정한<sup>1</sup> · 조훈휘<sup>1, #</sup>

## Prediction of wire surface roughness in the drawing process using finite element analysis

H. B. Hong, Raj Narayan Hajra, J. H. Kim, H. H. Cho

### Abstract

합금강 선재의 제조 공정에서 인발 중 발생하는 표면 특성을 정량적으로 분석하고, 공정 변수에 따른 표면 품질 변화를 평가할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 DEFORM 유한요소해석 소프트웨어를 활용하여 와이어 인발 공정을 해석하고, 소재별 공정 조건에 따른 표면 거칠기를 예측하는 모델을 구축한다. 마찰 계수, 인발 속도, 다이 각도 등 주요 공정 변수는 실험계획법(Design of Experiments, DOE)을 적용하여 체계적으로 분석한다. 인발 공정에서 발생하는 표면 특성을 정량적으로 예측하기 위해 유효변형률과 표면 거칠기 간의 상관관계를 고찰하고, 기존 문헌의 경험식을 기반으로 한 새로운 표면 거칠기 예측식을 수립한다. 유한요소해석을 통해 표면부 유효변형률 값을 도출하고, 이를 활용하여 소재별 다양한 공정 조건 하에서의 표면 거칠기를 정량적으로 계산한다. 해석 결과, 마찰 계수와 다이 각도가 증가할수록 표면 거칠기가 증가하고, 인발 속도가 증가할수록 감소하는 경향이 나타났다. 본 연구는 이종소재 부품 제작용 합금강 선재의 제조 공정 개발을 위한 정량적 평가 및 공정 최적화에 기초 자료로 활용될 수 있다.

**Keywords:** Finite element analysis, surface roughness, wire drawing, drawing condition

---

1. 국립한밭대학교 신소재공학과

# 국립한밭대학교 신소재공학과, 교수,

E-mail: hhcho@hanbat.ac.kr

## 기계적 체결용 FDS 및 FEW 소재의 Wire rod 선재 열간 압연 공정 최적화를 위한 고온 압축 거동 및 선재 열연 미세조직 분석

홍창완1, 윤국태1, 이락규1, 김주업1, 전효원1, 서창희1, 손동민2

### High-temperature Compression behavior and Characterization for Optimization of Wire rod - Hot rolling process for FDS and FEW materials for Mechanical Joining

C.W.Hong, K.T.Youn, R.G.Lee, J.U.Kim, H.W.Jeon, C.H.Seo, D.M.Son

#### Abstract

자동차를 포함한 제조업 제품의 최종 부품 조립은 일반적으로 용접 (Welding, Laser Brazeing), 접합 (FSW), 기계적 체결 (FDS, FEW, SPR, Rivet, REW) 등을 통해 최종 조립이 이뤄진다. 최근 친환경 자동차 시장에 따른 차량의 경량화에 부합하기 위해 단일소재 간 부품 조립보다는 이종 소재가 널리 쓰이는데 이종소재의 접합은 열물성 차이로 인해 점용접 (Spot welding) 방식을 적용하기 어려워, 하드웨어 기반의 기계적 체결방식이 사용되고 있으며, 이종소재를 통한 자동차 경량화를 위해 Al, Steel, 복합재료 등의 이종소재 간 체결에 요구되는 다양한 연구 (체결소재 합금 설계, 접합부 파단 특성, 체결 공정 개발 등)가 계속되고 있다. 본 연구에서는 자동차 조립공정에 적용되고 있는 다양한 기계적 체결공정 중 가장 대표적으로 사용되는 FDS 및 FEW 용 소재에 대해 알아보고자 하였다.

FDS (Flow Drill Screw) 체결용 소재는 회전력을 이용해 피접합체에 구멍을 내면서 동시에 회전하고 있는 접합체의 나사산에 의해 피접합체를 강하게 조여서 접합시키는 체결법으로 H/W 체결 시 나사산 회전에 의해 형성된 피접합체와의 접촉면을 단단하게 유지해야 하므로 체결 소재의 인성, 연성, 용접성보다는 높은 경도 (Hardness)가 요구된다. 반면에 FEW (Friction Element Welding) 체결용 소재는 리벳을 회전시켜 발생하는 열과 상부에서 가해지는 압력을 이용해 상판(Soft material)을 관통하고 동시에 하판(Hard material)과의 마찰력에 의해 고상 접합되어 체결 하드웨어 헤드와 고정된다. 접합체가 두꺼운 두 개의 상/하판 피접합체 관통 시 회전에 의한 마찰열 때문에, 열화(thermal degradation)를 방지해야 하며, 동시에 상/하판 피접합체 최종 관통단계에서 발생하는 소성변형에 견딜 적정한 수준의 인성과 경도가 필요하여 적용 가능한 하드웨어 소재에 제약이 상대적으로 높다.

해당 기계적 체결에 사용되는 하드웨어 소재는 Ingot (용해) - 원소재 Wire rod (Billet 열연) - 신선재 Wire (냉연, 괴막) - 하드웨어 H/W (전조/단조/열처리/표면처리/절삭가공) 공정을 통해 생

산된다. 그 중에서도 Wire rod 는 선재 열연 공정으로 생산되는데 일반 열연공정과는 달리 고온에서 극심한 소성변형이 가해져 매우 높은 수치의 단면적 감소 (Billet → Wire rod,  $5.5\varnothing \sim 7.5\varnothing$ )에 따른 동적 재결정, 불균일 조직 (Sub grain, deformed structure) 생성 및 높은 전위밀도를 가진다. 현재 이종소재 접합 하드웨어 시장은 100% 수입에 의존하는 상황이며, 해당 Wire rod (선재) 양산공정은 아직까지 국내에서 표준화, 정량화가 부족한 실정이며 체결 하드웨어 소재 별 물성을 만족하는 다양한 소재의 생산공정 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 FDS 및 FEW 체결용 소재의 선재 열간 압연 공정 최적화를 위한 ① 고온 압축 거동 해석과 ② Wire rod (선재)의 열간 압연 미세조직 분석을 진행하였다. VIM으로 용해된 FDS 및 FEW 체결용 소재 (Billet)에 대해 고온 압축 시험 (온도(° C) : 850, 950, 1050, 1150, 변형율 속도(/s) : 0.01, 0.1, 1, 10)을 진행하였으며 압축 강도(S-S curve), 균일 조직 및 동적 재결정 발생여부 및 변형 공정 지도 해석을 통해 고온 압축 거동을 비교 분석하였으며, Wire rod 의 실제 열간 압연 전/후 미세조직 (dislocation-related sub-grain, precipitation)을 분석하였다.

상대적 높은 탄소 량 (0.6~0.7wt%C)의 Plain carbon steel로서 열처리 (Aus-tempering) 및 냉각 제어를 통해 기지조직 (Martensite, Bainite, Ferrite, Pearlite, Residual austenite)의 상분율 제어를 주된 강화기구로 하는 FDS 체결용 소재와, 낮은 탄소량 (0.2~0.3wt%C)이며 고온 내열성 확보를 위해 탄화물 형성 원소인 Cr, Mo, V (1.5wt%Cr, 0.6wt%Mo, 0.3wt%V)이 첨가되어 탄화물 석출 강화, 결정립계 미세화를 주된 강화기구로 하는 FEW 체결용 소재 간 고온 압축 거동 차이를 확인하였으며, 열간 압연 전/후 미세조직 분석을 통해 동적 재결정이 수반된 열연과정 시 생성된 결정립 구조 및 석출물 거동을 해석하였다.

**Keyword:** Multi-Materials, Mechanical Joining, Hot rolling, Wire rod, Microstructure characterization

**Acknowledgement :** 본 연구는 산업기술평가관리원의 소재부품기술개발 패키지형 사업 (RS-2024-00433210)의 지원을 받아 수행된 연구임.

---

1. 대구기계부품연구원 소재부품연구본부

2. 세아창원특수강

# 교신저자 : 대구기계부품연구원 소재부품연구본부, E-mail: ihunsug1@dmi.re.kr

# Steel 하판이 Aluminum–Steel FEW 접합부의 성능에 미치는 영향

김재훈<sup>1,3</sup>· 추우인<sup>1</sup>· 주원중<sup>1</sup>· 김지훈<sup>2</sup>· 이승환<sup>3</sup>· 강동혁<sup>1,#</sup>

## Effect of steel sheet on the mechanical performance of aluminum-steel Friction Element Welding

Jae Hoon Kim, Woo-In Choo, Wonjung Ju, Seung Hwan Lee, Dong Hyuck Kam

### Abstract

In the automotive industry, weight reduction has become a key factor due to its positive effect on the driving range of electric vehicles (EV), as well as the gas mileage and emissions of internal combustion engine (ICE) vehicles. To achieve weight reduction, the use of lightweight multi-materials such as high-strength steel, aluminum and carbon composites has become essential. However, joining dissimilar materials necessitates highly efficient techniques, as conventional fusion welding methods are not applicable. Friction element welding (FEW) is an advanced joining method used to join nonferrous materials and steel sheets. The FEW process consists of four steps: penetration, cleaning, welding and compression. During this process, a rotating steel element is pressed through the aluminum top sheet, then friction-welded to the steel bottom sheet. This study investigates the quality of FEW joints between aluminum (top) and high-strength steel (bottom), which cannot be joined using flow-drill screw or self-piercing rivet. Steel sheets with various strengths and thicknesses were tested, along with two types of FEW elements (8T and 10T). The penetration and cleaning step parameters were optimized to minimize chip formation and to maximize shear load, respectively. Compression step parameters were fixed, as they had minimal effect on joint quality. The parameters for the welding step (force and RPM) were tested to analyze the shear strength of the FEW joint. The results indicated that the welding step force had a greater influence on the mechanical performance than RPM during the same step. Additionally, optimization tests with different strength steel sheets revealed that the strength of steel sheets significantly affected the tensile-sheer test results. After parameter optimization, all aluminum-steel combinations achieved an average maximum load of over 8 kN.

**Keywords:** Friction Element Welding, Solid State Welding, Shear Strength, Aluminum, High-Strength Steel

1. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소 유연생산연구부문

2. 주)진합, 선임

3. 한양대학교, 대학원생

# 교신저자의 소속, 부서, 직위, E-mail: 한국생산기술연구원

뿌리기술연구소 유연생산연구부문 선임연구원

Email : kamdong@kitech.re.kr

# 전기차 차체용 기계적 접합 하드웨어의 접합 특성에 관한 연구

정우영<sup>#</sup>· 김효성<sup>1</sup>· 허영준<sup>2</sup>· 최정묵<sup>3</sup>

## A Study on the Joining Characteristics of Mechanical Joining Hardware for Electric Vehicle Body Applications

H. S. Kim, W. Y. Chung, Y. J. Heo, J. M. Choi

### Abstract

자동차 산업에서는 탄소 배출 등 환경규제에 대응하기 위한 노력으로 다양한 미래 모빌리티에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 하나인 전기 자동차는 배터리의 무게로 인해 차량 무게가 더욱 증가하였다. 전기자동차의 무게는 차량의 연비 뿐만 아니라 주행가능거리에도 영향을 끼치기 때문에, 전기 자동차의 주행거리 확보를 위해서 구조적 안정성 뿐만 아니라, 차체의 경량화도 필요하다.

본 연구는 차체에 적용되는 다양한 소재들에 대해 동종/이종 소재 접합 시, 다양한 기계적 접합 방법을 제시하였으며, 인장시험, 단면분석 등을 통해 각기 다른 기계적 접합 방법의 접합 특성을 분석하였다.

**Keywords:** EV, Mechanical Joining, SPR, FDS

---

1. 한국자동차연구원 화학소재기술부문, 연구원

2. 한국자동차연구원 화학소재기술부문, 연구원

3. (주) 진합, 상무

# 한국자동차연구원 화학소재기술부문, 수석,  
wychung@katech.re.kr

## FDS 나사 소재의 TME 관찰 및 확산 코팅 분석

박지니<sup>1</sup>· 김선진<sup>1</sup>· 최지성<sup>2</sup>· 박준식<sup>3, #</sup>

### Investigation of TME Characteristics and Diffusion Coating Analysis of FDS Screw Materials

J. N. Park, S. J. Kim, J. S. Choi, J. S. Park

#### Abstract

철강 소재는 우수한 기계적 특성과 경제성으로 인해 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 특히, 열처리 및 표면처리를 통해 기계적 특성과 형상을 조절할 수 있어 고강도 부품 및 체결 부품 제조에 필수적인 소재로 알려져 있다. 그러나 철강은 부식에 취약하여 장기간 사용 시 부식으로 인한 기계적 성능 저하가 발생할 수 있고, 이를 방지하기 위해 다양한 표면처리 기술이 적용되고 있다. 또한, 일반적으로 철강 소재의 기계적 특성을 위해 다양한 열처리가 추가적으로 진행된다. 열처리 방법 중 퀸칭(Quenching)과 템퍼링(Tempering) 공정을 조합하여 진행되는데, 퀸칭 시 형성되는 마르텐사이트 조직은 높은 경도를 가지지만 취성이 증가하는 문제가 있으며, 이를 완화하기 위해 템퍼링이 적용된다. 그러나 특정 온도 범위(약 250~400°C)에서 템퍼링될 경우, TME(Tempered Martensite Embrittlement)가 발생하여 인성이 저하되고 부품의 과단 위험성이 증가하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 FDS 나사용 철강 소재의 TME 발생 온도 범위를 규명하고, 미세조직 분석을 통해 해당 현상의 원인을 고찰하고자 하였다. 또한, 나사 소재의 부식을 방지하고 내구성을 향상시키기 위해 확산 코팅을 적용하였다. 확산 코팅이 코팅 품질, 두께 및 상(Phase) 변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

**Keywords:** Tempered martensite embrittlement, Steel, Diffusion coatings, Heat treatment, Tempering

1. 국립한밭대학교 신소재공학과, 석사과정

2. 국립한밭대학교 신소재공학과, 학사과정

# 국립한밭대학교, 신소재공학과, 교수, E-mail: jspjh@hanbat.ac.kr

# 7kN급 기계적 체결 하드웨어를 적용한 경량 이종소재 차체부품 개발 및 실증

강상민<sup>1</sup>· 배기만<sup>2</sup>

## Lightweight Vehicle Body Parts Development Using 7kN-Class Mechanical Fasteners

S.M Kang, K.M Bae

### Abstract

자동차 경량화를 위한 다양한 소재의 복합 적용이 증가함에 따라, 이종소재 간의 안정적인 접합 기술 확보가 중요해지고 있다. 특히, 알루미늄과 같은 경량 소재와 소음·진동 저감 특성이 우수한 제진소재를 활용한 수요에 대한 검토가 증가하고 있으며, 이에 적합한 기계적 체결 방식의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 FDS, SPR, FEW, Blind Rivet 4종의 국산화 하드웨어를 활용하여, 이종소재 접합이 적용된 차체 부품을 개발하고, 구조적 성능 및 실차 적용 가능성을 검증하고자 한다.

연구의 주요 내용은 다음과 같다. 먼저, 제진소재는 알루미늄-핫멜트-알루미늄 구조의 샌드위치 복합재를 적용하였다. 이는 우수한 소음 및 진동차단 성능을 제공하지만, 중간층에 위치한 절연성 핫멜트로 인해 용접 방식의 접합이 불가능한 한계가 존재한다. 이러한 기술적 제약을 극복하기 위해 비전도성 환경에서도 적용 가능한 기계적 체결 하드웨어를 활용하여 시제품을 통한 검증이 필요하다. 이후 설계 최적화 및 해석 모델 기반의 동강성 구조 해석을 통해 설계 적절성을 검토하고, 최종적으로 제작된 시제품을 대상으로 성능 검증을 계획하고 있다.

본 연구를 통해 제시된 기계적 접합 기술은 기존의 용접 기술이 적용 될 수 없는 이종소재 차체 부품에 대한 대체 기술로서의 가능성을 제시하며, 향후 친환경 경량차체 개발 및 전기차 부품 적용 등에 있어 실질적인 기여가 가능할 것으로 기대된다.

**Keywords:** Damping Material, Lightweight, Fastening, Hardware, Dissimilar Material Joining, Forming

**후기 :** 본 연구는 산업통산자원부의 소재부품기술개발사업(과제번호 : RS-2024-00433194)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

---

1. (주)일지테크, 선행개발팀 선임

2. (주)일지테크, 선행개발팀 팀장

# 로봇기반 편방향 RFSSW 시스템 국산화

최영배<sup>1,#</sup>, 손은영<sup>2</sup>, 정근호<sup>3</sup>, 이광원<sup>4</sup>

## Localization of Robot-Based One-Way RFSSW System

Y. B. Choi, E. Y. Son, K. H. Jung, K. W. Lee

### Abstract

전기차(Electric Vehicle, EV) 시장의 성장에 따라 EV 배터리 하우징의 안전성과 성능을 보장하는 용접기술이 중요하게 다뤄지고 있다. 차체 경량화를 위하여 EV 배터리 하우징 구성 소재는 알루미늄과 CFRP 와 같이 비철금속 소재의 적용이 증가하고 있다.

다양한 소재가 확대 적용됨에 따라 이러한 소재의 동종 또는 이종 간의 다양한 용접 및 접합공법의 적용이 검토되고 있다. 로봇기반 RFSSW(Refill Friction Stir Spot Welding) 시스템 기술은 고강도 경량화 구조체 및 이종소재 접합수요가 급증하는 산업환경에서 기존 저항 용접 및 융합용 접 방식의 기술적 한계를 극복할 수 있는 차세대 고신뢰 점용접 솔루션으로 주목받고 있다. 특히 알루미늄, 마그네슘 고장력강 복합재등 난접합 소재 간의 안정적인 결합을 구현하기 위해서는 고정밀 제어가 가능한 슬리브-핀-클램프 3 축 구동, 변위 토크 온도 등 주요 공정 변수에 대한 실시간 센싱 및 피드백 제어 기능이 필수적으로 요구된다. 또한, 용접 품질의 반복성과 균일성을 확보하기 위해서는 내마모성을 갖는 공구 소재, 재료 유동을 최적화할 수 있는 핀 슬리브 형상 설계, 용착물 축적을 예측하고 자동으로 드레싱할 수 있는 유지관리 시스템 등의 기술이 종합적으로 확보되어야 한다. 이러한 요소 기술들은 장비 수명연장, 고 품질 접합부 형성을 가능하게 하며 결과적으로 생산성과 신뢰성을 동시에 높일 수 있다. 또한, 용접공정 중 발생하는 상호작용을 정확히 예측하고 제어하기 위해서는 CFD/FEM 기반의 시뮬레이션과 디지털 트윈 기반의 공정 최적화 시스템 구축이 필요하다. 이는 실시간 데이터 기반 품질 모니터링과 함께 AI 기반 공정 조건 추천 및 결함 예지 등 지능형 용접공정 관리 기술로 확장될 수 있다.

본 발표에서는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업 일환으로 추진 중인 “연속 300 타점급 無 하드웨어 접합 기술 및 하이브리드 경량 차체부품 기술개발” 중 로봇 기반 편방향 RFSSW 시스템 국산화 개발내용을 정리하였다.

**Keywords:** Refill Friction Stir Spot Welding, One-way System, Robotic, Localization, Monitoring System

1. 엠디티㈜, 기술연구소, 연구소장
2. 엠디티㈜, 기술연구소, 대리
3. 엠디티㈜, 기술연구소, 대리
4. 엠디티㈜, 대표이사

# 엠디티㈜, 기술연구소, 연구소장, choiyb83@mdtkorea.net

# RFSSW 용접 툴 국산화 및 검사시스템 개발

황재욱<sup>#</sup>· 정윤철<sup>1</sup>· 김경규<sup>2</sup>

## Development of RFSSW Tool Localization and Inspection System

J. U. Hwang, Y. C. Jung, G. G. Kim

### Abstract

본 연구는 항공기 경량 합금 구조물의 고신뢰성 접합 공정으로 주목받는 리필 마찰 교반 용접 (REFILL FRICTION STIR SPOT WELDING, RFSSW) 기술의 핵심 구성요소인 툴의 국산화를 목표로 하였다. 기존 외산 툴의 고비용성과 수급 불안정성을 해소하고, 국산 항공 제조 산업의 자립 역량 강화를 위하여 RFSSW 툴을 제작하였다. 툴은 솔더, 프로브, 클램프 등의 구성 요소로 이루어져 있으며, 고온 고하중 환경에서의 내열성과 마모 저항성을 확보하기 위해 특수 공구강을 기반으로 한 열처리 공정을 적용하였다. 더불어, 제작된 RFSSW 툴의 품질 확보를 위한 자동화 치수 검사 시스템을 설계하였다. 해당 시스템은 접촉 방식의 고정밀 센서와 좌표 측정 장비 (CMM)를 활용하여 툴의 외형 치수, 동심도, 표면 품질 등을 정밀하게 측정하며, 공정 자동화 및 실시간 품질 피드백 기능을 제공한다. 그 결과, 수작업 대비 검사 정확도가 향상되고 검사 시간은 평균 40% 이상 단축 및 불량률 저감에 기여할 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 RFSSW 툴의 국산화 기반이 마련되었으며, 향후 항공 및 자동차 산업의 고신뢰성 접합 기술의 자립도 제고와 제조 공정 자동화에 기여할 것으로 기대된다.

**Keywords:** RFSSW, 국산화, 툴 제작, 자동화 검사, 치수 측정, 항공분야 제조

### Acknowledgement

본 연구는 2024~2027년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 연구비 지원 (RS-2024-00433178, 연속 300 타점급 無 하드웨어 접합 기술 및 하이브리드 경량 차체부품 기술 개발)에 의해 수행되었습니다.

---

<sup>#</sup> 디엔엠항공 연구소, 이사, Dnma@dnmaero.com

1. 디엔엠항공 연구소, 과장  
2. 디엔엠항공 연구소, 사원

## 고인성 및 고내마모 동시 구현 RFSSW용 용접툴 소재의 개발

강재영<sup>1</sup>· 정야호<sup>2</sup>· 김한수<sup>3</sup>· 김대하<sup>4,#</sup>

### Development of welding tool material for RFSSW with high toughness and high wear resistance

J. Y. Kang<sup>1</sup>, Y. H. Jung<sup>2</sup>, H.S.Kim<sup>3</sup>, D.H.Kim<sup>4,#</sup>

최근 자동차 산업에서는 연비 향상과 탄소 배출 저감을 위한 경량화 기술의 중요성이 부각됨에 따라, 알루미늄 합금과 같은 경량 금속 소재의 활용이 급증하고 있다. 이에 따라 고강도, 고신뢰성 접합 기술의 수요도 함께 증가하고 있으며, 그중 Rotary Friction Stir spot Welding(RFSSW)는 비용 효율성과 우수한 기계적 특성 확보가 가능한 비용합 접합 공정으로 주목을 받고 있다.

RFSSW는 회전하는 비소모성 툴을 이용하여 재료 간의 마찰열과 소성 변형을 유도함으로, 금속 부재를 구부적으로 접합하는 고체상 접용접 방식으로, 전통적인 용접 방식과는 달리, 재료를 용융시키지 않고 고체 상태에서 접합이 이루어져 열영향부(HAZ)의 크기가 작고 기계적 특성이 우수한 접합부를 형성할 수 있다. 그러나, 알루미늄 합금과 같은 연질 재료의 반복적 접합 공정에서 RFSSW 툴은 심각한 마모와 열화 문제를 발생시키게 되며, 이는 접합 품질의 저하와 툴 수명 단축이라는 실질적 문제로 이어지게 된다. 또한, 아직까지 국내에서 공정 및 소재 연구등에 대한 연구가 미진하여 해외 기술에 의존하게 되어 이를 극복하기 위하여 고인성 및 고내마모 동시 구현이 가능한 우수한 소재 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 Fe합금 내부에 미세한 VC를 균일하게 분산시켜 고인성 및 고내마모성이 동시 확보 가능한 소재 개발을 위한 연구를 수행하였다. 미세한 VC의 석출 제어를 위하여 진공 유도불활성용융가스분무(VIGA)를 활용하여 VC의 석출량의 차이에 따른 9%, 12%, 15%의 합금분말을 제조하였다. 이후 제작된 합금분말은 Capsule-HIP 공정을 통하여 내마모 소재를 제작하였으며, 개발된 소재는 미세구조 제어를 위한 Quenching-Tempering 열처리를 통하여 경도를 일정하게 제어하였다. 열처리 진행된 소재를 활용한 소재 평가를 위하여 600°C의 환경에서 고온 내마모평가 및 상온의 환경에서 초음파피로테스트를 수행하였으며, 우수한 인성 및 내마모성이 확보된 소재에 대한 기초 데이터를 확보하였다.

**Keywords:** RFSSW, High wear resistance, High-Toughness, VC precipitation,

### **Acknowledgement**

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 연구비지원(연속 300타점급 無 하드웨어 접합 기술 및 하이브리드 경량 차체부품 기술개발, 2410001092, 00433178)에 의해 수행되었습니다.

---

1. 포항소재산업진흥원 기능소재연구실, 주임연구원

2. (주)코나솔 중앙연구소, 책임연구원

3. (주)코나솔 중앙연구소, 상무이사

# 포항소재산업진흥원 기능소재연구실 선임연구원, E-mail: kdh@pomia.or.kr

# 리필 마찰 교반 점 용접 공정의 마모 저감을 위한 유한 요소 해석

구인환<sup>1</sup>· 전종호<sup>1</sup>· 백승민<sup>1</sup>· 이윤수<sup>1</sup>· 조성채<sup>1</sup>· 탁우현<sup>1</sup>· 진인종<sup>1</sup>· 한채훈<sup>1</sup>· 조정호<sup>1#</sup>

## Finite Element Analysis for Wear Reduction in Refill Friction Stir Spot Welding of Aluminum

I. H. Koo, J. H. Jeon, S. M. Baek, Y. S. Lee, S. C. Cho, W. H. Tak, I.J. Jin, C.H. Han, J. H. Cho

### Abstract

리필 마찰 교반 점 용접(Refill friction stir spot welding, RFSSW)은 비소모성 회전 공구의 마찰 열을 이용하여 금속 간 국부적인 접합을 실현하는 고상 용접 공정으로, 기존의 마찰 교반 용접(Friction stir welding)에서의 키홀(Keyhole) 결합을 개선할 수 있어 항공 및 자동차 산업에서 활용도가 높아지고 있다. 그러나 반복적인 용접 과정에서 발생하는 공구의 마모는 접합부의 품질을 떨어뜨리고 공구의 치수에도 영향을 주어 공구 수명 단축과 생산성 저하의 원인이 된다. 특히 알루미늄 합금 접합 시, 공구의 슬리브(Sleeve)는 반복적인 삽입과 후퇴, 회전 과정에서 발생하는 마찰력과 전단 응력의 집중으로 연삭 마모와 공구강과 알루미늄 간의 확산에 의한 응착 마모가 발생한다. 이에 본 연구에서는 공구에 발생하는 응력을 유한 요소 해석을 통해 정량적으로 예측하고, 마모 저감을 위한 삽입 깊이 및 회전 속도와 같은 공정 변수의 영향을 분석하였다. 공정 변수 변화에 따라 공구에 작용하는 기계적 응력과 더불어 알루미늄 재료의 열-소성 변형 거동을 분석함으로써 공구의 마모 저감과 접합 품질 예측을 위한 해석 요소기술을 구축하였다.

**Keywords:** Refill Friction Stir Spot Welding, Aluminum Alloy, Finite Element Method, Tool Wear, Solid State Welding

### Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 연구비지원(연속 300타점급 無 하드웨어 접합 기술 및 하이브리드 경량 차체부품 기술개발, 2410001092, 00433178)에 의해 수행되었습니다.

---

1. 충북대학교 기계공학과

# 교신저자, E-mail: junghocho@chungbuk.ac.kr

2. 특별세션 8  
/ 일반 구두 발표  
/ 학회연합 교류발표회

대형 선박 혼소엔진의 고내식성  
배기 밸브 기술 개발

단조

학회연합 교류발표회

( 제 2 발표회장 )

# Ni-Cr-Al계 합금의 마찰용접 시 온도 및 변형 시뮬레이션

조해주<sup>1</sup>· 정종욱<sup>1</sup>· 이욱진<sup>#</sup>

## Simulation of Temperature and Deformation in Friction Welding of Ni-Cr-Al-based Alloy

H. Jo, J. Jung, W. Lee

### Abstract

Nimonic이라고 불리우는 Ni-Cr-Al계 합금은 고온강도와 내산화성이 우수하여 항공우주 및 고온엔진 부품 등에 내열합금으로 광범위하게 사용되고 있다. 한 편, 선박용 배기밸브 등 Ni-Cr-Al 합금 대형부품의 접합은 주로 회전 관성마찰용접으로 이루어지고 있는데, 이 때 마찰용접 중 합금의 접합부 주변은 고온 환경에서의 열적 응력과 소성변형이 복합적으로 발생하며 이와 같은 복잡한 온도분포와 변형현상은 접합부 품질, 미세조직 및 기계적 특성에 큰 영향을 미치기 때문에 이에 대한 상세한 분석이 필요하다. 본 발표에서는 유한요소해석기법을 기반으로 Ni-Cr-Al계 합금의 회전 관성마찰용접의 열-기계 연성해석을 수행한 결과를 소개할 예정이다. 시뮬레이션 모델은 실제 공정 조건에서 택할 수 있는 다양한 회전속도, 축방향 하중, 마찰시간, 냉각조건 등을 반영하였으며, 온도 상승에 따른 재료의 유동 현상을 고려하여 모델링을 수행하였다. 해석 결과와 실험적 관찰 결과를 비교하여 모델의 타당성을 확보하였고, 이를 바탕으로 Ni-Cr-Al계 합금의 마찰용접 조건 범위를 제시하였다.

**Keywords:** Friction welding, Ni-Cr-Al alloy, Simulation

---

1. 부산대학교 재료공학부, 대학원생

# 부산대학교 재료공학부, 부교수, E-mail: wookjin.lee@pusan.ac.kr

# 환경 하중에 따른 선박용 배기밸브 스피드들 작동상태 검출용 유도형 근접센서에 대한 구조특성 평가

정호승<sup>1</sup>· 노동현<sup>2</sup>· 이상민<sup>3</sup>· 조종래<sup>#</sup>

## Structural Characteristic Analysis of an Inductive Proximity Sensor for Detecting the Operating State of a Marine Exhaust Valve Spindle under Environmental Loads

H. S. Jeong, D. H. Noh, S. M. Lee, J. R. Cho

### Abstract

유도형 근접센서는 전자제어식 엔진의 배기밸브 시스템에 적용되어, 배기밸브 스피드들의 위치를 정확하게 측정하여 엔진 제어기에 실시간 데이터를 제공하는 역할을 한다. 해당 센서는 Housing, Cover, Adapter, Cap으로 구성되어 있으며, 센서부(Adapter, Cap)는 PEEK 소재로, Housing은 STS 316 소재로 제작된다. 유도형 근접센서는 엔진 하우징에 장착되어 선박 운전 시 발생하는 가혹한 환경 조건, 즉 진동, 고온, 고압에 지속적으로 노출되고 있다. 본 연구에서는 진동, 온도, 압력 등 단일 하중 조건 하에서 유도형 근접센서의 기계적 특성을 평가하고자 하였으며, 이후 복합 환경 조건 하에서도 구조적 특성을 분석하였다. 유도형 근접센서의 진동 특성을 평가하기 위해 모달 해석을 수행하였다. 이를 통해 유효 질량이 높은 주파수를 식별하고, 지배적인 공진 주파수를 관찰하였다. 고온 환경에 따른 특성 변화를 평가하기 위해 고온부 온도를 70°C, 100°C, 150°C의 세 단계로 설정하여 열전달 해석을 수행하였다. 온도 분포를 바탕으로 열변형 해석을 진행하였으며, 부품 간 접촉 상태 및 응력 분포를 분석하였다. 고압 하중에 따른 구조적 특성을 평가하기 위해 50 및 100bar 조건 하에서 구조해석을 실시하였으며, 부품 간 접촉 상태 및 응력을 관찰하였다. 엔진 운전 환경을 모사하기 위해 150°C의 분위기 온도 및 50bar, 100bar의 압력 조건을 동시에 적용하여 열-구조 연성 해석을 수행하였다. 이를 통해 하중 복합 조건 하에서 부품 간 접촉 상태, 응력 분포, 변형 형상 등을 종합적으로 평가하였다.

**Keywords:** Exhaust valve spindle, Inductive proximity sensor, Contact status, Structural analysis

1. 한국해양대학교, 산학협력단, 연구교수

2. 화진기업, 기업부설연구소, 개발팀장

3. 화진기업, 기업부설연구소, 연구실장

# 한국해양대학교, 기계공학부, 석좌교수, E-mail: cjr@kmou.ac.kr

# 700 °C $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ 혼합 용융염 환경에서 DSA760의 고온 부식 거동

정이<sup>1</sup>· 강창민<sup>1</sup>· 장희진<sup>#</sup>

## Hot corrosion of DSA760 in 700 °C $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ molten salt mixture

L. Jeong, C. M. Kang, H. J. Jang

### Abstract

DSA760 합금의 고온 부식 거동을 700 °C의 15 wt.%  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 85$  wt.%  $\text{V}_2\text{O}_5$  용융염 환경에서 Nimonic 80A와 비교하여 조사하였다. DSA760의 미세조직은  $\gamma$ ,  $\gamma'$  상과  $\alpha$ -Cr 상으로 구성되어 있으며,  $\alpha$ -Cr 상은 라멜라 구조 또는 구상화된 형태로 존재하였다. 용융염 도포량을 20  $\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 하여 196 시간 동안 고온 부식 시험을 실시한 결과 DSA760 합금에서 4  $\text{mg}/\text{cm}^2$  내외의 질량 손실이 발생하였는데 이는 Nimonic 80A의 부식량인 7  $\text{mg}/\text{cm}^2$ 보다 훨씬 적은 양이었다. 부식 후 DSA760 시편의 단면에서는 연속적인 Al 산화물 층이 관찰되었으며 이것이 우수한 내식성의 원인인 것으로 판단된다.

**Keywords:** hot corrosion, molten salt, superalloy

---

1. 조선대학교 신소재공학과, 대학원생

# 조선대학교 신소재공학과, 교수, heejin@chosun.ac.k

# 선박 혼소엔진용 고강도 고내식성 고Cr 함유 Ni-Cr-Al 합금 개발

이제인<sup>1#</sup>, 윤성민<sup>2</sup>, 최윤석<sup>3</sup>

## Development of high-Cr Ni-Cr-Al alloys for high strength and corrosion resistance

J. I. Lee<sup>1#</sup>, S. M. Yun<sup>2</sup>, Y. S. Choi<sup>3</sup>

### Abstract

배기밸브 스판들은 엔진의 연소 과정 중 발생하는 배기가스를 외부로 배출시키는 부품으로, 고온의 배기가스에 직접적으로 노출된다. 내식성이 우수한 Nimonic 80A, Inconel 625와 같은 합금이 주로 사용되고 있지만, 배기가스에 함유된 S, V 산화물에 의해 스판들이 부식되고 작동 중 표면이 깨지는 현상이 보고됨에 따라 기존보다 우수한 내식성을 갖는 신소재의 개발 및 적용이 필요하다. NiCrAl 계 합금은 불연속 석출에 의한 라멜라 구조를 형성하여 우수한 기계적 특성과 내식성을 가져 스판들 소재로 활용되기에 적합하지만, 국산화가 반드시 필요한 상황이다. 본 연구에서는 ThermoCalc를 활용하여 새로운 합금 원소를 선정하고, 기존 합금 조성에서 새로운 합금 원소를 첨가했을 때의 미세조직을 비교하였고, 새로운 합금을 제시하고자 하였다. Ti, Nb, V, Ta, W, Mo가 이종 원소로 선정되었고, 열처리 및 열가공 공정은 기존 NiCrAl 합금과 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.

**Keywords:** Ni alloy, Thermodynamic calculation, Microstructure, Hardness,

1. 부산대학교 재료공학부, 부교수

2. 부산대학교 재료공학부, 박사과정

3. 부산대학교 재료공학부, 교수

# 부산대학교, 재료공학부, 부교수, E-mail: jilee@pusan.ac.kr

## 선박엔진에 적용되는 초내열합금 배기밸브 스판들 연구

조재현<sup>1</sup>· 조두식<sup>1</sup>· 우영윤<sup>2</sup>· 윤은유<sup>2</sup>· 신재우<sup>#</sup>

### Research on Super-Heat-Resistant Alloy Exhaust Valve Spindles Applied to Marine Engines

J.H.Cho, D.S.Cho , Y.Y.Woo, E.Y.Yoon, J.W.Shin

#### Abstract

배기밸브 스패들은 선박엔진에서 중요한 부품으로, 고온, 고압, 그리고 부식이 심한 환경에서 작동된다. 이러한 극한 조건에서 뛰어난 내열성, 기계적 강도, 내산화성을 제공하는 초내열합금 소재의 사용이 필수적이며 본 연구는 선박엔진에 적용되는 배기밸브 스패들에 사용되는 초내열합금의 개발 및 성능을 조사하며, 극한 작동 환경에서의 내구성 향상을 통해 개발된 소재를 소개할 예정이다.

본 연구에서는 니켈 기반과 크롬 기반 초내열합금을 포함한 다양한 합금을 평가하여, 이들의 열적 안정성, 마모 저항성, 내식성을 분석한 내용을 담고 있으며 첨단 제조 공정이 배기밸브 스패들의 특성 최적화에 미치는 영향을 살펴볼 예정이다. 연구의 주요 목표는 내구성을 향상시키고 엔진 성능을 개선하며, 선박 엔진의 유지보수 비용을 절감할 수 있는 최적의 소재와 제조 방법을 찾는 것입니다.

본 연구 결과는 선박엔진의 신뢰성과 효율성을 향상시키는데 기여하며, 고성능 배기밸브 부품을 위한 재료 선택 및 제조 기술에 대한 중요한 통찰을 제공할 예정이다.

**Keywords:** Ni-Cr-Al alloy, Super-Heat-Resistant Alloy, Hot Forging, Upsetting

---

1. 케이에스피 기술연구소

2. 한국재료연구원

# 케이에스피 기술연구소, 연구소장, E-mail: jwshin@kspvalve.com

## 철도 차륜 열간 단조 해석 기술 개발

이정용<sup>1</sup>· 윤은유<sup>1</sup>· 홍종화<sup>1#</sup>

### Development of Hot Forging Simulation Technology for Railway Wheels

J. Y. Lee, E.-Y. Yoon, J.-H. Hong

#### Abstract

고속철도의 발전과 함께 철도의 운행 환경이 점점 더 가혹해지면서, 철도 차량의 운행 안정성을 확보하기 위해 철도 차륜(Railway wheels) 또한 높은 기계적 성능이 요구되고 있다. 이전 연구에서는 철도 차륜 소재인 ER8의 특정 화학 성분을 조정하여 내충격성과 내마모성 등 다양한 기계적 성질을 향상시킨 소재를 개발하였으며, 이를 바탕으로 변형 공정 지도(Deformation processing map)를 구축하여 소재의 변형 효율 및 안정성을 예측하였다. 본 연구에서는 변형 공정 지도를 기반으로 철도 차륜의 열간 변형 거동을 분석하고, 이를 활용한 열간 단조 해석 기술을 개발하였다. 성형 공정의 주요 변수에 따른 매개변수 연구(Parametric study)를 수행하여 각 변수의 민감도를 평가하였으며, 단조 과정에서 소재의 충진율을 극대화하고 내부 및 외부 결함을 최소화할 수 있도록 최적의 설계 전략을 도출하였다. 또한, 편치 및 다이에 작용하는 하중을 저감하여 단조 공정의 안정성을 확보하였다. 시뮬레이션 결과를 기반으로 다양한 공정 조건을 비교·분석한 결과, 최적의 단조 성형 조건을 도출할 수 있었으며, 이를 실제 차륜 생산 공정에 적용함으로써 보다 효과적인 공정 개발이 가능할 것으로 기대된다.

**Keywords:** Railway Wheels, ER8, Hot Forging Simulation, Parametric study, Process Optimization

---

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부

# 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 선임연구원, E-mail jhong@kims.re.kr

# 냉간단조용 탄소강의 유동특성

김남현<sup>1</sup>, 이현민<sup>1</sup>, 김민철<sup>2</sup>, 전만수<sup>1,#</sup>

## Flow behaviors of carbon steels to be cold-forged

N. H. Kim<sup>1</sup>, H. M. Lee<sup>1</sup>, M. C. Kim<sup>2</sup>, M. S. Joun

### Abstract

Tensile tests of carbon steels of S10C, S20C, and S45C to be cold-forged are conducted under the same conditions, and flow curves are obtained using the combined FEM and tensile test method. The flow information is used to express a general flow function for carbon steels to be forged, which can be used for any carbon steel with a specific carbon content.

**Keywords:** Carbon steel (탄소강), Annealing (풀림), Flow behaviors (유동특성)

### 1. 서론

단조용 탄소강은 풀림 또는 구상화 소둔 처리되며 그 정도에 따라 유동특성이 다소 변한다. 특히 탄소 함유량에 따른 유동특성은 동질성도 있지만, 차이도 있다. 이를 고려한 체계적인 유동정보의 관리는 단조산업의 경쟁력과 직결된다.

### 2. 본론

Fig. 1은 FEM과 인장시험을 연계하여 세 가지 유동곡선을 획득한 결과로, 수정된 Hollomon 유동함수[1]를 사용하여 유동상수를 탄소 함유량과 변형률의 이중구간선형함수로 표현하였다. 이는 임의의 탄소강의 유동특성 목적으로 사용될 수 있다. Fig. 2는 인장시험에 적용하여 실험결과와 해석결과를 비교하고 있다.

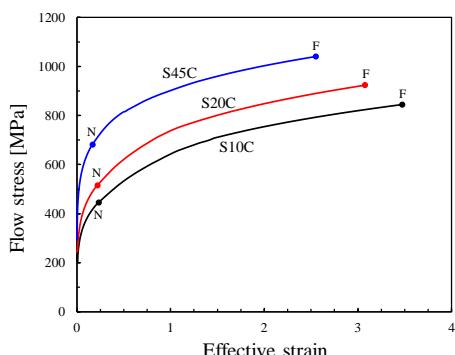


Fig.1 Flow curves of the three carbon steels

1. 경상국립대학교 기계항공공학부

2. (주)엠에프알씨

# 교신저자: 경상대학교 기계항공공학부,

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

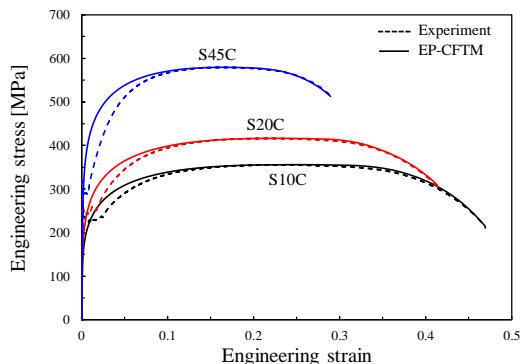


Fig.2 Comparison of the FE-predicted and experimental tensile test curves

### 3. 결론

이 연구에서는 탄소강의 유동곡선에 관한 일반적 활용방안이 검토되었다.

### 사사

이 연구는 LINK 3.0(20240619001)의 연구결과입니다.

### 참고문헌

- [1] Joun MS, Eom JG, Lee MC. A new method for acquiring true stress-strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method. *Mech Mater* 2008;40:586–93.

# 금속 재료의 유동 거동을 규명하기 위한 튜브 인장 시험

홍보승<sup>1</sup>, 신영빈<sup>1</sup>, 흥석무<sup>2</sup>, 전만수<sup>1#</sup>

## Tube tensile test for characterizing the flow behaviors of metallic materials

B. S. Hong, Y. B. Shin, S. M. Hong, M. S. Joun

### Abstract

An efficient method for obtaining high-accuracy flow curves by linking tensile tests of tube materials and the finite element method is presented. This method gradually reduces the difference between the tube tensile test predicted by the flow function, which is a piecewise linear function of a couple of effective strains experiments of the tube tensile test and its FE predicted, corresponding to sample points on the stroke-tube tensile load curve, and the experimental results.

**Keywords:** Tube tensile test(인장시험), Snug-fitting plug(꼭끼워맞춤 플러그)

### 1. 서론

튜브 재료의 특성상, 시편의 양단의 그립 부분의 내부를 보강할 목적으로 꼭끼워맞춤 플러그(snug-fitting plug)를 삽입하고 주 연신 구간의 외피를 적절히 선착함으로써 튜브 재료를 변형이 뚜렷하게 발생하는 몸체 부분과 소성변형이 매우 작은 그립 부분으로 구분한다.

### 2. 본론

튜브 인장시험에서는 대칭면 부근에서 시작된 소성변형이 지속적으로 그립 부로 이동하는 경향이 있다. 이러한 현상은 거시적 네킹 현상으로 볼 수 있으며, 이것의 영향은 파단에 가까워질수록 시편의 상하 대칭면 부근에 집중된다. 그림 1은 튜브 인장시험의 도면 및 시편을 나타낸 것이다.

### 3. 결론

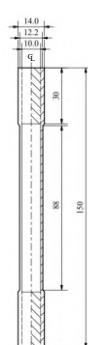
튜브 재료로부터 유동곡선을 획득하기 위한 표준화된 방법이 없다. 제안된 방법은 일반적이고 체계적이기 때문에 응용 프로그램을 용이하게 개발할 수 있다. 그리고 적은 비용으로 가능하다. 잡은 재료 파단의 극복이 중요한 현안 문제가 되고 있는 인발공정에서 유동곡선의 중요성을 고려 할 때, 제안된 방법의 실용적 가치는 충분하다고 사료된다.

1. 경상국립대학교

2. 공주대학교

# 교신저자: 경상국립대학교 기계항공공학부

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr



(a) 튜브 인장시험 도면 (b) 튜브 인장시편  
그림 1. 튜브 재료의 인장시편 및 도면

### 사사

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 지원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20214000000520, 자원순환(재제조) 산업 고도화 인력양성)

### 참고문현

- [1] Razali, N.A., Chung, S.H., Chung, W.J., Joun, M.S., 2022. Implicit elastoplastic finite element analysis of tube-bending with an emphasis on springback prediction. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 120, 6377-6391.

# 필렛 롤링 티타늄 합금 볼트 피로 수명 예측

이현민<sup>1</sup> · 곽희만<sup>2</sup> · 최정숙<sup>2</sup> · 전만수<sup>1, #</sup>

## Fillet rolling titanium alloy bolt fatigue life prediction

H. M. Lee<sup>1</sup>, H. M. Kwak<sup>2</sup>, J. M. Choi<sup>2</sup>, M. S. Joun<sup>1, #</sup>

### Abstract

Aircraft, satellites, and nuclear components require high fatigue life. To address this, we perform fillet rolling on the corners of the bolt neck, which is vulnerable to fatigue failure and apply preloads under compression conditions to improve fatigue life. In this study, we predict high-cycle fatigue life using the Haigh diagrams found in the literature, resulting in a quantitative investigation of the relationship between fatigue life improvement and fillet rolling.

**Keywords:** Fatigue test(피로시험), Ti6Al4V bolt(Ti6Al4V 볼트), Fillet rolling(필렛 롤링), Fatigue life(피로수명), Maximum principal stress(최대주응력)

### 1. 서론

본 연구는 기존 필렛 롤링 및 피로 파괴 유한 요소 결과를 바탕으로 티타늄 합금 볼트의 피로 수명을 예측하고 그 타당성을 논의한다.

### 2. 본론

해석 모델은 기존 소재의 120도 모델 및 흔들림 방지등의 가정을 기반으로 하고, 주응력을 기준으로 수명평가를 하였으며 필렛 롤링으로 인한 평균 응력 및 응력 진폭의 변화를 분석하였다. [1]에서 얻은 피로 수명에 의하면 필렛 롤링을 수행했을 때 무한 피로 수명이 예측되었다.

### 3. 결론

유한요소법을 이용하여 필렛 롤링 후 티타늄 합금 볼트의 피로 수명을 제시하였다.

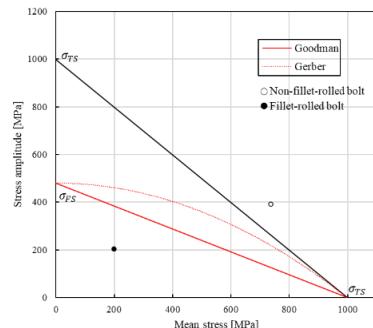


Fig. 1 Haigh diagram of the TiAl64V alloy

### 사사

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다. (20214000000520, 자원순환(재제조) 산업 고도화 인력양성)

### 참고문헌

[1] Xiangnan Pan, Hang Su, Chengqi Sun, Youshi Hong, The behavior of crack initiation and early growth in high-cycle and very-high-cycle fatigue regimes for a titanium alloy, International Journal of Fatigue, Vol 115, 2018 pp 67-78, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.021>.

1. 경상국립대학교 기계항공우주공학부

2. (주)진합

# 교신저자: 경상국립대학교, 기계항공우주공학부, 교수, E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

# 임의의 인장시험곡선으로부터 표준 인장시험곡선의 획득

김남윤<sup>1</sup> · 전만수<sup>1,\*</sup>

## Obtain a standard tensile test curve from any tensile test curve

N.Y Kim<sup>1</sup>, M.S Joun<sup>1</sup>

### Abstract

Cylindrical tensile testing is critically reviewed focusing on the gage length per diameter (GLPD) and its effect on the elongation. Flow behaviors and patterns of representative cold forging materials are revealed focusing on accurately predicting their tensile tests with various GLPDs using the combined elastoplastic FEM and tensile test method. A novel analytical elongation calibration function is presented and numerically validated. This function simply maps an experimental tensile test to the analytical tensile test of the specimen with arbitrary GLPD.

**Keywords:** Tensile test(인장시험), Elongation(연신율), Room temperature(상온)

### 1. 서론

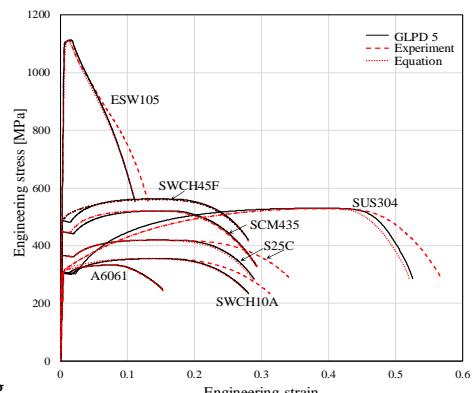
Kim 등 [1]은 인장시험으로부터, 직경대비 표점간 거리비가 5일때의 연신율을 획득 기술을 개발하였다. 이 기술은 인장시험으로부터 얻을 수 있는 정보를 개조하여 표준 인장시험을 획득하는 기술이다. 이 기술은 표준 인장시험에 대한 기준으로 제공하기 때문에 유용하다.

### 2. 본론

상온인장시험 결과로부터 직경대비 표점간 거리비가 5일때의 연신율을 예측할 수 있는 개선된 수식을 개발하였다. Fig.1은 인장시험과 해석, 개선된 수식으로 나타낸 연신율을 보여준다. 각각 파선은 실험, 점선은 개선된 수식, 실선은 직경대비 표점간 거리비가 5일때의 곡선을 나타낸다. 기준 실험이 표점간 거리비가 5인 재료뿐만 아니라, 표점간 거리비가 5가 아닌 재료도 정확함을 보여준다.

### 3. 결론

인장시험으로부터 연신율 표준화를 위한 개선된 수식화 방법이 제안되었다. 이와 같은 방법은 기존 수식 대비 평균 오차가 1.5%에서 0.7%로 감소함을 보였다.



Fig

### 사사

이 연구는 MOTIE가 지원하는 202140000520의 사업과 RS-2024-00398425의 결과물입니다.

### 참고문헌

- [1] N. Y. Kim, N. H. Kim, M. K. Razali, H. M. Lee, M. S. Joun. (2025). Analytical and numerical evaluation of the relationship between elongation calibration function and cyber standard tensile tests for ductile materials. Materials & Design, 113851.

1. 경상대학교 기계공학부  
# 교신저자: 경상국립대학교 기계항공공학부  
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

## ZF7B 합금강의 유동특성

조현준<sup>1</sup>, 김남윤<sup>1</sup>, 조주현<sup>2</sup>, 김진국<sup>2</sup>, 문호근<sup>3</sup>, 전만수<sup>1, #</sup>

## Flow characterization of ZF7B alloy steel and its application

H. J. Cho<sup>1</sup>, N.Y. Kim<sup>1</sup>, J. H. Cho<sup>2</sup>, H. K. Moon<sup>3</sup>, M. S. Joun<sup>1, #</sup>

### Abstract

The flow curves of ZF7B alloy were obtained through hot compression tests and applied to the flashless closed die forging process of complex shapes requiring high-precision FE analysis. The flow curves were obtained from the hot compression tests under the isothermal and homogeneous assumption and the effects of temperature and friction were compensated to reduce the average error of the predicted stroke-compression load curve to less than 2.2% compared to the experiment.

**Keywords:** Alloy steel (합금강), Hot compression test (고온압축시험), Precision hot forging (정밀열간단조)

### 1. 서론

정밀 열간단조 공정의 설계 및 공정상 문제의 해결을 위해서는 정확한 유동특성의 분석이 필수적이다. 문헌이나 SW적으로 획득된 유동곡선은 정성적 의미 이상을 갖기가 쉽지 않다. 이 연구에서는 열간단조용 ZF7B의 합금강의 유동곡선을 획득하고, 이를 정밀단조 공정의 엔지니어링에 활용한다.

### 2. 본론

고온압축시험 결과로부터 등온 균질압축 조건으로 획득한 유동곡선에 온도 및 마찰 영향을 반영함으로써 [1] 그림 1(a)의 유동곡선을 획득하였다. 이 곡선으로 압축시험을 해석하면, 그림 1(b)에서 실험결과와 2.2% 이내의 오차를 보인다. Fig. 2에 정밀밀폐단조에 적용한 사례를 나타내었다.

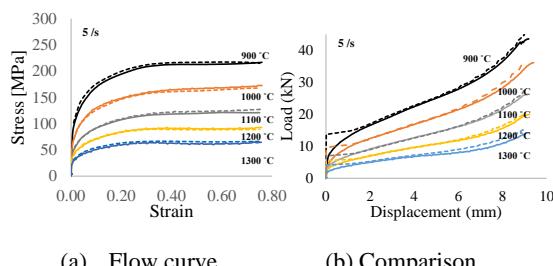
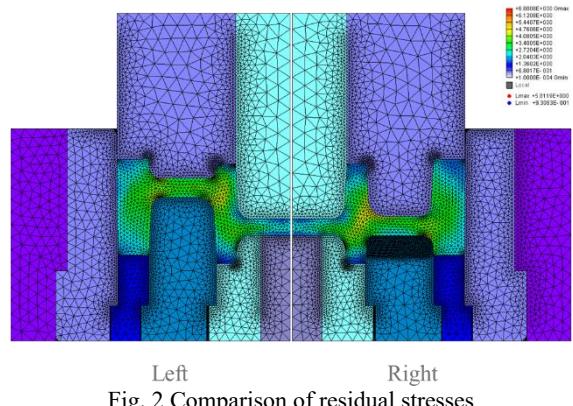


Fig. 1 Comparison of the initial and optimized design

1. 경상국립대학교 기계항공우주공학부
  2. 주동은단조 기술연구소
  3. 주엔에프알씨 기술연구소, 이사
- # 교신저자: 경상국립대학교 기계항공공학부  
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

### 3. 결론

이 연구에서는 정밀밀폐열간단조 공정의 엔진니어링 목적으로 유동특성이 규명되었고, 이를 활용한 정밀공정 해석이 이루어졌다.



### 사사

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다. (20214000000520, 자원순환(재생) 산업 고도화 인력양성)

### 참고문헌

- [1] M. S. Joun, S. M. Ji, J. D. Yoo, S. H. Chung, H. K. Moon, E. J. Kim, D. J. Yoon, J. M. Choi, A. Babu, 2022, Characterization of AZ31B, AZ61A and AZ80A magnesium alloys with an emphasis on temperature compensation for their application to a hot forging, J. Manuf. Proces., V. 84, pp. 764-785,

## 롤투롤 공정을 통한 멕신 유연 에너지 저장 필름 제작

김태현<sup>1</sup>·전성찬<sup>#</sup>

### Fabrication of Flexible Energy Storage Films Using Roll-to-Roll Process

T. H. Kim<sup>1</sup>, S. C. Jun<sup>#</sup>

#### Abstract

Recent advances in two-dimensional (2D) nanomaterials have opened new pathways for high-performance energy storage systems. Among them, MXene has attracted significant attention due to its metallic conductivity, tunable surface chemistry, and strong mechanical flexibility, making it a strong candidate for integration into flexible supercapacitor electrodes. In this study, we employed a roll-to-roll (R2R) wet coating process to fabricate MXene-coated carbon cloth electrodes, with a focus on the mechanical effects induced during processing. The R2R process not only enables uniform and scalable coating but also introduces mechanical pressure during processing, which plays a critical role in enhancing electrode quality. Particularly, the mechanical pressure applied during the roll-to-roll process significantly affects the deposition behavior of MXene and its integration with the carbon substrate. These mechanical effects contribute to the formation of uniform, defect-minimized films, which are essential for achieving stable and high-performance electrochemical characteristics. We examined two different R2R application timings—before and after the drying of the slurry—and confirmed that the mechanical interaction between the coating material and substrate at different stages influences the electrode's structural and electrochemical properties. These findings highlight the importance of mechanical pressure in the roll-to-roll process and provide key insights into process optimization for next-generation flexible energy storage devices.

**Keywords:** MXene, Roll-to-Roll Process, Mechanical Pressure, Carbon Cloth, Flexible Supercapacitor

---

1. 연세대학교, 기계공학부, 대학원생

# 연세대학교, 기계공학부, 정교수, E-mail: scj@yonsei.ac.kr

# 고속 · 고정밀 · 고생산성을 구현한 Wire Arc Direct Energy Deposition 공정 기술

조영태<sup>#</sup> · 손휘준<sup>1</sup> · 조인수<sup>1</sup>

## Advanced Wire Arc DED Process for High-Speed, High-Precision, and High-Throughput Metal Additive Manufacturing

Y. T. Cho, H. J. Son, I. S. Jo

### Abstract

To enable the practical application of additive manufacturing(AM) technologies in industrial circumstances, it is essential to develop processes that can rapidly and precisely fabricate metal components. In particular, the direct melting and deposition of metal wire has gained increasing attention for the production of large-scale parts. Among such approaches, the Wire Arc Direct Energy Deposition (WA-DED) process, which utilizes arc plasma as the heat source to melt the wire, has emerged as a promising technique. However, achieving high precision in WA-DED is challenging due to the inherent instability of arc plasma with high current and voltage levels. Additionally, attempts to increase deposition speed often result in problem of arc stabilization, further limiting process control.

To overcome these limitations, Prime Lab. at Changwon National University has developed various techniques to enhance the stability and accuracy of the WA-DED process. Notably, the integration of a laser as an auxiliary heat source has been shown to significantly stabilize the arc plasma. This hybrid approach enables consistent arc maintenance even at lower currents and allows for stable high-speed wire feeding. As a result, the process achieves both high deposition rates and improved precision in metal additive manufacturing. Furthermore, the research demonstrated enhanced control over molten pool dynamics, such as surface tension, thereby increasing the geometric freedom of structures. These advancements culminated in the development of a novel technique referred to as the “Metal 3D Pen”, which allows for freedom, high resolution metal deposition. This presentation introduces and discusses the key innovations and outcomes of this approach.

**Keywords:** Metal 3D Printing, Direct Energy Deposition, High Throughput Additive Manufacturing

---

1. 국립창원대학교 스마트제조융합협동과정, 대학원생

# 국립창원대학교, 기계공학부, 교수, ytcho@changwon.ac.kr

### 3. 일반 구두 발표

소재응용

( 제 3 발표회장 )

# 인공지능 기반 철강 소재 템퍼링 공정에서의 미세조직 및 물성 예측

강준우<sup>1,2</sup> · 김호혁<sup>1</sup>, 오영석<sup>1</sup>, 윤준석<sup>1</sup>, 오상현<sup>1,2</sup>, 김지훈<sup>2,#b</sup> · 강성훈<sup>1,#a</sup>

## AI-based prediction of microstructure and mechanical properties in the tempering process of steel materials

J. W. Kang, H. Kim, Y.S. Oh, J. Yun, S. H. Oh, J. H. Kim, S. H. Kang

### Abstract

열처리 공정 중 하나인 템퍼링 공정은 재료의 취성을 완화하고 연성을 회복하는 열처리 공정으로, 기존에는 반복적인 실험을 통해 템퍼링 공정이 물성에 끼치는 영향을 분석해왔다. 이러한 방법은 시간과 비용이 많이 소모되는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 딥러닝 기반 접근법을 통해 해결하고자 한다. 이를 위해 42CrMo4강을 다양한 템퍼링 온도 조건에서 처리한 후, 광학현미경 (Optical microscopy)을 통해 미세조직 이미지 데이터를 수집하였고, 인장시험을 통해 기계적 물성데이터를 분석하였다. 이 데이터를 활용하여, 딥러닝을 기반으로 한 2 단계 모델 구성을 하고, 템퍼링 공정-미세조직-물성 관계를 모델링하였다. 첫 번째 단계는 템퍼링 온도와 미세조직 간의 관계를 모델링 하는 것으로 StyleGAN (Style-based generator architecture for generative adversarial networks)을 통하여 모델링 하였다. 두 번째 단계는 미세조직과 물성간 관계를 모델링 하고, 합성곱 신경망 (Convolutional neural networks, CNN)을 통하여 모델링 하였다. 모델의 성능은 첫 번째 단계에서는 FID (Frechet inception distance)와 상 분율 분석을 통해 평가되었으며, 두 번째 단계에서는 결정계수 (R-squared)와 RMSE (Root mean squared error)를 통해 각각 평가하였다. 그 결과, 딥러닝 기반 모델은 실험에 포함되지 않은 템퍼링 온도 조건에서도 미세조직 및 물성을 예측할 수 있었다. 또한, 딥러닝 모델의 일반화 성능을 검증하기 위해, 학습에 포함되지 않은 새로운 템퍼링 조건에 대해 추가 실험을 수행하였으며, 해당 조건에서 얻은 실제 데이터를 기반으로 학습된 모델의 예측 성능을 평가하였다. 이를 통해 본 연구의 딥러닝 기반 모델이 공정-미세조직-물성 관계를 학습하고, 새로운 조건에서도 확장 가능함을 확인하였다.

**Keywords:** Deep Learning, Steel, Tempering, Microstructure, Mechanical Properties

### **Acknowledgement**

본 연구는 소재부품기술개발사업(소재부품패키징사업, 과제번호: RS-2024-00431835)로 수행된 연구결과입니다.

---

1. 한국재료연구원

2. 부산대학교 기계공학부

#a 교신저자: 한국재료연구원, 책임 연구원, E-mail: kangsh@kims.re.kr

#b               부산대학교 기계공학부, 교수, E-mail: kimjh@pusan.ac.kr

# Constitutive Behavior of ZK60 Magnesium Alloys during Hot Deformation: A Data-Driven Modeling Approach

Murugesan Mohanraj<sup>1</sup>, Hyo-Sun Jang<sup>1</sup>, Jae-Hyung Cho<sup>1,\*</sup>

## Abstract

Predicting the hot deformation characteristics of magnesium alloys in industrial forming processes requires precise modeling of flow stress behavior. The present research work aims to examine the modeling and prediction of high-temperature flow characteristics of solid solution heat-treated ZK60 magnesium alloys under compression at various temperatures ranging from 298K to 698K, with strain rates of  $0.0069\text{s}^{-1}$  and  $0.139\text{s}^{-1}$ . The experimental data acquired from compression tests are used to develop and implement a conventional artificial neural network (ANN) through two hybrid optimization algorithms—a genetic algorithm (GA) and a constrained nonlinear function (Fmincon)—for better generalization and hyperparameter tuning of the network to maximize its predictive performance. In addition, the model's performance is evaluated using statistical measures, including coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), and average absolute relative error (AARE). By providing improved predictive capabilities across the tested deformation conditions, comparative results show that ANN-Fmincon performs noticeably better than the standalone ANN and ANN-GA models. The proposed ANN-Fmincon model predicts flow behaviors of ZK60 magnesium alloys effectively during work hardening, dynamic recovery (DRV), and softening due to dynamic recrystallization (DRX). The suggested hybrid modeling framework offers a suitable method for capturing the complex nonlinear behavior of ZK60 magnesium alloy, giving important insights for implementing process design and alloy development.

**Keywords:** ZK60 magnesium alloy, compression test, flow stress, artificial neural network, genetic algorithm, fmincon, dynamic recovery, dynamic recrystallization, hybrid optimization

---

1. Department of Materials Processing, Korea Institute of Materials Science (KIMS), Changwon, 51508, South Korea

# Corresponding author, E-mail: jhcho@kims.re.kr

## AA6082-T6 알루미늄 압출재의 극저온 고주기 피로 특성

허정민<sup>1</sup>· 권종혁<sup>1</sup>· 권대서<sup>1</sup>· 김동규<sup>1,\*</sup>

### Cryogenic high cycle fatigue behavior of extruded AA6082-T6

Jeong-Min Heo<sup>a</sup>, Jong-Hyeok Kwon<sup>a</sup>, Dae-Seo Kwon<sup>a</sup>, Dong-Kyu Kim<sup>a\*</sup>

#### Abstract

In this study, tensile and high cycle fatigue tests were conducted on extruded AA6082-T6 at both room and cryogenic temperatures to evaluate the changes in mechanical properties. The results of the tensile test showed enhanced strength and ductility, primarily attributed to increased work hardening due to suppressed dynamic recovery and more homogeneous slip. In the fatigue tests, an improvement in fatigue strength was also observed, particularly under tension-tension loading, where the material exhibited a lower fatigue damage rate. Quantitatively, the fatigue strength increased by 45% and 75% under  $R = -1$  and  $R = 0.1$ , respectively, as the temperature decreased from 298 K to 173 K. Recognizing that high cycle fatigue failure initiates and propagates from strain localization and dislocation accumulation at the microscale, the fracture mechanisms were analyzed from a microstructural perspective. The analysis revealed that at cryogenic temperature, dislocations were more uniformly stored within grains, increasing their storage capability. In addition, reduced dislocation mobility promoted the formation of secondary cracks near localized stress concentrations, which contributed to stress redistribution and effectively delayed the propagation of main cracks, enhancing overall fatigue resistance. These investigations enhance the understanding of cryogenic high cycle fatigue mechanisms in aluminum alloys.

**Keywords:** Aluminum alloy, Cryogenic temperature, High cycle fatigue, Stress ratio, Strengthening mechanism

---

1. 건국대학교 기계공학부

# 교신저자: 건국대학교 기계공학부 E-mail: dongkyukim@konkuk.ac.kr

## 스트레칭-벤딩 변형모드의 균형을 갖는 하이브리드 격자구조 메타물질

오호약<sup>1</sup>· 권종혁<sup>1</sup>· 권대서<sup>1</sup>· 허정민<sup>1</sup>· 정경환<sup>2</sup>· 이호원<sup>3</sup>· 김동규<sup>#</sup>

### Hybrid architected metamaterial with balanced stretch-bending deformation modes

Haoyue Wu<sup>1</sup>, Jong-Hyeok Kwon<sup>1</sup>, Dae-Seo Kwon<sup>1</sup>, Jeong-Min Heo<sup>1</sup>, Kyung-Hwan Jung<sup>2</sup>, Ho Won Lee<sup>4</sup>, Dong-Kyu Kim<sup>#</sup>

#### Abstract

As additive manufacturing technology advances, lattice structures with complex topological shapes can be fabricated. This study presents a new hybrid lattice design strategy aimed at enhancing both structural strength and energy absorption. The design incorporates five stretch-dominated lattices as load-bearing units and five bending-dominated lattices as energy-absorbing units. After performance evaluation, three high-strength lattices and one high-energy absorption lattice were selected and combined to form the hybrid design. Modifications were applied to the high-energy absorption lattice to improve the overall stability of the hybrid structure. The design integrates two key strategies: failure path reinforcement and microstructure-inspired design, resulting in seven distinct unit cell configurations. Quasi-static compression tests were performed on 316L stainless steel samples fabricated using laser powder bed fusion (LPBF) technology. The finite element model was validated by comparing experimental and simulation results. The findings demonstrate that the hybrid lattice structure significantly enhances mechanical performance, with the improvement becoming more pronounced at lower relative densities. This work provides a comprehensive analysis of lattice behavior at various relative densities, offering valuable insights into hybrid lattice design and the optimization of mechanical properties.

**Keywords:** Lattice structure, hybrid design, mechanical properties, laser powder bed fusion, finite element analysis

- 
1. 건국대학교 기계공학부
  2. 한국생산기술연구원 강원기술실용화본부 기능성소재부품그룹
  3. 한국재료연구원 재료인공지능·빅데이터 연구실

# 교신저자: 건국대학교 기계공학부, E-mail: dongkyukim@konkuk.ac.kr

## 다결정 소성 모델을 활용한 동적 재결정 모사

전보혜<sup>1</sup> · Carlos N Tomé<sup>2</sup> · 정영웅<sup>1,3, #</sup>

### Dynamic recrystallization simulated using a polycrystal plasticity model

Bohye Jeon, Carlos N Tomé, Youngung Jeong

#### Abstract

본 연구에서는 통합된 점소성 및 탄점소성 다결정 결정 소성 모델(VPSC,  $\Delta$ EVPSC 및  $\sigma$  EVPSC) 코드를 활용하여, Ni-30Fe-Nb-C 합금의 고온( $1075^{\circ}\text{C}$ ) 동적 재결정 거동을 모사하였다. 동적 재결정은 일반적으로 핵생성, 성장, 수축, 소멸의 단계를 거치며 점진적인 집합조직 발달이 나타난다. 재결정 발생을 위한 임계 에너지가 충족되기 전에는 유동 응력이 증가하나, 동적 재결정이 발생하며 점진적인 응력 감소가 나타나고, 더욱 큰 변형 후에는 유동 응력이 수렴하는 특징이 발현된다. 본 연구에서는 언급된 유동 응력의 변화와 함께 핵생성, 결정립 성장, 수축 그리고 소멸에 이르는 다양한 경우를 모사하기 위해, 개별 결정립의 크기 변화를 고려한 형태로 종전의 재결정 모델을 재구성하였다. 평면 변형 환경에서 Ni-30Fe-Nb-C 합금의 결정내 소성 변형을 옥타헤드랄( $\{111\}<110>$ ) 및 비-옥타헤드랄( $\{011\}<110>$ ) 슬립계 메커니즘으로 모사하였고, 간단한 보세(Voce) 경화 법칙을 활용하였다. 다양한 변형 수준에서 슬립 활성도와 집합조직의 변화를 계산하였고 Brass, Cube, Goss 등의 주요 성분 변화를 정량 계산하였다. 각 집합조직 성분 발달과 슬립계의 관계를 정량적으로 평가하였고, 실험으로 측정된 집합조직 결과와 비교하였다.

**Keywords:** Crystal plasticity model (결정 소성 모델); Dynamic Recrystallization (동적 재결정); Texture (집합조직); Ni-30Fe-Nb-C;

---

1. 창원대학교 소재융합시스템공학과

2. Los alamos national Laboratory, MST-8

3. 창원대학교 신소재공학부

# 창원대학교 신소재공학부, 부교수, E-mail: yjeong@changwon.ac.kr

# 마그네슘 합금의 회복: 실험적 관찰과 결정소성 해석

정영웅<sup>1,#</sup>, Jose Victoria-Hernandez<sup>2</sup>

## Recovery of Mg-Zn-Nd-Y-Zr alloy: experimental observation and analysis via crystal plasticity

Youngung Jeong, Jose Victoria-Hernandez

### Abstract

마그네슘(Mg) 합금에 희토류(RE) 원소를 첨가하면 비기저면 (non-basal) 전위계의 활성이 촉진될 수 있다. 그 결과, 마그네슘 합금의 성형성을 향상시키기 위한 방법으로 희토류 원소의 첨가가 널리 연구되어 왔다. 섭씨 200도 이상의 온도에서는 마그네슘 합금의 기계적 유동 응력이 크게 감소하는데, 이는 비기저면 전위계의 임계전단응력(CRSS) 감소와 전위 회복(recovery) 및 재결정에 기인한 것으로 해석된다. 본 연구에서는 일련의 EBSD(전자 후방 산란 회절) 분석을 통해 회복 현상에서 선호되는 슬립계를 관찰하였으며, 결정 소성 시뮬레이션 결과로 온도에 따른 임계전단응력의 변화 및 집합조직 발달의 변화를 모사하였다. 이 결과는 특히 비기저면 전위의 회복이 유동 응력 및 이방성에 있어 기존에 생각했던 것보다 더 중요한 역할을 할 수 있음을 보여주었다.

**Keywords:** Crystal plasticity model (결정 소성 모델); Recovery (회복); Magnesium (마그네슘); 이방성 (anisotropy)

---

1. 창원대학교 신소재공학부

2. Helmholtz-Zentrum, Hereon

# 창원대학교 신소재공학부, 부교수, E-mail: yjeong@changwon.ac.kr

## 고성능 상용차용 휠 개발

권혁선<sup>1</sup>

### Development of High Performance Commercial Vehicle Wheel

Hyuk Sun Kwon

#### Abstract

최근 연비, 환경 이슈로 차량 경량화가 가속되고 있는 추세이며, 특히 재료분야에서는 복합조직강 고강도강을 활용하여 차량 경량화 및 부품 경량화에 적용 시도되고 있다. 본 연구에서는 트레일러, 트럭, 버스 등에 사용되는 상용차용 경량 로드휠을 개발 하였다. 고내구, 고유동 및 고강성 위해 먼저 인공지능 해석 기술을 기반으로 형상 최적화를 수행 하였고, 복합조직 고강도강을 활용하여 휠을 제작 하였다. 가공 성형을 위해 롤스파닝 해석 기술을 마련 하였고, 실제 제작된 휠과 비교 하였다. 개발된 고성능 로드휠은 17% 수준의 경량화를 달성 하였으며, 유속 10% 상승 및 내구성능 2.9배 증가를 나타내었다.

**Keywords:** 상용차용 로드휠, 고강도강, 롤스파닝 성형, 내구성능

---

1. POSCO Global R&D center, 성형연구그룹, kwonhs@posco.com

# 마그네슘 합금 판재의 r-값 및 성형성에 대한 집합조직의 영향과 상관관계 분석

유승윤<sup>1</sup> · 정영웅<sup>2</sup> · 김영민<sup>3</sup> · 박성혁<sup>#1</sup> · 서병찬<sup>#2</sup>

## Effect of Texture on r-value and Formability with Correlation Analysis in Magnesium Alloy Sheets

S. Yu, Y. J, Y. M. Kim, S. H. Park, B-C, Suh

### Abstract

The relationship between r-value and formability is well-established in commercial structural materials such as Fe, Al, and their alloys, where a higher r-value generally corresponds to improved deep drawability, enhanced isotropic deformation characteristics, and superior formability. These favorable properties make such materials essential for industrial sectors requiring excellent formability performance. In contrast, Mg alloys deviate from this conventional trend. Despite often achieving relatively high r-values, Mg alloys typically display poor formability at room temperature. This paradoxical behavior arises from two primary factors: the intrinsic limitation of available slip systems and the development of a strong basal texture during thermo-mechanical processing. Given this unique behavior, the present study focuses on a detailed investigation into how r-value correlates with formability in Mg alloy sheets. A systematic approach was employed, analyzing critical parameters including initial texture, the role of alloying elements, Schmid factors(SFs) across different slip systems, and their collective influence on deformation behavior. Through these analyses, this research clarifies the complex interactions that govern the mechanical response of Mg alloys, particularly under room temperature conditions. Furthermore, the study provides strategic insights into optimizing both alloy composition and texture control to overcome formability limitations, thereby contributing to the advancement of magnesium alloys for applications where enhanced mechanical properties and improved formability are essential.

**Keywords:** Magnesium alloy, Texture, r-value, Formability, Rolling sheet

---

1. 경북대학교 금속재료공학과, 대학원생

2. 국립창원대학교 신소재공학부, 교수

3. 한국재료연구원 경량재료연구본부, 책임연구원

#1 경북대학교 금속재료공학과, 교수, E-mail: sh.park@knu.ac.kr

#2 한국재료연구원 경량재료연구본부, 선임연구원, E-mail: bcsuh@kims.re.kr

# UNSM과 Electropulsing 처리를 통한 마그네슘 합금 판재의 미세조직 제어 및 기계적 물성 향상

홍원표<sup>1</sup>, 김현지<sup>2</sup>, 이태경<sup>3</sup>, 박성혁<sup>#</sup>

## Integrated UNSM–Electropulsing Treatment for Tailoring Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy Sheet

W. P. Hong, H. J. Kim, T. K. Lee, S. H. Park

### Abstract

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 with bimodal microstructure. 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  $\mu\text{m}$ , 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.

**Keywords:** AZ31 Alloy, Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification, Electropulsing Treatment, Bimodal Microstructure, Mechanical Properties

- 
1. 경북대학교 금속재료공학과, 학부연구생
  2. 국방과학연구소 제4기술연구원, 선임연구원
  3. 부산대학교 기계공학부, 교수

# 경북대학교 금속재료공학과, 교수 E-mail: sh.park@knu.ac.kr

# Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 분산된 Ti-6Al-4V 합금 제조 및 특성 평가

김우혁<sup>1</sup>· 고의준<sup>2</sup>· 박형기<sup>2</sup>· 김한수<sup>3</sup>· 이태규<sup>1</sup>· 김정한<sup>1, #</sup>

## Fabrication and Characterization of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Dispersed Ti-6Al-4V Alloys

W. H. Kim, U. J. Ko, H. K. Park, H. S. Kim, T. G. Lee, J. H. Kim

### Abstract

산화물 분산 강화 합금(oxide dispersion strengthened, ODS alloy)은 기계적 합금화(mechanical alloying)를 통해 기지 금속 내에 산화물을 미세하고 균일하게 분산시켜 제조된 합금으로, 분산된 산화물은 전위의 이동을 효과적으로 억제함으로써 기계적 물성을 크게 향상시킨다. 이러한 미세한 산화물 분산은 특히 고온 강도 및 크리프 저항성에서 탁월한 성능을 발휘하기 때문에, ODS 합금은 철계 및 니켈계 합금을 중심으로 활발히 연구되어 왔다. 그러나, 타이타늄 기반의 산화물 분산 강화 합금에 대해서는 소수의 연구를 제외하고는 거의 이루어지지 못하였다. 이는 철계, 니켈계 합금 대비 낮은 탄성 계수를 가져 기계적 합금화 공정 중에 충격 에너지가 산화물 입자에 효과적으로 전달되지 않고 기지 내로 흡수되며, 이로 인해 산화물의 균일한 분산이 어려워지고 입자들 간의 응집이 발생하기 쉽기 때문이다. 따라서 타이타늄 기지 내에 산화물을 균일하게 분산시키기 위해서는 더 많은 시간과 높은 에너지가 요구되기 때문에 기존의 공정 방식으로는 타이타늄 기반 ODS 합금의 효율적인 제조에 많은 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 분말 기반 directed energy deposition 공정을 활용하여 타이타늄 기반 산화물 분산 강화 합금을 제조하였다. 적층 공정 중 산화물 분산을 위해 pre-alloyed powder 및 coated powder를 제작하였다. 또한 기존 기계적 합금화 방식의 한계를 보완하고자 극저온 볼밀링(cryogenic ball milling) 공정을 도입하여 분말의 분산성을 향상시켰으며, spark plasma sintering을 통해 ODS 합금을 추가로 제조하였다. 제조된 소재의 미세조직 분석 결과, 기지 내부에 나노 크기의 산화물이 분산되어 있었고 기계적 특성 분석 결과에서 상용 Ti-6Al-4V 소재 대비 우수한 강도를 보였다.

**Keywords:** Ti-6Al-4V, oxide dispersion strengthened alloy, microstructure, mechanical property

1. 국립한밭대학교, 신소재공학과

2. 한국생산기술연구원

3. (주)KONASOL

# 국립한밭대학교, 신소재공학과, 교수, E-mail: jh.kim@hanbat.ac.kr

# NOVEL SURFACE ACTIVATION TREATMENT FOR ENHANCED DIRECT BONDING BETWEEN ALUMINUM 8079 AND CAST POLYPROPYLENE USING TRIAZINE DERIVATIVES AND THEIR MIXTURES

Emmanuel Appiah, Byoung Jun Han, Jin Woong Park, Jung Hyun Kang, Jeoung Han Kim\*

## Abstract

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 special 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 sufficient mixture with highest bonding effect was used to study its effect on the bonding between Al 8079 and different derivatives of CPP and nylon to determine the most effective derivative for the pouch application. Pouch film. The surface characteristics of the aluminum before and after the triazine treatment at the nanoscale were studied using Scanning Electron Microscopy (SEM), Confocal Laser Microscopy, 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 to 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.

**Keywords:** Triazine derivatives, environmental resilience, direct adhesion, tensile strength

---

1. Department of Material Science and Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Republic of Korea

# Corresponding author: Jeoung Han Kim (jh.kim@hanbat.ac.kr)

## 음향방출법 기반 Top-hat 압축시험을 통한 냉간압조용 강재의 단조성 평가

권대서<sup>1</sup>· 권종혁<sup>1</sup>· 허정민<sup>1</sup>· 박현승<sup>1</sup>· 주호선<sup>2</sup>· 오영석<sup>3</sup>· 강성훈<sup>3</sup>· 김동규<sup>1, #</sup>

### Forgeability assessment of CHQ steel wires by acoustic emission-based top-hat compression test

Dae-Seo Kwon<sup>a</sup>, Jong-Hyeok Kwon<sup>a</sup>, Jeong-Min Heo<sup>a</sup>, Hyun-Seung Park<sup>a</sup>, Ho Seon Joo<sup>b</sup>,  
Young-Seok Oh<sup>c</sup>, Seong-Hoon Kang<sup>c</sup>, Dong-Kyu Kim<sup>a\*</sup>

#### Abstract

This study presents an acoustic emission (AE)-based top-hat compression test as a reliable method for quantitatively evaluating the forgeability of cold heading quality (CHQ) steel wires under high negative stress triaxiality, a critical stress state in bulk metal forming. Finite element simulations were performed to analyze the deformation behavior of top-hat specimens and to identify key dimensional parameters that promote localized plasticity and fracture initiation. Based on the simulation results, an optimized specimen design was selected and applied experimentally to four types of CHQ steel wires. During the test, a gradual load drop was observed, indicating the onset of micro-cracking and progressive damage. *In situ* AE monitoring effectively captured early-stage damage evolution with greater sensitivity and temporal resolution than conventional load-based detection methods. Thus, the integration of AE with the top-hat compression test provides a robust and sensitive approach for forgeability assessment under complex compressive stress states.

**Keywords:** Forgeability assessment, CHQ steel wire, Negative stress triaxiality, Acoustic emission, Top-hat compression

- 
1. 건국대학교 기계공학부
  2. 포스코 철강솔루션연구소 성능연구그룹
  3. 한국재료연구원 재료공정연구본부

# 교신저자: 건국대학교 기계공학부, E-mail: dongkyukim@konkuk.ac.kr

## 4. 특별세션 2

국내 항공엔진 소재부품 기술 개발 현황,  
한화와 함께하는 엔진 국산화 도전

( 제 4 발표회장 )

# 항공엔진 부품 단조 공정 설계의 지능화

김낙수<sup>1#</sup>· 박준희<sup>1</sup>· 김인서<sup>1</sup>

## Intelligent Design of Forging Processes for Gas Turbin Engine Components

N. Kim, J. Park, I. Kim

### Abstract

항공엔진 부품은 고온·고압 환경에서 장시간 작동하는 핵심 구조물로서, 단조 공정은 이들의 기계적 성능과 수명을 좌우하는 결정적인 제조 단계이다. 전통적인 단조 공정 설계는 숙련자의 경험과 반복적인 해석 기반의 접근에 의존하고 있으며, 이는 시간 소모가 크고 신입 인력의 진입 장벽이 높다는 한계를 가진다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하고자 단조품을 대상으로 AI 기반 지능형 단조 설계 프레임워크를 구축하였다. 본 연구는 단조 공정 설계의 패러다임을 기존의 경험 기반 방식에서 데이터 기반 지능 설계로 전환하고, 신입 인력도 즉시 설계 가능하게 만드는 기술적 기반을 마련한다. 향후 항공 엔진뿐 아니라 고정밀 금속 부품 제조 전반에 확장 적용이 가능할 것으로 기대된다.

**Keywords:** Forging Process, Gas Turbine Engine, Artificial Intelligence, Manufacturing Process, Design Automation

---

1. 서강대학교 기계공학과

# 서강대학교, 기계공학과, 교수, E-mail: nskim@sogang.ac.kr

## 항공용 가스터빈 엔진 단조품 및 국산화 개발 현황

오승철<sup>1</sup>· 황승욱<sup>1</sup>· 권혁준<sup>1</sup>· 김지윤<sup>1</sup>· 손인수<sup>1</sup>

### Overview of Forged Components for Aero Gas Turbine Engines and Current Status of Localization Development

S. C. Oh, S. U. Hwang, H. J. Kwon, J. Y. Kim, I. S. Son

#### Abstract

항공용 가스터빈 엔진은 팬, 압축기, 연소기, 터빈 등으로 구성되며, 각 부품에는 극한 환경을 견딜 수 있는 첨단 소재가 사용된다. 특히 주요 회전체 부품은 단조공정을 통해 제조되며, 니켈기 초내열합금과 타이타늄 합금 같은 핵심 소재가 적용된다. 이들 소재는 1,500°C 이상의 고온과 수천~수만 시간의 작동 조건을 견뎌야 하므로, 고온강도, 내산화성, 피로수명 등 높은 물성 요구도를 충족해야 하며, 사용 환경에서 신뢰성이 보장되어야 한다. 이러한 요구 특성을 만족시키기 위해 엔진 부품 제조 시 단조공정, 열처리공정, 시험평가 등 복합적인 기술 요소에 대한 종합적인 연구개발이 수행되고 있다.

본 발표에서는 항공용 가스터빈 엔진의 구조와 핵심 소재별 요구 특성을 분석하고, 엔진 제조에서 주요 단조품 구성 현황 및 단조 기술이 항공엔진에서 갖는 기술적 중요성을 고찰한다. 또한 국내에서 진행 중인 항공엔진 단조품 국산화의 추진 전략과 주요 개발 과제를 중심으로, 그동안의 실증 성과와 핵심 요소 기술 확보 현황을 소개한다. 특히, 해외 의존도가 높았던 엔진용 디스크, 샤프트 등의 국산화를 위한 설계, 공정 최적화, 검사 및 신뢰성 확보 기술 개발 사례를 중심으로 논의하며, 이러한 노력을 통해 축적된 기술 역량과 남아 있는 도전 과제를 종합적으로 점검하고자 한다. 끝으로, 향후 국내 항공엔진 핵심 부품의 국산화를 위한 발전 방향을 제언한다.

**Keywords:** Aero Gas Turbine Engine, Forging, Forged Components, Nickel Superalloy, Titanium Alloy, Localization Development

---

1. 한화에어로스페이스, 한국연구소

# 고성능 항공엔진 부품을 위한 단조 기술과 적용 사례

권혁준<sup>1</sup>· 황승욱<sup>1</sup>· 오승철<sup>1</sup>· 김지윤<sup>1</sup>· 손인수<sup>1</sup>

## Forging Technologies and Applications for High-Performance Aeroengine Components

H. J. Kwon, S. U. Hwang, S. C. Oh, J. Y. Kim, I. S. Son

### Abstract

항공엔진은 고온, 고압, 고속 회전이라는 극한 환경에서 운용되며, 이를 구성하는 주요 부품에는 우수한 기계적 성능과 높은 신뢰성이 요구된다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 항공 엔진 산업에서는 다양한 단조 기술들이 폭넓게 활용되고 있다. 단조는 금속 재료를 고온에서 압력을 가하여 원하는 형상으로 성형하면서 동시에 내부 미세조직을 제어하는 공정으로, 소재의 결정립을 미세화하고, 제품 형상에 따른 최적화된 Grain Flow 를 형성함으로써 강도 및 괴로 등과 같은 기계적 특성을 크게 향상시킬 수 있다. 이러한 특성으로 인해 단조는 항공엔진 부품 제조에 있어 형상 구현과 소재 성능 향상을 동시에 달성할 수 있는 핵심 기술로 자리매김 하고 있다.

항공엔진 부품 제조에 적용되는 주요 주요 단조 기술로는 Ingot을 Billet으로 전환하는 Conversion 공정부터, 복잡한 형상을 구현하는 정밀 단조 기술, 미세조직을 정밀하게 제어할 수 있는 특수 단조 공정들이 포함된다. 이러한 단조 기술들은 각기 다른 공정 특성과 미세조직 적 이점을 바탕으로, 디스크나 샤프트와 같은 회전체 부품은 물론, 엔진 케이스와 같은 구조물 부품에도 효과적으로 적용되고 있다.

본 발표에서는 항공엔진 부품에 적용되는 단조 기술의 원리와 특징을 개괄하고, 실제 항공 엔진 부품에의 적용 사례를 소개하고자 한다. 이를 통해 고성능 항공엔진 부품 개발에 있어 단조 기술이 가지는 역할과 중요성에 대해 논의하고자 한다.

**Keywords:** Aero Gas Turbine Engine, Forging, Forged Components, Conversion, Closed Die Forging, Ring Rolling, Grain Refinement, Grain flow, Mechanical Properties

---

1. 한화에어로스페이스, 한국연구소

# Processing Map을 활용한 소성가공 공정 설계

김지윤<sup>1</sup>· 권혁준<sup>1</sup>· 황승욱<sup>1</sup>· 오승철<sup>1</sup>· 손인수<sup>1</sup>· 박준희<sup>2</sup>

## Design of Hot Deformation Process Using Processing Map

J. Y. Kim, H. J. Kwon, S. U. Hwang, S. C. Oh, I. S. Son, J. H. Park

### Abstract

항공엔진용 단조소재는 고강도 및 고내열 특성으로 인해 성형 윈도우가 좁아 정밀한 온도 및 변형 조건 설정이 필수적이다. 가공 중에는 균열, 미세조직 불균일, 기계적 성질 저하 등 의 문제가 동반될 수 있다. 이러한 공정 제약을 극복하기 위한 방안으로 온도, 변형속도, 변형률 조건에 따른 유동 거동과 가공 안정성을 시각화한 Processing Map이 사용되고 있다.

Processing Map은 재료의 유동응력 데이터를 기반으로 에너지 소산 효율 및 가공 불안정성 지수를 분석하여, 성형성과 조직 제어가 가능한 최적의 가공 조건을 도출하는 데 효과적이다.

유동응력 데이터는 주로 Gleeble 장비를 활용하여 고온 성형성 시험을 통해 확보되며, 이를 바탕으로 재료의 변형 거동을 파악하고 동적 재결정 조건 및 공정 안정성 지표를 분석한다. 결과적으로 소재별 특성에 최적화된 성형 윈도우 설정 및 불안정 영역 회피 전략 수립이 가능 하며 공정 안정성 향상, 품질 균일화, 재료 손실 최소화 등의 효과를 기대할 수 있다.

본 발표에서는 고온 성형성 평가 결과 기반 Processing Map을 활용한 당사 항공엔진용 단조 소재 개발 사례를 소개하고, 향후 항공기용 정밀 단조 공정 설계를 위한 기술적 적용 가능성과 기대 효과를 논의하고자 한다.

**Keywords:** Aeroengine, Hot Forming , Formability, Processing Map, Flow Stress

---

1. 한화에어로스페이스, 한국연구소

2. 서강대학교

# 항공엔진용 인코넬 718 합금의 결정립 미세화를 위한 단조공정 연구

김종식<sup>1</sup>, 주경준<sup>1</sup>, 권용혁<sup>1</sup>, 금보경<sup>1</sup>, 이기영<sup>1,#</sup>

## A Study on Forging Processes for Grain Refinement of Inconel 718 Alloy for Aerospace Engines

J. S. Kim, G. J. Ju, Y. H. Kwon, B. K. Geum, K. Y. Lee

### Abstract

Inconel 718 alloy is a nickel-based alloy widely used in the aerospace industry due to its mechanical stability at elevated temperature. Delta processing is a method that distributes the  $\delta$  phase in the grain boundary, acting as a pinning point to prevent grain growth during hot deformation (e.g., cogging). In this study, delta processing was applied to domestically developed aerospace-grade Inconel 718 alloy to achieve grain refinement between cogging process, and microstructural changes and mechanical properties were evaluated.

**Keywords:** Superalloy, Inconel 718 Alloy, Grain Refinement, Delta Processing

### References

- [1] J. Y. Zhang, 2019, "An innovative approach for grain refinement in Ni-based superalloys: Modification in the classical delta process through  $\gamma'$  pre-aging treatment", Journal of Alloys and Compounds.
- [2] P.J. Páramo Kañetas, 2015, "Influence of the Delta Phase in the Microstructure of the Inconel 718 subjected to "Delta-processing" Heat Treatment and Hot Deformed", Procedia Materials Science.

### Acknowledgement

This research was supported by funding from the Korea government (KASA, Korea AeroSpace Administration) (Grant No. RS-2023-00256058)

---

1. (주)케이피씨엠

# (주)케이피씨엠, 기업부설연구소, 연구소장, kylee@kpccorp.co.kr

# 항공 엔진소재용 니켈합금 단조품 제조를 위한 Delta Phase 기반 공정 최적화

나혜성, P. L Narayana, 김정균, 최재영\*

## Optimization of Forging Process for Nickel-based Superalloy Components for Aerospace Engines via Delta Phase Control

### Abstract

Inconel 718 합금은 우수한 고온 특성으로 인해 항공기 가스터빈 엔진과 같은 초내열 Ni계 소재로 널리 활용되고 있다. 터빈 부품과 같은 회전체로는 피로 저항성을 확보하기 위해 미세한 결정립 크기를 갖는 것이 중요하다. Inconel 718의 기계적 성능은 650°C 이상의 고온 환경에서  $\delta$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  석출물 및 금속간 화합물의 형상, 크기, 분포 등에 의해 크게 좌우된다. 특히, 열처리에 의해 형성된  $\delta$ 상은 압연 및 단조와 같은 열기계적 가공 과정에서 pinning effect를 유도하여 결정립 성장을 효과적으로 억제하는 역할을 한다. 본 연구에서는  $\delta$ 상의 특성을 활용한 Delta processing을 적용하여 Inconel 718 합금의 미세조직을 제어하고, 이에 따른 기계적 특성 변화를 평가하였다.

---

1. (주)에이치브이엠

## 와스팔로이 합금 단조공정 해석

이인규<sup>1</sup>· 이성윤<sup>1</sup>· 안지섭<sup>2</sup>· 황선광<sup>3</sup>· 권혁준<sup>4</sup>· 김지윤<sup>5</sup>· 이상곤<sup>#</sup>

### Analysis of The Forging Process for Waspaloy Alloy

I. K. Lee, S. Y. Lee, J. S. Ahn, S. K. Hwang, H. J. Kwon, J. Y. Kim, S. K. Lee

#### Abstract

와스팔로이(waspaloy) 합금은 니켈(Ni)기반 초내열합금(superalloys)으로 고온에서도 우수한 기계적 강도와 내산화성, 내크리프 특성을 유지할 수 있는 소재로, 특히 항공기 엔진의 터빈 디스크 및 블레이드, 샤프트, 패스너 등 고온 환경에서 작동하는 부품에 주로 사용되고 있다. 니켈 기반 초내열합금은  $\gamma'$  석출강화입자가 존재하기 때문에 1000°C 이상의 고온에서 구조적 안정성을 유지할 수 있다.

본 연구에서는 와스파로이 합금 단조공정에 대한 해석 및 설계를 수행하였다. Gleeble 고온 압축시험을 통해 와스팔로이 합금의 고온물성치를 확보하였으며, 이를 토대로 와스팔로이 합금 디스크 열간단조공정에 대한 성형해석을 수행하였다. 해석결과를 이용하여 디스크 단조공정을 분석하고, 이를 토대로 디스크 단조공정 설계 데이터를 확보하였다.

**Keywords:** Waspaloy Alloy, Hot Compression Test, FE Analysis, Disk Forging

**Keywords:** 본 연구는 핵심기술 연구개발과제(무기체계 패키지형) “1,000마력급 가스터빈엔진 핵심 부품소재 장수명화 기술(No. )”의 용역사업인 “Waspaloy 합금 디스크 단조품 성형공정해석 및 공정설계(No. IR230012)”에 의한 연구임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

- 
1. 한국생산기술연구원 모빌리티품그룹, 선임연구원
  2. 한국생산기술연구원 모빌리티품그룹, 학생연구원
  3. 한국생산기술연구원 모빌리티품그룹, 수석연구원
  4. 한화에어로스페이스 한국연구소, 책임연구원
  5. 한화에어로스페이스 한국연구소, 연구원

# 한국생산기술연구원, 모빌리티품그룹, 수석연구원, E-mail: sklee@kitech.re.kr

# 단류선의 건전성 및 기계적 특성을 고려한 단조 공정 설계

박준희<sup>1</sup> · 박동휘<sup>1</sup> · 한병찬<sup>1</sup> · 김낙수<sup>1#</sup>

## Forging Process Design Based on Grain Flow Integrity and Mechanical Properties

J. Park, D. Park, B. Han, N. Kim

### Abstract

본 연구는 열간 단조 공정에서 형성되는 단류선(grain flow)의 정렬도와 밀도를 정량적으로 평가하고, 이를 바탕으로 단조 품질과 기계적 성능을 향상시키는 설계 프레임워크를 제안한다. 두 가지 사례 연구를 통해 단류선 평가 함수를 제안한다. 제안된 함수는 주응력 방향과의 정렬도 및 고응력 역역에서의 밀도, 인장강도 및 피로수명을 고려한다. 또한, 기계학습 기반 예비 성형체 설계와 단조품의 사용 조건을 반영한 유한요소 해석을 통해 제안 기법의 실효성을 입증한다. 이는 단조품의 구성 요소의 성능과 품질을 개선하기 위한 공정 설계 방법의 기반을 마련한다.

**Keywords:** Forging Process, Grain flow integrity, Finite element analysis, Mechanical properties

---

1. 서강대학교 기계공학과

# 서강대학교, 기계공학과, 교수, E-mail: nskim@sogang.ac.kr

## 5. 일반 구두 발표

적층제조 및 유연공정

제조공정 및 장비

( 제 5 발표회장 )

# 레이저 분말베드 용융 공정에서의 열 변형 완화를 위한 다중 에이전트 강화학습 기반 영역 분할 공정 변수 최적화

육주찬<sup>1</sup> · 박석희<sup>#</sup>

## Multi-agent reinforcement learning-based region-wise process parameter optimization for mitigating thermal deformation in powder bed fusion process

J. C. Yuk, S. H. Park

### Abstract

레이저 파우더 베드 용융(Laser powder bed fusion, LPBF) 공정은 베드 위의 분말에 레이저를 조사하여 분말을 용융 및 소결하여 적층하는 기술로, 의료, 항공, 우주, 국방 등 산업의 부품 제조에 널리 활용되고 있다. 그러나, LPBF의 안정적인 부품 제조를 위해 국소적인 열 입력과 열 축적 제어가 필수적이다. 서포트 구조물을 추가하여 과도한 열 변형을 완화할 수 있으나, 복잡한 구조물의 경우 서포트 사용이 제한되며 부가적인 재료 소모를 유발한다. 기존 연구에서는 레이저 출력, 스캔 속도 및 스캔 경로 등의 공정 변수를 최적화하는 기법들을 개발하고 있으나 수식 기반의 전통적인 최적화 기법은 단순한 상황에 주로 적용되고 있다. 최근, 공학적 문제 해결을 위해 머신러닝 기법이 활발히 사용되고 있으며, 그 중 강화학습은 복잡한 순차적 의사결정 문제를 해결하는 것에 탁월한 성능을 보인다. 최근, 강화학습을 통해 LPBF 공정의 레이저 출력과 스캔경로를 최적화하는 연구들이 있으나, 기존 연구에서는 국소적인 영역 및 단순한 부품 제조에 대한 공정 최적화를 수행하였다. 본 연구에서는 다중 에이전트 기반의 강화학습 기법을 통해 층 내의 분할된 여러 영역에서의 레이저 출력 및 스캔 순서를 최적화를 수행하는 프레임워크를 제시하였다. 먼저, 강화학습의 핵심 구성요소인 상태, 행동, 보상 및 환경을 정의하였으며, 유한요소 해석 기반 시뮬레이션을 통해 강화학습 환경을 구현하였다. 이를 기반으로 강화학습 모델의 학습 수행 결과, 강화학습 모델에 의해 최적화된 공정 변수는 FEM 시뮬레이션 및 실험에서 기존 레이저 스캔 전략과 비교하여 완화된 열 변형을 보였다. 본 연구는 다중 에이전트 강화학습 알고리즘을 공정 변수들을 분할된 영역마다 공정 변수들을 조절하는 연구를 수행하였으며, 이를 통해 격자 구조 등 복잡한 형상의 부품 제조 공정 최적화의 가능성을 보였다.

**Keywords:** Laser powder bed fusion, Multi-agent reinforcement learning, Process optimization

---

1. 부산대학교 기계공학부, 대학원생

# 부산대학교 기계공학부, 부교수, E-mail: selome815@pusan.ac.kr

# L-PBF 공정에서 비접촉 서포트 적용이 오버행 구조 조형에 미치는 영향

안성현<sup>1</sup>· 김상우<sup>#</sup>

## Effects of Contactless Supports on the Fabrication of Overhang Structures in the L-PBF Process

S. H. Ahn, S. W. Kim

### Abstract

L-PBF (Laser-Powder Bed Fusion) 공정에서는 오버행 구조를 제작하기 위해 서포트 구조가 일반적으로 사용된다. 그러나 적층이 완료된 후 수행하는 서포트 제거 과정은 많은 시간과 노동이 소요되며, 표면 품질을 저하시킬 수 있다. 본 연구는 물리적 접촉 없이 열 축적을 완화할 수 있는 비접촉 서포트의 적용 가능성을 탐구하였다. 비접촉 서포트의 적용은 오버행 구조의 열 변형을 억제하여 안정적인 적층에 기여하는 동시에, 후처리 공정의 생략을 통해 제조 효율 향상과 비용 절감을 가능하게 한다. 경사각, 구조물 간 간격, 서포트 두께를 변수로 하여 비접촉 서포트의 효과를 평가하였으며, 제작된 시편은 표면 품질, 치수 정확도, 경도, 미세조직 측면에서 분석하였다. 분석 결과, 비접촉 서포트는 하향면의 표면 품질을 개선하고, 열 방출 향상을 통해 조형 안정성을 확보하는 데 효과적임을 확인하였다. 이는 냉각 속도 차이에 따른 것으로, 미세조직 및 경도 분석 결과를 통해 입증하였다. 또한, 서포트 두께가 일정 수준을 초과하면 품질 향상에 더 이상 기여하지 않았으며, 변형이나 구조물 간 결합을 방지하기 위해 적절한 간격 설정이 필수적인 것으로 나타났다.

**Keywords:** Additive Manufacturing, L-PBF, Overhang Structure, Contactless support, Heat dissipation

### 후기

본 연구는 과학기술정보통신부와 우주항공청의 연구비 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.  
(과제번호: RS-2023-00257079)

---

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부, 연구원

# 한국재료연구원 재료공정연구본부, 책임연구원, E-mail: kims@kims.re.kr

# 에너지 제어형 용착 공정을 이용한 적층 공정 및 기계 부품 재제조 기술 개발

이광규<sup>1</sup>· 안동규<sup>#</sup>

## Development of Deposition Technology and Remanufacturing Technology of Mechanical Part Using a DED Process

K. K. Lee, D. G. Ahn

### Abstract

에너지 제어형 용착 공정 (Directed energy deposition : DED) 공정은 금속 적층 제조 공정 중 하나로 제작, 수리, 보수 및 이종재료 적층을 통한 기능강화에 강점을 가지고 있다. 하지만, 공정 변수가 많아 활용하기 어렵고 공정 중 발생하는 열전달 현상 및 공정 후 잔류하는 응력에 의해 최종 부품 제작까지 많은 시간이 소요된다. 본 연구에서는 에너지 제어형 용착 공정을 이용한 적층 공정 및 기계 부품 재제조 기술 개발을 통해 공정 변수 설정 방향과 공정을 활용한 재제조 기술에 대하여 연구하였다. 실험에 사용된 장비는 DN Solutions 사에서 제작한 DVF-8000AML 으로 5 축 적층 및 가공이 되는 하이브리드 장비이다. 공정 변수를 단일, 다열 및 다층으로 구분하여 실험을 진행하였으며, 적층 실험을 통해 비드의 변화 및 형상을 고찰하였다. 적절한 공정 변수를 선정한 이후 2 가지의 기계 부품 재제조 사례를 통해 재제조에 적합한 적층 기술에 대해 제안하였다.

**Keywords:** Directed Energy Deposition, Deposition Process, Process Parameter, Remanufacturing

**Acknowledgment :** This study was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MIST) (No. RS-2023-00219369) and research fund from Chosun University (2024-202272-01)

---

1. 조선대학교 BRL 센터, 선임연구원

# 조선대학교, 기계공학과, 교수, E-mail: smart@chosun.ac.kr

# 압출력 데이터를 이용한 conditional LSTM-VAE 모델 기반 3D 프린팅 공정 실시간 워핑 감지 시스템 개발

이승문<sup>1</sup>·박석희<sup>#</sup>

## Real-time warping detection in 3D printing process using conditional LSTM-VAE model with extrusion force data

S. M. Lee, S. H. Park

### Abstract

PEEK(polyether ether ketone)는 우수한 강도와 내열성, 내화학성을 갖춘 super engineering plastic으로 항공우주 및 의료 분야 등에서 주목받고 있다. 그러나 높은 유리전이 온도를 가진 PEEK를 material extrusion 방식으로 출력하기 위해 약 400°C 고온이 요구되며, 이로 인해 워핑(warping) 현상이 빈번히 발생한다. 워핑은 압출된 플라스틱이 냉각되면서 발생하는 열 수축으로 인해 뒤틀림이 생기는 현상으로, 출력물이 베드에서 이탈하거나 치수 정밀도가 저하되는 등의 문제를 유발한다. 이에 따라 워핑 발생 시 적절한 조치를 취하거나 출력을 중단하기 위한 실시간 모니터링 시스템이 필요하다. 기존에는 카메라와 머신러닝을 이용한 모니터링 방식이 주로 연구되었으나, 이러한 방식은 조명 환경에 따른 이미지 품질 저하와 카메라 사각지대의 존재로 인해 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 노즐 조립체 내부에 로드셀을 장착하여 필라멘트의 압출력을 실시간으로 측정할 수 있는 구조를 설계하였다. 워핑이 발생한 위치에서 재료를 압출 할 때 출력물이 압출을 방해하여 압출력이 일시적으로 증가하는 특성이 나타나며, 이를 이용하여 워핑을 감지하는 시스템을 구성하였다. 로드셀 데이터와 모터의 엔코더 데이터를 실시간으로 수신 받아 처리하며 시계열 데이터 처리에 특화된 long short-term memory(LSTM)을 variational autoencoder(VAE)의 인코더와 디코더에 적용한 LSTM-VAE 모델을 활용하였다. 또한, 엔코더의 x, y 축 위치 데이터를 처리하여 16×16 크기의 이미지로 변환하였으며 autoencoder를 통해 이를 차원축소하여 LSTM-VAE의 condition으로 활용하였다. 모델 학습은 워핑이 발생하지 않은 정상 데이터를 기반으로 한 비지도학습 방식의 이상치 탐지 방법을 적용하였다. 최종적으로, 학습된 conditional LSTM-VAE 모델을 통해 로드셀 및 엔코더 데이터를 활용한 실시간 워핑 감지 및 발생 위치 추적이 가능한 시스템을 구축하였다.

**Keywords:** PEEK(polyether ether ketone), warpage, extrusion force, time series data, machine learning, anomaly detection

1. 부산대학교 기계공학부, 대학원생

# 부산대학교 기계공학부, 부교수, E-mail: selome815@pusan.ac.kr

# 에어포일 형상 스트럿으로 설계된 격자 구조체의 적층제조 및 방열 성능 평가

박근태<sup>1,2</sup>· 김상우<sup>#</sup>

## Thermal performance evaluation of additively manufactured lattice structures with airfoil-shaped struts

K. T. Park, S. W. Kim

### Abstract

격자 구조체는 경량성 및 우수한 열교환 특성을 보유하고 있는데, 열교환 특성은 주로 단위 셀의 형상에 의해 결정된다. 적층 제조 기술은 단위 셀 형상에 대한 설계 자유도를 크게 향상 시켰고, 그 결과 다양한 단위 셀 형상의 격자 구조체가 제안되며, 열교환 성능에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 원형 형상의 스트럿 대신, 에어포일 형상의 스트럿으로 구성된 격자 구조체를 제안했다. 단위 셀 형상은 비교적 단순한 구조를 갖는 BCC(Body-centered cubic)를 선택하였다. 스트럿 형상, 단위 셀 배열, 종횡비, 상대 밀도를 변화시킨 격자 구조체 코어로 구성된 샌드위치 패널 테스트 샘플을 설계하였고, AlSi7Mg 소재와 L-PBF(Laser-powder bed fusion) 공정을 통해 이를 제작하였다. 이후, 공기를 활용한 강제 대류 시험을 통해, 다양한 유속 조건에서 방열 성능 및 압력 강하를 측정했다. 에어포일 형상 스트렛으로 구성된 BCC 격자 구조체는 원형 형상에 비해 압력 강하량이 유의미하게 감소했으며, 결과적으로 효율 지수가 증가했다. 시험에서 적용된 설계 범위에서, 종횡비 감소 및 상대 밀도 증가는 방열 성능 및 압력 강하를 상승시키는 것으로 나타났다.

**Keywords:** Additive manufacturing, Lattice structure, airfoil, heat transfer

### 후기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술기획평가원의 연구비 지원을 받아 수행된 연구결과입니다. (과제번호: 10076429)

---

1. 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 연구원

2. 부산대학교 항공우주공학과, 대학원생

# 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 책임연구원, E-mail: kims@kims.re.kr

# 딥러닝을 이용한 적층제조된 18Ni300 마레이징 강의 잔류 응력 완화 예측

김세윤<sup>1,2</sup> · 김동규<sup>3</sup> · 강성훈<sup>1</sup> · 김지훈<sup>2</sup> · 오영석<sup>1, #</sup>

## Prediction of residual stress mitigation in additively manufactured 18Ni300 maraging steel using deep learning

Seyun Kim<sup>1,2</sup>, Dong-Kyu Kim<sup>3</sup>, Seong-Hoon Kang<sup>1</sup>, Ji Hoon Kim<sup>2</sup>, Young-Seok Oh<sup>1, #</sup>

### Abstract

적층 제조 방식의 하나인 Laser Powder Bed Fusion (LPBF)은 고출력 레이저를 이용해 금속 분말을 선택적으로 용융하고 융합하여 층별로 3차원 금속 구조를 형성하는 방식이다. 이 과정에서 발생하는 급격한 열적 구배는 부품 내 잔류응력을 유발한다. 이러한 잔류응력은 LPBF 공정조건에 영향을 받으며, 이를 완화하기 위해 적절한 후열처리(Post-Heat Treatment, PHT) 공정이 필요하다. 본 연구에서는 딥 러닝을 활용하여 공정조건(레이저 출력, 스캔 스피드, 어닐링 온도, 유지 시간)을 고려하여 LPBF 적층제조된 18Ni300 마레이징 강의 열처리 전, 후의 잔류응력 분포 이미지를 예측하였다. 공정조건별 유한요소해석을 통해 생성된 45개의 잔류응력 분포 이미지를 한정된 원시 학습데이터를 사용하였으며, 학습에는 딥러닝 모델 중 하나인 conditional StyleGAN2-ADA를 사용하였다. 본 모델은 학습 및 테스트 데이터에서 결정계수( $R^2$ )는 각 99.93%, 96.34%, 구조적 유사도 지수(Structural Similarity Index, SSIM)는 각 99.93%, 98.35%로 높은 정확도를 보였다. 이 후, 학습된 네트워크를 활용하여 유전알고리즘을 통해 평균 잔류응력과 표면 잔류응력을 최소화하는 공정 최적화를 수행하였으며 최적 공정 조건( $P=510W$ ,  $V=590$ ,  $T=900^\circ\text{C}$ ,  $H=5\text{hr}$ )을 도출하였다.

**Keywords:** Laser powder bed fusion, Residual stress, Deep learning, StyleGAN2-ADA

1. Korea Institute of Materials Science (KIMS, 한국재료연구원)

2. Pusan National University (PNU, 부산대학교)

3. Kunkuk University (KU, 건국대학교)

# Corresponding authors : 오영석 (한국재료연구원, 재료공정연구본부, 책임연구원, oostone@kims.re.kr)

## 고온 환경에서 Cermet 코팅의 내열성 및 내마모 특성에 관한 연구

하형진<sup>1</sup>· 심도식<sup>#</sup>

### Study on Thermal and Wear Properties of Cermet Coatings in High-Temperature Environments Using Directed Energy Deposition

H. J. Ha, D. S. Shim

#### Abstract

탄소강은 다양한 산업 분야에서 널리 활용되지만, 고온 환경에서는 산화와 마모에 취약한 한계가 존재한다. 직접에너지적층(Directed energy deposition, DED) 공정은 이종 소재 적층이 가능하여 표면 강화에 적합한 기술이다. 본 연구에서는 고온 환경에서 산화 및 마모에 취약한 탄소강의 기능적 한계를 극복하기 위해, 우수한 내마모성과 열차폐 특성을 지닌 WC 기반 WC10%-Ni60AA cermet 분말을 DED 공정으로 탄소강 표면에 적층함으로써 내열성과 내마모성을 평가하였다. 적층을 위해서는 주요 DED 공정변수가 적절히 선정되어야 하며, 그렇지 않으면 기공 및 크랙과 같은 결함이 발생하였다. 적층된 cermet 코팅층은 탄소강 모재 대비 우수한 경도 특성을 나타냈으며, 탄소강의 표면 경도가 약 550 HV인 반면, cermet 코팅층은 최대 780 HV까지 증가하는 결과를 보였다. 내마모성 평가를 위해 ball-on-disc 방식의 마모시험을 수행한 결과, cermet 코팅 시편은 마모 트랙의 폭과 깊이가 작고 응착 마모의 형태를 보였다. 반면, 탄소강은 연삭 마모의 형태를 보이며 상대적으로 더 뚜렷한 마모 흔적을 나타냈으며, 이는 두 시편 간의 표면 경도 차이에 기인한 것으로 판단된다. 내열성 평가는 열전도도 및 고온 경도 측정을 통해 수행되었으며, cermet 코팅층은 낮은 열전도도를 나타내면서도 고온에서의 경도 저하가 비교적 작아 우수한 열적 안정성을 보였다. 또한, pin-on-disc 방식으로 진행한 알루미늄 소착 시험 결과, cermet 코팅 시편은 마찰 중 표면 온도가 가장 낮게 유지되었고 알루미늄 소착 흔적이 관찰되지 않아 뛰어난 소착 저항성을 확인할 수 있었다. 이는 낮은 마찰계수와 함께 마찰열 발생 자체가 적어, 열이 표면에 효과적으로 축적되지 않았기 때문으로 판단된다. 본 연구는 WC 기반 cermet을 활용한 표면 강화 기술이 고온 환경에서의 내열성과 내마모성 향상에 효과적임을 입증하였다.

**Keywords:** Cermet, Directed energy deposition, Wear resistance, Thermal resistance, Aluminum adhesion

**<후기>**

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-23-007, 지능형 적층제조 특화연구실)

- 
1. 국립한국해양대학교 신소재융합공학과
  2. 국립한국해양대학교 해양신재생에너지공학과
- # 국립한국해양대학교 해양신소재융합공학과, 정교수, E-mail: think@kmou.ac.kr

# CNT 코팅이 적용된 TPMS 구조의 적층 재료 및 셀 형상에 따른 전기 저항 성능 분석

한승현<sup>1</sup>· 범종찬<sup>2</sup>· 안동규<sup>#</sup>

## Investigation of the Influence of Deposition Materials and Cell Type of TPMS Structures Applied CNT Coating on Electrical Resistance Performance

S. H. Han, J. C. Beom, D. G. Ahn

### Abstract

삼중 주기적 최소 곡면 (triply periodic minimal surface: TPMS) 은 내부가 주기적인 곡면으로 구성되어 있다. TPMS 구조가 전자파 간섭 (electromagnetic interface: EMI) 차폐 시편에 적용될 경우 시편 내부에서 다중 반사 (multi-reflection) 현상을 야기시켜 전기 저항 성능을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다. 이 연구에서는 용융 수지 적층 조형 (fused deposition modeling, FDM) 및 광경화성 수지 조형 (stereolithography: SL) 공정으로 TPMS 시편을 제작하였다. FDM 및 SL 공정에 사용된 재료는 각각 그래핀이 함유된 필라멘트 및 액체 레진이다. 제작한 TPMS 구조에 딥 코팅 (dip-coating) 방식을 통해 탄소나노튜브 (carbon nanotube: CNT)를 코팅하였다. 전기 저항 성능 측정 결과, 적층 재료 및 셀 형상에 따라 전기 저항 성능이 뚜렷한 차이를 보였다.

**Keywords:** Carbon Nanotube, Triply Periodic Minimal Surface, Electric Resistance Performance

### 후기

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (No. RS-2023-00219369, No. RS-2025-00562459)

---

1. 조선대학교 기계공학과, 석사과정

2. 조선대학교 기계공학과, 박사과정

# 조선대학교 기계공학과, 교수, E-mail: smart@chosun.ac.kr

# WAAM 공정으로 제조된 Al-5356 합금의 미세조직 건전성 및 기계적 특성 평가

전민수<sup>1</sup> · 황원구<sup>1</sup> · 오민선<sup>2</sup> · 감동혁<sup>2</sup> · 이기안<sup>1#</sup>

## Evaluation of Microstructural Integrity and Mechanical Properties of Al-5356 Alloy Fabricated by WAAM Process

M. S. Jeon, Y. J. Huang, M. S. Oh, D. H. Kam, K. A. Lee

### Abstract

Al-Mg 기반의 5000 계 알루미늄 합금은 고용 강화형 시스템으로, 우수한 내식성과 중간 이상의 강도, 뛰어난 가공성과 용접성을 동시에 갖춘 것이 특징이다. 특히 Al-5356 합금은 해양 구조물, 선박, 트레일러 부품, 압력용기, 자전거 프레임 등 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있으며, 알루미늄 용접 와이어로도 대표적인 상업용 합금 중 하나이다. 하지만 알루미늄 합금은 높은 반사율과 열전도도로 인해 분말 기반 적층 제조(Powder Bed Fusion, PBF) 공정에서는 가공 안정성이 떨어지고, 균일한 적층이 어렵다는 공정적 제약이 존재한다. 이에 따라 대체 공정으로 주목받는 WAAM(Wire Arc Additive Manufacturing)은 와이어를 아크 열원으로 용융하여 적층하는 방식으로, 대형 부품 제조에 적합하며 소재 낭비가 적고 생산성이 우수하다는 장점이 있어 최근 다양한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 Al-5356 합금을 WAAM 공정으로 적층 제조한 후, 재료의 미세조직(기공도, 석출물, 결정립 크기 등)과 경도, 상온 인장 특성을 평가하였다. CT 분석 결과 평균 기공 크기는 약  $5.22 \mu\text{m}$ , 기공도는 0.02%로 매우 낮은 수준을 보였으며, 이는 WAAM 공정을 통한 치밀한 적층이 가능함을 시사한다. 비커스 경도 시험에서는 평균 약  $82.4 \text{ HV}_{0.3}$ 로 나타났으며, 방향에 따른 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다. 상온 인장 시험 결과 수평 방향에서는 항복 강도 155 MPa, 인장 강도 292 MPa, 연신율 40.8%, 수직 방향에서는 항복 강도 102.7 MPa, 인장 강도 232.9 MPa, 연신율 16.4%로 나타났다.

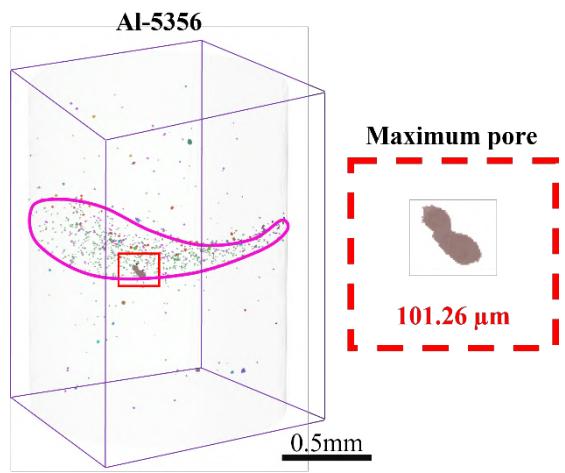
상기 관찰 결과를 바탕으로 WAAM 공정을 이용한 Al-5356 소재의 기계적 특성 조사 및 변형 기구를 규명하고자 하였다.

**Keywords:** Wire Arc Additive Manufacturing, Al-Mg alloy, Anisotropy, Tensile property

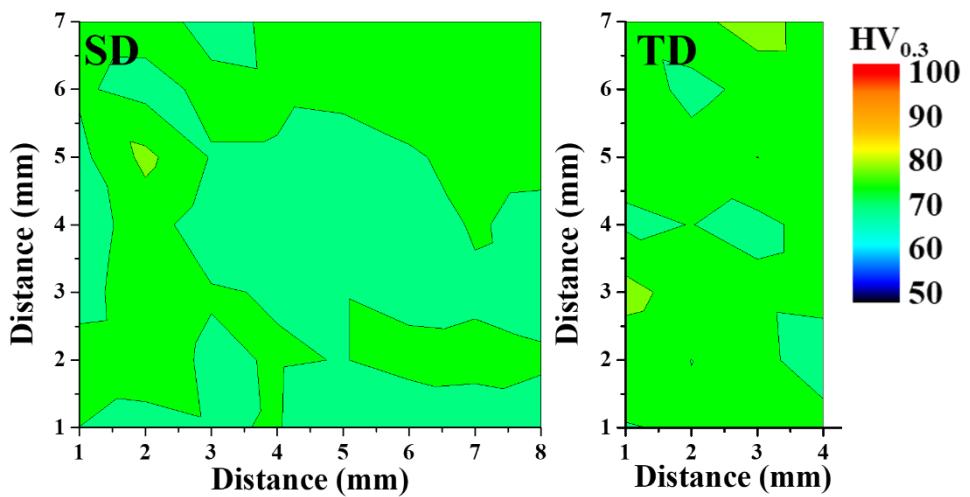
1. 인하대학교 신소재공학과, 대학원생, 교수

2. 한국생산기술연구원, 수석 연구원

# 인하대학교 신소재공학과, 교수, E-mail: keeahn@inha.ac.kr



**Fig. 1.** CT image of Al-5356 manufactured by wire arc additive manufacturing



**Fig. 2.** Measured Vickers hardness on the SD and TD planes of the Al-5356 specimen.

# Study on the process optimization and properties of nickel–aluminum bronze fabricated by directed energy deposition

C. L. Yao<sup>1</sup>, K. Y. Shin<sup>2</sup>, D. S. Shim<sup>#</sup>

## Abstract

Directed energy deposition (DED), a prominent metal additive manufacturing (AM) technique, has garnered significant attention due to its numerous advantages and rapid development in recent years. Nickel–aluminum bronze (NAB), known for its low density and high strength, is widely used in components such as landing gear bearings and seawater valves. In this study, NAB components were successfully fabricated using the DED process with gas-atomized NAB alloy powders. Firstly, a highly dense deposited layer was obtained by optimizing the DED process parameters. The height and internal defects of the deposition varied significantly with changes in laser power and scanning speed. At high energy densities, large-sized pores were more likely to form, while excessively low energy densities resulted in a substantial reduction in deposited height. By selecting appropriate parameters to adjust the energy density, an optimal process window was established. Additionally, the microstructure of the deposition showed significant variations with the differences in the melt pool, which was caused by the unique deposition paths and thermal inputs of the DED process. The interior of the melt pool primarily consisted of a  $\beta$  matrix and precipitated Widmanstätten  $\alpha$  phase. Along the outer boundary of the melt pool, abundant  $\alpha$  phase precipitation was observed, which is attributed to reheating effects from subsequent layer deposition that promoted microstructural coarsening. Compared to as-cast NAB, the deposited NAB exhibited a much finer microstructure, likely due to the rapid cooling rate of the DED process suppressing the element precipitation. Furthermore, the average microhardness of deposited NAB is 342 Hv, significantly higher than that of as-cast NAB (210 Hv). This study provides a new perspective on producing high-performance NAB components via metal AM technologies.

**Keywords:** Directed energy deposition, Nickel–aluminum bronze, Process optimization, Properties

---

1. 한국해양대학교 해양신소재융합공학과, 대학원생

2. 한국생산기술연구원 스마트가공공정그룹, 연구원

# 한국해양대학교 해양신소재융합공학과, 교수, E-mail: think@kmou.ac.kr

# 배관 용접부 결함 예측을 위한 다중 센싱 시스템 및 머신 러닝 알고리즘 개발

정유형<sup>1</sup>· 장승범<sup>1</sup>· 트루영반도이<sup>1</sup>· 윤종현<sup>#</sup>

## Development of a multi-sensor system and machine learning algorithm for orbital weld defect prediction

Y. H. Jeong, S. B. Jang, V. D. Troung, J. H. Yoon

### Abstract

This study investigates the application of advanced machine learning algorithms for the real-time prediction of welding defects in multipass orbital welding processes. To facilitate accurate and continuous monitoring, the welding process is observed in real time using an integrated system consisting of an Infra-red (IR) camera, a line scanner, and an acoustic sensor. These sensors are employed to collect various physical and thermal parameters that are crucial for defect detection and prediction. The IR camera and line scanner work together to capture detailed thermal profiles and geometric characteristics of the molten pool, such as its width and depth. In parallel, the acoustic sensor captures real-time sound signals generated during the welding process. These signals undergo Fast Fourier Transform (FFT) analysis to extract frequency-domain features, which are then used in another machine learning model designed to interpret acoustic signatures and predict defects along the weld bead. This acoustic signal processing method enhances the model's ability to detect issues that may not be visible through thermal imaging alone. To improve predictive performance, an ensemble machine learning model is proposed. This ensemble model integrates the outputs from multiple sensor-specific models using a voting mechanism based on the random forest algorithm. The fusion of predictions allows for a more comprehensive classification, identifying not only the presence of defects but also categorizing them into specific types, such as lack of fusion or porosity, and estimating their locations within the weld bead. To validate the model's effectiveness, a confusion matrix is generated based on the prediction outcomes from the ensemble approach.

**Keywords:** Orbital welding, real-time defect prediction, multi-sensing system, ensemble machine learning

---

1. 한양대학교 기계설계공학과, 대학원생

# 한양대학교 기계공학과, 교수, E-mail: yooncsmd@gmail.com

## 6. 일반 구두 발표

재료거동 및 특성화

미세구조 및 응용

플라스틱가공

( 제 6 발표회장 )

# 알루미늄 압출재 기계가공 유한요소해석을 위한 이방성,변형률 속도,하중경로를 고려한 연성파단 물성 실험

심현보, 신윤우, 정찬욱, 오석근, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성\*

## Material characterization for ductile fracture modeling in machining simulation considering anisotropy, strain-rate, and strain path with extruded aluminum alloy

H.B. Sim, Y.W. Shin, C .W. Jung, S.K. Oh, H.I. Park, M.Y. Seok, D.J. Lee, Y.N. Kwon, H.S. Choi\*

### Abstract

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 가공변형 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.

# 소성이방성과 변형율속도가 알루미늄 압출재의 파단물성에 미치는 영향

김형서<sup>1</sup>· 흥서준<sup>1</sup>· 원정윤<sup>1</sup>· 경준석<sup>2</sup>· 이명규<sup>#</sup>

## Effect of Plastic Anisotropy and Strain Rate on Fracture Behavior of Extruded Aluminum Alloys

H. S.Kim<sup>1</sup>, S. J. Hong<sup>1</sup>, J. Y. Won<sup>1</sup>, J.S.Kyeong<sup>2</sup>, M.G.Lee<sup>#</sup>

### Abstract

Driven by the increasing demand for high-performance and environmentally sustainable materials, lightweight aluminum alloys have gained significant attention, particularly in the form of extrusions for complex geometries. This study examines the effect of plastic anisotropy and strain rate on the ductile fracture characteristics of 6xxx aluminum extrusions. A hybrid experimental-numerical approach was employed, combining ductile fracture experiments with finite element simulations to calibrate a Hosford-Coulomb ductile fracture model. To evaluate the influence of plastic anisotropy, three yield criteria—von Mises, Hill1948, and Yld2K-3D—were implemented. Strain rate sensitivity was incorporated through a modified Johnson-Cook hardening law and a rate-dependent Hosford-Coulomb fracture model. The results show that each yield function produced a distinct fracture locus, with the Yld2K-3D model predicting fracture displacement with up to 18 % higher accuracy than the other models. Regarding strain rate effect, the rate-dependent model improved prediction accuracy by up to 7% compared to its rate-independent counterpart. However, the strain rate sensitivity parameter ( $\gamma$ ) was found to be minimal, suggesting a negligible impact on fracture behavior. These findings highlight that, for 6xxx aluminum extrusions, accurate fracture prediction requires consideration of plastic anisotropy, while strain rate sensitivity plays a limited role, primarily affecting plastic deformation rather than fracture itself.

**Keywords:** Aluminum extrusion, plastic anisotropy, strain rate, fracture

---

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

2. 현대모비스 금속재료센, 책임연구원

# 서울대학교 재료공학부, 교수, myounglee@snu.ac.kr

# 형상측정기반 소성 변형 압입 시험 원리 및 금속 소재 적용 연구

권준범<sup>1#</sup>· 김용남<sup>1</sup>

## Principles and Applications of Profilometry-Based Indentation Plastometry (PIP) in Metallic Materials

J. B. Kwon, Y. N. Kim

### Abstract

This study presents an in-depth overview of profilometry-based indentation plastometry (PIP), a novel method for determining the mechanical properties of metallic materials through the analysis of plastic deformation induced by indentation. PIP leverages high-resolution surface profilometry to capture the residual imprint geometry, from which stress-strain behavior can be accurately extracted. This approach offers significant advantages over conventional mechanical testing methods by being efficient, non-destructive, and applicable to a wide range of material forms, including small and complex geometries.

In this research, PIP was applied to conventional stainless steel and metallic components produced by additive manufacturing (AM) to assess its applicability to different types of metallic materials. The experimental results demonstrated that PIP can reliably capture the mechanical response of these materials, providing stress-strain data that is consistent and reproducible. These findings highlight the growing adoption of PIP in various industrial sectors, where rapid, localized, and accurate material characterization is increasingly critical. Furthermore, PIP shows strong potential for broader implementation in future applications across diverse fields such as aerospace, automotive, and advanced manufacturing, supporting enhanced quality assurance and performance optimization.

**Keywords:** Indentation Plasometry, Inverse FEM, Metallic Materials, Plastic Deformation, Stress–Strain Curves

---

1. 한국재료연구원 재료데이터·분석연구본부 재료분석센터

# 한국재료연구원 재료데이터·분석연구본부 재료분석센터, 책임연구원, E-mail: jbkwon@kims.re.kr

# 페인트 베이킹 3세대 강판 저항점용접부의 국부 소성 거동에 대한 마이크로 스케일 인장 특성 평가

조동혁<sup>1</sup> · 최두열<sup>2</sup> · 윤정환<sup>1,3,#</sup>

## Micro-Scale Tensile Characterization of Local Plastic Deformation Behavior in Paint-Baked 3rd Generation Steel Resistance Spot Welds

Donghyuk Cho<sup>1</sup> · Du-Youl Choi<sup>2</sup> · Jeong Whan Yoon<sup>1,3,#</sup>

### Abstract

This study investigates the influence of the paint baking treatment on local mechanical properties and localized plastic deformation behavior in resistance spot welds of third-generation advanced high-strength steel. Despite negligible changes in hardness after PB, macroscopic mechanical testing revealed increases in tensile-shear and cross-tension strengths (up to 30%) as well as significant enhancements in energy absorption (up to 99%). To understand this phenomenon at the micro-scale, micro-tensile tests were conducted combined with Digital Image Correlation (DIC) analysis. Local strain measurements clearly showed increased local ductility and toughness in PB-treated welds. The localized constitutive relationships constructed from DIC data confirmed that paint baking enhances the local plastic deformation behavior significantly. Additionally, fracture surface and computed tomography (CT) analyses demonstrated altered fracture modes toward more ductile characteristics following PB. The results provide critical insights into local deformation mechanisms and underscore the importance of evaluating weld performance based on localized mechanical properties, offering valuable data for modeling and optimizing advanced steel joining processes.

**Keywords:** Micro-digital image correlation (micro-DIC), Resistance spot welds (RSW), Micro-scale Testing, Constitutive properties, Localized deformation

---

1. 한국과학기술원 기계공학과, 박사과정

2. POSCO, 수석연구원

3. Deakin University, Adjunct Professor

# 한국과학기술원 기계공학과, 교수, E-mail: j.yoon@kaist.ac.kr

## 포타슘이 도핑된 텉스텐의 초기 소성에 대한 연구

김정석<sup>1</sup> · 민건식<sup>1</sup> · Phu Cuong Nguyen<sup>2</sup> · 이성민<sup>1</sup> · 오연주<sup>1</sup> · 김황선<sup>1</sup> · 김형찬<sup>3</sup> · 류일<sup>1,#</sup> · 한홍남<sup>1,#</sup>

### Study on incipient plasticity of potassium-doped tungsten

Jeongseok Kim<sup>1</sup>, Guensik Min<sup>1</sup>, Phu Cuong Nguyen<sup>2</sup>, Sungmin Lee<sup>1</sup>, Yeonju Oh<sup>1</sup>, Hwangsun Kim<sup>1</sup>, Hyoung Chan Kim<sup>3</sup>, Ill Ryu<sup>1,#</sup>, Heung Nam Han<sup>1,#</sup>

#### Abstract

포타슘이 도핑된 텉스텐은 순수 텉스텐보다 연성, 저온 파괴인성이 우수하고, 재결정 온도가 높아 1950년대부터 백열전구의 필라멘트로 활용되어 왔으며, 최근 핵융합, 국방, 항공우주 등과 같이 고온 또는 고열속이 조사되는 극한환경에서의 구조재료로써 주목받고 있다. 본 연구는 포타슘이 도핑된 텉스텐과 순수 텉스텐 상용재의 초기 소성 거동에 대한 정량적인 분석을 제공한다. 투파전자현미경을 활용해 포타슘이 도핑된 텉스텐 내부에 평균 크기가 수십 나노미터인 포타슘 버블의 존재와 버블 내 포타슘의 분포가 확인되었다. 나노압입시험으로부터 포타슘이 도핑된 텉스텐은 순수 텉스텐 상용재보다 더 낮은 응력 하에서 소성 변형이 시작됨이 확인되었다. 또한, 유한요소 해석과 전위 동역학 모사를 통해 포타슘 버블 주위에 집중된 응력이 정량화되었으며, 포타슘 버블 개수와 재료 내 전위 밀도가 응력 집중에 미치는 영향이 분석되었다. 이는 포타슘 버블로 인해 텉스텐의 소성 변형이 촉진되는 이유를 완전히 설명하며, 텉스텐의 취성을 보완하는 합금 개발에 기여할 것으로 기대된다.

**Keywords:** Tungsten, Potassium, Plasticity, Nanoindentation, Dislocation dynamics

---

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

2. 텍사스 대학교 달라스 기계공학부, 박사 후 연구원

3. 한국핵융합에너지연구원, 책임연구원

# 서울대학교 재료공학부, 교수, E-mail: ryuill@snu.ac.kr (류일), hnhan@snu.ac.kr (한홍남)

# 디지털 이미지 상관 기법(DIC)을 이용한 고속 인장 시험 시 표점 거리가 변형률 속도에 미치는 영향 분석

이상민<sup>1</sup>· 김정민<sup>1</sup>· 김원섭<sup>2</sup>· 흥석무<sup>3,\*</sup>

## Analysis of the Effect of Gauge Length on Strain Rate in High-Speed Tensile Test Using Digital Image Correlation (DIC)

S. Lee, J. Kim, W. Kim, S. Hong

### Abstract

개발된 제품의 성능 유효성을 검증하기 위한 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)의 정확도를 향상시키기 위해서는, 고속 변형 조건을 반영한 정확한 재료 물성치가 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 고속 인장 시험을 수행하여 금속 판재의 변형률 속도 의존성을 분석하였다. 기준에는 변형률 속도를 시험 속도와 초기 표점 거리 기준으로 단순 계산하였으나, 본 연구에서는 디지털 이미지 상관법(DIC, Digital Image Correlation)을 활용하여 시편 전면의 실제 변형률 분포를 측정하고, 각 실험 조건에서의 변형률 속도를 정밀하게 도출하였다. 이를 바탕으로 응력-변형률 곡선과의 차이를 비교 분석하였다. 또한, 적절한 표점 거리 선정을 위하여 표점 거리별 이론값과 DIC 기반 측정값을 비교하였으며, 최대 인장 강도 및 파단 직전 구간에서의 변형률 속도 분석을 통해 균일 연신 영역과 국부 연신 영역 간 변형률 속도 차이를 평가하였다. 이로써, 고속 인장 시험에서 적절한 표점 거리의 결정을 통한 변형률 속도를 측정할 수 있었다.

**Keywords:** Digital Image Correlation, Gauge Length, Highspeed Tensile Test, Sheet Metal, Strain rate

이 연구는 2025 산업통상자원부의 미래형 모빌리티 소재부품공정 혁신기술개발 기반 문제해결형 R&D 인재 양성 (P0023726) 연구비 지원에 의한 연구임.

- 
1. 공주대학교 미래융합공학과, 대학원생
  2. 오엠에이콤, 이사
  3. 공주대학교 그린카기술연구소, 교수
- # 공주대학교, 미래자동차공학과, 교수,  
E-mail: smhong@kongju.ac.kr

# 전자기장을 활용하여 재료의 기계적 물성을 실시간 측정기술 및 이를 기반으로 한 소성가공 자율제조 기술

이은호<sup>#</sup>

## Real-Time Measurement of Mechanical Properties Using Electromagnetic Fields and Autonomous Metal Forming Technology

E. H. Lee

### Abstract

최근 제조 산업에서는 생산성 향상과 비용 절감을 위해 무인화 및 자율화 기술에 대한 필요성이 증가하고 있다. 자율제조기술을 구현하기 위해서는 생산 라인에서 데이터를 신속하고 신뢰성 있게 측정하고, 공정을 판단하며, 이를 제어할 수 있는 하드웨어와 소프트웨어가 필요하다. 이러한 시스템이 신속하고 안정적으로 수행할 수 있도록 해야하며, 고도화된 소프트웨어와 하드웨어를 유기적으로 통합하여 운용하는 기술 확보가 핵심 과제로 부각되고 있다. 본 연구에서는 전기자동차 및 가전제품의 제조라인에서 전자기장을 활용하여 소재의 기계적 물성을 실시간으로 측정하는 원천기술을 소개한다. 아울러, 실시간 물성 데이터를 기반으로 인공지능을 활용하여 공정을 판단하고 제어하는 기술 개발 내용을 제시한다. 개발된 하드웨어 및 소프트웨어 기술을 전기자동차 차체 및 모터 생산 공정에 적용하고, 다양한 모델이 혼류로 생산되는 제조 현장에 접목하여 자율제조 시스템을 구현한 사례를 통해, 제조 신뢰성을 향상시키기 위한 연구 성과를 소개한다.

**Keywords:** Atonomous metal forming technology, Electromagnetic field-based sensing, Real-time measurement, Intelligent manufacturing, Cutting Force

---

<sup>#</sup> 성균관대학교, 기계공학부, 교수, E-mail: e.h.lee@skku.edu

## 실시간 음향방출 및 중성자 회절 기반 B<sub>4</sub>C/AA6061 복합재의 미시역학적 손상 기구 규명

권종혁<sup>1</sup>· 허정민<sup>1</sup>· 권대서<sup>1</sup>· 이호원<sup>2</sup>· 조승찬<sup>2</sup>· 채호병<sup>3</sup>· 우완측<sup>3</sup>· 김동규<sup>1,\*</sup>

### Unveiling micromechanical damage mechanism in B<sub>4</sub>C/AA6061 composite by *in situ* acoustic emission and neutron diffraction

Jong-Hyeok Kwon<sup>a</sup>, Jeong-Min Heo<sup>a</sup>, Dae-Seo Kwon<sup>a</sup>, Ho Won Lee<sup>b</sup>, Seungchan Cho<sup>b</sup>,  
Hobyung Chae<sup>c</sup>, Wanchuck Woo<sup>c</sup>, Dong-Kyu Kim<sup>a\*</sup>

#### Abstract

This study presents the micromechanical analysis of damage evolution in B<sub>4</sub>C-reinforced AA6061 metal matrix composite (MMC) under tensile loading using the integration of *in situ* acoustic emission (AE) analysis and neutron diffraction. Compared to unreinforced AA6061, the composites exhibited significantly higher and sustained AE activity during deformation, reflecting progressive damage mechanisms including interfacial friction, decohesion, and particle fracture induced by the B<sub>4</sub>C reinforcement. Wavelet packet transform (WPT) analysis enabled a more systematic and quantitative identification of damage modes by decomposing AE waveforms into frequency bands. To support AE-based interpretations, *in situ* neutron diffraction was employed to track lattice strain evolution in both the matrix and reinforcement phases, revealing phase-dependent stress partitioning and constraint effects unique to the composite materials. Fractography using scanning electron microscopy (SEM) further confirmed the presence of multiple damage features, including interface separation, void coalescence, and brittle particle cracking. These findings highlight the effectiveness of combining *in situ* AE and neutron diffraction to reveal complex, phase-specific damage mechanisms in particle-reinforced MMC.

**Keywords:** Metal matrix composite, B<sub>4</sub>C reinforcement, Micromechanical damage mechanism, *In situ* characterization, Acoustic emission, Neutron diffraction

- 
1. 건국대학교 기계공학부
  2. 한국재료연구원 재료인공지능·빅데이터 연구실
  3. 한국원자력연구원 중성자과학부

# 교신저자: 건국대학교 기계공학부 E-mail: dongkyukim@konkuk.ac.kr

# 전단 변형 시험을 통한 초고강도강의 타발 데미지와 구멍확장비 연구

이승호<sup>1</sup> · 조우진<sup>1</sup> · 정든봄<sup>1</sup> · 이제웅<sup>2</sup> · 김성일<sup>2</sup> · 한홍님<sup>#</sup>

## Abstract

초고강도강 (Advanced high strength steel, AHSS)은 현재 자동차 산업에서 각광받고 있는 구조재료 중 하나이다. 초고강도강은 기존 강재에 비하여 강도와 연신율이 우수하여 동일 물성의 차체를 만드는데 상대적으로 적은 양의 강재가 필요하여 동일 강도에서 차체의 총 무게를 줄이고 결과적으로 공정 및 자동차 자체의 이산화탄소 배출량을 줄이는데 도움이 된다. 그러나 초고강도강 역시 단점이 존재하는데, 이는 기존 강재에 비해 열위한 엣지부 성형성 (Stretch-flangeability)이다. 이로 인해 자동차 산업에서의 범용적 사용에 제약이 있어 초고강도강의 엣지부 성형성을 개선하고 또한 엣지부 성형성에 대한 평가를 수월하게 하기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔다.

본 연구에서는 엣지부 성형성을 평가할 수 있는 물성인 구멍확장비 (Hole Expansion Ratio, HER)에 대한 새로운 접근법과 함께 복잡하고 강재 소모가 큰 실제 구멍확장시험 (Hole Expansion Test, HET)을 대체하여 구멍확장비를 예측하고 타발 공정 중 구멍의 엣지부에 축적되는 타발 데미지를 평가할 수 있는 방법에 대하여 논의하였다. 초고강도강의 구멍확장비 측정을 위하여 방전 가공(Electrical Discharge Machining, EDM)과 타발의 두 가지 방법으로 강재에 구멍을 제작하였다. 이 때, EDM을 통해 제작하여 구멍 주변부에 데미지가 없는 구멍의 구멍확장비를  $HER_0$ 라 명명하였다. 이러한  $HER_0$ 는 머신러닝 기법을 통해 강재의 일축 인장 시험 물성으로 예측이 가능함을 보였다. 타발 데미지의 경우 타발 공정 중 판재가 전단될 때 발생하는 가공경화량에 가장 직접적으로 연관이 되는 것을 이전 연구에서 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 열연 및 냉연 초고강도강에 대하여 타발 공정과 유사하지만 더 간단하며 강재의 소모가 적은 전단 변형 시험을 수행하여 타발 데미지와 상관성이 높은 파라미터를 확보하고자 하였다. DIC 분석을 통해 얻은 전단 변형 시험 결과인 nominal shear stress-shear strain curve에서 확보한 타발 데미지 파라미터가 실제 타발 데미지의 경향성을 반영할 수 있음을 확인하였다.

**Keywords:** Advanced High Strength Steel, Hole Expansion Ratio, Machine Learning, Punching, Shear test

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

2. 포스코 기술연구소

# 서울대학교 재료공학부, 정교수, E-mail: hnhan@snu.ac.kr

# AlMoV 내열 중엔트로피 합금의 설계 및 기계적 특성

이시우<sup>1</sup>· 손수정<sup>2, #</sup>· 홍순직<sup>3</sup>· 김형섭<sup>4, #</sup>

## Alloy design and mechanical properties of AlMoV medium-entropy alloys

S.W. Lee, S. Son, S.-J. Hong, H.S. Kim

### Abstract

최근 우주 항공 산업에서 주목받고 있는 refractory high-entropy alloy (RHEA)는 고용점의 내열 원소들로 구성되어, 극한 환경에서도 우수하고 안정적인 기계적 특성을 나타낸다. 하지만 RHEA는 구성 원소들의 높은 밀도로 인해 에너지 효율을 저하시키고, 다른 부품에 가해지는 하중을 증가시키는 문제점이 존재한다. 본 연구는 열역학 소프트웨어와 다양한 합금 설계 이론들에 기반하여 Al 첨가를 통해 경량화를 달성하는 동시에 기계적 특성을 향상시키고자 하였다. 이를 검증하기 위해 Mo-V 합금계에 Al을 다양한 분율로 첨가하고, 이에 따른 미세구조 변화와 기계적 특성을 체계적으로 분석하였다. Al의 첨가는 원소들 간의 탄성계수 차이를 증가시켜 고용강화를 유도하였으며, 첨가량이 많아질 경우 혼합 엔탈피가 낮아져 금속간화합물을 형성하였다. 추가적으로, 설계된 합금들은 Al 함량에 따라 소성 변형 및 파괴거동에 뚜렷한 차이가 있음을 변형 미세조직 관찰을 통해 확인하였다. 해당 합금 설계론은 전반적인 high entropy alloy (HEA)에 폭넓게 적용이 가능하여 상업적 범용성이 높으며, RHEA의 활용 가치를 더 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Medium entropy alloy, Refractory high entropy alloy, Alloy design, Microstructure, Mechanical properties, Lightweight materials

- 
1. 포항공과대학교 신소재공학부, 대학원생
  2. 포항공과대학교 신소재공학부, 연구원
  3. 국립공주대학교 신소재공학부, 교수
  4. 포항공과대학교 친환경소재대학원, 교수

# 초음파 나노표면개질 공정이 이종 마찰용접 Nimonic 80A/SNCrW 소재에 미치는 영향 분석

최언준<sup>1,2</sup>, 우영윤<sup>1</sup>, 김정기<sup>2</sup>, 신재우<sup>3</sup>, 조재현<sup>3</sup>, 윤은유<sup>1, #</sup>

## Analysis for effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification process on Friction Welded Dissimilar Nimonic 80A/SNCrW Joints

E. J. Choi<sup>1,2</sup>, Y. Y. Woo<sup>1</sup>, J. G. Kim<sup>2</sup>, J. W. Shin<sup>3</sup>, J. H. Cho<sup>3</sup>, E. Y. Yoon<sup>1, #</sup>

### Abstract

니켈 초내열합금인 Nimonic 80A 는 우수한 내열성과 내식성으로 인해 고온 환경의 엔진 부품, 배기밸브 등에 널리 활용되지만, 고가의 소재로 경제성 측면에서 개선의 요구가 발생하고 있다. 이에 따라, 고온에서 상대적으로 높은 강도를 요구되는 부분에는 Nimonic 80A 를 사용하고 비교적 고온에 노출되지 않는 부분은 스테인리스계 SNCrW 강을 사용하는 이종재 마찰용접이 비용 절감 측면에서 효과적인 대안으로 제시되었다. 그러나 이종소재 마찰용접 시 용접부에는 열팽창 및 수축에 따른 고응력 집중이 발생하며, 열영향에 따른 위치별 기계적 특성차이로 이는 응력부식균열(SCC)과 피로 수명 저하로 이어질 수 있다.

초음파 나노표면개질(Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, UNSM)은 정적 및 동적 하중이 가해진 불을 초음파 진동으로 금속 표면에 20 kHz 이상의 속도로 타격하여 금속 표면에 고속으로 타격함으로써, 표면 조도 개선, 표면 경도 상승, 압축 잔류응력을 유도하며 응력부식균열(SCC)을 효과적으로 완화할 수 있는 표면처리 기술이다. 이러한 초음파 나노표면개질 공정은 피로수명 향상과 기계적 특성 개선 측면에서 높은 잠재력을 지니고 있으나, 마찰용접부의 각 위치별 나노표면개질 공정 적용에 따른 압축 잔류응력 분포, 표면 거칠기 변화, 경도 향상, 미세조직 변태 등에 대한 체계적인 분석은 아직 미비한 실정이다. 따라서 마찰용접부 특성에 따라 초음파 나노표면개질 공정의 영향이 어떻게 달라지는지에 대한 정량적 평가가 필요하다.

본 연구에서는 Nimonic 80A 와 SNCrW 강 이종재 간의 마찰용접부를 대상으로 초음파 나노표면개질 공정을 적용하고, 이에 따른 기계적 특성 및 표면 변화 양상을 분석하였다. 마찰용접부의 위치별로 초음파 나노표면개질 공정을 적용한 후, X 선 회절법(XRD)을 통한 잔류응력 분석, 비커스 경도 측정 및 미세조직 비교를 통해 초음파 나노표면개질 공정의 마찰용접소재의 표면에 미치는 영향을 분석하였다.

**Keywords:** Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, Friction Welding, Residual Stress, Ni superalloy

- 
1. 한국재료연구원
  2. 경상국립대학교
  3. 케이에스피

# 교신저자 :한국재료연구원, 책임연구원 E-mail :eyyoon@kims.re.kr

## 7. 특별세션 1

청정복합화력발전 핵심요소기술 및  
국산화 전문인재 양성 심포지엄

( 제 1 발표회장 )

## DED(Directed Energy Deposition)공정을 이용한 Inconel 625 및 Ti64 기판 상 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 적층 거동 분석

김태현<sup>1</sup>, 이진수<sup>1</sup>, 김상인<sup>1</sup>, 배수한<sup>1</sup>, 김세윤<sup>#</sup>

### Analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deposition behavior on Inconel 625 and Ti64 substrates using DED(Directed Energy Deposition) process

T. H. Kim<sup>1</sup>, J. S. Lee<sup>1</sup>, S. I. Kim<sup>1</sup>, S. H. Bae<sup>1</sup>, S. Y. Kim<sup>#</sup>

#### Abstract

Directed Energy Deposition(DED)은 다양한 재료를 복잡한 형상으로 적층하거나 부품의 유지, 보수에 적합한 제조 기술로, 고온 및 고부식성 환경에서 사용되는 가스터빈 블레이드나 항공 부품과 같은 응용 분야에서 주목받고 있다. 가스터빈 블레이드나 항공 부품에 사용되는 금속 표면에 DED로 세라믹 코팅을 적용하여 치밀한 산화막을 형성함으로써 부식성 물질의 내부 확산을 효과적으로 차단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 DED를 이용하여 내열성 및 내산화성이 우수한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 가스터빈 블레이드에 주로 사용되는 Inconel625와 항공 부품에 경량화 재료로 주로 사용되는 Ti64(Ti-6Al-4V) 위에 적층하고자 하였다. 이종소재 적층 거동 분석을 위해 레이저 출력, 스캔 속도, 분말 공급 속도 3 가지의 공정변수를 제어하였으며, 적층부의 조성, 미세구조, 적층 잔존율 등을 분석평가하여 적층 경향성을 파악하고 이종소재 접합 메커니즘을 제안하고자 한다.

Directed Energy Deposition (DED) is an advanced additive manufacturing technique suitable for fabricating complex geometries using various materials, as well as for the repair and maintenance of components. It has gained significant attention in applications such as gas turbine blades and aerospace components, which are exposed to high-temperature and highly corrosive environments. By applying ceramic coatings via DED onto metal surfaces used in these components, it is possible to form dense oxide layers that effectively prevent the inward diffusion of corrosive species. Therefore, in this study, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—known for its excellent heat and oxidation resistance—was deposited using the DED process onto Inconel 625, commonly used in gas turbine blades, and Ti-6Al-4V (Ti64), a lightweight alloy frequently used in aerospace parts. To analyze the deposition behavior of these dissimilar material systems, three key process parameters—laser power, scanning speed, and powder feed rate—were systematically varied. The composition, microstructure, and deposition integrity of the fabricated layers were analyzed to identify deposition trends, and a bonding mechanism for the metal–ceramic interface was proposed.

**Keywords:** Directed Energy Deposition(DED), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dissimilar material deposition, process parameter

1. 경남대학교 메카트로닉스공학과 나노신소재공학부, 대학원생

# 경남대학교 신소재공학과 조교수, E-mail: kimseyun@kyungnam.ac.kr

# NiCoCrAlY 조성을 갖는 분말과 용사코팅된 시편의 열성장 산화물 및 혼합산화물의 형성 거동

김상인<sup>1</sup>· 김태현<sup>1</sup>· 배수한<sup>1</sup>· 이진수<sup>1</sup>· 김세윤<sup>#</sup>

## Formation Behavior of Thermally Grown Oxide and Mixed Oxide in NiCoCrAlY Powder and Thermal Spray-Coated Specimens

S. I. Kim<sup>1</sup>, T. H. Kim<sup>1</sup>, B. S. Han<sup>1</sup>, J. S. Lee<sup>1</sup>, S. Y. Kim<sup>#</sup>

### Abstract

가스터빈은 고온·고압의 가스로부터 얻는 회전에너지를 동력(항공용) 또는 전기에너지(발전용)로 변환하는 회전기관이다. 현대의 가스터빈은 1,600°C 이상의 고온에서 작동되며, 고온·고압의 가스로부터 모재를 보호하기 위해 열차폐코팅(TBC, Thermal barrier coatings) 기술을 적용한다. 열차폐코팅은 모재-BC(Bond coat)-TGO(Thermally grown oxide)-TC(Top coat) 구조이며, 모재의 산화를 억제하는 과정에서 BC/TGO 및 TGO/TC 계면에서 코팅의 조기박리를 유발하는 혼합 산화물(MO, Mixed oxide)을 형성한다. 본 연구에서는 대기분위기-1,100°C 조건에서 NiCoCrAlY 조성을 갖는 BC 분말 및 용사코팅시편을 산화 테스트하였으며, NiCoCrAlY 분말은 Al 함량이 높은 B-NiAl 상이 전부 소모된 이후 MO가 형성되었고, 산화물 형성 자유에너지에 기반하여 가장 이상적인 산화 거동을 하였다. 반면 NiCoCrAlY 용사코팅시편은 B-NiAl 상이 존재함에도 불구하고 분말보다 빠른 시점에 MO를 형성하였으며, 분말에서 관찰되지 않는 독특한 산화거동이 관찰되었다. 본 연구는 분말에서 MO의 형성거동을 규명 및 용사코팅시편과 비교하고, 용사코팅시편에서의 MO 형성 거동을 규명하였다.

A gas turbine is a rotary engine that converts thermal energy from high-temperature and high-pressure gas into either mechanical power (for aviation) or electrical energy (for power generation). Modern gas turbines operate at temperatures exceeding 1,600 °C and employ thermal barrier coating (TBC) technology to protect the underlying substrate. A typical TBC system consists of a substrate, bond coat (BC), thermally grown oxide (TGO), and top coat (TC). During oxidation, mixed oxides (MO) can form at the BC/TGO and TGO/TC interface, which may lead to premature delamination of the coating. In this study, NiCoCrAlY-based bond coat (BC) powder and thermally spray-coated specimens were subjected to oxidation tests at 1,100 °C in an air atmosphere. In the case of NiCoCrAlY powder, MO formation was observed only after the β-NiAl phase, which is rich in Al, was completely depleted, and the overall oxidation behavior aligned well with the predicted thermodynamic stability based on oxide formation free energy. In contrast, the thermally

sprayed specimens exhibited earlier MO formation despite the presence of the B-NiAl phase, and showed distinct oxidation behavior that was not observed in the powder. This study elucidates the formation behavior of MO in NiCoCrAlY powder and compares it with that of the spray-coated specimens, providing insight into the differences in oxidation mechanisms between the two.

**Keywords:** Thermal barrier coating, Bond coat, Thermally grown oxide, Mixed oxide, Thermal spray coating

---

1. 경남대학교 메카트로닉스공학과 신소재공학부, 대학원생  
# 경남대학교, 신소재공학과, 조교수, E-mail: kimseyun@kyungnam.ac.kr

## 직접용융증착법으로 제조된 Inconel 625 / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 경사기능재의 단열 및 기계적 특성

유현용<sup>1</sup>· 유진영<sup>2</sup>· 안성열<sup>3</sup>· 이태경<sup>4</sup>· 김형섭<sup>5</sup>· 김정기<sup>6,#</sup>

### Thermal and Mechanical Properties of Inconel 625 / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Functionally Graded Material Fabricated by Directed Energy Deposition

Hyeon Yong Yu<sup>1</sup>, Jin Yeong Yu<sup>2</sup>, Soung Yeoul Ahn<sup>3</sup>, Tae Kyung Lee<sup>4</sup>, Hyoung Seop Kim<sup>5</sup>, Jung Gi Kim<sup>6,#</sup>

#### Abstract

가스터빈의 열효율 향상을 위한 터빈 작동 온도의 지속적인 상승으로 인해 내열소재가 노출되는 환경이 가혹해지고 있다. 상기 문제를 해결하기 위해 부품 내 냉각유로 설계에 기반한 냉각을 유도했으나, 터빈 온도의 지속적인 상승에 따라 냉각을 활용한 온도 저하에 한계가 발생하면서 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)기술이 필수적으로 요구되고 있다. TBC는 금속 모재 위에 세라믹 층을 형성하여 우수한 단열 성능을 제공하지만, 금속과 세라믹 간의 열팽창 계수 차이로 인한 박리현상이 여전히 문제로 남아있다. 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 및 전기빔 물리 기상 증착법은 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성능 확인을 위해 레이저 섬광 분석 및 굽힘 시험을 통해 열적·기계적 특성을 평가하였다.

**Keywords:** Thermal Barrier Coating, Functionally Graded Material, Electron Beam Physical Vapor Deposition, Directed Energy Deposition, Laser Flash Analysis

- 
1. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 석사과정
  2. 부산대학교 기계공학부, 석박사통합과정
  3. 포항공과대학교 신소재공학과, 석박사통합과정
  4. 부산대학교 기계공학부, 교수
  5. 포항공과대학교 신소재공학과, 교수
  6. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 부교수

# 교신저자: 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 부교수, junggi91@gnu.ac.kr

# 직접용융증착법을 활용하여 접합한 IN738LC / CM247LC 이종소재의 인장 변형 중 계면 안정성

성예찬<sup>1</sup> · 강호성<sup>1</sup> · 김정기<sup>1,\*</sup>

## Interfacial Stability of the Tensile Deformed IN738LC/CM247LC Dissimilar Materials Joined by Directed Energy Deposition

Ye Chan Sung<sup>1</sup>, Ho Seoung Kang<sup>1</sup>, Jung Gi Kim<sup>1,\*</sup>

### Abstract

항공 및 발전용 터빈 부품에 주로 사용되고 있는 고온부품은 1200°C 이상의 고온환경, 잦은 기동 및 정지가 되기 때문에 다양한 기계적 손상이 발생할 수 있다. 기존에는 유지보수를 위해 신규 부품을 수입하여 교체하였으나, 최근 글로벌 공급망의 불안정에 따라 높은 비용 및 시간이 요구되고 있다. 상기 문제점을 해결하기 위해 유지보수 기술의 국산화를 통한 비용 절감이 필요하므로 본 연구에서는 직접용융증착법을 이용해 터빈에 많이 활용되는 CM247LC 합금 기지에 IN738LC 합금을 접합하여 유지보수 가능성을 평가하고자 한다. 적층 과정에서는 공정변수에 따른 결함을 줄이기 위하여 반응표면분석법을 적용해 최적 공정조건을 도출하였으며, 열처리 과정에서의 변화를 관찰하기 위하여 보편적인 CM247LC 합금의 열처리조건에서 열처리 유무를 구분하였다. 그 결과, 열처리를 진행하지 않은 시편에서는 접합부 IN738LC 영역에 일부 원소의 확산에 의한 미세균열 및 탄화물이 관찰되었으며, 대부분 W, Ta, Ti에 기반한 탄화물로 분석되었다. 반면, 열처리가 진행된 시편에서는 접합부 IN738LC 영역에 존재하던 균열들이 CM247LC 영역으로 전파되어 기판에서의 손상이 발생한 것을 확인하였다. 상기 결과는 접합 중 계면에서 발생되는 이차상 및 열처리 과정이 모재의 안정성에 큰 영향을 미침을 보여주므로 본 발표에서는 접합부의 미세균열 및 탄화물이 기계적 특성에 미치는 영향과 열처리 과정에서 확산된 균열의 원인에 대하여 고찰하였다.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Inconel alloy, Mechanical Property, Microstructure

---

1. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 석사과정

# 교신저자: 경상국립대학교, 나노신소재융합공학과, 부교수, junggi91@gnu.ac.kr

# Directed energy deposition으로 제조된 IN738LC 합금의 후 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화

강호성<sup>1</sup>, 성예찬<sup>1</sup>, 박기덕<sup>2</sup>, 이형수<sup>3</sup>, 김형섭<sup>4</sup>, 김정기<sup>1,#</sup>

## Post-heat treatment effect on the microstructure and mechanical properties of directed energy deposited IN738LC alloy

Ho Seoung Kang<sup>1</sup>, Ye Chan Sung<sup>1</sup>, Gideok Park<sup>2</sup>, Hyungsoo Lee<sup>3</sup>, Hyoung Seop Kim<sup>4</sup>, Jung Gi Kim<sup>1,#</sup>

### Abstract

가스터빈의 유지보수, 수리 및 운영(Maintenance, Repair, and Overhaul; MRO)은 장기적 활용에 필수적인 요소이므로 발전 산업에 매우 중요하다. 그러나, 종래의 수리 용접 공정은 용접성이 상대적으로 우수한 저등급 Ni기 초내열합금에만 적용되는 한계가 존재하므로, 직접용융증착(Directed Energy Deposition; DED) 공정 기반의 수리기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 고등급 Ni기 초내열합금의 적용성을 평가하기 위해 IN738LC 합금의 DED 공정 후 열처리 조건에서의 미세조직 변화 및 인장 특성을 조사하였다. 우선 반응표면분석법을 활용해 레이저 출력, 스캔 속도, 분말 공급 속도 등의 핵심 공정변수로부터 치수 정확도, 경도, 상대 밀도를 동시에 만족하는 최적의 공정조건을 도출하였다. 상기 최적 공정조건으로 제작된 조형체는 열처리 후에도 미세균열이 관찰되지 않음을 확인했다. 또한, 열처리 단계가 증가할수록 MC 탄화물이  $M_{23}C_6$  탄화물로 분해되면서 크기와 분율이 감소하는 경향을 보였으며,  $\gamma'$ 상의 크기와 입자 간 거리(interparticle spacing)는 점진적으로 증가하고, 부피 분율은 감소하였다. 특히, 3STEP 열처리를 적용한 경우, 균질화 및 동적 재결정이 발생하였으며, 기지 내 1차  $\gamma'$ 상과 2차  $\gamma'$ 상이 공존하는 바이모달 구조가 형성됨을 확인하였다. 상기 미세조직이 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 인장 및 크리프 시험을 수행했으며,  $\gamma'$ 상의 크기 및 부피 분율, MC 및  $M_{23}C_6$  탄화물의 용해도와 분율 차이에 따라 기계적 특성에 큰 영향을 받음을 확인할 수 있다.

**Keywords:** Additive manufacturing, Inconel alloy, Response surface method, Heat treatment, Microstructural evolution, Tensile properties

- 
1. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 석사과정
  2. 갓테크(주), 대표
  3. 한국재료연구원, 선임연구원
  4. 포항공과대학교 철강 및 친환경 소재 기술 대학원

# 교신저자: 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 부교수, junggi91@gnu.ac.kr

# Numerical Investigation of Flow and Combustion Characteristics of Hydrogen-Enriched Fuel in a Micromix Combustion Chamber

S. Tamang<sup>1</sup> · H. Park<sup>2#</sup>

## Abstract

This research introduces a micromix multi-nozzle combustor specifically designed for the stable and efficient combustion of hydrogen gas. The design incorporates a nozzle that facilitates cross-flow mixing of air and hydrogen, mitigating early flashback issues. Additionally, this configuration substantially reduces thermal NOx emissions by decreasing the residence time of reactants within the flame regions of multi-nozzle micro flames. In this study, three primary investigations were carried out. Firstly, an experimental analysis was conducted to examine the velocity characteristics of the specially designed combustor model under isothermal conditions. Secondly, a numerical simulation was investigated, and its validity was ascertained using various turbulence models. Lastly, hydrogen combustion simulations were performed under different air-fuel ratio conditions. These simulations offered valuable insights into the microflow, mixture fraction, temperature, and thermal NOx distribution within the combustor.

**Keywords:** Micromix, Isothermal thermal flow, Hydrogen, Combustion, Numerical simulation

---

1. Changwon National University, Smart Manufacturing Engineering, Graduate Student

# Changwon National University, Mechanical Engineering, Professor, heesungpark@changwon.ac.kr

# 이중벽 냉각 구조를 통한 가스터빈 연소기 라이너 냉각 성능 향상 연구

김덕형<sup>1</sup>· 박희성<sup>#</sup>

## Enhancement of Gas Turbine Combustor Liners Cooling Performance through Double-Wall Cooling Structures

D. H. Kim, H. S. Park

### Abstract

Efficient cooling of the combustor liner in gas turbine applications is essential to maintain operational stability and ensure the durability of high-temperature components. To improve the thermal performance of gas turbine engines a double-wall cooling structure combining impingement and effusion cooling is utilized. This study experimentally investigates the flow characteristics and cooling performance of the proposed structure under various blowing ratios and cooling configurations. The experiments use a low-speed wind tunnel to replicate the thermal and flow conditions of a gas turbine combustor liner. Flow characteristics are measured using a traverse system to obtain qualitative and quantitative pressure data. The cooling performance of the double-wall cooling structure is evaluated by collecting qualitative and quantitative temperature data using an infrared thermographic camera. Key parameters include the blowing ratio the shape of the effusion cooling plate holes and the compound angle. Results show that variations in the shape and compound angle of the effusion cooling plate significantly affect both flow characteristics and cooling performance. The cooling efficiency shows high sensitivity to these geometric factors emphasizing the importance of precise design to achieve optimal thermal management. This study provides insights into the thermal management of gas turbine double-wall cooling components and contributes to the optimization of cooling structure design. Future work aims to correlate experimental data with numerical simulations to enhance predictive accuracy.

**Keywords:** Gas turbine, Combustor liner, Blade, Double-wall cooling, Compound angle

---

1. 국립창원대학교 스마트제조융합협동과정, 박사과정

#. 국립창원대학교 기계공학부, 교수,

E-mail: Heesungpark@changwon.ac.kr

## 8. 포스터 발표

( 제 2 발표회장 )

# 변형율 기반 연성 파단 모델을 적용한 버링 성형성 예측

김기정<sup>1</sup>, 박영철<sup>1</sup>, 전진화<sup>1</sup>, 신건진<sup>2</sup>, 윤승재<sup>#</sup>,

## Prediction of Burrung limits for Hot-rolled steel based on fracture forming limits in strain space

K. J. Kim, Y. C. Park, J. J. Hwa, G. J. Shin, S. C. Yoon

### Abstract

This paper is concerned with modeling of fracture-based forming limit criteria for anisotropic materials in sheet metal forming to predict the sudden fracture in complicated forming processes. Three different kinds of fracture based forming limit criteria are suggested and investigated with an assumption that the stress state is under the plane stress condition with proportional loading. To determine the parameters of the model proposed, the three-dimensional digital image correlation (3D DIC) method is utilized to measure the strain histories on the surface of three different types of specimens during deformation and the measurement results are investigated to identify the anisotropy effect on the equivalent plastic strain at the onset of fracture. The comparison of HER(Hole expansion ratio) and burring operation fracture predictions with the FLC(Forming Limit Diagram) results demonstrates that the proposed FFLC(Fracture Forming Limit Diagram) can predict the instant of ductile fracture initiation in Ultra high strength steels with good accuracy.

**Keywords:** Ultra High Strength Steel, Fracture, Necking, Finite Element Method, Forming Limit Diagram

---

1. 현대제철 응용기술실 샤크이용기술팀

2. 서울대학교 재료공학부

# 교신저자: 현대제철 차체응용기술팀 E-mail: scyoon@hyundai-steel.comr

## 초고강도강판 크랙 저항성 평가

박영철<sup>1</sup>· 김지영<sup>1</sup>· 임기학<sup>1</sup>· 김기정<sup>1</sup>· 진병극<sup>1</sup>· 전진화<sup>1</sup>· 박형권<sup>2</sup>· 조용희<sup>2</sup>· 유지성<sup>2</sup>

### Crack Resistance Evaluation for Advanced High Strength Steel

Y. C. Park, J. Y. Kim, G. H. Yim, K. J. Kim, B. K. Jin, J. H. Jeon, H. K. Park, Y. H. Jo, J. S. Yoo

#### Abstract

초고강도강이 적용된 자동차 부품화에 따른 성형 공정 중 가공 크랙에 대한 불량이슈가 증가하고 있다. 자동차 부품 개발을 위해서는 인장물성, 성형한계 등의 Global formability 관점에 대한 성형성 검토가 일반적으로 수행되고 있다. 하지만 성형과정에서의 국부적 응력 집중에 의한 Edge crack과 같은 Local formability 관점에서 성형특성 평가가 진행되어야 초고강도강 부품 개발에 반영이 될 수 있다. Local formability 평가의 종류로는 Hole Expansion Ratio (HER), True Fracture Strain (TFS), True Thickness Strain(TTS), Fracture Toughness 가 있으며, 본 논문에서는 1.5G 초고강도강을 대상으로 파괴역학 관점을 통한 박판 소재의 크랙 저항성 비교를 위해 J-integral 평가를 진행하였다.

**Keywords:** Global Formability, Local Formability, Edge Crack, 1.5G Advanced high-strength steels, Low-temperature heat treatment, Fracture toughness

---

1. 현대제철 연구개발본부, 책임연구원

2. 한국재료연구원 금속재료연구본부, 선임연구원

# 합성 토크 데이터를 활용한 AI 기반 조립 공정 불량 판별 모델 개발

곽봉석<sup>1</sup> · 김민수<sup>2</sup> · 박지우<sup>3, #</sup>

## Development of an AI-Based Defect Detection Model for Assembly Processes Using Synthetic Torque Data

B. S. Kwak, J. W. Park, M. S. Kim

### Abstract

This study aims to develop an AI-based defect detection model using torque data to determine whether the bolting process has been performed correctly. Since real bolting torque data were unavailable, synthetic torque data were generated to simulate a typical bolting process, where torque remains stable until the snug point and then increases rapidly. The data were structured as time series, consisting of 3,000 datasets (1,000 each for training, validation, and testing). Key extracted features include threading time, time to reach maximum torque after the snug point, maximum torque value, and torque gradient from the snug point to maximum torque. Using these features, an MLP-based detection model was developed to evaluate the conformity of the bolting process. Evaluation metrics, including accuracy, F1-score, precision, and recall, demonstrated high detection performance, achieving an accuracy exceeding 96%. The results highlight the feasibility of AI-driven defect detection in bolting processes and provide a foundation for real-world autonomous assembly applications.

**Keywords:** AI-based defect detection, Synthetic torque data, Bolting process, Machine learning, Time-series feature extraction

### 후기

본 연구는 산업통상자원부의 “로봇산업핵심기술개발사업(과제번호 RS-2024-00507686)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

- 
1. 한국생산기술연구원, 자체인턴
  2. 한국생산기술연구원, 수석연구원
  3. 한국생산기술연구원, 선임연구원

# Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology,  
E-mail : pjwoo@kitech.re.kr

# 가변 접착력 및 모션 적응성을 갖춘 피부 패치 설계 및 웨어러블 전자기기 응용

김소미<sup>1</sup>· 최건준<sup>2</sup>· 김재일<sup>2</sup>· 이희진<sup>1</sup>· 장혜진<sup>2</sup>· 정훈의<sup>#</sup>

## Design of Motion-Adaptive Skin Patches with Tunable Adhesion for Wearable Electronics

S. M. Kim, G. J. Choi, J. I. Kim, H. J. Lee, H. J. Jang, H. E. Jeong

### Abstract

Recent advancements in skin-interfaced electronics have opened new possibilities for personalized healthcare applications. However, existing skin patches often face difficulties in achieving a balance between strong adhesion, flexibility to accommodate body movements, seamless integration of bulky electronics, and the ability to detach without causing damage. To overcome these limitations, this study introduces an innovative hybrid approach that incorporates all of these critical features into a single, flexible patch platform. The design makes use of shape memory polymers (SMPs), arranged in a tessellated configuration, which combine both rigid and flexible SMPs. This arrangement enables exceptional deformation, superior adaptability to motion, and strong, repeatable adhesion to the skin, while offering precise control over the adhesive properties. Additionally, this system supports the integration of large electronic components without compromising the adhesion strength. By embedding various electronics, including signal acquisition circuits, sensors, and a battery, the proposed tessellated patch has been demonstrated to securely adhere to the skin, accommodate dynamic body movements, accurately measure physiological signals with a high signal-to-noise ratio (SNR), transmit data wirelessly, and be easily detached when required.

**Keywords:** Shape memory polymer (SMP), Tunable adhesion, Skin-interfaced electronics, Tessellated array, Motion adaptability

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF-2021R1A2C3006297) and Technology Innovation Program (00144157, Development of Heterogeneous Multi-Sensor Micro-System Platform) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

- 
1. 울산과학기술원 기계공학부, 대학원생
  2. 울산과학기술원 기계공학부, 박사후연구원
- # 울산과학기술원 기계공학부, 정교수,  
E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr

## 기계학습 기반 계층적 군집화를 활용한 레이저 용접된 DP 강의 상분율 예측

천민준<sup>1</sup> · Soumyabrata Basak<sup>2</sup> · 홍성태<sup>2</sup> · 조훈휘<sup>1, #</sup>

### Prediction of phase fraction in laser-welded DP steel using machine learning-based hierarchical clustering method

M. J. Cheon<sup>1</sup> · Soumyabrata Basak<sup>2</sup> · S. T. Hong<sup>2</sup> · H. H. Cho<sup>1, #</sup>

#### Abstract

DP(Dual Phase)강은 페라이트와 마르텐사이트의 2상 조직으로 구성되어 있으며, 1980년대에 개발되어 유럽에서 자동차 산업에서 적극적으로 사용되기 시작했다. 이 강의 기계적 특성은 주로 2상의 분율에 의존하며, 보통 가공처리 혹은 열처리 후에는 2상의 분율이 모상과 상이하게 된다. 본 연구에서는 레이저 용접된 DP590강에서 2상의 상분율을 기계학습 기법을 이용해 분석하고자 한다. 우선, 전자후방산란회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 분석기를 이용해 모재, 용접부 및 통전 열처리된 용접부의 미세조직을 관찰하였다. 측정된 image quality(IQ) 값을 이용해 상분율을 분석하였고, 다양한 군집화 알고리즘 중 계층적 군집화 기법이 가장 정확한 상분율 분석 결과를 나타내었다. 레이저 용접부에서는 상당한 마르텐사이트 분율 증가가 나타나는 것을 확인하였으며, 통전 열처리가 용접부의 마르텐사이트 분율을 낮추는 것을 확인하였다.

**Keywords:** DP steel, laser welding, microstructure, machine learning, hierarchical agglomerative clustering, image quality

---

1. 국립한밭대학교 신소재공학과

2. 울산대학교 기계공학과

# 교신저자: 국립한밭대학교 신소재공학과, 교수

E-mail: hhcho@hanbat.ac.kr

# Cu 첨가와 인공 시효 조건에 따른 6xxx계 Al 합금의 미세구조 및 기계적, 전기화학적 특성 분석

홍현빈<sup>1</sup> · Raj Narayan Hajra<sup>1</sup> · 신은주<sup>2</sup> · 김재국<sup>3</sup> · 이종숙<sup>3</sup> · 김정한<sup>1</sup> · 김재황<sup>4</sup> · 조훈휘<sup>1, \*</sup>

## Analysis of the microstructure, mechanical, and electrochemical properties of 6xxx series Al alloys according to Cu addition and artificial aging conditions

H. B. Hong, Raj Narayan Hajra, E. J. Shin, J. K. Kim, J. S. Lee, J. H. Kim, J. H. Kim, H. H. Cho

### Abstract

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)를 사용하여 각 조건 별 시편의 석출물 거동을 분석하였고, 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)과 소각 중성자 산란 장치(Small Angle Neutron Scattering, SANS)로 석출물의 유형 및 분포를 분석하였다.

**Keywords:** Al alloys, Cu addition, artificial aging, electrochemical behavior, precipitation behavior

- 
1. 국립한밭대학교 신소재공학과
  2. 한국원자력연구원 중성자과학부
  3. 전남대학교 신소재공학부
  4. 한국생산기술연구원 탄소경량소재그룹
1. # 국립한밭대학교 신소재공학과, 교수, E-mail: hhcho@hanbat.ac.kr

# 이상 결정 방위의 가우시안 분산과 영향

정의찬<sup>1</sup> · 정영웅<sup>1, 2, #</sup>

## Perturbing texture components via Gaussian dispersion and its effects studied via crystal plasticity simulations

Euichan Jeong, Youngung Jeong

### Abstract

본 연구에서는 결정 방위에 가우시안 분산을 적용하여 이상적인 방위에서 벗어난 단결정 재료의 거동을 모사해 보았다. 다결정 금속의 경우 예를 들어 전자 후방산란 회절(EBSD), X선 회절 실험 등으로부터 획득한 초기 집합조직 정보를 활용하는 데 비해, 터빈 블레이드 등에 활용되는 단결정 금속 제품 경우 요구되는 최적 방위가 존재하나 그 방위에서 통계적으로 벗어나는 경향을 보이는 경우가 있다. 본 연구에서 활용하는 기법을 통해 통계적으로 제어된 결정 방위의 분산을 고려하고, 결정 방위에서의 오차(bias)와 편차(deviation)가 물성치에 끼친 영향을 수치 해석적으로 효과적으로 모사할 수 있다. 특히, 요구되는 방위로부터의 분산을 제어하고 조절함으로써 적절한 결정 방향 편차의 범위를 설정하는 데 쓰일 수 있다. 본 예비 연구 결과를 통해 단결정 데이터를 기반으로 제안된 기법을 적용하고, 그 결과 독립형 (stand-alone) 및 유한요소 해석용 결정 소성 수치해석에의 결과를 비교함으로써 방법의 유효성과 타당성을 검증하였다.

**Keywords:** Gaussian Dispersion, Crystal Orientation, Texture, Elasto-visco-plastic self-consistent model (탄점소성 다결정 결정소성 모델)

---

1. 창원대학교 소재융합시스템공학과

2. 창원대학교 신소재공학부

#창원대학교, 신소재공학부, 부교수, E-mail: yjeong@changwon.ac.kr

# 허브 베어링용 아웃터 링 공정 시뮬레이션 및 성형하중의 실험적 검증

문호근<sup>1</sup> · 장성민<sup>1</sup> · 염재근<sup>1</sup> · 조주현<sup>2</sup> · 김진국<sup>2</sup> · 전만수<sup>#</sup>

## Simulation of Outer Ring Process for Hub Bearings and Experimental Verification of Forming Load

H. K. Moon, S. M. Jang, J. G. Eom, J. H. Cho, J. K. Kim M. S. Joun

### Abstract

This study presents a finite element analysis incorporating temperature effects to simulate the outer ring components of hub bearings. In hot forging, temperature variations in the material significantly influence the prediction of the final shape and forming load. The forming load predicted by the simulation was compared with experimental data from the actual process to evaluate the accuracy of the simulation.

**Keywords:** Hub Bearing(허브 베어링), Non-isothermal(비등온), Hot Forging(열간단조), Finite Element Analysis (유한요소해석)

### 1. 서론

차량용 허브 베어링은 휠 베어링으로도 불리며, 자동차가 구동할 때 바퀴 축의 마찰을 최소한으로 줄이면서 동시에 바퀴를 차체에 연결하여 바퀴로부터 전해지는 충격 하중과 차량의 하중을 지지하는 역할을 한다. 허브 베어링은 고속회전과 차체 하중을 견디기 위해 고강도로 제작되며, 자동차 구동장치의 주요 핵심부품 중의 하나이다. 그러므로 허브 베어링의 구성부품인 외륜[1]은 엄격한 고객관리 기준을 바탕으로 열간

단조 공정으로 제작된다.

수동작업의 경우, 업셋팅, 브로커, 피니셔 공정이 순차적으로 이루어져 각단별 성형하중이 장비부하능력보다 크지 않으면 생산성에 문제가 없다. 하지만 자동 트랜스퍼 공정의 경우, 업셋팅, 브로커, 피니셔, 피어싱 등의 공정이 동시에 이루어져 부하능력이 큰 장비가 필요하게 된다. 기존 장비를 이용하여 자동 트랜스퍼 공정으로 생산을 하기 위해서는 각 공정별 정확한 성형하중 예측을 통한 공정별 하중분배 최적화가 필요하다. 보다 정확한 성형 해석을 위해서 비

1. (주)엠에프알씨 기술연구소

2. 동은단조(주)

# 교신저자: 경상국립대학교 기계공학부, 교수.

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

등온 해석[2]은 필수적이다.

## 2. 아웃터 링 부품의 비등온 유한요소해석

허브 베어링용 아웃터 링 부품은 열간단조로 3000 톤 자동프레스에서 생산되며, 재질은 ASTM A572 Grade 55 이다. 보다 정확한 성형하중 예측을 위하여 소재 이송, 성형 전·후 대기, 성형 중, 이송 시 소재와 금형의 온도를 고려하여 비등온 해석으로 시뮬레이션을 진행하였으며, 소재 초기 온도는 1150°C로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 총 성형하중은 2045 ton 으로 예측이 되었다. 실제 공정의 데이터는 프레스에 장착된 로드셀에서 표기되는 50 개의 데이터를 추출하여 평균한 값을 활용하였고, 그 결과는 평균 1867 ton 으로 나왔다. 측정된 평균 하중 값에서 하중 정확도 90% 범위 설정을 위해 ±10%에 해당하는 라인을 그래프에 표기하였고, 성형해석 결과와 함께 Fig.1 에 나타내었다.

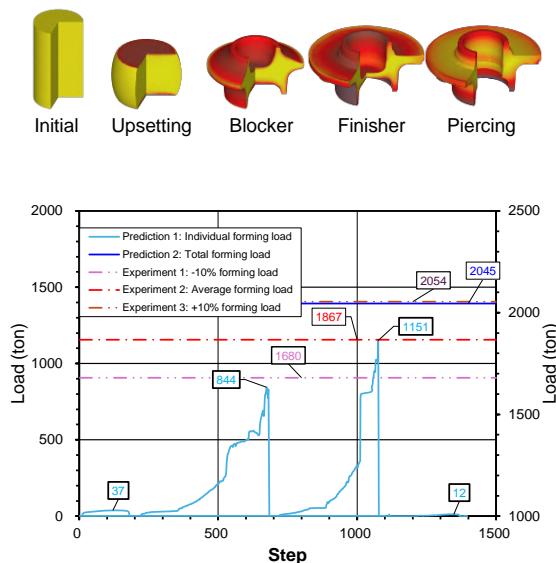


Fig. 1 Simulation results

## 3. 결론

이 연구에서는 허브 베어링용 아웃터 링 부품의 공정해석 시뮬레이션을 진행하였고, 시뮬레이션에서 예측된 하중과 실제 작업 시 프레스 하중을 모니터링하여 그 평균값과 비교하여 검증하였다. 비교 결과 하중 정확도는 약 90.46%로 ±10% 이내 범위안에 들어왔으며, 이는 시뮬레이션 결과와 실험 데이터가 비교적 일치하는 결과라고 할 수 있다.

## 후기

이 연구는 중소벤처기업부의 스마트 제조 혁신 기술개발사업(R&D)(RS-2024-00446241)의 지원으로 수행됨.

## 참고문헌

- [1] J. D. Yoo, M. C. Kim, H. K. Moon, M. S. Joun, 2018, Simulation of a rotary forging process of an assembling hub bearing assembly, Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp.37-38.
- [2] J. B. Byun, J. B. Park, I. D. Seo, M. S. Joun, 2019, Non-isothermal analysis of a SUS 304 ball-stud forging process, Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp.118-119

# 탄성 계수, 변형률 증분 및 속도가 탄점소성 다결정 모델 수치해석 결과에 미치는 영향

강주홍<sup>1</sup>·정영웅<sup>1, 2, #</sup>

## Effect of Elastic Modulus, Strain Increment, and Strain Rate on Numerical analysis based on Elasto-Visco-Plastic Self-Consistent Polycrystal Models

Juhong Kang, Youngung Jeong

### Abstract

다결정 재료의 구성 모델로써 탄점소성 다결정 모델(EVPSC)은 다양한 금속 재료의 기계적 변형 거동을 모사하고 해석하는데 널리 쓰이고 있다. 본 연구에서는 최근 문헌에 보고된 두 EVPSC모델의 수치해석 결과에 영향을 끼치는 인자로써 탄성 계수, 변형률 증분, 그리고 변형률 속도로 설정하고 기존에 보고된 수치해석 방법을 검증하였다.

이를 위해 다양한 조합의 탄성 계수(Young's modulus), 변형률 증분(strain increment), 변형률 속도(strain rate)를 고려하여 응력 기반 ( $\sigma$  EVPSC) 및 응력 증분 기반( $\Delta$  EVPSC)의 모델을 활용해 얻은 일축 인장 시뮬레이션 결과를 비교해 보았다. 유동 응력-변형률 곡선, 변형률 속도 민감도 및 평균 응력값의 표준편차를 개별 결정법으로부터 계산하여 통계적 편차와 평균값을 분석하였다. 나아가 조합된 재료 성질에 상관없이 통계적 강건성(robustness) 높은 수치해석 계산 결과를 얻기 위한 방안을 모색하였다.

**Keywords:** AA7075-T6, 탄점소성 다결정 결정 소성 모델, 탄성계수, 변형률 증분, 변형률 속도

---

1. 창원대학교 소재융합시스템공학과

2. 창원대학교 신소재공학부

# 창원대학교 신소재공학부, 부교수, E-mail: yjeong@changwon.ac.kr

# AI 기반 YOLOv8과 다향 회귀 보정식을 이용한 연속공정 압연품의 폭·두께 측정 시스템에 관한 연구

이관규<sup>1#</sup>· 김진구<sup>2</sup>· 곽호택<sup>3</sup>

## Study on the width and thickness measurement system of real-time rolling process using YOLOv8 and PRC formula.

Gwangyu Lee, Jingu Kim, Hotaek Kwak

### Abstract

고속 압연 생산이 확대되면서, 실시간 고정밀 치수 측정을 통한 품질 관리 자동화에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히 촬영 위치나 각도, 조명 조건이 달라지는 산업 환경에서도 일관된 정밀도로 두께 및 폭을 측정할 수 있는 영상 기반 측정 기술의 중요성이 커지고 있다. 하지만 기존의 영상 측정 시스템은 카메라 위치나 대상물의 위치 변화에 민감하고, 복잡한 보정 절차나 수동 입력이 요구되는 경우가 많아 현장 적용에 제약이 따른다. 특히 실시간 데이터 연동성과 자동화 가능성 측면에서도 한계가 존재한다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해, YOLOv8 객체 검출 알고리즘과 2 차 다향 회귀 기반 mm/pixel 환산 기법을 결합한 실시간 치수 측정 시스템을 제안한다. 측정 대상은 연속공정의 압연품이며, 객체 검출 후 ROI 내 이진화 및 컨투어 기반의 두께·폭 산출을 수행하고, 각 y 좌표별 회귀 모델을 통해 정량적 거리로 변환된다. 이 과정에서 보정계수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 를 각각 좌측 폭, 우측 폭, 두께 측정에 적용하여 기하학적 왜곡 및 위치 편차를 보정하였다. 또한, 측정값의 안정성을 확보하기 위해 최대·최소값 반복 제거 방식의 이상치 필터링을 적용하였으며, 두께 측정 시 ROI 경계 기울기 평균화를 통해 수직 정렬 오차를 줄였다. 본 시스템은 실제 환경에서  $\pm 0.05\text{mm}$  수준의 정밀도를 확인하였다. 제안 시스템은 측정 유효 범위(2448x2048)에서 고정밀 측정 성능을 구현하였으며, 제조 현장의 비접촉형 자동 계측 기술로서의 활용 가능성을 제시한다.

**Keywords:** Rolling Process, YOLOv8, Polynomial Regression, Width·Thickness Measurement

### 후기(Acknowledgments)

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(제도부경도 600Hv, 경량화율 10% 이상 이종소재 치형 휠베어링 개발, RS-2024-00430258, 산업통상자원부

1. (주)씨에이이테크놀러지, 사원
2. (주)씨에이이테크놀러지, 책임연구원
3. (주)씨에이이테크놀러지, 대표이사

# 교신저자 E-mail: kklee@caetech.co.kr

# 적층제조 후가공 효율성 향상을 위한 빌드 플레이트 상 밀링 공정 개발 및 FEA 기반 품질 예측

함민지<sup>1</sup>· 문인용<sup>#</sup>

## Develop of an On-Build Plate Milling Process for Improving Post-processing Efficiency in Additive Manufacturing and FEA-Based Quality Prediction

M.J. Ham, I.Y. Moon

### Abstract

금속 적층제조는 형상의 자유도가 높아 다양한 산업분야에 활용되고 있으나 표면 조도 및 치수 정밀도 측면에서 기계가공 대비 한계가 존재하여 최종 품질 확보를 위해 밀링과 같은 후 가공이 수반된다. 이러한 후가공 공정은 적층 후 서포트 제거, 빌드 플레이트 분리, 클램핑 및 원점 설정과 같은 복잡한 절차가 선행되어야 하기 때문에 이로 인해 시간과 비용이 증가하고 생산성이 저하되는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 후가공 절차의 간소화를 위해, 적층 시 적용되는 서포트를 구조적 지지체로 활용하여 적층품이 빌드 플레이트에 고정된 상태로 밀링을 수행하는 방식을 제안하였다. 이를 위해 다양한 강성을 갖는 서포트 구조를 설계하고, 해당 구조가 적용된 시험편을 제작하여 밀링 실험을 수행하였다. 가공 중 발생한 절삭력, 표면 거칠기, 치수 정밀도 등의 결과를 정량적으로 측정하고, 서포트 구조에 따른 가공 반응의 차이를 분석하였다. 또한 실험만으로 다양한 구조에서 최적의 가공조건을 도출하는데 한계가 있으므로, 동일한 조건 하에서 유한요소해석을 수행하여 응력 및 변위 거동을 시뮬레이션하고, 실험 결과와 비교함으로써 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구는 서포트 구조에 따른 가공 중 기계적 반응 특성을 기반으로 다양한 형상과 조건에서의 밀링 품질을 사전에 예측할 수 있는 평가 체계를 구축하고자 하였다.

**Keywords:** Additive manufacturing, Support structure, Milling, Build plate, Post process

---

1. 한국생산기술연구원 기능성소재부품그룹, 연구조원

# 한국생산기술연구원, 기능성소재부품그룹, 선임연구원, E-mail:mooniy085@kitech.re.kr

# 트랙 링크 열간단조 공정의 유한요소해석

장성민<sup>1</sup>· 문호근<sup>1</sup>· 김병오<sup>2</sup>· 전만수<sup>#</sup>

## Finite Element Analysis of Hot Forging Process for Track Link

S. M. Jang, H. K. Moon, B. O. Kim, M. S. Joun

### Abstract

In this study, non-isothermal finite element analysis was conducted to simulate the hot forging process of track link components. The simulation considered temperature variations induced by die contact before and after forging, thermal changes during deformation, and heat loss during inter-stage transfer. Accurately accounting for the temperature evolution of the workpiece is crucial in hot forging, as it significantly influences the prediction of the final geometry and forming load. The presented analysis demonstrates the effectiveness of the simulation in validating and optimizing the forging process design.

**Keywords:** Track Link(트랙 링크), Hot Forging(열간단조), Finite Element Analysis (유한요소해석)

### 1. 서론

트랙 링크는 건설 중장비 및 농기계의 기본적인 체인을 형성하는 링크 부품으로 핀(Pin), 부시(Bush), 트랙 슈(Track shoe) 등과 조립되어 트랙 체인(Track chain) 또는 트랙 링크 어셈블리(Track link assembly)를 구성하는 핵심 부품이다. 많은 연구들 중에서 트랙 체인에 대한 구조적인 설계 및 해석, 케도 시스템[1,2]에 대한 연구는 많으나, 트랙 링크 부품 생산에 관련된 연구는 전무하다.

트랙 링크는 주로 굴착기, 불도저, 크레인 등 장비의 구동 및 하중을 견디는 역할을

하며, 불균일한 지면이나 농지에서도 원활하게 주행할 수 있도록 돋고, 무게를 분산 시켜 지면의 침하를 방지하는 역할을 한다. 구성하는 부품과 조립방법에 따라 드라이(Dry) 타입, 실드(Sealed) 타입, 그리스(Greased) 타입, 윤활(Lubricated) 타입으로 구분된다. 타입에 따라 유지보수, 수명, 이동속도, 사용환경이 달라진다.

### 2. 트랙 링크 부품의 유한요소해석

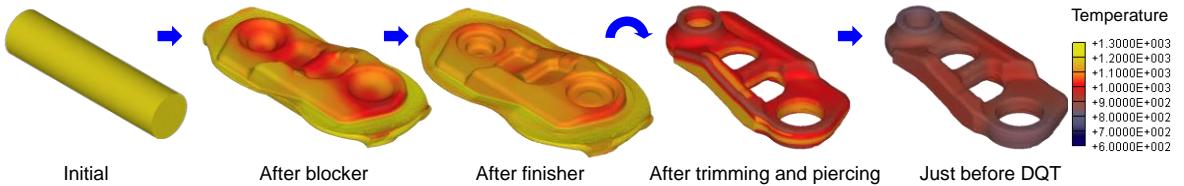
트랙 링크의 생산은 열간단조 공정으로 제작이 되며, 블로커, 피니셔 그리고 동시에

1. (주)엠에프알씨 기술연구소

2. 아이티알인더스트리즈(주)

# 교신저자: 경상국립대학교 기계공학부, 교수.

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr



**Fig. 1 Simulation results of track link (Temperature)**

트리밍과 피어싱을 하기 때문에 총 3공정이다. 해당 부품은 서로 교차되어 조립되며 피어싱한 조립 홀을 제외하고 대부분은 비가공 부위이다. 따라서 소재 표면에 겹침 또는 결육과 같은 불량이 존재하면 추가적인 후가공비가 많이 소요되는 부품이다. 트랙 링크의 소재는 무거운 하중을 견디고, 지속적인 마찰과 충격을 받기 때문에 높은 강도와 내마모성이 필요로 하므로 보론강(15B36Cr)을 주로 사용하며, 열간단조 공정 이후 컨베이어로 냉각조까지 이송하면서 소재를 약 900°C까지 식힌다. 이 후 직접 담금질 및 뜨임(DQT: Direct Quenching and Tempering) 열처리 과정을 진행하거나 트리밍과 피어싱 이후 단조 소재를 공랭 시킨 이후, 일반적인 담금질 및 뜨임(QT: Quenching and Tempering)을 한다. 따라서 단조공정에서 온도를 예측하는 것은 실작업에 적용을 위해 중요한 부분이다. Fig. 1의 해당공정은 DQT를 위하여 소재의 온도변화를 고려한 비등온 공정해석[3]이 진행 되었으며, 각 공정별로 형상 및 소재의 온도변화를 나타내고 있다.

### 3. 결론

이 연구에서는 트랙 링크 부품의 비등온

유한요소해석을 수행하였으며, 성형해석을 통해 소재의 온도변화를 예측함으로써 열처리 직전 소재온도 및 단조공정 설계에 대한 검증이 이루어졌다.

### 후기

이 연구는 중소벤처기업부의 스마트 제조 혁신 기술개발사업(R&D)(RS-2024-00446241)의 지원으로 수행됨.

### 참고문헌

- [1] C. H. Lee, Y. H. Kim, C. K. Woo, J. H. Jang, M. S. Kim, Y. K. Kwak, 2000, Design and Analysis of Link-type Track for Variable Configuration Tracked Vehicle, Kor. Soc. Auto. Eng. Annu. Autumn Conf., pp.727-732.
- [2] H. S. Ryu, J. S. Jang, J. H. Choi, D. S. Bae, 2004, Track System Interactions Between the Track Link and the Ground, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.28, No.11, pp.1711-1718.
- [3] S. M. Jang, 2010, Tree-dimensional Simulation of Hammer Forging for Large Crankshaft, Master's thesis, Gyeongsang National University

# 프로그래밍이 가능한 접착력을 위한 미세구조와 비선형 컷 기반의 다중스케일 균열 제어 접착 패치

송현석<sup>1</sup> · 박성진<sup>1</sup> · 강동관<sup>1</sup> · 정훈의<sup>#</sup>

## Multiscale Crack Control Adhesive Patch based on Microstructures and Nonlinear Cuts for Programmable Adhesion

H. Song, S. Park, D. K. Kang, H. E. Jeong

### Abstract

Precise regulation of crack propagation at bonded interfaces is essential for the development of high-performance smart adhesives. While prior research has largely focused on controlling crack dynamics at either the microscale or macroscale, our study introduces a hybrid adhesive system that combines microscale microarchitectures with macroscopic nonlinear cut designs. This multiscale structural integration enables conformal contact and concurrent crack trapping across different length scales, leading to more than a 70-fold enhancement in adhesion strength. Additionally, the macroscopic architecture guides crack propagation along predetermined directions, allowing for programmable detachment and high reusability. With spatially tunable adhesion strength and directionality, the system enables the fabrication of skin-adhesive patches that are simultaneously breathable, non-irritating, robust, and easily detachable. These features are demonstrated through a skin-mounted patch integrated with electronic components capable of detecting human motion and wirelessly transmitting data, thus enabling real-time avatar control in virtual reality environments.

**Keywords:** Programmable adhesion, Crack control, Adhesive patch, Nonlinear cut, Microstructure

This work was supported by the Technology Innovation Program (00144157, Development of Heterogeneous Multi-Sensor Micro-System Platform) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea), and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) (RS-2024-00445152).

---

1. 울산과학기술원 기계공학부, 대학원생

# 울산과학기술원 기계공학부, 정교수,

E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr

## 316L 스테인리스강 고압수소배관 제조 시 발생하는 인장 물성 및 내수소취성 변화

고재훈<sup>1</sup>, 흥성모<sup>2</sup>, 강지현<sup>#</sup>

### Effect of Manufacturing Processes on the Mechanical Properties and Hydrogen Embrittlement Resistance of 316L Stainless Steel for High-Pressure Hydrogen Applications

J. H. Go, S. M. Hong, J. H. Kang

#### Abstract

최근 탄소중립 정책 추진과 함께 수소에너지의 활용이 증가하면서, 고압 수소배관용 소재의 기계적 신뢰성 확보가 중요한 연구 분야로 부각되고 있다. 본 연구에서는 상용 316L 스테인리스강 고압수소배관 제조 시 각 공정이 미세조직 변화 및 수소취성 저항성에 미치는 영향을 분석하였다. 핫 페어싱, 필거링 및 열처리 공정을 거친 시편을 대상으로 결정립 크기, 변형 쌍정 등의 미세조직의 차이를 분석하고, Kernel Average Misorientation (KAM) 값을 측정하여 변형 정도를 평가하였다. 이후, 각 공정 조건에서 제조된 시편에 대해 전기화학적 수소 장입을 수행한 후 저속 인장 시험을 진행하여, 수소 장입 여부에 따른 인장물성의 변화와 시편에 가해지는 변형량에 따른 수소취성 감수성에 대해 비교하였다. 실험 결과, 공정 중 변형량이 클수록 항복 강도 및 인장 강도가 증가하는 반면, 연신율은 감소하는 경향을 나타냈다. 또한, 저속 인장시험 후 Relative Elongation Loss (REL) 분석을 통해, 배관 제조 공정이 진행됨에 따라 시편의 수소취성에 대한 저항성이 감소하는 것을 확인하였다.

**Keywords:** Austenitic Stainless Steel 316L, High-Pressure Hydrogen Tube, Hydrogen Embrittlement (HE), Slow Strain Rate Tensile Test (SSRT), Tensile Properties

---

1. 영남대학교 신소재공학부, 대학원생

2. 주세창스틸, 이사

#. 영남대학교 신소재공학부, 부교수, jeekang@yu.ac.kr

## 성형해석을 통한 주조재용 압입너트 최적화

염승록<sup>1#</sup>· 강성묵<sup>1</sup>· 이광희<sup>1</sup>· 김진용<sup>1</sup>· 김민철<sup>2</sup>

### Forming Simulation-Based Optimization of Press-Fit Nuts for Casting

S. R. Yeom, S. M. Kang, K. H. Lee, J. Y. Kim, M. C. Kim

#### Abstract

최근 자동차 부품의 경량화 및 일체화가 진행되면서 알루미늄 주조 소재의 사용이 증가하고 있다. 이에 따라 기존의 용접 방식이나 나사 체결 방식이 적용되기 어려운 문제가 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위한 새로운 체결 기술이 요구되고 있다.

본 연구에서는 너트 제조 방식인 냉간다단단조 설계에 앞서 성형 해석프로그램(Afdex)을 활용하여 주조재 너트의 압입시 소재 변형 흐름을 확인 후 최적의 성형 형상을 설계하여 조립시 이탈(Pull out)과 회전방지(Toque turn) 성능이 최적화 되도록 연구 진행하였다.

그 결과, 주조재와의 체결력을 향상시킬 수 있는 최적의 형상 조건을 확보하였고, 실용적 적용 가능성도 확인되었다. 본 연구는 알루미늄 주조재용 압입 너트 개발에 대한 기초 데이터를 제공하며, 경량화 차량 부품의 체결 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Press-fit nut, Cold forging, Aluminum alloy , Forming simulation, Fastening performance, Optimization

---

1. (주)풍강

2. (주)엠에프알씨

# 교신저자: (주)풍강, 기술개발1팀, 대리, E-mail: roker898@pungkang.co.kr

# Cu/Al/Cu 클래드 메탈을 이용한 유연 버스바 제조에 관한 연구

송재선<sup>1, #</sup> · 윤국태<sup>2</sup> · 김동환<sup>3</sup> · 정관효<sup>4</sup>

## Study on the manufacturing of flexible busbar using Cu/Al/Cu clad metal

J. S. Song, K. T. Youn, D. H. Kim, K. H. Jeong

### Abstract

버스바(busbar)는 전기자동차, 에너지저장시스템 등에서 전선을 대체해서 큰 전기용량을 이차 전지(secondary battery)로부터 전장품으로 전력을 공급하는 핵심 부품으로 일반적으로 동(copper, Cu) 소재를 사용하여 제작된다. 현재 사용되는 버스바의 종류에는 Cu 고정형 버스바, Cu 박판 유연(flexible) 버스바, Copper Clad Aluminum(CCA) 고정 버스바가 있으며, 대부분 비싼 원소재인 Cu를 사용하여 중량이 무겁거나, 이종 소재 간의 신율 차이로 크랙이 발생한다.

CCA 버스바는 Al의 외부에 Cu를 접합하여 박판으로 만들고, 각각의 박판을 적층하여 원하는 두께로 제작함으로써 잘 구부리지고, Cu와 Al로 구성되어 기존의 Cu 고정형 버스바 대비 약 20% 이상의 경량화가 가능하다. 또한, 타 전선과 달리 필요한 길이만큼만 절곡, 용접 등으로 형상화하여 완제품으로 사용할 수 있다. 그러나, CCA 소재의 용융점 차이와 벤딩 곡률반경, 생산성 등의 문제로 기존의 Cu 박판 유연 버스바 제조기술로는 대응이 어려운 실정이다.

이에 본 연구에서는 CCA 박판 Flexible 버스바를 제조하기 위해서 CCA 적층을 위한 박판 두께와 접합 조건을 최적화하였으며, 굽힘/용접강도/체결력 등의 기계적 특성과 내전압/온도상승/내전압 등 전기적 특성에 대한 평가를 진행하여 가볍고 유연하면서도 전기적 특성이 유지되는 CCA Flexible 버스바의 제조가 가능함을 확인하였다.

**Keywords:** Busbar, Copper Clad Aluminum (CCA), Flexible

**후기:** 본 연구는 중소벤처기업부 중소기업기술개발지원사업(과제번호: S3047960)을 통해 연구한 내용이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

---

1. (재)대구기계부품연구원 소재부품연구본부, 책임연구원

2. (재)대구기계부품연구원 소재부품연구본부, 본부장

3. 창신대학교 항공정비기계학과, 교수

4. 신성ST(주) 기술연구소, 팀장

# 교신저자: (재)대구기계부품연구원, 책임연구원, E-mail: jssong@dmi.re.kr

# 전기자동차 차동장치용 액추에이터 하우징 부품의 공정설계에 관한 연구

이상길<sup>1</sup>· 송원호<sup>1</sup>· 노태욱<sup>2</sup>· 진도훈<sup>3</sup>

## A Study on the Process Design of Actuator Housing Parts for Differential of Electric Vehicle

S. G. Lee, W. H. Song, T. W. Rho, D. H. Chin

### Abstract

액추에이터 하우징(Actuator Housing)은 하이브리드 및 전기차의 SUV 차량 및 픽업트럭 트랜스퍼케이스(Transfer Case) 내부 차동장치를 구성하는 부품으로 감속기와 모듈형태로 장착되며, 내연기관 차량의 엔진과 같은 역할을 수행한다. 하이브리드 차량에서는 엔진과 변속기 사이에 장착되어 저속 및 고 토크 영역에서 차량을 구동 시킨다. 기존 제품의 생산 방식이 전적으로 주조, 선반 가공에 의해 제작되어 왔다. 크랙 및 스크래치가 발생되는 것을 최소화하고, 이물질을 제거하여 품질향상과 안정성을 극대화하기 위하여 프레스 공법을 적용하였다.

본 연구에서는 기존 대부분의 생산공정이 19공정 전후로 진행되던 것을 12공정으로 축소하여 진행함으로써 기존 공정대비 약 42.5%의 중량을 감소시킬 수 있고. 생산성 향상 및 완성차의 효율적인 주행 효과를 가져올 수 있게 한다. 또한 생산공정 단축으로 제조원가가 약 50%의 절감이 가능할 것으로 판단된다.

**Keywords:** Actuator Housing(액추에이터 하우징), Electric Vehicle(전기자동차),

Process Design(공정설계), Transfer Case(트랜스퍼 케이스), Differential(차동장치)

### 1. 서론

액추에이터 하우징(Actuator Housing)은 하이브리드 및 전기차의 SUV 차량 및 픽업트럭 트랜스퍼 케이스(Transfer Case) 내부의 차체 자세제어장치 즉 차동장치 기능을 가진 차량에 장착되는 전자식 솔레노이드 액추에이터 장치에 결합되는 부품이다.

액추에이터 하우징은 현재 여러가지의 공정 및 혼합된 생산방식에 의해 제작되고 있다. 단조, 열처리, 선반가공 등의 다수 공정의 진행에 따라 많은 시간과 인력이 소요되는 단점이 있었다. 이를 개선하기 위해 공정 재설계를 통한 생산의 효율성 재고가 필요하며, 이와 관련하여 공정 설계를 진행하게 되었다.

1. (주)송원하이텍 기술연구소

2. 볼보자동차코리아 부천서비스센터

3. 부산가톨릭대학교 산업안전보건학과, 교수

## 2. Actuator Housing 부품의 공정 재설계 및 성형해석

기존 제품의 생산공정은 아래와 같이 주로 총 19개의 공정으로 진행되며 아래와 같다.

#10	#20	#30	#40	#50
소재구매	절단	Upsetting	정타(단조)	피어싱
1. 재질:S45C 2. 치수: $\Phi 50 \times 6\text{m}$				
#60	#70	#80	#90	#100
열처리	쇼트	CNC 1차 활삭	CNC 2차 활삭	CNC 1차 정삭
조질 열처리 HRC18-22	$\Phi 2$ Ball로 쇼트 진행			
#110	#120	#130	#140	#150
CNC 2차 정삭	6XΦ7 MCT	MCT 키홀	$\Phi 4.35$ MCT	$\Phi 4.35$ MCT
#160	#170	#180	#190	
CNC 정삭 1차	CNC 정삭 2차	핀 웨딩	쉴드 웨딩	

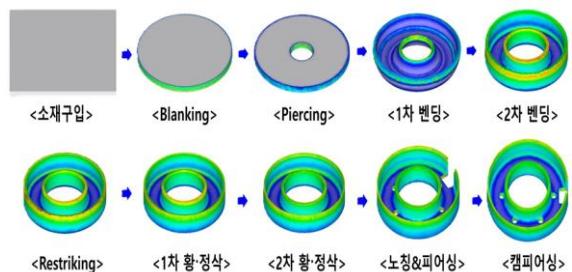
이러한 공정을 Fig.1과 같이 12개의 공정으로 단순화하였다.

#10	#20	#30	#40
소재입고	블랭킹	피어싱	W. 벤딩
1. 재질:SPHC 2. 치수: $\Phi 6.5 \times 174\text{m}$	( $\Phi 161$ )	( $\Phi 35.2$ )	
#50	#60	#70	#80
U-벤딩	교정	CNC1차활·정삭	CNC2차활·정삭
#90	#100	#110	#120
피어싱&노침	캡피어싱	핀웰딩	쉴드웰딩

<Fig.1 축소 재설계된 공정>

위와 같이 축소된 공정으로 생산하기 위한 금형의 신규제작에 필요한 시간 단축, 비용절감, 발생할 수 있는 잠재적 위험 요인 등을 알아보기 위해 프레스 금형 제작이 필요한 9개의 공정에 대한 성형 시뮬레이션을 실시하였으며

이를 Fig.2에 나타내었다.



<Fig.2 공정별 성형해석 결과>

## 3. 결론

본 연구에서는 기존 제작공정에서 발생하던 크랙 및 스크래치를 최소화하기 위하여 다단 판단조를 포함하여 공정 개발이 이루어졌으며, 성형공정에 대하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 그 해석결과를 통하여 공정 및 금형 설계에 대한 검증을 실시하였고, 액추에이터 하우징 부품개발의 연구자료로 활용하였다.

## [참고문헌]

- [1] K. G. Park, J. S. Lee, S. M. Jang, M. S. Joun, 2023, Elastoplastic finite element analysis of a plate forging process of a high-strength raceway bearing part, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp.158-159.
- [2] N. A. Razali, S. H. Chung, W. J. Chung, M. S. Joun, 2022, Implicit Elastoplastic Finite Element Analysis of Tube-bending with an emphasis on Springback Prediction, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol.120, pp.6377-6391, <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09073-8>.
- [3] 홍석무, 2017, 프레스 이론 및 성형해석 2017, 공주대학교

## <후기>

이 연구는 중소기업 구매조건부(구매연계형) 신제품 개발사업(과제번호: S3376142, 전기 자동차 차동장치용 Actuator Housing Assy 부품 개발)의 지원을 받아 수행함.

# Direct energy deposition 적층 공정으로 제조된 중탄소 공구강의 우수한 강도-연성 조합에 미치는 계층적 미세조직 영향

박정현<sup>1</sup>· 전민수<sup>1</sup>· 김대중<sup>2</sup>· 전종배<sup>3</sup>· 구용모<sup>4</sup>· 이기안<sup>1, #</sup>

## Effect of hierarchical microstructure on exceptional strength-ductility combination of medium-carbon tool steel manufactured by direct energy deposition

J. H. Park<sup>1</sup>, M. S. Jeon<sup>1</sup>, D. J. Kim<sup>2</sup>, J. B. Jeon<sup>3</sup>, Y. M. Koo<sup>4</sup>, K. A. Lee<sup>1, #</sup>

### Abstract

최근, 고강도 공구강 소재를 금속 적층 제조방식에 적용하여 부품으로 제조하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중 direct energy deposition (DED) 방식은 그 공정적 장점으로 인해, 금형/공구 산업에서 효율적인 공정으로써의 적용 가능성이 검토되고 있다. 그러나 탄소 함량이 높은 공구강의 경우 적층 과정 중 균열 발생으로 인해 별크 형태의 샘플 제조에 어려움이 있다. 본 연구에서는 용접봉 소재로 알려진 Gridur 6 중탄소강 소재에서 균열 형성에 영향을 미치는 탄화물 억제를 위해 C과 Cr을 감소시켰으며, 고용 강화 증대를 위해 Mn, Si 분율을 증가시켜 modified 조성 (G6#)을 설계하였다. 설계된 소재는 대기 분사(G6#1) 및 진공 분사(G6#2) 방식으로 만든 분말을 각각 적용하였으며, DED 공정으로 제조한 샘플들의 미세조직 및 기계적 특성을 조사하여 그 상관관계를 함께 규명하였다. DED G6# 샘플들은 모두 균열과 결함이 거의 없는 별크 형태로 제조되었다. G6#1 시편에서는 미세한 martensite size ( $2.35 \pm 0.66 \text{ }\mu\text{m}$ )를 나타내었으며, G6#2 시편은 G6#1에 비해 조대한 martensite size ( $3.39 \pm 1.54 \text{ }\mu\text{m}$ )를 보여주었다. PAG reconstruction map 분석 결과, G6#1 시편의 PAG는 columnar structure 형태를 나타내었으며, G6#2 시편은 equiaxed structure 형태를 나타내어 martensite 형성 도중 변형을 균일하게 수용한 것으로 확인되었다. 인장 특성 비교 결과, G6#1 소재의 인장 강도는 2333MPa, 연신율은 9.2%로 우수한 강도-연성 조합을 보여주었으며, G6#2의 인장 강도는 1834MPa, 연신율은 20.8%로 우수한 연성을 나타내었다. 상기 관찰 결과를 바탕으로 DED 적층 제조공정을 이용한 G6#1 및 G6#2 소재의 기계적 특성을 조사하고 변형, 파괴 기구를 규명하고자 하였다.

**Keywords:** Direct Energy Deposition, Medium-Carbon Tool Steel, Microstructure, Mechanical Properties

1. 인하대학교 신소재공학과, 박사 후 연구원, 대학원생, 교수

2. (주)에이엠솔루션즈, 대표이사

3. 동아대학교 신소재공학과, 교수

3. (주)창성, 이사

# 교신저자: 인하대학교 신소재공학과, 교수, E-mail: keeahn@inha.ac.kr

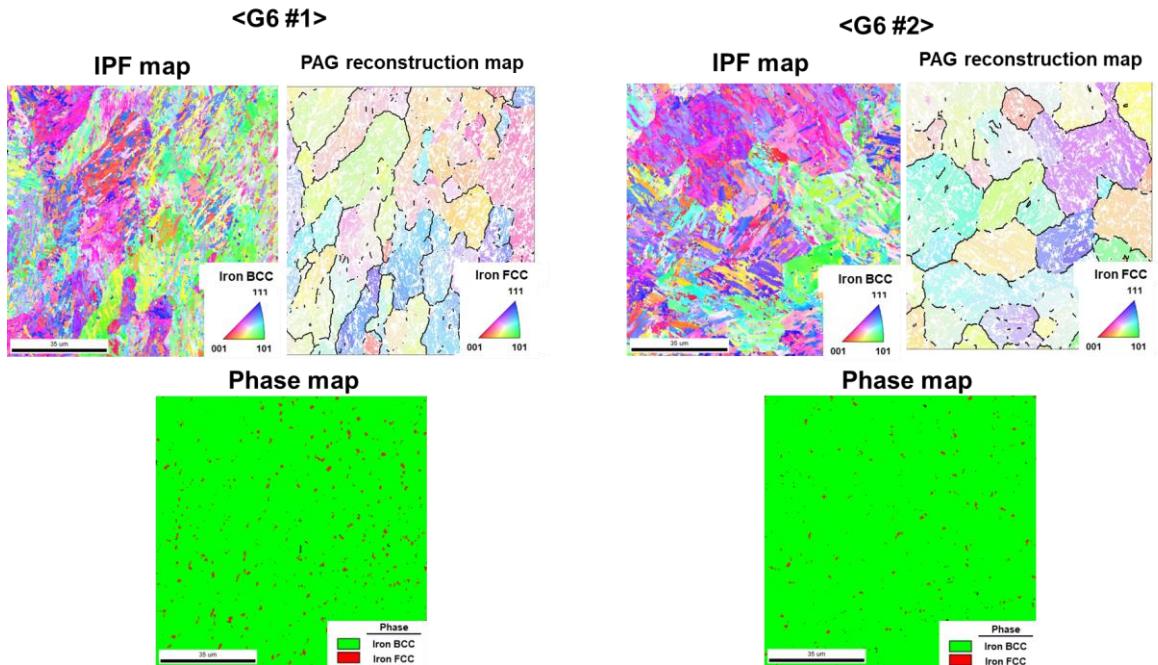


Fig. 1. EBSD image of as-built G6#1 and G6#2 sample manufactured by direct energy deposition

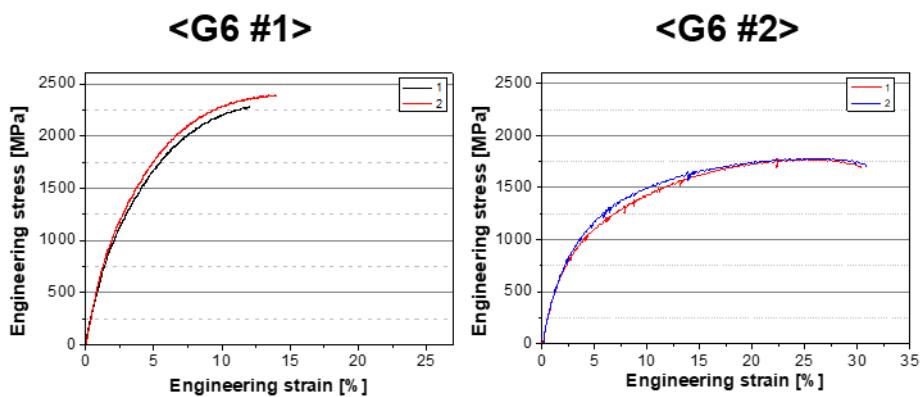


Fig. 2. Tensile stress-strain curve of as-built G6#1 and G6#2 sample manufactured by direct energy deposition

# 고내식 Ni-Cr-Mo계 합금의 고온 변형 거동 분석

조주형<sup>1</sup> · 우영윤<sup>1</sup> · 흥종화<sup>1</sup> · 윤은유<sup>1#</sup>

## Analysis of high temperature deformation behavior of high corrosion resistance Ni-Cr-Mo alloy

J. H. Cho, Y. Y. Woo, J. H. Hong, E. Y. Yoon

### Abstract

반도체의 고집적화에 따른 고부식성 가스의 사용에 따라 부식환경에 저항성을 보유한 고기능성 Ni-Cr-Mo계 니켈합금 소재에 대한 요구가 증가하고 있으며, Ni-Cr-Mo계 Hastelloy C-22 합금은 Ni 고용강화형 합금으로써 고온 및 고압 환경에서 높은 강도와 우수한 내부식성으로 인해 광범위한 산업분야에 널리 사용되고 있는 고부가가치 소재이지만, 전량 해외에 의존하여 관련 소재기술 내재화가 필요한 소재이다. Hastelloy C-22은 고온에서도 고강도의 특성을 보이는 반면, 성형성이 낮은 소재로, 적합한 소성변형 온도 및 변형량의 조건에서 소성변형을 하는 것이 소재의 특성 및 부품에 요구되는 특성과 형상을 도출할 수 있다. 최적의 조건에서의 열간 성형 공정에 따라 균일하고 미세한 미세조직을 확보하는 것이 균열이나 파단을 예방하는 데에 중요한 역할을 한다.

따라서 본 연구에서는 국내개발 Hastelloy C-22급 소재의 미세조직 연계 최적의 고온변형 조건을 도출하고자 고온변형거동을 분석했다. 고온변형거동은 고온압축실험을 통해 변형률, 온도, 변형속도를 따라 분석하였으며, 유동응력을 활용하여 Dynamic model에 따라 분산효율과, 불안정영역을 계산하고 변형 공정 지도(Deformation processing map)를 통해 Processing Window를 도출하였다. 각각의 온도, 변형률, 변형률 속도 별 고온성형 시 미세조직을 분석하였으며, DRX(동적 재결정)에 따른 결정립 미세화와 성장, 균일도를 분석했다. 분석 결과, 변형률 속도 0.01/s, 변형률 1.2 이상, 1,050°C~1,150°C에서 평균 결정립도 11.33μm로 초기 결정립도 63.6μm 대비 82.2% 감소한 미세조직을 보이고, 균일한 미세조직이 분석되어 최적의 소성 가공 조건으로 도출하였다.

**Keywords:** 미세조직 분석, 변형 공정 지도, 고온 변형 거동

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부

# 한국재료연구원 재료공정연구본부, 선임연구원, E-mail: chojooohyeong2000@naver.com

# 프레스 특성 가시화 및 형합 보정을 위한 볼스터 변형량 측정 및 시뮬레이션 연구

강희원<sup>1</sup>· 박건영<sup>1</sup>· 정정봉<sup>2</sup>· 최진영<sup>3</sup> 김동옥<sup>#</sup>

## Measurement and Simulation of Bolster Deformation for Press Characteristic Visualization and Forming Accuracy Calibration

H. W. Kang, G. Y. Park, J. B. Jung, J. Y. Choi, D. O. Kim

### Abstract

현재 자동차 차체는 대부분 금형을 이용한 프레스 공정을 통해 생산되며, 특히 후드, 도어, 트렁크 리드와 같은 외관 부품의 품질은 차량의 상품성과 직결되기 때문에 매우 중요한 관리 요소이다. 이러한 차체 외관 부품의 금형은 제작 난이도가 높아, 금형 품질 육성을 위한 반복적인 수작업 사상 가공을 거치므로 개발 기간과 비용이 많이 소모되어, 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 이러한 금형 사상 작업의 최소화를 위해, 프레스 설비의 물리적 특성을 데이터화하고 이를 기반으로 시뮬레이션을 위한 예측 시스템을 모델로 구현하고자 하였다. 이를 위해 프레스 금형 형합 정밀도에 영향을 미치는 볼스터의 탄성 변형 특성을 분석하고 이를 시뮬레이션 모델에 반영하였다. 실험에서는 프레스 볼스터 상에 일정 간격으로 변형량을 측정하는 측정 지그를 배치한 후 프레스 하중에 따른 볼스터 변형량을 변위센서를 통해 정밀하게 측정하였다. 이후 LS-DYNA를 활용한 시뮬레이션에서는 프레스 볼스터를 스프링 요소로 모델링하고, 스프링 강성 값을 변화시키며 실제 측정값과 일치할 수 있도록 볼스터 모델을 구축하였다. 본 연구를 통해 확보된 볼스터의 탄성 변형 데이터는 향후 프레스 형합 보정 및 금형 사상 공정의 자동화·지능화에 유용한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Press Characteristic Visualization, Bolster deformation, Elastic deformation, LS-DYNA

후기 이 연구는 2025년도 중소벤처기업부 및 중소기업기술정보진흥원의 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2021-TI019680)

1. 한국자동차연구원 신소재기술부문, 연구원

2. 주)신영하이테크, 이사

3. 주)신영하이테크, 매니저

# 한국자동차연구원 신소재기술부문, 책임연구원, E-mail: dokim@katech.re.kr

## 유도국부가열을 적용한 전기차 속업쇼바용 고강도 스프링시트 냉간성형에 관한 연구

권태하<sup>1</sup>· 서창희<sup>#</sup>· 전효원<sup>1</sup>· 송 확<sup>2</sup>· 김은영<sup>2</sup>· 장효정<sup>2</sup>

### A Study on Cold Forming of High Strength Spring Sheet for Electric Vehicle Shock-up Shock-bar With Induced Local Heating

T. H. Kwon, C. H. Suh, H. W. Jeon, H. Song, E. Y. Kim, H. J. Jang

#### Abstract

The spring seat of the automobile shock-up shock-bar is a part that offsets the measurement force applied to the shock-up shock-bar spring and prevents the spring from flowing, twisting or buckling by the measurement force, and requires high strength and high durability. Since electric vehicles have a heavier battery weight than internal combustion engine cars and must be responsible for a higher load than internal combustion engine cars, the spring seat of the variable shock-up shock-bar is required to be made of high-strength materials and requires a deep molding depth, so the molding difficulty is very high. In general, parts of spring sheets and chassis modules are produced by press molding using steel materials. Residual stress is generated on the broken surface and the edge portion with a rough surface when shear is performed in the first blank process. As for the broken surface and residual stress, as soon as a load is applied in the secondary process work such as forming, drawing, and bending during post-process work, cracks are easily generated on the broken surface, leading to poor molding, resulting in many problems, so it is necessary to develop a new molding technology that can solve this problem.

Therefore, in this study, a study was conducted on the method of manufacturing induced local heating that controls tissue and ductility by rapidly heating the local part using induced heating.

**Keywords :** Electric Vehicle, Induced Local Ductility Control., Induction Heating, High Strength Steel, Local Ductility

본 연구는 중소기업기술혁신개발사업(RS-2024-00421689)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

---

1. 대구기계부품연구원

2. 기승공업(주)

# 교신저자: 대구기계부품연구원, 책임. E-mail:suhch@dmi.re.kr

# 냉간압연 및 열처리에 따른 MgLi 합금의 미세조직 및 기계적 특성 연구

조유연<sup>1,2</sup>· 강민성<sup>1</sup>· 김한중<sup>1</sup>· 이현준<sup>1</sup>· 이성<sup>3</sup>· 정효태<sup>#</sup>

## A study on microstructure and mechanical properties of MgLi alloys by cold rolling and heat treatment

Y. Y. Jo, M. S. Kang, H. J. Kim, H. J. Lee, S. Lee, H. T. Jeong

### Abstract

웨어러블·모바일 기기 등 소형 IT 기기에 대한 수요와 개발이 폭등하면서 경량 소재에 대한 개발은 선택이 아닌 필수가 되어가고 있다. MgLi 합금은  $1.5 \text{ g/cm}^3$  급의 초경량 금속 구조재로, 1963년 NASA에서 처음 소개된 이래로 현재까지 알려진 금속구조용 재료 중 가장 가벼운 구조재이다. 특히 변형성이 우수한 체심입방구조(BCC)인  $\beta\text{-MgLi}$ 를 통해 상온 소성가공에 대한 연구가 다양하게 있었으나, 절대 강도가 낮은 명확한 한계점으로 인하여 최근에는  $\alpha + \beta$ 의 이상영역의 MgLi을 대상으로 합금 설계나 공정 개선 등을 통한 물성 향상에 대한 연구들이 진행되고 있다.

이 연구에서는 MgLi 합금에 대해 소성가공 및 열처리 조건을 변화시켜서 물성 향상 가능성을 판단하고자 하였다. 압하량에 따른 가공 경화량 확인을 위해 냉간압연을 진행하였고, 석출 경화량 확인을 위해 용체화 온도 아래에서 압연된 소재의 열처리를 진행하였다. 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미세조직을 확인하고, 경도 및 인장 시험을 진행함으로써 MgLi의 물성 향상 가능성을 확인하였다.

**Keywords:** lightweight material, precipitation hardening material, Rolling, Optical Microscope, SEM

---

1. 강릉원주대학교 신소재금속공학과

2. 솔루션소재

3. 하나에이엔티

# 강릉원주대학교, 신소재금속공학과, 교수, htjeong@gwnu.ac.kr

## 다이어프램 벨브용 Co계 초합금 냉간 압연재의 인장 특성 및 강화 메커니즘

송노건<sup>1</sup>, 박정현<sup>1</sup>, 최재호<sup>2</sup>, 강두홍<sup>3</sup>, 이기안<sup>1#</sup>

### Tensile Property and Strengthening Mechanism of Cold-Rolled Co-Based Materials for Diaphragm Valves

N. G. Song<sup>1</sup>, J. H. Park<sup>1</sup>, J. H. Choi<sup>2</sup>, D. H. Kang<sup>3</sup>, K. A. Lee<sup>1#</sup>

#### Abstract

다이어프램 벨브는 반도체 제조 공정에서 고순도 가스 및 화학물질의 유동을 제어하기 위해 사용되며, 내부 압력 및 작동 응력을 견딜 수 있는 변형 저항성이 요구된다. 최근에는 높은 내구성을 갖는 다이어프램 벨브의 제조를 위해 기존에 사용되었던 스테인리스 강 외에도 Co계 초합금 소재들이 제시되고 있다. 이 중 Co-Cr-Ni계와 Co-Ni-Cr계 합금들은 우수한 기계적 특성 및 내식성 조합을 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Co-Cr-Ni 계 합금인 Elgiloy와 Co-Ni-Cr 계 합금인 SPRON 510을 제조하여 사용하였다. 두 소재들에 대하여 각각 70%의 압하율의 냉간 압연을 수행하였으며, 직접 시효 열처리(Direct Aging, DA)를 적용하고 미세조직 및 기계적 특성 차이를 비교하였다. Elgiloy의 경우 as-rolled 및 DA 상태에서 공통적으로 변형 유도 마르텐사이트 변태를 통한 HCP 상이 관찰되었으며, 각각  $0.76 \pm 0.57 \mu\text{m}$ ,  $0.42 \pm 0.21 \mu\text{m}$  크기의 Mo-rich 석출물들이 관찰되었다. SPRON 510 합금의 경우 as-rolled, DA에서 모두 FCC 단일상을 나타냈으며 각각  $0.93 \pm 0.31 \mu\text{m}$ ,  $0.65 \pm 0.31 \mu\text{m}$  크기의 Mo, Nb, Ti-rich 석출물들이 확인되었다. DA 적용 후 상온 인장 시험 결과, Elgiloy 소재의 인장 강도, 항복 강도 및 연신율은 각각 2152.6 MPa, 1828.4 MPa, 0.9 %로 얻어졌으며 SPRON 510의 소재의 인장 강도, 항복 강도 및 연신율은 각각 2015.8 MPa, 1920.7 MPa, 1.6 %로 확인되었다. 상기 결과들을 바탕으로 Elgiloy 및 SPRON510 냉간 압연재의 DA 열처리 후 변형 및 파괴 기구를 규명하고자 하였다.

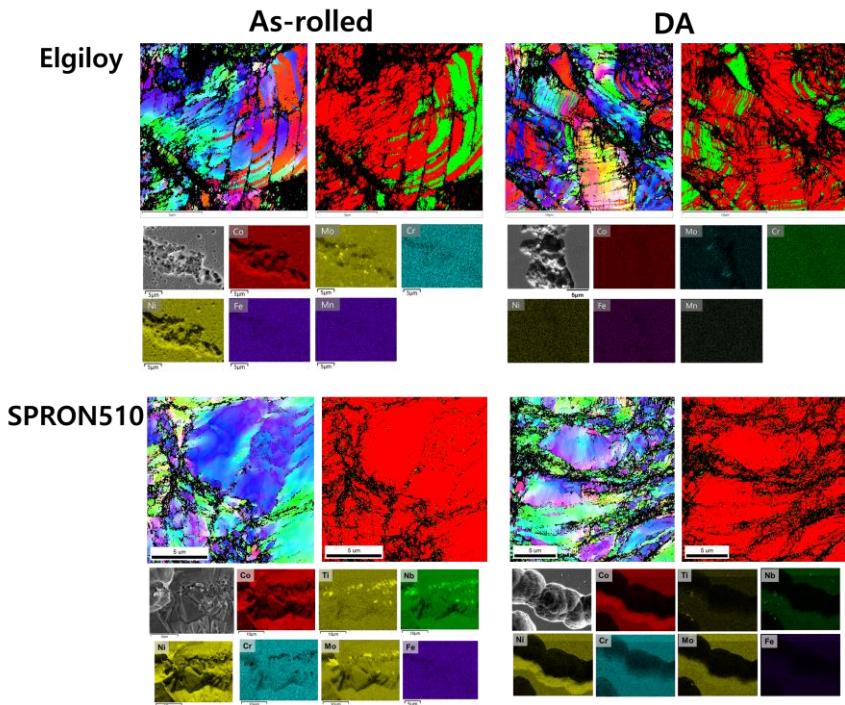
**Keywords:** Diaphragm valve, Co-Cr-Ni, Co-Ni-Cr, cold rolled, microstructure, tensile property, deformation behavior

1. 인하대학교 신소재공학과, 박사 후 연구원, 대학원생, 교수

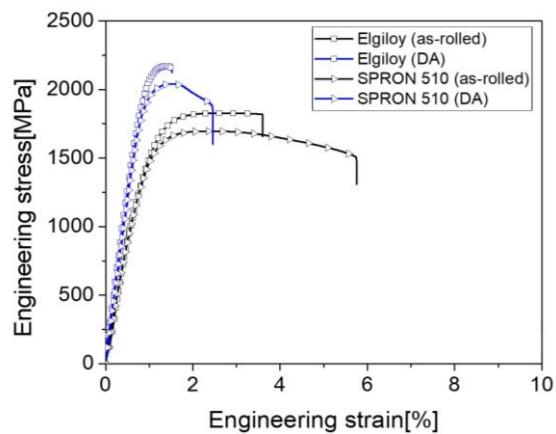
2. 주) 씨엔원, 부사장

3. 주) 아스플로, 대표이사

# 교신저자: 인하대학교 신소재공학과, 교수, E-mail: keeahn@inha.ac.kr



**Fig. 1.** EBSD/EDS mapping of initial microstructure Elgiloy and SPRON 510 Co-based superalloy materials.



**Fig. 2.** Tensile properties of Elgiloy and SPRON 510 Co-based superalloy materials in as-rolled and direct aging heat treatment conditions.

# 강화학습 적용한 SPOT 용접순서에 따른 거동분석

최현범<sup>1</sup>· 이서한<sup>1</sup>· 이정우<sup>1</sup>· 이상현<sup>#</sup>· 백승엽<sup>2</sup>· 강정길<sup>3</sup>·

## Behavior Analysis of Spot Welding Sequence through Reinforcement Learning

H. B. Choi, S. H. Lee, S. W. Lee, S. H. Lee, S. Y. Back, J. G. Kang

### Abstract

자동차 차체부품에 대한 용접 신뢰성은 경량소재 및 고강도 재질로 변경되면서 중요성이 커지고 있다. 제조현장에서는 주로 열을 이용한 용융용접을 적용하고 있으며, 이에 대한 열 변형에 대해서는 현장을 중심으로 용접 모듈의 치수변화에 대한 분석 및 개선활동이 지속적으로 추진되고 있지만, 실 개선활동까지는 현실적인 공정 및 비용 등 적용이 원활하지는 못했다.

본 연구에서는 SPOT 용접모델을 설정하여 AI를 적용하기 위한 강화학습을 반영하여 SPOT 용접순서를 도출하여 실 용접의 변형량을 비교하고자 한다. 용접모델은 선행과제를 참고하여 3차 형상으로 각 좌우로 총 6타점을 주는 조건으로 설계하였으며, 제조현장의 통전량/통전시간/가압력을 학습변수로 활용하였다. 결과는 가장 변형이 좋은 조건 (Best) 4-5-3-6-2-1, 변형이 큰 조건(Worst) 3-2-5-1-6-4로 나누어졌다. 이를 실물에서 변형량을 비교하기 위해서 강화학습 모델과 같은 조건으로 용접시험편을 제작하였으며, 3차원 스캔을 통하여 용접변형 거동을 확인하였다. 결과는 변형부분의 가장 큰 결과값을 각각 비교하면 Best 둘째 0.23mm / Worst는 처칠 -0.67mm로 나타나 강화학습으로 도출된 용접순서 적용이 부품의 변형을 감소하는 효과를 확인하였다.

본 연구는 한국산업기술평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)” 수행된 연구결과입니다.  
(RS-2024-00453431)

**Keywords:** Ultra high strength Steel, Heat deformation, Spot Welding, Reinforcement Learning

1#. (주)호원 기술연구소, 선행연구팀장 E-mail:shlee@howon.com

2. 한국자동차연구원 광주지역본부

3. 조선대학교 산학협력단

# 알루미늄 플레이트 용접부 염수침수에 따른 강도변화

최현범<sup>1</sup>· 이서한<sup>1</sup>· 이정우<sup>1</sup>· 이상현<sup>#</sup>

## Strength Change of Aluminum Plate Weld Joints for Salt Water

H. B. Choi, S. H. Lee, S. W. Lee, S. H. Lee

### Abstract

전세계적으로 친환경 자동차 모델로 배터리 팩을 동력원으로 하는 전기자동차 (Battery Electric Vehicle, BEV) 모델 출시 및 수요 증가하고 있다. 하지만, 동력원인 배터리 팩 모듈의 장착은 차체중량을 늘리는 문제로 인하여 이를 극복하고자 경량소재를 차체부품으로 적용하는 사례가 점차적으로 늘어가고 상황이다. 이러한 상황에서 경량소재 차체부품 간의 접합에 대한 연구과 검증의 필요성이 커지고 있다.

본 논문에서는 알루미늄 압출기반의 배터리 팩 냉각플레이트 제작에 적용한 레이저 / 마찰교반 용접부 대한 신뢰성 확보 및 향후, 개선을 연구하고자 염수침수 시험을 수행하였다. 시험은 KS D 9502 및 선행자료를 참고하여 7%의 염수용액에서 25°C 분위기로 96시간 동안 침수한 뒤 접합강도를 측정하여 염수침수에 노출되지 않았던 시편과의 비교하여 염수침수로 인한 알루미늄 용접부의 강도변화에 대하여 도출하였다. 염수침수시험 전의 알루미늄 레이저/마찰교반 용접강도는 각각 17.2kN 및 94kN이며 염수침수 후, 레이저 용접강도 12.1kN으로 약 30%의 강도가 저하된 결과 값이 나타났지만 마찰교반 용접강도는 116 kN으로 오히려 강도가 높게 나타났. 이는 레이저 용접인 경우, 열로 인하여 용융열로 인한 열화된 용접면으로 염수침투로 인한 변화로 보이지만, 특히, 마찰교반 용접인 경우, 고상용접으로 인하여 열화면이 없어, 염수침투의 영향이 없이 시효경화 효과로 인하여 접합부 강도 증가한 현상으로 판단된다.

본 연구는 한국산업기술평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)” 수행된 연구결과입니다.  
(RS-2024-00453431)

**Keywords:** Aluminum, LightWeight, Welding, Joint Condition, Salt water Test, Purpose Built Vehicle

---

1#. (주)호원 기술연구소, 선행연구팀장 E-mail:shlee@howon.com

# 형상 기억 고분자 소재 기반 4D 구조물의 인장–굽힘 특성 평가

김민성<sup>1</sup> · 박 근<sup>#</sup>

## Evaluation of Tensile-Bending Characteristics of 4D Structures Based on Shape Memory Polymer Materials

M. S. Kim, K. Park

### Abstract

4D 프린팅은 3D 프린팅의 개념에 시간의 요소가 결합된 기술로, 3D로 출력한 물체가 스스로 변형하여 사용자가 원하는 형태의 결과물을 만드는 기술이다. 형상 기억 고분자 (Shape Memory Polymer; SMP)는 외부 자극에 의해 변형된 상태에서 원래 형태로 돌아갈 수 있는 성질을 갖는 폴리머를 말하며 온도, 전기 등 다양한 매개체를 활용하여 원래 형상을 복구 가능하다는 특징을 가진다. 본 연구에서는 SMP 및 4D 프린팅을 활용한 4D 구조물의 유리 전이 온도에서의 인장 및 굽힘 특성을 평가하고자 한다. 다양한 구조에 대한 변형 특성을 평가하기 위해 오그제틱(Auxetic) 특성을 갖는 재진입(Re-entrant) 구조와 원형 구조, 사각 구조를 설계하였으며, 열가소성 폴리우레탄(Thermoplastic Polyurethane) 소재의 SMP를 활용하여 압출 기반 프린팅 방식(Fused Deposition Modeling; FDM)을 통해 제조하였다. 유리 전이 온도에서의 각 구조 별 인장 과정 및 형상 회복 과정이 이루어질 때의 변형률 및 형상 회복률(Recovery Ratio)를 실험적으로 도출하였다. 또한 동일 온도 조건에서 다양한 곡률을 가진 형상 및 곡률을 가지지 않는 형상에 대해 굽힘 실험을 진행하여 곡률에 대한 굽힘 변형률 및 형상 회복률을 확인하였다. 이러한 특성을 바탕으로 세 종류의 4D 구조물 중 최적의 구조물을 도출하여 다양한 곡률을 가지는 신체 여러 부위에 사용되는 웨어러블 디바이스(Wearable Device)에 적용하고자 한다.

**Keywords:** 4D printing, Shape Memory Polymer, Recovery Ratio, Re-entrant structure

---

1. 서울과학기술대학교, 기계시스템디자인공학과, 학석사통합과정

# 서울과학기술대학교, 기계시스템디자인공학과, 교수, kpark@seoultech.ac.kr

# 디지털 이미지 상관법(DIC) 기반 인장시험 시 네킹 이후 물성평가 및 해석적용

문지환<sup>1,2</sup> · 김동건<sup>1,2</sup> · 이명규<sup>3</sup> · 송정한<sup>#</sup>

## Determination of Post-necking Stress-Strain Relationship using Digital Image Correlation (DIC)

J. H. Moon, D. G. Kim, M. G. Lee, J. H. Song

### Abstract

일반적으로 유동응력곡선은 인장 시험 표준에 따라 하중-변위 데이터를 추출하고 이를 공칭 또는 진응력-변형률 데이터로 변환하여 얻을 수 있다. 그러나 최대 인장강도를 초과하는 경우, 가정된 단면적을 기반으로 한 변환 방식을 적용하는 것은 하중이 증가함에 따라 신장 형태가 균일에서 불균일로 변하기 때문에 적용하기에 한계가 있어 주로 최대응력까지의 결과를 Hollomon, Swift, Voce 등으로 외삽하여 사용한다. 본 연구에서는 이러한 네킹 이후 구간에서의 대변형 물성을 얻기 위한 방법으로 디지털 이미지 상관분석(DIC)에 기반하여 실제 시편 단면의 변화를 측정하고, 이 데이터를 사용하여 네킹 후 응력-변형률 곡선을 구축하는 방법과 미소 사이즈의 가상 신율계를 도입하여 국부적인 변형을 측정하여 계산하는 방법에 대하여 그 결과를 비교하고, 이러한 포스트 네킹 이후의 대변형 인장 물성치를 비규격 파단시편의 유한요소 해석에 적용하여 실험과 비교함으로써 그 효용성을 분석하였다.

**Keywords:** Digital Image Correlation(DIC), Virtual Extensometer, Area Reduction Method(ARM), Local Property Method(LPM), FE Simulation, Tensile Test

### Acknowledgement

이 연구는 2025년도 산업통산자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (1.5GPA급 초고강도강 대상 고강도 용접 와이어 및 초고강도 샤크 부품 개발, RS-2024-00425266)

---

1. 한국생산기술연구원 유연생산연구부문, 근로연수생

2. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

3. 서울대학교 재료공학부, 교수

# 한국생산기술연구원 유연생산연구부문, 수석연구원, Email: jhsong@kitech.re.kr

# 배터리용 알루미늄 커버 부품 프레스 성형 공정 설계 연구

김경민<sup>1,2</sup>, 이상오<sup>1,2</sup>, 임성식<sup>3</sup>, 배기현<sup>3</sup>, 노건우<sup>4</sup>, 송정한<sup>#</sup>

## Simulation-based Stamping process design of the aluminum cover plate press for EV battery

G. M. Kim, S. O. Lee, S. S. Lim, G. H. Bae, G. W. Noh, J. H. Song

### Abstract

The manufacturing of electric vehicle battery parts is a complex process that requires precise shapes using lightweight materials such as aluminum, which are difficult to form, and precise mold design is essential for efficient and high-quality parts production. In this study, analysis-based mold design was conducted to optimize the press molding process to prevent wrinkles or fractures in electric vehicle battery parts. To this end, the finite element analysis (FEA) technique was utilized to predict the peripheral strain and thickness reduction rate that may occur in the early stage of mold design, and the plastic deformation and flow characteristics of the material were modeled to change the shape of the part where cracks are expected to occur during molding, thereby improving the molding quality. In addition, a design that improves shape precision was derived through springback analysis and mold compensation based on this. Through this study, it was confirmed that the molding quality can be improved through the analysis-based mold design process for mass production of electric vehicle battery parts, and various problems that may occur during the production process can be prevented in advance. Through this battery parts press mold design, important productivity and cost reduction effects can be expected industrially.

**Keywords:** Electric Vehicle, Battery Module Component, Stamping Process, Formability, Mold Design

### Acknowledgement

이 논문은 산업통상자원부의 ‘열계면용방폭/방열세라믹캡필러소재개발사업-친환경 모빌리티·에너지 시스템용 방폭/방열 동시구현 세라믹 열계면소재부품 개발’ 중 세라믹 열계면 소재 부품이 적용된 배터리 팩의 방열/방폭 안전성·검증기술 개발 지원을 받아 연구되었음(세부과제번호 RS-2024-00420231, 과제고유 번호 2410000732)

---

1. 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소 유연생산연부문 학생연구원

2. 고려대학교 기계공학부, 대학원생

3. 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소 유연생산연부문 수석연구원

4. 고려대학교 기계공학부 부교수

# 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소 유연생산연부문 부문장, E-mail: jhsong@kitech.re.kr

# 항온변태 열처리 온도가 냉간단조용 비조질강의 성형성에 미치는 영향

안민호<sup>1,3</sup>, 이영선<sup>2</sup>, 박성혁<sup>3</sup>, 우영윤<sup>1,#</sup>

## Formability Improvement in Non-heat-treatment steel for cold forging via Isothermal Heat Treatment

M. H. An, Y.S. Lee, S.H. Park, Y. Y. Woo

### Abstract

자동차 냉간 단조 부품 분야에서 지속적으로 심화하는 지구온난화에 대응하기 위한 탄소 배출 저감 방안으로, 열처리 공정 단순화를 통한 친환경 소재 개발이 주목받고 있다. 그 중에서도 조질(Quenching & Tempering) 열처리 공정을 생략할 수 있는 비조질강(non-heat-treatment steel)은 Q/T 공정 생략과 열처리 시간을 절감할 수 있어 경제성과 환경적 측면에서 유리하다. 특히 다상 조직강은 항온 변태 열처리를 통해 항복비 제어가 가능하고, 우수한 가공경화성을 바탕으로 비조질강으로서의 적용 가능성이 높다. 다상 조직강은 인장강도 1GPa 및 연신율 20% 이상의 우수한 기계적 특성을 확보하였으나, 압축 시험에서는 성형성이 저하되는 한계가 있었다. 본 연구에서는 항복비 제어를 위한 폐라이트 분을 조절을 목적으로, Annealing 온도에 따른 미세조직 변화가 냉간 성형성과 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하였다. 이를 위해 다상조직 비조질강에 항온변태 열처리를 적용하고, 인장특성, 압축 성형성 및 미세조직 분석을 수행하였다.

**Keywords:** Non-heat-treatment-steel, Multiphase-steel, Heat treatment, Microstructure, Mechanical property

- 
1. 한국재료연구원 재료공정연구본부
  2. 한국재료연구원 극한소재 실증연구기반조성 사업단
  3. 경북대학교 첨단소재공학부

# 교신저자: 한국재료연구원 재료공정연구본부, 선임연구원, E-mail: yywoo@kims.re.kr

# 고온 박막 공정용 AlN 샤프트 및 접합 소재의 특성 평가

정준기<sup>1</sup> · 하태권<sup>2#</sup>

## Characterization of AlN Shafts and Bonding Materials for High-Temperature Thin-Film Applications

J. K. Chung, T. K. Ha

### Abstract

In this research, focuses on the localization of 650°C ultra-high temperature AlN shafts and bonding materials for CVD and PVD semiconductor processes. An optimal composition was developed to achieve low thermal conductivity, low thermal expansion, and high strength. The bonding process was also optimized to ensure reliable high-temperature joining. The final product showed excellent properties, including 89.277 W/m·K thermal conductivity and 323 MPa flexural strength.

**Keywords:** Aluminum Nitride (AlN), AlN shaft, Sintering, Thermal conductivity, Bonding material reliability

### 1. 서론

반도체 제조공정의 고집적화 및 미세화 기술이 급속도로 발전함에 따라, 박막 공정에서 사용되는 장비 및 부품의 고온 대응 능력이 요구되고 있다. 기존에 사용되던 알루미늄 금속 히터는 열팽창계수 차이로 인한 크랙, 파티클 발생 등의 문제를 유발하므로, AlN 기반 세라믹 소재의 히터 및 구성 부품이 대체재로 주목받고 있다. AlN은 열전도도, 내열성, 내식성이 우수해 고온 용 샤프트에 적합하며, 접합 안정성을 위해 동일 소재 사용이 필수적이다. 본 연구는 국산 기술로 고성능 AlN Shaft 및 본딩 소재 개발을 목표로 수행되었다.

### 2. 실험방법

본 연구에서는 AlN Shaft의 열적 · 기계적 특성을 향상시키기 위해  $Y_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$ ,  $SiO_2$  등을 첨가한 최적 조성을 개발하였다. 성형은 PVB 바인더를 0.5% 첨가한 후 냉간정수압성형 방식으로 진행하였고, 탈지 및 소결은 각각 550°C와 1900°C에서 수행하였다. 소결 후 가공 및 열처리를 통해 제품의 크랙과 변형을 최소화하였다. 또한, 히터와의 접합을 위한 본딩 소재는 입도 미세화와 조성 최적화를 통해 1650°C 조건에서 안정적으로 접합하였다.

1. 강릉원주대학교 신소재융복합연구소, 연구교수
  2. 강릉원주대학교 신소재·생명화학공학부, 교수
- # 강릉원주대학교 신소재·생명화학공학부, 교수, E-mail: tkha@gwnu.ac.kr

### 3. 결과 및 고찰

AlN Shaft 조성 실험을 통해 최적 조성을 도출하였고, 이 조성은 이론 밀도의 99%에 해당하는  $3.24\text{g/cm}^3$  의 소결밀도를 확보하였다. 과단면 주사전자현미경 분석결과 치밀한 미세구조를 나타내며 소결성이 양호한 상태를 나타내었다 (Fig. 1). 특성분석 결과 열전도도  $89.277\text{W/mk}$ , 열팽창계수  $2.98\text{ppm}/^\circ\text{C}$ , 파괴강도  $323\text{MPa}$  등을 나타내었다. 본딩 소재는  $\text{SiO}_2$  첨가량 증가 및 입도 미세화를 통해 접합성을 향상시켰으며, 최종적으로  $1650^\circ\text{C}$  접합에서 미접합 부위 없이 접합 성공, He Leak 테스트에서도 기준 이하의 성능을 나타냈다. 수명시험( $700^\circ\text{C}$ , 5일 x 9cycle)에서도 크랙 및 변색 없이 안정적인 구조를 유지하여 신뢰성을 확보하였다.

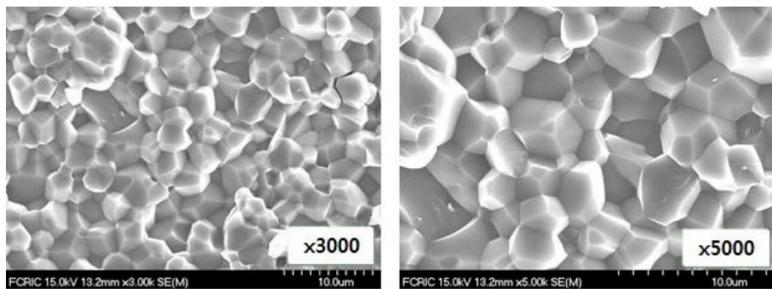


Fig. 1. SEM images of AlN sintered at  $1900^\circ\text{C}$  with additives of  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ , and  $\text{SiO}_2$

### 4. 결론

AlN 샤프트는 낮은 열전도도, 낮은 열팽창계수, 높은 기계적 강도를 동시에 만족해야 하는 고난이도 기술을 요구하는 부품으로,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  등을 최적 비율로 조합한 조성 개발을 통해 이러한 물성을 구현하였다. 또한, CIP 성형과 고온 소결 공정을 정밀하게 제어하여 크랙 및 변형 없는 고품질 샤프트 제조 기술을 확립하였다. 더불어, 히터와 샤프트간 안정적인 접합을 위한 본딩 소재 개발에서도 큰 성과를 이루었다.  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$  삼원계 기반에  $\text{SiO}_2$ 를 첨가한 조성으로 입도 미세화를 통해 접합력을 향상시켰으며,  $1650^\circ\text{C}$ 에서의 고온 열접합 공정을 통해 접합 안정성을 확보하였다.

### 참고문헌

- [1] L. Qiao, H. Zhou, H. Xue, S. Wang, 2003, Effect of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  on Low Temperature Sintering and Thermal Conductivity of AlN Ceramics, J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 23, No. 1, pp. 61~67.
- [2] K. Komeya, H. Inoue, A. Tsuge, 1981, Effect of Various Additives on Sintering of Aluminum Nitride, J. Jpn. Ceram. Soc, Vol. 89, No. 6, pp. 58~64.

# CFD 기법을 적용한 LNG 이송용 이중배관 시스템의 기화량(BOG)에 관한 연구

윤정현<sup>1</sup>· 정민근<sup>1</sup>· 박종빈<sup>1</sup>· 지서현<sup>1</sup>· 임현우<sup>1</sup>· 한정연<sup>1</sup>· 김성재<sup>#</sup>

## A Study on Boil-Off Gas Behavior in Double-Pipe LNG Transport Systems Using CFD Analysis

J. H. Yoon, M. G. Jeong, J. B. Park, S. H. Ji, H. W. Lim, J. Y. Han, S. J. Kim

### Abstract

LNG(액화천연가스) 운송 및 저장 시스템에서 기화량(Boil-Off Gas, BOG)은 중요한 설계 요소이다. BOG는 시스템 내에서 유체가 기화하면서 발생하는 가스로, 파이프의 열전달 특성과 유속에 크게 의존한다. 본 연구는 ANSYS FLUENT 2024 R2를 이용하여 이중배관 시스템에서 유속과 압력에 따른 BOG 발생량에 관한 해석 결과를 제시한다. 유속과 열전달 해석을 기반으로, 벽면 온도, 유체의 흐름, 그리고 기화잠열을 고려하여 기화량을 분석한다. 유속이 BOG 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 유동 해석을 진행하고, 열전달 모델을 적용하여 파이프 벽면에서 유체로 전달되는 열의 양을 계산한다. 파이프 내에서 유속이 증가함에 따라 기화가 증가하는 경향을 보이며, 이에 따른 기화량의 변화가 시스템에 미치는 영향을 분석한다. 본 연구는 다양한 운전 조건을 가정하고 BOG 발생량을 추정하는 방법론을 제시한다. 본 연구는 배관을 설계하기 이전에 유속, 온도, 압력과 같은 파라미터를 통해 LNG 배관 시스템에서의 기화량을 효과적으로 계산할 수 있음을 보여준다. 이 결과는 LNG 운송 및 저장 시스템의 열적 설계 시 고려해야 할 유동 조건의 중요성을 부각시킨다. 또한, 유동 해석 및 열전달 해석을 통해 최적화된 이중배관을 제작하였다.

\* 이 논문은 2025년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원을 받아 연구되었음

[No. RS-2023-00221670]

**Keywords:** Boil-Off-Gas(BOG), LNG(Liquefied Natural Gas), Double-Pipe, Evaporation Modeling, VOF(Volume Of Fluid), Numerical Simulation

---

1. 동아대학교 기계공학과

# 동아대학교 기계공학과, 교수, E-mail: sjkim641@dau.ac.kr

# Tape Cast 한 다공성 Ti 판재의 면저항 특성 분석

박민수<sup>1</sup>· 이돈희<sup>1</sup>· 이태호<sup>2</sup>· 김민지<sup>2</sup>· 박만호<sup>3</sup>· 진영민<sup>3</sup>· 장시영<sup>#</sup>

## Abstract

수전해 기반의 그린 수소 생산을 위한 Proton Exchange Membrane Electrolyzer Cell (PEMEC)은 우수한 반응 성과 빠른 시스템 응답속도로 주목받고 있다. PEMEC 시스템 중 Porous Transport Layer(PTL)은 핵심적으로 중요한 구성요소로서 다공성의 재질이 요구된다. 이에 본 연구에서는 여러 종류의 Ti 분말을 Tape cast 하여 다공성 Ti 판재를 제조한 후, 분말 조성, 판재의 두께, 표면 거칠기, 기공율에 따른 면저항을 측정하였다. 실험 결과, 분말 조성이 Grade 1, 2, 4에서 각각 4.15, 4.70, 5.32 mΩ/□로 측정되어 Grade 가 낮을수록, 판재의 두께가 0.1mm, 0.14mm, 0.2mm에서 각각 4.70, 2.70, 2.00 mΩ/□로 두께가 두꺼울수록, 기공율이 낮을수록 면저항이 감소하는 경향을 보였다. Grade1 0.1mm 시편의 표면 거칠기(Ra)가 0.133, 0.185, 0.571, 0.754 μm 일 때, 면저항이 3.77, 4.04, 4.29, 4.55 mΩ/□로 거칠기가 낮을수록 면저항이 감소하는 경향을 보였다.

**Keywords:** PEMEC, PTL(Ti Porous Sheet), Tape Casting, Sheet Resistance, Surface Roughness

## Acknowledgments

This research was supported by a grant(Project No.H2424001) from Gyeonggi Technology Development Program funded by Gyeonggi Province.

---

1. 한국항공대학교 신소재공학과, 대학원생

2. 한국항공대학교 신소재공학과, 학부생

3. 에너리치

# 한국항공대학교 신소재공학과, 교수 E-mail : sychang@kau.ac.kr

# マイクロ LED用 기판 전도성 잉크 코팅을 위한 노즐 형상 및 기판 모서리 영향 해석

박정연<sup>1</sup>·권승갑<sup>2</sup>·김지우<sup>3</sup>·강봉철<sup>4</sup>·김종수<sup>#</sup>

## Numerical Analysis of Nozzle Geometry and Substrate Edge Effects on Conductive Ink Coating for Micro LED Panel

J. Y. Park, S. G. Kwon, J. W. Kim, B. C. Kang, J. S. Kim

### Abstract

This study aims to realize uniform film formation of conductive ink (IPA + Ag 50 wt%) on substrates used in micro-LED packaging processes by quantitatively evaluating the effects of nozzle shape parameters (slope angle, effective flow channel length) and substrate edge geometry (chamfer or curvature radius) on flow behavior. The conductive ink was modeled as an incompressible Newtonian fluid, and CFD-based flow simulations were conducted to compare filling patterns, velocity distributions, and turbulence formation. The results show that a nozzle slope angle of 5° ensures flow stability, whereas edge features with a chamfer or curvature radius of 0.1 mm or more tend to induce flow stagnation and turbulence, leading to increased filling non-uniformity. These findings can serve as preliminary design guidelines for optimizing coating nozzle geometry prior to experimental verification.

**Keywords:** Conductive Ink Coating, Micro LED Packaging, Nozzle Geometry, Substrate Edge Configuration, CFD Flow Simulation

**Acknowledgment:** This research was supported by the "Machinery and Equipment Industry Technology Development Program" of the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Republic of Korea. (Project No. 00446120).

1. 한국생산기술연구원 디지털생산부문(한국금형기술센터), 선임연구원

2. 국민대학교, 기계시스템공학과, 박사과정

3. 한국생산기술연구원 디지털생산부문(한국금형기술센터), 석박사통합과정

4. 국민대학교, 기계시스템공학과, 부교수

# 한국생산기술연구원 디지털생산부문(한국금형기술센터), 수석연구원, jskimgloria@kitech.re.kr

# 고전단 영역에서 사출기 기반 점도 측정 시 과소 측정 원인 분석 및 수지별 유동 특성 비교

박정연<sup>1</sup>·손종인<sup>2</sup>·윤언경<sup>3</sup>·이준한<sup>4</sup>·손정언<sup>3</sup>·김상윤<sup>3</sup>·윤길상<sup>4#</sup>

## High Shear Viscosity Behavior of Thermoplastics in Injection-Based Rheometry: Causes of Underestimation and Material Comparison

J. Y. Park, J. I. Son, E. G. Yun, J. H. Lee, J. E. Soun, S. Y. Kim, G. S. Yoon

### Abstract

With the miniaturization and ultra-thin trend of smartphone camera module components, the melt viscosity at extremely high shear rates exceeding  $100,000 \text{ s}^{-1}$  has become a critical parameter in determining the moldability and dimensional stability of injection-molded parts with thicknesses below 0.3 mm. In this study, a custom in-mold rheometric system integrated into an injection molding machine was developed to evaluate the high-shear-rate viscosity of COC, COP, and PC-based resins for fabricating optical lens molding. The measured viscosities at equivalent shear rates were significantly lower than those obtained from conventional rotational and capillary rheometers. This discrepancy was attributed to several factors, including insufficient pressure sensor response time leading to missed peak pressures, interfacial slip behavior of nonpolar resins, thermal softening due to shear heating, unrecorded elastic stress overshoot in high-shear rate. Comparative analyzes of polarity, surface energy, contact angle, and shear stress profiles across resin types provided further insight into their distinct high-shear flow behaviors.

**Keywords:** High-shear-rate viscosity, In-mold rheometry, Optical lens molding, Polymer melt rheology, Flow instability at high shear rates

**Acknowledgment:** This research was supported by an industry-academia collaborative project between LG Innotek and the Korea Institute of Industrial Technology (Contract No. 2023220921) and by an internal project of the Korea Institute of Industrial Technology (Project No. JC230007).

1. 한국생산기술연구원 디지털 생산부문(한국금형기술센터), 선임연구원

2. 주LG이노텍, 초소형렌즈TDR, 책임연구원

3. 한국생산기술연구원 디지털 생산부문(한국금형기술센터), 기술원

4. 한국생산기술연구원 디지털 생산부문(한국금형기술센터), 포스트닥터

# 한국생산기술연구원 디지털 생산부문(한국금형기술센터), 수석연구원(부문장), seviaygs@kitech.re.kr

# 조립응력 및 결합강도를 고려한 핀 없는 케이블체인의 다 목적 최적설계

김민제<sup>1</sup> · 홍석무<sup>2,\*</sup>

## Multi-Objective Structural Optimization of a Pin-less Cable Chain Considering Assembly Stress and Joint Strength

M. Kim, S. Hong

### Abstract

최근 산업용 로봇 및 자동화 설비의 보편화에 따라 케이블체인의 수요가 증가하고 있다. 케이블체인은 반복적으로 움직이는 산업용 장비 내부에 설치되어 전선 보호와 장치 간 간접 방지, 높은 자유도 확보를 위한 기능성 구조체로 널리 사용된다. 케이블체인은 금속 핀을 삽입하여 체결하는 방식이 주로 사용되며 구조적 안정성은 확보되지만, 핀 제작 및 조립에 따른 비용과 시간이 소요되는 단점이 있다. 이로 인해 최근 핀 없이 모델 자체의 돌기 형상을 활용한 체결방식이 연구되고 있다. 그러나 이 방식은 조립 중 체결부에 응력이 집중되어 파손이 발생할 수 있으며, 결합 유지력이 기존방식 대비 낮다. 따라서 본 연구에서는 핀 없는 케이블체인의 최대 인장하중의 최대화와 조립 중 발생하는 최대등가응력의 최소화를 동시에 고려한 다목적 최적설계를 수행하고자 한다. 먼저 임의의 핀 없는 케이블체인 모델을 기반으로 구조해석을 수행한 후, 두 목적함수에 공통된 영향을 미치는 설계 변수들을 설정했다. 이후, 실험계획법 (DoE)과 민감도분석을 통해 설정한 설계 변수들 중 다중 목적함수의 주요한 영향을 미치는 핵심 변수들을 선별하였다. 이에 대한 반응표면법(RSM)을 적용하여 두 목적함수에 대한 회귀식을 도출했다. 각 회귀식에 동일한 가중치를 부여하여 하나의 통합 목적함수로 구성한 뒤 최적 설계를 수행한 결과, 기존 모델 대비 조립공정 중 응력은 감소하였으며 동시에 최대인장하중이 증가하는 개선효과를 확인하였다.

**Keywords:** Design of Experiments, Factorial Design, Equivalent Stress, Finite Element Analysis, Multi-objective Optimization

---

1. 공주대학교 스마트모빌리티공학과, 석사과정

2. 공주대학교 미래자동차공학과·그린카기술연구소, 교수

# Corresponding Author: Department of Future Automotive

Engineering, Kongju National University, E-mail:

smhong@kongju.ac.kr

# 플라스틱 씰의 형상 및 구동 조건 민감도 분석을 통한 접촉 압력 경향 연구

심형준<sup>1</sup>· 오민성<sup>1</sup>· 안수봉<sup>2</sup>· 이희장<sup>3</sup>· 홍석무<sup>4, #</sup>

## Investigation of Contact Pressure Trends through Sensitivity Analysis of Shape and Operating Conditions in Plastic Seal

H. Shim, M. Oh, S. An, H. Rhee, S. Hong

### Abstract

기계 회전체 부품에서 친환경적인 무윤활 방식의 밀폐장치(플라스틱 씰)를 사용하는 사례가 늘어나고 있다. 이러한 방식은 윤활유를 사용하지 않아 씰 내부 오염 및 누유 위험이 적고 유지 보수 비용을 절감할 수 있지만, 씰의 구동조건과 형상에 따라 씰과 샤프트 사이 접촉 압력에 차이가 발생하며 이는 밀폐력에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서 민감도 분석을 통해 플라스틱 씰의 구동조건 및 형상에 따른 씰의 접촉 압력 경향을 분석하고자 한다. 접촉 압력에 대한 민감도를 정량적으로 분석하기 위하여 유한요소해석을 진행하였다. 해석에서 2D 축대칭 조건, 씰과 샤프트 사이의 억지 끼움 접촉을 활용하여, 씰에 샤프트를 끼워 넣는 거동을 구현하였다. 또한 접촉식 3차원 측정을 통해 해석과 2.9%의 오차를 확인하여 해석 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다. 이후 외부에서 씰에 가해지는 압력, 전체 온도(하우징, 씰 그리고 샤프트), 씰 직경 그리고 씰과 샤프트 사이의 마찰계수 4가지를 설계변수로, 접촉 압력에 대한 민감도 분석을 수행하였고 마찰계수가 가장 높은 영향을 보였다. 이를 통해 씰의 접촉압력에 대한 민감도를 파악할 수 있었으며, 접촉 압력 경향을 연구하였다.

**Keywords:** Contact pressure, Finite element analysis, Friction coefficient, Plastic seal, Sensitivity analysis

---

1. 공주대학교 미래융합공학과, 석사과정

2. 씰링크 주식회사, 대리

3. 씰링크 주식회사, 회장

4. 공주대학교 미래자동차공학과·그린카기술연구소, 교수

# Corresponding Author: Department of Future Automotive Engineering,  
Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr

## 수소 장입 온도에 따른 pure Ta의 기계적 물성 및 미세조직에 관한 연구

김민호<sup>1</sup>· 흥현빈<sup>1</sup>· 조민철<sup>2</sup>· 이근호<sup>2</sup>· 박이주<sup>2</sup>· 이상엽<sup>1</sup>· 신중호<sup>3</sup>· 조훈희<sup>1, #</sup>

### Study on the mechanical properties and microstructure of pure Ta under hydrogen charging at elevated temperature

M. H. Kim, H. B. Hong, M. C. Jo, K. H. Lee, L. J. Park, S. Y. Lee , J. H. Shin , H. H. Cho

#### Abstract

본 연구에서는 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 Pure Ta 소재에서의 수소 장입에 따른 기계적 특성 및 미세구조를 분석한다. Pure Ta는 진공 분위기에서 목표온도(400~1000°C)까지 가열한 후 10torr 수소 분위기에서 1 시간 동안 유지하고, 이후 Ar 분위기에서 상온까지 냉각한다. 먼저, 수소 장입 온도에 따른 장입면과 단면 경도를 측정하기 위해 비커스(Vickers) 경도 시험을 이용한다. 소재의 장입면 경도는 600 °C 유지온도까지 경도 증가 효과가 확인되고, 그 이후 온도부터는 그 효과가 감소한다. 동일한 열처리 조건의 진공 분위기와 비교했을 때, 수소 분위기에서 더 높은 경도 값이 나타난다. X-선 회절분석기(X-ray Diffractometer)를 사용하여 각 조건별 회절 패턴을 비교한다. 모재와의 비교를 통해 수소 장입에 따른 격자팽창을 확인한다. 열 탈착 분광기(Thermal desorption spectroscopy)를 사용하여 모재와 수소를 장입한 소재의 수소 함량을 비교한다.

**Keywords:** Ta, Ta hydride, hydrogen charging, microstructure, mechanical properties

- 
1. 국립한밭대학교 신소재공학과
  2. 국방과학연구소
  3. 강릉원주대학교 신소재·생명화학공학부
- # 교신저자: 국립한밭대학교 신소재공학과, 교수  
E-mail: hhcho@hanbat.ac.kr

# 마찰교반용접 조건에 따른 Al6061의 기계적 및 미세조직 특성 분석

변성욱<sup>1</sup> · 이강찬<sup>2</sup> · 박옥조<sup>3</sup> · 홍석무<sup>4,\*</sup>

## Analysis of Mechanical and Microstructural Characteristics of Al6061 under Varying Friction Stir Welding Conditions

S. Byun, K. Lee, O. Park, S. Hong

### Abstract

현재 자동차 산업에서는 경량화를 위한 알루미늄 합금 등의 경량 재료 사용이 증가하고 있다. 이에 따라 이러한 재료를 안정적으로 접합할 수 있는 용접 기술의 중요성이 부각되고 있다. 그러나 기존의 용접들은 고온에 의해 재료의 기계적 특성 저하, 열변형과 같은 문제점이 발생 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고체상태에서의 접합이 가능한 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)이 주목받고 있다. FSW는 회전하는 도구의 마찰열과 기계적 교반을 통해 재료를 연성 상태로 만들어 접합하는 공정으로, 열적 손상이 적고 접합 품질이 높다는 장점이 있다. 따라서 본 연구는 Al6061을 대상으로 다양한 FSW 조건(이동속도 300-500 mm/min, 회전속도 800-1000 rpm)에 따른 기계적 특성 및 미세조직의 변화를 분석하였다. 인장시험 및 경도시험을 통해 기계적 특성을 평가하였으며, 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 용접부의 미세조직을 관찰하고, 조직 변화를 분석하였다. 인장시험 결과, 회전속도가 증가할수록 인장강도와 연신율이 증가하는 경향을 보였다. 특히 회전속도 1000 rpm 조건에서 우수한 기계적 특성이 나타났으며, 이 동속도는 400 mm/min 이하일 때 안정적인 접합이 이루어지는 것으로 분석된다. 본 연구를 통해 Al6061의 FSW 공정 조건에 따른 기계적 특성 변화 경향을 파악할 수 있었으며, 안정적인 접합을 위한 FSW 공정 조건 도출을 위한 기반을 마련할 수 있었다.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Al6061, Processing Conditions, Mechanical Properties, Microstructure

- 
1. 공주대학교 미래융합공학과, 대학원생
  2. 공주대학교 스마트모빌리티공학과, 대학원생
  3. 부일티에스㈜, 사장
  4. 공주대학교 미래자동차공학과·그린카기술연구소, 교수

# Corresponding Author: Department of Future Automotive Engineering,  
Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr

# 기계학습 기반 ZK60 압출재의 재결정 거동 예측

천세호<sup>1</sup>· 유진영<sup>1</sup>· 이성호<sup>1</sup>· 이태경<sup>#</sup>

## Machine Learning-Based Prediction of Recrystallization in Extruded ZK60 Alloy

S. Cheon, J. Yu, S. H. Lee, T. Lee

### Abstract

금속재료에서 재결정은 미세조직 미세화 및 기계적 성능 향상에 중요한 역할을 한다. 일반적으로 grain orientation spread(GOS) 값이 재결정 여부 판별에 활용되지만, 임계값 설정( $1\sim5\%$ )의 차이로 인해 결과의 일관성과 신뢰성이 저하될 수 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 기계학습 기반 재결정 예측 모델을 제안한다. ZK60 압출재에 대해  $400^{\circ}\text{C}$ 에서 electropulsing treatment(EPT) 및 기존 퍼니스 열처리를 각각 1분, 5분, 30분, 60분 동안 수행하였다. 특히, EPT는 압출 방향과 횡방향으로 각각 적용하여, 방향성에 따른 재결정 및 결정립 성장 특성을 반영하였다. EBSD 분석을 통해 획득한 열처리 시간, 온도, 결정립 크기, EPT 방향, 결정립 종횡비 등의 변수를 입력 데이터로 사용하여 예측 모델을 구축하였다. 이 방법은 기존 GOS 임계값 설정의 주관성을 제거하고, 다양한 열처리 조건 하에서도 재결정 및 미세조직 변화를 정량적으로 예측할 수 있게 한다. 개발된 모델은 ZK60 합금뿐만 아니라 다른 마그네슘 및 금속 합금에서 확장 적용 가능하여, 재료 설계 및 열처리 공정 최적화에 실질적인 기여가 기대된다.

**Keywords:** Machine learning, Heat treatment, Recrystallization, Grain orientation spread

---

1. 부산대학교 기계공학부, 대학원생

# 부산대학교 기계공학부, 교수, taeklee@pnu.edu

## 2D FEM과 비대칭 시편을 이용한 EPT의 열 · 비열 효과 정량적 규명

송종한<sup>1</sup> · 이승엽<sup>1</sup> · 천세호<sup>1</sup> · 유진영<sup>1</sup> · 이성호<sup>1</sup> · 박동준<sup>1</sup> · 이정훈<sup>1</sup> · 박성혁<sup>2</sup> · 이태경<sup>#</sup>

### Validating athermal contribution of electropulsing treatment via asymmetrical specimen

J. H. Song, S. Y. Lee, S. Cheon, J. Yu, S. H. Lee, D. J. Park, J. Lee, S. H. Park, T. Lee

#### Abstract

전류 펄스 인가법(Electropulsing Treatment, EPT)은 금속 소재에 전류를 펄스 형태로 인가하여 줄 가열 효과(Joule Heating Effect)에 따른 발열을 유도, 이를 통해 기존 노열처리(Furnace Heat Treatment, FHT) 대비 뛰어난 에너지 효율성과 가공성을 제공하는 공정이다. 최근 연구에서는 EPT가 단순한 열 효과(thermal effect)를 넘어 비열 효과(athermal effect) 또한 유발할 수 있음이 보고되었으나, 두 효과를 명확히 구분하여 정량적으로 분석하는 방법은 아직 정립되지 않았다. 이에 본 연구에서는 비대칭 형상의 시편을 활용하여 EPT 과정에서 나타나는 열 및 비열 효과를 정량적으로 구분·분석하는 새로운 방법을 제안하였다. 특정 부위만 전류가 통과하도록 설계한 비대칭 시편을 사용함으로써, 동일한 공정 조건 하에서도 열과 비열 효과가 동시에 작용하는 영역과 오직 열 효과만 작용하는 영역을 비교할 수 있도록 하였다. 또한, 이러한 시편 설계를 기반으로 2차원 유한요소해석(2D FEM)을 수행하여 온도 분포 및 가열 양상을 예측하고, 실험 데이터를 통해 모델을 검증하였다. 실험 결과, EPT 처리 시 특정 구간에서 전류에 의해 미세조직 변화가 촉진됨을 확인하였으며, 구체적으로는 60초 동안 EPT를 적용한 결과, 결정립 성장 약 40%p 증가, 쌍정 경계 분율 약 20%p 감소, 저각 경계 분율 약 28%p 감소라는 정량적 변화를 관찰할 수 있었다. 이를 통해 EPT 과정에서 비열 효과가 존재함을 명확히 입증하였다. 본 연구는 기존 방법의 한계를 극복하고, EPT의 열 · 비열 효과를 보다 정밀하게 분석할 수 있는 새로운 접근법을 제시하였다.

**Keywords:** EPT, Magnesium, Athermal effect, Heat treatment

1. 부산대학교 기계공학부, 대학원생

2. 경북대학교 금속재료공학과, 교수

# 부산대학교 기계공학부, 교수, E-mail: taeklee@pnu.edu

# 열처리 공정에 따른 원자력 격납용기 강재의 carbide 미세 조직 및 충격 인성 평가

박동준<sup>1</sup>, 유진영<sup>1</sup>, 천세호<sup>1</sup>, 이성호<sup>1</sup>, 송종한<sup>1</sup>, 이승엽<sup>1</sup>, 이정훈<sup>1</sup>, 이진모<sup>2</sup>, 이채훈<sup>2</sup>, 이태경<sup>1#</sup>

## Effect of Heat Treatment on the Carbide Microstructure and Impact Toughness of Steel for Nuclear Containment Vessels

D. J. Park, J. Yu, S. Cheon, S. H. Lee, J. H. Song, S. Y. Lee, J. Lee, J. M. Lee, C. H. Lee, T. Lee

### Abstract

원자력 발전소의 사용 후 연료 저장을 위한 격납용기 소재는 높은 기계적 신뢰성과 함께 저온에서도 충분한 충격 인성을 확보해야 한다. 이를 위해 다양한 열처리 공정이 적용되어 왔으나, 열처리 과정에서 석출되는 탄화물의 크기와 분율 변화가 소재의 충격 인성에 미치는 영향은 아직 명확히 규명되지 않았다. 특히, 탄화물이 임계 크기를 초과하여 석출될 경우, 미세조직 내 취약 부위를 형성해 파단 저항성을 저하시키는 문제가 보고되고 있다. 본 연구에서는 원자로 격납용기에 사용되는 SA350LF3 강재를 대상으로, quenching 횟수와 시간을 조절하여 탄화물의 특성과 충격 인성 간의 상관관계를 체계적으로 분석하였다. 세 가지 열처리 조건을 설정하고, 각각의 시편에 대해 저온 drop weight test 를 수행하여 파단 여부를 온도별로 평가하였다. 미세조직 변화는 scanning electron microscopy(SEM)와 electron backscatter diffraction(EBSD)을 통해 정량적으로 분석하였다. 또한, drop weight test, tensile test, nanoindentation 결과를 종합하여, 열처리 조건 변화에 따른 탄화물 성장 거동과 이에 따른 충격 인성 저하 메커니즘을 규명하고자 하였다. 이 연구를 통해 격납용기 강재의 열처리 최적화에 필요한 탄화물 제어 기준을 제시하고, 사용 후 연료 저장용 소재의 저온 신뢰성 확보를 위한 공정 설계 방향을 제안하였다.

**Keywords:** Carbide evolution, Impact resistance, Heat treatment, Drop-weight testing, Containment steel

---

1. 부산대학교 기계공학부, 금속설계연구실, 대학원생

2. (주)태웅, 기업부설연구소

# 부산대학교 기계공학부, 금속설계연구실, 정교수, E-mail: taeklee@pnu.edu

# 인공지능 기반 ML-DIC 이미지를 이용한 AI-합금 과대하중 시 피로균열 전파 거동 분석

김도현<sup>1</sup>, 최영원<sup>1</sup>, 좌비오<sup>1</sup>, 이승환<sup>1</sup>, 최현성<sup>1</sup>, 박현일<sup>1</sup>, 석무영<sup>1</sup>, 이동준<sup>1</sup>, 권용남<sup>1\*</sup>

## AI-Enhanced ML-DIC Imaging Analysis of Fatigue Crack Propagation Behavior in Aluminum Alloys under Overload Conditions

D. H. Kim, Y. W. Choi, Pius. Jwa, S. H. Lee, H. S. Choi, M. Y. Seok, D. J. Lee, Y. N. Kwon

### Abstract

항공기 구조재의 선택은 기체의 성능·안전·내구·경제성 전반을 좌우한다. 이 가운데 7000계 알루미늄 합금은 경량·고강도 특성과 함께 우수한 피로 수명, 내식성, 파괴 인성을 제공하여 항공우주 분야에서 핵심적으로 활용되고 있다. 손상 허용 설계 개념이 도입된 현대 항공 구조물에서는 이러한 합금의 피로 균열 전파 거동을 세밀하게 파악하는 것이 구조적 무결성을 유지하고 유지보수 전략을 최적화하는 핵심 과제가 된다. 실제 운용 환경에서 작용하는 하중은 진폭이 불규칙하게 변하는 변동하중인 경우가 많아, 균열의 초기 생성과 전파 속도를 실시간으로 감지하고 평가할 수 있는 기술이 요구된다.

본 연구는 기계 자극 시 녹색 기계발광을 발현하는 SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup> 분말과 탄소나노튜브(CNT)를 혼합해 제작한 ML-DIC 복합 필름을 응력 감지 매체로 적용하였다. ML 특성을 이용해 극한 환경에서도 균열 선단의 위치와 길이를 시각적으로 특정하고, CNT가 형성하는 무작위 패턴을 통해 디지털 이미지 상관분석(DIC)을 수행함으로써 균열 주변 변형장을 정밀 추출하였다. 이렇게 도출된 데이터로부터 균열 성장률과 응력확대계수를 정량화하고, 이어서 머신러닝 모델(CNN)을 활용해 과대하중 이후의 균열 전파 특성을 자동으로 분류·평가하는 인공지능 기반 진단 기법을 구현하였다.

제안한 ML-DIC-AI 통합 접근법은 항공 구조물의 피로 손상을 실시간으로 시각화하고, 임계 균열 도달 이전 단계에서 정확한 판단을 가능케 함으로써, 구조 건전성 모니터링 기술의 신뢰도와 유지보수 효율을 크게 향상시킬 것으로 기대된다.

**Keywords:** 항공재료, 피로균열전파, 과대하중, DIC, ML, 인공지능

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부

2. 항공우주재료실증센터, 연구원

E-mail: kimdo0405@kims.re.kr

## 금속소재의 피로 균열 치유를 위한 펄스전류 인가 공정 설계

홍법락<sup>1</sup>· 최현성<sup>2</sup>· 석무영<sup>2</sup>· 이동준<sup>2</sup>· 권용남<sup>2</sup>· 박현일<sup>#</sup>

### Process Design for Electropulsing-Assisted Healing of Fatigue Cracks in Metallic Materials

**Beom-Rak Hong, Hyunsung Choi, Moo-Young Seok, Dongjun Lee, Yongnam Kwon and Hyeonil Park**

#### Abstract

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, 스탶-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 조건에 따라 균열선단에서 출 가열(Joule heating)로 인해 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 321이며, 5mm 두께의 ASTM E-647 규격 기반 SE(B) 및 M(T) 시편을 가공하여 약 1mm 길이의 피로 균열을 생성한 후 조건 별 EPT 공정을 수행하였다. 결과적으로, 저주파 직류와 고주파 교류 전류를 각각 인가하였을 때, 소재의 열팽창과 로렌츠 힘의 영향 등을 분석할 수 있었고, EPT 공정의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구는 한국재료연구원 기관고유사업(주요사업, PNKA360)의 지원을 받아 수행되었습니다.

**Keywords:** Fatigue crack healing, Electropulsing treatment, Aerospace metallic material, Process design

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부 항공우주재료연구센터, 부산대학교 기계공학부, 학생연구원

2. 한국재료연구원 재료공정연구본부 항공우주재료연구센터, 연구원

# 한국재료연구원 재료공정연구본부 항공우주재료연구센터, 연구원, E-mail: hipark@kims.re.kr

## 열간압연 공정으로 제조된 고망간강의 바나듐 함량 및 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화 분석

양승우<sup>1</sup>, 송호정<sup>1</sup>, 박시욱<sup>2</sup>, 김용진<sup>2</sup>, 박건우<sup>3</sup>, 이동호<sup>4</sup>, 장재훈<sup>5</sup>, 전종배<sup>1,\*</sup>

### **Effect of vanadium composition and heat treatment conditions on microstructure and mechanical properties of hot-rolled high Mn steels**

S. W. Yang, H. J. Song, S. W. Park, Y. J. KIM, G. W. Park, D. H. Lee, J. H. Jang, J.B. Jeon

#### **Abstract**

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 고망간강에 바나듐을 첨가한 후 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화를 분석하였다. Kinetic 계산을 통해 석출물의 석출 시작온도 및 분율을 계산하였다. 미세조직 분석을 위해 XRD를 사용하여 안정상 형성 거동을 분석하였으며, EBSD를 사용하여 결정립의 형상 및 재결정 분율 등을 분석하였다. 기계적 물성 분석을 위해 인장시험을 통해 항복강도, 연신율을 분석하였으며, 충격시험을 통해 충격인성을 분석하였다. 파단면과 표면은 OM과 SEM을 이용하여 분석을 진행해 파괴기구를 해석하였다. 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서는 고망간강의 바나듐 함량 및 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성의 변화에 대해 고찰하였다.

**Keywords:** High Mn steel, Carbon, Vanadium, Mechanical property, Heat treatment effect

- 
1. 동아대학교 금속공학과, 대학원생
  2. 국방과학연구소, 선임연구원
  3. 울산과학기술원 신소재공학과, 대학원생
  4. 포스코 기술연구원, 책임연구원
  5. 한국재료연구원 재료정밀분석실, 책임연구원

# 교신저자의 소속, 부서, 직위, E-mail: 동아대학교, 신소재공학과, 부교수, jbjeon@dau.ac.kr

# 타이타늄 합금 판재의 확산접합/부풀림 성형을 통한 샌드위치 구조체의 제조 및 기계적 특성 연구

반승현<sup>1</sup>· 최현성<sup>2</sup>· 박현일<sup>2</sup>· 석무영<sup>2</sup>· 권용남<sup>2</sup>· 이동준<sup>#</sup>

## Fabrication and Mechanical Characterization of Titanium Alloy Sheet-Based Sandwich Structures via Diffusion Bonding and Blow Forming

Seung-hyeon Ban, Hyunsung Choi, Hyeonil Park, Moo-Young Seok, Yongnam Kwon, Dongjun Lee

### Abstract

최근 한국형 초음속 전투기(KF-21) 개발 성공과 경공격기(FA-50)의 폴란드 수출에 힘입어 국내 항공산업 분야 민간 기업들의 항공용 소재 및 부품 제조공정 기술에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 글로벌 항공기 산업시장에서의 경쟁력을 갖기 위해 항공기 엔진 국산화를 위한 노력도 지속해서 이뤄지고 있다. 타이타늄 합금은 높은 비강도, 우수한 피로특성 및 내열성을 바탕으로 니켈계 합금과 함께 항공기 엔진 팬 블레이드에 널리 사용되는 대표적인 소재이다. 항공기 엔진 팬 블레이드는 냉각 성능 향상과 경량화, 구조 강성 향상을 위해 부품 내부에 샌드위치 구조가 주로 적용된다. 타이타늄 합금의 초소성 특성을 이용하여 확산접합과 부풀림 공정을 이용하여 엔진 팬 블레이드를 제작할 수 있다. 본 연구에서는 확산접합과 부풀림 성형 공정을 이용하여 엔진 팬 블레이드와 유사한 성형품을 제작하고 기계적 물성을 평가하였다. 2장 또는 3장의 판재를 확산접합한 후, 다양한 형상의 부풀림 성형을 적용하여 내부 레이어를 가진 샌드위치 구조의 팬 블레이드를 제작하였다. 시제품의 공정변수에 따른 접합부 미세조직, 접합률 및 기계적 특성을 분석하였다. 확산접합 및 부풀림 성형 공정을 통해 높은 기계적 강도와 내부 보강구조를 동시에 갖춘 샌드위치 구조체의 제조 가능성을 확인하였다.

**Keywords:** Titanium alloy, Diffusion bonding, Blow forming, Sandwich structure

---

1. 한국재료연구원 항공우주재료실증센터, 학생연구원

2. 한국재료연구원 항공우주재료실증센터, 선임연구원

# 한국재료연구원 항공우주재료실증센터, 선임연구원, E-mail: djlee@kims.re.kr

# 고체냉각소재 La-Fe-Co-Si 합금의 열간 변형 거동 및 자기 열량 특성 분석

양선영<sup>1</sup>· 김민직<sup>1</sup>· 양우석<sup>1</sup>· 김정한<sup>2</sup>· 이광석<sup>1</sup>· 신다슬<sup>1, #</sup>

## Analysis of Hot Deformation Behavior and Magnetocaloric Properties of La-Fe-Co-Si Alloys

S. Y. Yang, M. J. Kim, W. S. Yang, J. H. Kim, D. S. Shin

### Abstract

La-Fe-Co-Si 합금은 상온 부근에서의 자기 열량 효과(Magnetocaloric effect), 작은 히스테리시스(Hysteresis), 비유독성 구성 원소를 바탕으로 친환경 냉각 기술인 자기 냉각 소재로서 많은 관심을 받고 있다. 자기 냉각 장치에서 열전달 효율을 향상시키기 위해 소재 및 유체 간에 노출되는 면적이 넓어야 하며, 이에 따라 판재 및 와이어 형태로의 소재 성형 기술 개발이 필수적이다. 그러나 고체 냉각 소재의 고유한 취성으로 인해 원하는 형상으로 가공할 수 있는 변형 공정에서의 한계가 있다.

본 연구에서는 La-Fe-Co-Si 합금의 고온 변형 메커니즘을 분석하여 열간 압연 공정을 통해 약 1.57 mm 두께의 La-Fe-Co-Si 기반 판재를 제작하였다. 열역학을 기반으로 조성에 따른 상태도를 작성하여  $\text{La}(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Si})_{13}$  (1:13) 상이 최대화될 수 있는 조성으로 설계를 진행하였다. 또한, 성형성을 평가하기 위해 나노인덴테이션 및 열간/냉간 단조 공정을 포함한 다중 스케일 특성을 체계적으로 분석하였으며, 이를 기반으로 열간 압연 공정을 진행하여 약 67%의 압축률을 달성하였다. 열간 압연 이후 미세조직 내 1:13 상 내 조성 변화 및 미세조직적 결함 등에 따른 자기 열량 특성이 저하를 확인하였다. 자기 열량 특성을 회복하기 위해 다단계 열처리 공정을 도입하여 미세조직 재구성을 통해 향상된 자기 열량 특성을 확보하였다.

**Keywords:** La-Fe-Co-Si alloy, Magnetocaloric effect, Hot rolling process, Multi-step heat treatment

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부, 연구원

2. 국립한밭대학교 신소재공학과, 교수

# 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 선임연구원, E-mail: daseulshin@kims.re.kr

# Artificial Intelligence-Based Analysis of Fatigue Crack Propagation in Aluminum Alloys Using ML-DIC Images

**Y. W. Choi<sup>1</sup>, Pius Jwa, D. H. Kim<sup>1</sup>, Y. W. Shin<sup>1</sup>, S. H. Lee<sup>2</sup>, H. S. Choi<sup>2</sup>, H. I. Park<sup>2</sup>, M. Y. Seok<sup>2</sup>, D. J. Lee<sup>2</sup>, Y. N. Kwon<sup>#</sup>**

## Abstract

The materials used in aircraft structures are crucial for maintaining both the safety and performance of the aircraft, requiring strict compliance with essential criteria such as strength, weight optimization, durability, and resistance to internal environmental conditions.

Common structural materials used in aircraft manufacturing include titanium alloys, composite materials, special alloys, and aluminum alloys. Among them, 7xxx-series aluminum alloys are widely utilized in the aerospace industry due to their exceptional strength-to-weight ratio, superior fatigue life, outstanding corrosion resistance, stress corrosion cracking resistance, and high fracture toughness.

In aerospace structures made from aluminum alloys, a deep understanding of fatigue crack propagation characteristics is essential, based on damage-tolerant design principles. This understanding is a critical component in evaluating and enhancing structural integrity, providing the foundation for fatigue damage analysis and assessment.

ML-CNT films, composed of mechanoluminescent (ML) materials, are engineered to emit light in response to mechanical forces such as tension, compression, shear, and vibration. The intensity of this luminescence is directly proportional to the applied stress and the resulting material deformation, allowing for precise detection of crack tips and lengths. Additionally, the incorporation of carbon nanotubes (CNTs) within these films replicates the speckle patterns used in digital image correlation (DIC) techniques, enhancing the application of advanced DIC methodologies.

This study introduces an innovative approach to the safety diagnostic evaluation of structural components by leveraging ML-CNT films in fatigue crack propagation tests. Through this method, we aim to precisely estimate  $\Delta K$  values associated with fatigue cracks, thereby enhancing predictive maintenance strategies for aerospace structures.

Artificial intelligence plays a crucial role in detecting, monitoring, and predicting fatigue cracks. In particular, machine learning algorithms excel at identifying patterns within large datasets and constructing predictive models. In this research, we utilize stress and strain visualization data obtained from ML and DIC imaging techniques to develop an automated model for predicting  $\Delta K$  values and fatigue crack growth rates. This approach not only facilitates early detection and prognosis of fatigue cracks in the aerospace sector, contributing to accident prevention and improved safety, but also reduces maintenance costs and enhances

the operational efficiency of aircraft.

**Keywords:** Mechano Luminescence, Aluminum Alloys, Digital Image Correlation (DIC), Fatigue crack propagation, Artificial Intelligence (AI)

- 
1. 한국재료연구원 경북대학교 나노신소재공학과, 대학원생
  2. 한국재료연구원, 항공우주재료실증센터, 선임연구원
- # 한국재료연구원, 항공우주재료실증센터, 책임연구원,  
E-mail: kyn1740@kims.re.kr

# 롤 라미네이션 공정 조건에 따른 장길이 연성회로기판의 충진 특성 분석

이찬우<sup>1,2</sup>, 곽은지<sup>1,2</sup>, 최두선<sup>1</sup>, 한준세<sup>1,2, #</sup>

## Analysis of filling characteristics in long-length flexible printed circuit boards based on roll lamination process parameters

C. W. Lee<sup>1,2</sup>, E. J. Gwak<sup>1,2</sup>, D. S. Choi<sup>1</sup>, J. S. Han<sup>1,2, #</sup>

### Abstract

연성 인쇄 회로 기판 (Flexible printed circuit board, FPCB)은 전자 부품 간의 전기적 연결을 제공하는 유연한 구조물로, 모바일 기기, 자동차 전장 시스템 등 다양한 산업 분야에 널리 활용되고 있다. 특히 최근 전기차산업에서는 차량 경량화와 공간 최적화 요구가 증가함에 따라, 기존의 와이어 하네스 (wire harness)를 대체할 수 있는 솔루션으로서 FPCB에 대한 관심이 커지고 있다. FPCB는 일반적으로 시트 프레스 방식으로 구리 도체층이 포함된 연성 회로 기판과 이를 보호하는 커버레이이 필름을 접합하여 제작된다. 본 연구에서는 와이어 하네스를 대체하기 위해서는 장길이의 FPCB가 요구됨에 따라 대면적 및 연속 생산이 가능한 롤투롤 기반 롤 라미네이팅 공정을 개발하였으며, 이를 통해 공정 확장성과 생산 효율을 동시에 확보하고자 하였다. 특히, 롤 라미네이팅 공정에 사용되는 커버레이이 접착제의 유연학적 및 열적 특성을 분석하여 이를 공정에 적용하였으며, 다양한 구리 회로 폭 조건 하에서 공정 변수 (압력, 온도, 속도 등)에 따른 충진 거동 변화를 정량적으로 평가하였다. 이를 통해 개발된 롤 라미네이팅 기반 FPCB의 충진 성능은 기존 시트 프레스 방식과 동등한 수준을 나타내었으며, 이는 신뢰성을 확보함과 동시에 연속 생산을 위한 확장 가능성을 입증하였다.

**Keywords:** Flexible printed circuit board, electric vehicle, roll lamination, encapsulation

이 논문은 2023년도 산업통상자원부의 ‘기계장비산업기술개발사업’의 지원을 받아 연구되었음(No. 20023932)

---

1. 한국기계연구원 나노리소그래피연구센터

2. 과학기술연합대학원대학교

# E-mail: jshan@kimm.re.kr

# 열간압연강에서 형성된 산화물 스케일의 잔류 응력 수치 분석을 위한 준해석적 방법 개발

전웅제<sup>1,\*</sup> 윤지강<sup>1,\*</sup> 이재민<sup>2</sup> 김선호<sup>1</sup> 김영천<sup>3</sup> 남승훈<sup>4</sup> 이명규<sup>5,#1</sup> 노우람<sup>6,#2</sup>

## A Semi-Analytical Approach for Numerical Analysis of Residual Stress in Oxide Scale Grown on Hot-Rolled Steels

**Y.-J. Jun, J.-G. Yoon, J.-M. Lee, S.-H. Kim, Y.-C. Kim, S. Nam, M.-G. Lee, W. Noh**

### Abstract

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.

**Keywords:** Semi-Analytical Method, Residual Stress, Oxide Scale Growth, Thermal Expansion, Hot-Rolled Steel

- 
1. 국립경국대학교 반도체·신소재공학과, 석사 과정
  2. 현대제철 전기로공정기술팀, 책임매니저
  3. 국립경국대학교 반도체·신소재공학과, 부교수
  4. 명지대학교 신소재공학과, 부교수
  5. 서울대학교 재료공학부, 교수
  6. 국립경국대학교 반도체·신소재공학과, 조교수

\* These authors contributed equally to this work.

#1 Corresponding Author : Seoul National University, Department of Materials Science and Engineering, E-mail : myounglee@snu.ac.kr ORCID : 0000-0001-5870-0737

#2 Corresponding Author : Andong National University, Department of Materials Science and Engineering E-mail : wnoh@anu.ac.kr ORCID : 0000-0002-0969-6441

# LZ91 합금의 냉간 압연 시 미세조직 변화에 대한 연구

서위걸<sup>1</sup> · 고경민<sup>1</sup> · 이은세<sup>1</sup> · Khushahal Thool<sup>1</sup> · 최시훈<sup>#</sup>

## A Study on the Microstructural Evolution of LZ91 Alloy during Cold Rolling

W. G. Seo, K. M. Ko, E. S. Lee, K. Thool, S. H. Choi

### Abstract

마그네슘 합금은 초경량 구조재료로서 구조용 금속중 가장 가벼운 금속으로, 높은 비강도를 가져 전자기기 및 자동차 부품 등에 적용되고 있다. LZ91 합금은 마그네슘에 밀도가 낮은 리튬을 첨가하여 플라스틱에 가까운 밀도를 가지며, 뛰어난 가공성으로 인해 냉간 가공이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 낮은 기계적 특성을 가지고 있기 때문에 기계적 특성을 향상하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 열간 압연된 LZ91 시편에 대해 초기 미세조직을 분석하기 위해서 SEM 및 EBSD를 활용하였고, RD(rolling direction)과 TD(transverse direction)에 대해 압축 시험을 실시하였다. 이후 냉간 압연을 통해 20, 40, 60와 80% 압하율 별로 미세조직의 변화를 SEM과 EBSD를 통해서 분석하였으며, 기계적 특성의 변화를 분석하기 위해서 인장 시험 및 비커스 경도 시험을 수행하였다. 이를 바탕으로 미세조직 변화와 기계적 특성 간의 상관관계를 분석하고 향후 항복강도 및 인장강도를 높이기 위한 연구의 기초를 마련하고자 한다.

**Keywords:** LZ91, Cold rolling, Microstructure, Compression, Hardness

---

1. 국립순천대학교 첨단부품소재공학과, 대학원생

# 국립순천대학교, 첨단부품소재공학과, 교수, E-mail: shihoon@s.scnu.ac.kr

# 쇼트피닝 처리된 알루미늄 합금의 피로 하중 중 잔류 응력 이완 및 균열 성장 거동 분석

조윤지<sup>1</sup>· 이승환<sup>1</sup>· 최현성<sup>1</sup>· 박현일<sup>1</sup>· 석무영<sup>1</sup>· 권용남<sup>1</sup>· 권준범<sup>2</sup>· 홍종화<sup>#</sup>· 이동준<sup>#</sup>

## Compressive residual stress relaxation and crack propagation behavior under cyclic loading in Shot-Peened Aluminum alloy

Y.J. Cho, S.H. Lee, H.S. Choi, H.I. Park, M.Y. Seok, Y.N. Kwon, J.H. Hong, D.J. Lee

### Abstract

Compressive residual stress plays a critical role in delaying fatigue crack propagation (FCP) by reducing the effective tensile stress at the crack tip. However, under cyclic loading, residual stress progressively relaxes and redistributes due to the accumulation of plastic deformation—an effect that has not been sufficiently addressed in many conventional analyses. Traditional approaches that treat residual stress as a static average or initial condition fall short in capturing the dynamic nature of stress fields during fatigue. To address this limitation, fatigue crack propagation (FCP) tests, high-cycle fatigue (HCF) experiments, and digital image correlation (DIC) analysis were conducted on shot-peened Al2124-T851 specimens. The HCF results revealed that residual stress relaxation becomes significant at applied stress levels exceeding 70% of the yield strength, leading to the formulation of a nonlinear empirical model correlating stress ratio with residual stress reduction. Strain fields near the crack tip, measured via DIC, were converted into externally applied stress fields ( $\sigma_{\text{applied}}$ ) using uniaxial elasticity assumptions. These were then combined with the redistributed residual stress fields ( $\sigma_{\text{RS}}$ ) to construct the effective stress field ( $\sigma_{\text{effective}}$ ). The resulting  $\sigma_{\text{effective}}$  distribution demonstrated a reduction in stress concentration and plastic zone size, contributing to delayed crack opening and slower crack growth. This study proposes an integrated modeling framework that incorporates residual stress relaxation and dynamic stress field interactions, offering a practical and physically meaningful method to analyze fatigue crack behavior under cyclic loading.

**Keywords:** Residual stress relaxation, Fatigue crack propagation, Al alloy, Shot peening

1. 한국재료연구원 항공우주재료실증센터

2. 한국재료연구원 재료분석센터

# 교신저자의 소속, 부서, 직위, E-mail: 한국재료연구원 djlee@kims.re.kr / jhong@kims.re.kr

# PMMA 진공 성형에서 두께 균등성을 위한 변형 거동 분석

백민재, 신윤우, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 김덕성, 정대호, 송민환, 정유인, 최현성

## Analysis of deformation behavior for thickness uniformity in PMMA vacuum forming

### Abstract

폴리메틸메타크릴레이트(PMMA)는 항공기 캐노피와 각종 투명 구조물에 자주 사용되며, 진공 성형 기법을 통해 다양한 부품으로 제작된다. 본 연구는 PMMA의 고온 진공 성형 시 성형 속도와 변형 양상이 두께 균일도에 미치는 영향을 중점적으로 다루었다. 먼저, 크리프와 소성 변형을 명확히 구분하기 위해 시편 단위의 크리프 실험과 고온 인장 시험을 진행하였다. 크리프 실험은 일정한 온도와 하중 하에서 시간에 따른 변형률을 측정하여 크리프 곡선을 얻고, 변형 거동을 분석하였다. 소성 변형의 경우, 상온 및 고온 인장 시험을 통해 항복 강도와 연신율의 변화를 비교하고, 각 실험에서 계이지부의 두께 변화를 정량적으로 평가하였다. 두께 균일성 분석을 위해 직사각형 부품을 진공 성형하였고, 온도와 성형 속도를 주요 인자로 다양한 조건에서 실험을 수행하였다. 성형 후 두께와 표면 투과도를 측정하고, 가교도 분석을 통해 크리프 및 소성 변형의 차이를 평가하였다. 또한, 성형 속도와 온도 변화가 내부 구조에 미치는 영향을 분석하고, 소재의 안정성을 종합적으로 검토하였다.

**Keywords:** PMMA, 진공 성형, 두께 균일성, creep 변형, 소성 변형, 고온 인장 시험, 가교도

# 다상조직강의 충격 특성 개선을 위한 열처리 공정 최적화

김상현<sup>1</sup>· 윤은유<sup>1</sup>· 이영선<sup>1</sup>· 우영윤<sup>1, #</sup>

## Optimization of heat treatment process for improving the impact properties of multiphase steel

S. H. Kim<sup>1</sup>, E. Y. Yoon<sup>1</sup>, Y. S. Lee<sup>1</sup>, Y. Y. Woo<sup>1, #</sup>

### Abstract

탄소 중립에 대한 요구가 강화됨에 따라, 자동차 부품 산업에서는 제조 공정의 간소화와 동시에 기계적 성능을 향상시킬 수 있는 고효율 소재의 개발이 중요해지고 있다. 다상조직강은 낮은 항복비와 우수한 가공경화 성능을 통해 열처리 단계를 간소화할 수 있어 탄소 저감형 자동차 소재로 주목받고 있다. 그러나 부적절한 열처리 조건은 마르텐사이트의 과다 형성을 유도하여 소재의 취성을 증가시키고, 이에 따라 소성 가공성과 충격 저항성이 저하되는 문제가 발생한다. 특히 충격 특성이 중요시되는 자동차 부품 설계에서는 이러한 문제의 해결이 필수적이다.

본 연구는 다상조직강의 충격 특성을 개선하기 위해 마르텐사이트 분율을 제어할 수 있는 열처리 공정 조건을 최적화하였다. 0.25C-1.5Mn-1.5Si 조성을 가진 탄소강을 사용하여 2단 연속 열처리 조건에 따라 시편들을 제조하였고, 미세조직 관찰을 통해 다상조직의 형성을 확인하였다. 또한, 상온 인장시험과 샤르피 충격시험을 통해 각 조건에 따른 기계적 특성을 평가하고, 충격시험 시편 표면의 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 연성 및 취성 파괴 거동의 차이를 정량적으로 비교하였다.

**Keywords:** Multiphase steel, Heat treatment, Mechanical properties, Microstructure

---

1. 한국재료연구원

# 교신저자: 한국재료연구원, 선임연구원 Email: yywoo@kims.re.kr

# 열처리형 알루미늄 합금 2014 및 6061의 이축교번단조 비교: 미세조직과 기계적 거동

하성호<sup>1</sup>·신영철<sup>1#</sup>

## Biaxial Alternate Forging of Heat-Treatable Aluminum Alloys 2014 and 6061: A Comparative Study on Microstructure and Mechanical Behavior

S. H. Ha, Y. C. Shin

### Abstract

6061 과 2014 알루미늄 합금은 각각 범용성과 고강도를 특징으로 하는 대표적인 열처리형 알루미늄 합금으로, 항공·자동차·정밀구조재 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용된다. 이들 합금은 모두 열처리를 통해 석출강화가 가능하지만, 합금 조성에 따라 변형 거동, 연성, 조직 안정성에서 뚜렷한 차이를 보인다. 이축 교번단조(biaxial alternate forging, BAF)는 시편을 90 도로 교차 회전시키며 반복 단조하는 공정으로, 상대적으로 낮은 온도에서도 높은 누적 변형을 유도 할 수 있으며, 정밀 제어된 변형장 안에서 재료의 기계적 성능과 미세조직 변화를 동시에 유도 할 수 있는 장점을 지닌다. 기존의 압출·압축 시험 대비 반복성과 변형 제어성이 뛰어나, 고강도 합금의 극한 성형 및 조직 제어 연구에 적합한 공정으로 고려된다. 본 연구는 동일한 BAF 조건 하에서 열처리형 알루미늄 합금인 6061 과 2014-T6 의 미세조직 및 기계적 특성 변화를 비교·분석하는 것을 목적으로 하였다. 두 합금 모두 최대 8 패스까지 BAF 를 적용하였으며, 유한요소 해석, 인장 시험, 조직분석을 병행하여 변형률을 축적, 전위 밀도 변화, 쌍정 및 석출물 거동 등을 정량적으로 평가하였다. 그 결과, 2014-T6 합금은 4 패스에서 최대 약 356%의 유효 변형률이 중심부에 집중되었고, Q', Θ' 석출물의 집적과 고밀도 전위 클러스터 형성이 관찰되었다. 반면, 6061 합금은 8 패스까지 안정적인 단조가 가능하였으며, 쌍정 및 전위 밀도 증가에 기반한 강도 향상이 나타났고, 재결정 현상 없이 미세조직 안정성을 유지하였다. 이로써 BAF 공정으로 고강도 열처리형 알루미늄 합금에 대해 효과적인 미세조직 제어 및 기계적 성능 향상이 가능하였음을 확인하였다.

**Keywords:** Biaxial Alternate Forging, Heat-Treatable Aluminum Alloys, Severe Plastic Deformation

1. 한국생산기술연구원, 수석연구원

# 한국생산기술연구원, 유연생산연구부문, 수석연구원, E-mail:  
ycshin@kitech.re.kr

## 9. 일반 구두 발표 / 특별 세션 6

박판성형

플라스틱 성형 공정에서의  
디지털트윈/시뮬레이션 최신 동향

( 제 3 발표회장 )

# 46mm 직경 철강재 원통형 이차전지 용기 성형 시험용 딥-드로잉 금형 개발과 이를 활용한 성형 특성 연구

박기철<sup>1#</sup>, 안강환<sup>1</sup>

## Deep Drawing Tool Design and Forming Study of Steel Cylindrical Secondary Battery Case with 46mm Diameter.

K. C. Park, K. Ahn

### Abstract

최근 46mm 직경 원통형 이차전지가 활발하게 개발되고 있다. 여기에 사용되는 철강재 케이스의 가공 조건 및 소재 특성 변경이 성형성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 46mm 직경에 약 88mm 높이 용기를 6단계 딥-드로잉 가공으로 성형하는 금형을 개발하였다. 사용하는 소재는 Ni 도금 냉연강판이다. 0.8mm 두께 소재로 성형하는 경우는 용기 벽 부분 두께 0.45mm를 목표로 하였고 0.6mm 소재를 사용하는 경우는 벽 두께 0.40mm를 목표로 하였다. 금형은 먼저 0.8mm 두께 소재용으로 제작하여 시험 제작한 용기가 일반적인 이차전지 용기에서 허용 가능한 벽 두께 편차와 진원도를 만족하는 수준으로 성형 가능함을 확인하였고 이후에 그 제작 경험을 활용하여 0.6t 용 금형을 다이 insert 와 편치만을 기존 금형에서 교체하는 방법으로 금형 trial 을 거쳐 제작하였다. 금형은 당초 축 대칭 성형해석으로 금형을 설계하였으나 실제 금형 제작 중 trial 과정에서 상당 부분 수정되어 당초 설계한 금형 형상과는 다소 차이가 있었다. 금형 trial 과정을 거쳐서 금형과 가공 조건을 조정하여 허용 가능한 수준의 케이스를 만들 수 있었다. 그리고 6단계 딥-드로잉 성형 중 편치에 작용하는 성형하중을 측정할 수 있는 기술을 금형에 반영하였다. 개발 금형을 이용하여 소재 특성, 마찰특성, 블랭크 크기 등이 용기 성형성에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였고 그 결과를 소개한다. 본 개발 금형을 활용하여 다양한 철강 소재의 기계적 특성 및 도금특성이 46mm 직경 원통형 이차전지 케이스 성형특성에 미치는 영향을 연구하여 고객사의 최적 소재 적용을 기술적으로 지원하는 데 활용하고 있다.

**Keywords:** Multi-Stage Deep Drawing, Ni Coated Steel Sheet, 46mm Diameter Cylindrical Battery Case

---

1. (주)포스코 철강솔루션연구소 성형연구그룹

# (주)포스코 철강솔루션연구소 성형연구그룹, E-mail: parkkc@posco.com

# 통합 인공 신경망 평가 함수를 활용한 다단 딥 드로잉 공정 설계 최적화

한성식<sup>1</sup>· 김홍규<sup>#</sup>

## Optimal design of multistage deep drawing process using an integrated artificial neural network evaluation function

S. S. Han, H. K. Kim

### Abstract

이 연구는 회귀 및 분류 인공 신경망 모델을 사용해 개발한 통합 다단 딥 드로잉 평가 함수를 통해 새로운 다단 딥 드로잉 최적화 방법을 제안하였다. 블랭크 물성, 블랭크 형상 그리고 공정 설계 변수를 사용하여 수행된 FE 시뮬레이션을 통해 다단 딥 드로잉 데이터베이스가 구축되었다. 구축된 데이터베이스를 사용해 각 성형 단수마다 성형 결과를 예측할 수 있는 분류 및 회귀 인공 신경망 모델들이 개발되었다. 개발된 인공 신경망 모델을 다단 딥 드로잉 공정 최적화에 적용하기 위해 통합 다단 딥 드로잉 평가 함수가 개발되었다. 이 함수는 주어진 블랭크 물성과 목표 형상을 고려하여 공정 순서를 따라 인공 신경망 모델을 평가하고, 가장 적절한 성형 단수와 이에 해당하는 형상 손실 및 판재 두께를 반환한다. 통합 다단 딥 드로잉 평가 함수와 비지배 정렬 유전 알고리즘-III를 결합하여 파레토 최적이 얻어졌다. 파레토 최적 중에서 가장 적절한 결과가 최적의 공정으로 선택되었고, 실험과 FE 시뮬레이션 결과의 비교 검증을 통해 개발된 최적화 방법의 신뢰성이 검증되었다.

**Keywords:** Artificial Neural Network, Surrogate models, Multistage deep drawing, NSGA-III, Optimization

---

1. 국민대학교 자동차공학전문대학원, 박사과정

# 국민대학교, 자동차공학과, 교수, E-mail: krystal@kookmin.ac.kr

# 최적화 모델에 따른 GISSMO 손상계수 결정 비교 연구

오민성<sup>1</sup> · 박상규<sup>2</sup> · 홍석무<sup>3, #</sup>

## Comparative Study on the Determination of GISSMO Damage Parameters Using Optimization Models

M. Oh, S. Park, S. Hong

### Abstract

판재 성형 시 소성 변형의 예측뿐만 아니라, 균열 또는 국부적 파손을 정확하게 고려하기 위해 데미지 모델의 도입이 요구된다. 판재성형에 사용되는 주요 데미지 모델 중 한가지인 GISSMO는 손상 계수를 예측에 활용되며, 실험과 해석의 오차를 줄이기 위해 최적화 기법을 활용한다. 기존 연구에서는 GISSMO 모델에 대한 최적화 사례는 존재하지만, 다양한 최적화 모델을 적용한 뒤 성능을 비교한 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 본 연구에서는 GISSMO 손상 계수 결정하는 과정에서 다양한 최적화 기법을 비교하기 위해 Ansys optiSLang을 활용하여 각 최적화 기법의 성능을 비교 및 평가를 진행하고자 한다. 성능 평가는 수렴 속도, 해석 기반 최적 값, 메타모델 기반 최적 값, 해석과 메타모델 오차 그리고 메타모델의 실험데이터 crack 지점 유사성을 기준으로 이루어졌다. 연구모델은 단축 인장(uni-axial tensile) 시편에 대한 인장시험을 기반으로 수행되었으며, 설계변수는 GISSMO 손상계수에 주요 영향을 미치는 4개의 설계 변수를 선정하여 해석을 수행하였다. 실험점의 구성은 설계 공간을 균등하게 채울 수 있도록 라틴 하이퍼큐브 샘플링을 적용하여 총 500개의 실험점을 생성하였으며, 이를 활용하여 Kriging 메타모델을 구축하였다. 모델의 예측 성능은 조정된 결정 계수와 예측 계수를 통해 검증되었다. 메타모델을 활용하여 다양한 최적화 방법 적용 시 연산 시간을 약 83% 절감할 수 있었으며, 최적화 모델 중 NLPQL, PSO 그리고 ARSM 3가지 모델이 가장 우수한 성능을 보였다. 본 연구를 통해 GISSMO 모델 생성 시간을 획기적으로 단축하였고, 사용자가 요구하는 최적화 기준(수렴속도, 정확도 등)에 따라 적합한 최적화 기법을 선정하고 이를 자동화하여 적용할 수 있는 시스템을 구축할 수 있었다.

**Keywords:** Damage, FEA, GISSMO, Metamodel, Optimization

1. 공주대학교 미래융합공학과, 석박사통합과정

2. 엔시스 코리아, 상무

3. 공주대학교 미래자동차공학과·그린카기술연구소, 교수

# Corresponding Author: Department of Future Automotive

Engineering, Kongju National University, E-mail:

smhong@kongju.ac.kr

## 롤포밍 및 3차원 벤딩을 적용한 1.7G 초고강도 강판의 폐단면 튜블라빔 부품 개발

남기석<sup>1#</sup>· 박상천<sup>1</sup>· 조성민<sup>2</sup>

### Development of 1.7G Ultra High Strength Steel Tubular Beam using Roll Forming and 3D Bending

Ki-Seok Nam, Sang Cheon Park, Sung Min Cho

#### Abstract

증가하는 전기차 수요에 맞춰 EV(Electrical Vehicle) 차종 개발이 확대되고 있고, 그에 따른 배터리 용량 증대와 각종 전장 부품의 추가로 인해 차량 중량이 증가하는 추세이다. 이러한 중량 증가는 차량의 효율 및 성능 등 다양한 문제를 야기하며 그 중 충돌 성능의 저하는 승객 안전성이라는 치명적인 위험으로 이어질 수 있다. 이에 따라 고중량 차량의 충돌 시에도 높은 기계적 강도를 바탕으로 승객 안전 공간을 확보할 수 있는 초고강도 차체 부품의 개발이 필수적이다.

본 프로젝트에서는 루프 사이드 아우터 내부 공간에 체결하여 천장 강도 및 스몰 오버랩 충돌 성능을 향상시킬 수 있는 튜블라빔 구조의 보강재 부품을 개발하였다. 현재 가장 고장력강판인 1.7G 2.0mm 소재를 사용하여 강성확보에 유리한 롤포밍 폐단면 구조 및 3차원 벤딩 기술을 적용하였다. 먼저 부품의 성형성 확보 및 검증을 위해 롤포밍 시 부품 단면에 발생하는 변형률을, 3차원 벤딩 시 부품 전체에 분포하는 잔류응력을 해석하였다. 또한, IIHS R/Crush Test를 모사하여 3-point bending 정 하중 프레스 해석을 진행하였다. 해당 결과들을 통해 부품 성능을 최적화하기 위한 최적의 단면을 도출하여 시작품을 제작하였고 실제 부품의 수소취성 민감도, 치수 정확도 평가 결과를 통해 1.7G 부품의 폐단면 롤포밍+3차원 벤딩 기술의 실제 양산 적용 가능성을 검증하였다.

본 개발을 통해 1.7G 소재의 기본적인 특성을 파악하고 부품의 충돌 성능 및 수소취성 저항성을 최적화하기 위한 변수 등을 도출할 수 있었으며 이를 통해 추후 1.7G 소재를 사용한 부품 확대 시에 적용 가능한 설계 가이드를 제시하였다.

**Keywords:** Ultra High Strength Steel, Roll Forming, 3D CNC Bending, .Car Crash Performance, Residual Stress Analysis

1. 현대자동차, 차체재료개발팀

2. (주)아산, 책임연구원

# 현대자동차, 차체재료개발팀, 연구원, E-mail: nks5598@hyundai.com

# 자동차용 1.8GPa 핫스탬핑 강판 개발 및 적용기술

윤승재<sup>1, #</sup> · 박계정<sup>2</sup> · 박재명<sup>1</sup> · 공제열<sup>1</sup> · 손경주<sup>1</sup>

## Development and application of 1.8 GPa hot-stamped steel sheets for automotive bodies

S. C. Yoon, K. J. Park, J. M. Park, J. Y. Kong, K. J. Sohn

### Abstract

The tightening of collision safety regulations and increasing demand for electric vehicles necessitate developing high-strength, lightweight automotive body components to protect passengers and battery systems. Consequently, the use of advanced high-strength steels (AHSS) has become crucial for enhancing fuel efficiency, reducing CO<sub>2</sub> emissions, and improving crashworthiness. However, conventional cold forming processes encounter difficulties in ensuring adequate formability and precise dimensional control due to the high strength and limited elongation of these steels. Hot stamping technology, involving heating materials above 900°C followed by forming and rapid cooling in dies, allows the production of components with strengths exceeding gigapascal levels. This process simultaneously achieves vehicle weight reduction, improved crash safety, and precise control of component shape and dimensions. In this study, the hot stamping strength level was successfully increased from 1.5 GPa to approximately 1.8 GPa through optimized alloy design and tailored process conditions ensuring adequate weldability and hydrogen embrittlement resistance. Customized hot stamping processes applying cooling rates above 25°C/s effectively controlled formability, weldability, and hydrogen embrittlement characteristics. The developed 1.8 GPa-grade automotive components achieved approximately 20% higher strength and over 17% improved crash resistance compared to conventional components, thus significantly enhancing collision energy absorption capabilities and aligning with eco-friendly vehicle advancements.

**Keywords:** 1.8GPa, Hot stamping, High strength vehicle

---

1. 현대제철연구소, 책임연구원

2. 현대제철연구소, 전임연구원

# 현대제철연구소, 차체응용기술팀, 책임연구원, E-mail: scyoon@hyundai-steel.com

# 압출스크류 파단 문제 해결 및 공 압출 (Coextrusion) 사례

이돈규<sup>1..</sup>

## Case Study of Extrusion Screw Failure and Coextrusion

D. K. Lee

### Abstract

스크류는 플라스틱 사출 및 압출 공정에서 주로 사용되며, 고형 및 저온 액상의 수지를 다음 공정에 사용할 수 있도록 가소화시켜 주는 주요 장치입니다. 스크류의 형상에 따라 제품의 품질 및 생산성에 영향을 미칩니다. 특히 올바르지 못한 스크류 설계로 인해 Extruder 내의 수지 이송이 원활하게 하지 못하며, 이로 인해 특정 영역에서의 수지 고화로 과도한 횡방향 압력이 스크류에 가해져 2차적인 스크류 파단을 유발할 수 있습니다. 스크류 파단의 원인을 분석하여 예상되는 문제를 스크류 설계에 적용하였습니다.

공압출(Coextrusion)은 두 개 이상의 폴리머 층을 하나의 다이(금형)를 통해 압출하는 공정입니다. 공압출 공정은 다층 시트, 블로운 필름, 캐스트 필름, 튜빙, 와이어 코팅, 프로파일 등을 생산하는 데 사용될 수 있습니다. 공압출 공정은 1950년대 초부터 제품 품질 및 공정 효율 향상을 위해 사용되어 왔습니다. 그러나 특정 조건에서 공압출 공정은 아직 완전히 이해되지 않은 일부 유통 불안정성 현상을 보입니다. 특정 조건에서 점탄성 고분자 재료의 유통은 불안정한 계면과 다이 말단의 불균일한 속도 분포 및 전단응력의 분포로 제품 특성에 상당한 영향을 미칠 수 있습니다. 일반적으로 이종간의 재료를 사용한 동시 압출은 제품의 원하는 계면을 확인하기 위하여 많은 비용과 시간이 소요되는 시험 압출을 통하여 확인했던 전통적인 접근 방법을 사용하고 있습니다. 상용프로그램을 사용한 실제 제품 개발에 적용하여 이러한 계면 불안정성을 확인하고 원인을 분석하여 원하는 형상 및 영역에 대한 결과를 도출 함과 동시에 상온으로 압출되는 제품 단면 형상을 예측 적용하여 제품의 품질 및 생산성을 높일 수 있습니다.

**Keywords:** 스크류(Screw), 공압출(Coextrusion)

**Acknowledgements:** 본 사례는 Compuplast사의 압출성형해석프로그램 VEL을 사용 하였습니다.

---

1. DFMA Korea 솔루션 컨설턴트

# 소재 물성 신뢰성 확보를 위한 Moldex3D DT 활용

황병관<sup>1</sup> · Joe Wang<sup>2</sup>

## Application of Moldex3D DT for Reliability of Material Properties

B. K. Hwang, Joe. Wang

### Abstract

사출 성형은 고분자 소재를 가소화 시켜 금형 내부에 주입하여 제품을 성형하는 공정이다. 고분자 소재는 다양한 종류가 있다. 제품의 기능과 공정 요구 사항이 다양하기 때문에 고분자 소재의 종류별 특성은 고유하고 다르다. 사출 성형에서 고분자 소재는 가열, 용융, 전단, 압축, 고화 등 복잡한 공정을 거치므로, 사출 성형 시뮬레이션의 정확도는 재료 모델과 그 물성치의 정밀도에 크게 의존한다. 따라서 소재 물성의 변동성과 특성을 정확히 이해하는 것은 성공적인 시뮬레이션과 고품질 제품 생산의 핵심이다. 고분자 소재 가공에 영향을 미치는 주요 물리적 특성에는 유연학적 특성, PVT 특성, 열적 특성, 기계적 특성 등이 포함된다. 현재 대부분의 특성은 상용화된 측정 장비를 통해 정량화 할 수 있으나, 점점 더 정밀한 시뮬레이션과 제품 품질이 요구되면서 높은 신뢰도와 해상도의 측정 데이터가 요구되고 있다. 최근 컴퓨터 하드웨어와 수치 해석 기술의 발전으로 CAE 분석은 제품 설계와 공정 최적화에 필수적인 도구로 자리 잡았다. 나아가 CAE 기술은 재료 물성 측정의 정밀도 향상과 장비 설계 개선에도 적용될 수 있으며, 이를 ‘Material Digital Twin’이라 정의할 수 있다. CAE 분석을 통해 장비의 내부 구조, 측정 과정, 재료 거동을 가시화함으로써 보다 정교한 재료 데이터 획득할 수 있다. 또한, 재료 개발과 측정 장비 개선을 위한 강력한 도구로 활용할 수 있다.

**Keywords:** Injection Molding, Material Properties, Digital Twin, Moldex3D, CAE

---

1. 이티에스소프트 Moldex3D팀

2. CoreTech System Material Testing Center Manager

# 사출성형 해석기반의 XR/AI 응용 소프트웨어를 활용한 Ramp-up 프로세스 개선에 관한 연구

황순환<sup>1, #</sup> · 오준호<sup>1</sup> · 황수진<sup>1</sup> · 이재훈<sup>1</sup> · 안영수<sup>1</sup> · 강동훈<sup>1</sup>

## A Study on Ramp-Up Process Improvement Using Injection Molding Simulation-Based XR/AI Application Software

S. H. Hwang, J. H. Oh, S. J. Hwang, J. H. Lee, Y. S. An, D. H. Kang

### Abstract

사출성형 제품을 대량 생산에 앞서 제품 품질과 생산성을 확보하기 위한 Ramp-up(초기 공정 안정화) 단계는 매우 중요하다. 이 단계는 금형 수정, 성형조건 확보, 품질 검증 등을 포함하며, 국내에서는 ‘육성’이라는 용어로도 사용된다. 최근에는 디지털 기술을 활용하여 Ramp-up 시간을 단축하고 초기 품질을 안정화하려는 시도가 활발하다. 본 연구에서는 Autodesk® Moldflow® 사출성형 해석 데이터 기반으로 하는 확장현실(eXtended Reality, XR) 소프트웨어인 twin0™와 머신러닝(Machine Learning) 기반 예측 소프트웨어 Mold Assist™를 활용하여 Ramp-up 프로세스를 디지털 방식으로 최적화한 사례를 제시한다. twin0™는 XR 환경에서 CAD 및 해석 결과를 실시간 시각화하고, 설계자·해석자·생산 기술자 간의 협업 분석을 지원함으로써 공정 오류와 금형 수정 이슈를 조기에 공유 및 대응하게 한다. 이를 통해 디지털 워크플로우를 정착시키고, 커뮤니케이션 비용과 개발 시간을 절감하였다. Mold Assist™는 과거 해석 데이터를 학습하여 신규 모델에 대해 유사 모델 추천 및 게이트 위치·성형조건을 제안하며, 초기 해석 설정의 정확도를 높이고 반복 시뮬레이션을 줄이는 데 기여한다. 두 소프트웨어의 결합은 설계-해석-생산 간 데이터 흐름을 통합하며, 실시간 데이터 기반 의사결정을 가능하게 하여 Ramp-up 과정의 디지털 최적화를 실현하였다. 결과적으로 twin0™와 Mold Assist™는 Ramp-up 단계의 시간을 단축하고 품질 균일성 및 수율을 향상시키는 실질적 도구로, 스마트 제조 환경에서의 높은 산업적 활용 가능성을 지닌다.

**Keywords:** Injection Molding Simulation, Ramp-Up, Extended Reality(XR), Machine Learning-Based Prediction

1. (주)이디앤씨 오토데스크팀

# (주)이디앤씨 오토데스크팀, 상무, E-mail: peter.hwang@ednc.com

# 사출금형 냉각 효율 향상을 위한 적층제조 메타물질 활용

박 근<sup>1, #</sup>, 오서현<sup>1, 2</sup>, 유정희<sup>1, 3</sup>

## Applications of Additively Manufactured Metamaterials for Improvement of Cooling Efficiency in Injection Molding

K. Park, S. H. Oh, J. H. You

### Abstract

사출성형은 고분자 소재를 고온에서 가소화시켜 금형 내부에 고속으로 주입하여 제품을 성형하는 공정으로, 성형 후 냉각시간을 단축시키기 위해 금형 내부에 냉각회로를 가공하여 냉각수를 순환시키는 방식을 사용하고 있다. 최근 적층 제조 기술의 발전으로 형상적응형 냉각회로(Conformal cooling channel)의 적용을 통한 냉각효율의 향상에 대한 연구가 수행되고 있으나, 높은 제작비용으로 인해 실제 산업 현장에서 제한적으로 사용되고 있으며 낮은 표면조도로 인해 금형으로 사용하기 위해서는 추가적인 후가공이 필수적이다. 본 연구에서는 상기 한계점을 극복하기 위해 분할형 금형 코어 내측에 냉각회로 대신 미세 다공 구조를 적용한 냉각구조체를 삽입하는 형태의 금형 구조를 제안하였다. 미세 다공 구조로는 미세격자(Micro-lattice) 구조와 삼중 주기적 최소 곡면(Triply periodic minimal surfaces; TPMS) 구조를 적용한 열적 메타물질을 사용하였고, 금속 프린팅 공정을 사용하여 냉각구조체를 제작하였다. 제작된 냉각구조체를 분할형 금형 내측에 삽입하여 금형 코어의 냉각회로를 형성하고, 제작된 금형의 냉각특성을 실험적으로 고찰함으로써 기존의 형상적응 냉각회로와 냉각성능을 비교하였다. 적층제조 메타물질 기반 냉각구조체를 적용한 경우 기존 회로형 냉각구조에 비해 냉각효율 및 균일도를 높일 수 있으며, 제작비용 및 유지보수에도 장점이 있어 산업적으로 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Injection Molding, Additive Manufacturing, Mechanical Metamaterials, Conformal Cooling

**Acknowledgements:** 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (No. RS-2025-00512549).

---

1. 서울과학기술대학교 기계설계 로봇공학과

2. University of Akron (USA), 대학원생

3. 한국타이어 & 태크놀러지 재료기획팀, 선임연구원

# 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 교수, E-mail: kpark@seoultech.ac.kr

## 10. 일반 구두 발표 / 특별 세션 5

공정계산역학

인공지능 및 디지털트윈 기반  
자율 제조 공정 기술

( 제 4 발표회장 )

## 결정소성 유한요소법과 In-situ EBSD 분석을 이용한 CP Ti 판재의 기계적 거동 분석

### Analysis of the mechanical behavior of CP Ti sheet using crystal plasticity finite element method and in-situ EBSD

김경표<sup>1</sup>·강주희<sup>2</sup>·오창석<sup>3</sup>·김지훈<sup>4,#</sup>

#### Abstract

Commercially pure titanium (CP Ti) exhibits significant anisotropy and asymmetry at room temperature. Although various studies have been conducted to explain this unique behavior, the deformation mechanisms causing asymmetric yielding and hardening have not been clearly identified. In this study, micromechanical analysis was performed using electron backscatter diffraction (EBSD) and crystal plasticity finite element modeling (CPFEM) to predict the microstructure-based hardening behavior of CP Ti. Representative volume elements were generated based on EBSD experimental results of CP Ti Grade 2 and 4, and crystal plasticity model parameters were derived by comparing uniaxial tension/compression tests with CPFEM results. By comparing CPFEM results with measurements of in-situ EBSD analysis of tensile deformation in RD and TD directions, it was demonstrated that CPFEM could effectively capture the local micromechanical behavior as well as macroscopic anisotropic and asymmetric behavior of CP-Ti by reflecting the major slip and twin modes at room temperature. Using the derived CPFEM model, the relationship between yield functions of each deformation mode and the overall material yield function predicted was shown, and deformation mechanism-based approach was proposed for plastic constitutive equation modeling of CP Ti.

**Keywords:** Crystal Plasticity, CP-Ti, Mechanical testing, Anisotropic material, Twinning, multi-surface

- 
1. 부산대학교 기계공학부, 석사과정
  2. (주)웨이브센스, CTO
  3. 한국재료연구원, 책임연구원
  4. # 부산대학교 기계공학부, 교수, E-mail: kimjh@pusan.ac.kr

# 베이지안 추론과 유한 요소 해석을 활용한 기계적 물성 역 추정: 핵연료 피복관 응용 사례

전보혜<sup>1</sup> · Carlos N Tomé<sup>2</sup> · Laurent Capolungo<sup>2, #</sup> · 정영웅<sup>1,3, #</sup>

## Reverse engineering using Bayesian inference and Finite Element Analysis: application to determining hoop properties of nuclear cladding material

Bohye Jeon, Carlos N Tomé, Laurent Capolungo, Youngung Jeong

### Abstract

핵연료 피복 재료(nuclear cladding material)는 일반적으로 압출 공정을 통해 제조된 튜브형상을 가지며, 공정 중 발달하는 집합조직으로 인해 이방성을 보인다. 후프 방향의 기계적 물성은 피복재의 성능 평가에서 필수적으로 요구되나, 형상의 제약으로 인해 실험적으로 정확히 측정하기 어렵다. 링-풀(Ring-pull) 시험만으로 성능을 제한적으로 평가할 수 있으나, 형상에 무관한 물성을 평가하는데 뚜렷한 한계를 보이며 따라서 종종 실행하기 까다로운 추가 실험이 요구된다. 본 연구에서는 링풀 시험만으로 후프 방향 물성을 예측하기 위해, 베이지안 확률론(Bayesian inference)과 유한요소 해석(Finite Element Analysis)을 결합한 역추정 기법을 개발하였다. 대상 재료로 Fe-Cr-Al 기반 합금인 C26M 강을 선정하였다. 제안된 기법의 타당성 평가를 위해 등방 탄소성 거동과, 간단한 연성 파괴 모델을 고려하였다. 총 6개의 입력 파라미터를 설정하였고, 힘-변위 곡선으로부터 도출한 5개의 타겟 파라미터의 관계 추론을 위해 유한요소 기반의 데이터베이스를 구축하였다. 베이지안 추론을 통해 도출된 물성의 타당성을 추가 유한요소 해석을 통해 검증하였다. 추가로 입력 파라미터와 타겟 파라미터 사이의 영향력을 전역 민감도 분석법을 통해 분석하였다.

**Keywords:** Reverse engineering (리버스 엔지니어링); Bayesian probability (베이지안 확률론); Ring pull test (링 풀 시험); Finite element analysis (유한 요소 해석); FeCrAl alloy;

---

1. 창원대학교 소재융합시스템공학과

2. Los alamos national Laboratory, MST-8

3. 창원대학교 신소재공학부

# 창원대학교 신소재공학부, 부교수, E-mail: yjeong@changwon.ac.kr

# PMMA기반 투명체 성형공정 설계 및 유한요소해석 모델링

최현성<sup>1,#</sup>, 백민재<sup>2</sup>, 신윤우<sup>2</sup>, 박현일<sup>1</sup>, 이동준<sup>1</sup>, 석무영<sup>1</sup>, 권용남<sup>3</sup>, 정대호<sup>4</sup>.

## Development of Transparent PMMA Component Forming Process and Finite Element Analysis Modeling

H. Choi, M. J. Baek, Y. W. Shin, H. Pa\|, D. Lee, M. Seok, Y.N.Kwon, D.H.Jeong

### Abstract

Stretched acrylic (PMMA) materials, produced by biaxial stretching of cast acrylic, are widely used for fighter jet canopy due to their excellent optical transmittance, impact resistance, weatherability, heat resistance, and lightweight characteristics. These canopy is normally manufactured by vacuum forming PMMA sheets at temperatures below the glass transition temperature. Process parameters such as temperature, vacuum pressure, forming time, and clamping force are known to significantly affect the thickness uniformity of the final product. In this study, the issues arising during the transparent forming process using PMMA acrylic materials were analyzed from the perspective of process variables. Additionally, finite element modeling was conducted to support efficient design and optimization. The behavior of PMMA during high-temperature vacuum forming is associated with temperature- and strain rate-dependent plastic deformation, as well as time-dependent creep deformation under constant temperature and stress conditions. To accurately simulate these behaviors, a temperature- and strain rate-dependent viscoplastic model was proposed, and the time-dependent creep behavior was modeled using the Norton-Bailey creep law. The proposed viscoplastic model was implemented through a user-defined subroutine (UHARD) and validated by single-element tensile simulations. The forming process was modeled as a three-stage process based on the commercial software ABAQUS/VISCO solver.

**Keywords:** PMMA, Viscoplastic model, Creep model, Canopy

- 
1. 한국재료연구원 항공우주재료실증센터, 선임연구원
  2. 한국재료연구원 항공우주재료실증센터, 연구원
  3. 한국재료연구원 항공우주재료실증센터, 책임연구원
  4. 한국항공우주산업㈜, 책임연구원
- # 한국재료연구원 항공우주재료실증센터, 선임연구원, E-mail:h.choi@kims.re.kr

# 스마트 사출성형 시스템 기술의 현재와 미래

소현우<sup>1</sup>· 이승찬<sup>2</sup>

## Current Status and Future Prospects of Smart Injection Molding Systems

H. W. So, S. C. Lee

### Abstract

종래의 사출성형 제조방식은 수작업 중심으로 작업자의 숙련도에 의존한 품질 편차, 낮은 생산 효율성, 공정 데이터의 실시간 수집 및 분석 부족으로 인해 제품의 일관성과 경쟁력이 저하되고 있다. 또한, 불량률 증가와 에너지 낭비는 원가 상승을 초래하며, 시장 변화에 신속하게 대응하기 어려운 구조적 문제를 안고 있다. 이러한 한계는 스마트 제조 환경으로의 전환 필요성을 강조하며, 사출산업의 디지털화와 자동화가 시급한 과제로 대두되고 있다. 최근 들어, 전 세계 Smart Factory 추진에 발맞추어 사출성형 산업 역시 자동화, 디지털화 및 지속가능성을 중심으로 급속히 발전하고 있다. 사출성형 기계 시장은 2023년 119억 달러에서 2032년 171억 달러로 성장할 것으로 예상되며, 이는 에너지 효율성과 스마트 제조 솔루션에 대한 수요 증가에 기반하고 있다. Industry 4.0 기술의 도입으로 IoT 기반 센서와 AI분석이 생산 공정에 통합되어 실시간 모니터링과 예측 유지보수가 가능해지고 있고, 이로 인해 불량률 감소, 생산성 향상 및 에너지 절감이 실현되고 있다. 국내 사출성형 산업은 스마트팩토리 기술의 도입을 통해 디지털 전환을 추진하고 있으며, 정부의 지원정책과 기업의 노력으로 점차 저변을 확대하고 있다. 특히, 사출기 제조사와 제품제조 관련 대기업 중심으로 앞장서 개발되고 있고 빠르게 관계 협력 사로 확대전개 되고 있는 상황이다. 단위 공정의 디지털화를 넘어 공장 전체를 포함하는 디지털 플랫폼 구축, 그리고 더 나아가 글로벌 양산처간 데이터 공유 가능 플랫폼 개발로까지 확대되고 있는 상황이다. 이를 통해, 스마트 사출성형은 고정밀, 친환경, 유연한 생산 시스템으로 진화하며 글로벌 제조업의 핵심 기술로 자리매김할 수 있다.

**Keywords:** Smart Injection Molding, Industry 4.0, Digital Manufacturing, Mold Sensing

---

1. LG전자, 연구위원

2. LG전자, 책임연구원

# 교신저자: LG전자, 생산기술원, 연구위원, hyunwoo.so@lge.com

# 공정 모니터링 기반 판재성형 지능화 기술 개발

배기현<sup>1#</sup>· 송정한<sup>1</sup>· 이종섭<sup>1</sup>· 장인제<sup>2</sup>· 김태훈<sup>3</sup>· 김경환<sup>4</sup>· 이주은<sup>5</sup>· 김보의<sup>6</sup>· 정영수<sup>7</sup>

## Development of Intelligent Sheet Metal Forming Technology Based on Process Monitoring

G. H. Bae, J. H. Song, J. S. Lee, I. J. Jang, T. H. Kim, K. H. Kim, J. E. Lee, B. I. Kim, Y. S. Jung

### Abstract

최근 제조업의 자율제조화 실현을 위한 원천기술 개발의 일환으로, 공정의 실시간 모니터링과 AI 알고리즘 내재화를 통한 지능화 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 판재성형 공정의 지능화를 목표로, 공정 모니터링을 위한 데이터 센싱 기술, 취득된 데이터를 기반으로 한 공정 이상 감지용 AI 알고리즘 개발, 그리고 이러한 지능화 기술의 프레스 성형 현장 적용에 대해 다룬다. 우선 Lab-scale 수준의 판재 프레스 성형 테스트베드를 구축하고, 이를 활용해 데이터 취득 및 AI 알고리즘 개발에 관한 기초 연구를 수행하였다. 이후 개발된 기술을 실제 프레스 성형 제조현장에 적용하여 실시간 데이터 센싱 기반 공정 이상 및 성형 불량 감지 기술의 적용성과 유효성을 검토하였다. 이러한 판재성형 공정의 지능화 기술은 제조업의 디지털 전환 및 AI 전환을 위한 핵심 원천기술로서, 궁극적으로 자율제조화 실현에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Sheet Metal Forming, Process Monitoring, AI Algorithm, Intelligent Manufacturing

---

1. 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소, 수석연구원

2. 삼성전자 생활가전사업부, Staff Engineer

3. 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소, 자체인턴

4. 케이에이엔, 대표

5. 케이에이엔, 선임

6. 세동산업 기술연구소, 연구소장

7. 세동산업 기술연구소, 사원

# 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소, 수석연구원, E-mail: baegh@kitech.re.kr

# 물리 정보 신경망을 이용한 절삭력과 절삭에너지 예측

맹상진<sup>1, #</sup>• 김병민<sup>2</sup>

## Prediction of cutting force and cutting energy using physic informed neural network

S. Maeng, B. M. Kim

### Abstract

During milling, cutting forces arise in the process of chip formation caused by plastic deformation. These cutting forces vary depending on multiple factors, including tool geometry, machining conditions, machine tool precision, and the lubrication between the tool and the workpiece. Accurately predicting these cutting forces is important for extending tool life, improving the efficiency of machine tool design, and selecting optimal machining conditions. Meanwhile, as climate change becomes more severe, efforts to reduce carbon emissions continue, and the machine tool industry is also working to save energy. Accordingly, research is underway to predict cutting energy and find methods to reduce energy consumption during cutting. Analytical and experimental models for predicting cutting forces and cutting energy have been actively studied, but analytical models have limitations in accurately capturing the complex, nonlinear nature of cutting processes, and conventional experimental methods struggle to efficiently handle large and diverse data sets. Recently, with advances in machine learning techniques and computing power, there has been a rise in research on machine learning-based approaches to predict nonlinear and complex cutting forces and cutting energy. However, gathering extensive experimental data and dealing with overfitting remain challenges. To address these problems, this study proposes an experimental strategy that can effectively extract data under various conditions from a minimal number of experiments, and verifies its validity through milling experiments by comparing it with traditional methods. Additionally, to mitigate the overfitting problem in cutting force and cutting energy prediction models, a Physics-Informed Neural Network (PINN) is applied, and its performance is evaluated in comparison with existing machine learning models such as ANN and SVM.

**Keywords:** Cutting force, Cutting energy, Cutting coefficient, milling experiment, PINN

- 
1. 홍익대학교 기계시스템디자인공학과, 조교수
  2. 홍익대학교 기계시스템디자인공학과, 석사과정
- # 홍익대학교, 기계시스템디자인공학과, 조교수, E-mail:  
sjmaeng@hongik.ac.kr

# 기계학습 기반 밀링 공구 마모 예측 모델 분석

Matteo Ramella<sup>1</sup> · 윤희택<sup>1#</sup>

## Investigation on Machine learning-based Tool Condition Monitoring in Milling Process

M. Ramella, H. T. Yun

### Abstract

In the past years, Tool Condition Monitoring (TCM) has emerged as one of the most innovative technologies aiming to revolutionize production as known so far. However, his ground-breaking technology has until this moment been limited to the need for a considerable amount of data. This ongoing research aims to produce an easier and less computationally requiring model that uses public data by PHM2010 challenge: force and vibration measurement obtained from a 6mm ball nose tungsten carbide milling cutter to extrapolate the remaining useful life of the tool by looking at the wear that the component is subjected to. In particular, the model is based on deep learning structures, by combining both Convolutional Neural Networks and Long Short Term-Memory. In addition, Generative Adversarial Network is also used to increase the number of data available allowing better training and more complex models reducing the risk of incurring in overfitting.

**Keywords:** Tool Condition Monitoring (TCM), Tool wear prediction, Milling processes, Machine learning (ML)

---

1. 한국과학기술원 기계공학과

# 한국과학기술원, 기계공학과, 조교수, E-mail:htyun@kaist.ac.kr

# 미세조직 역설계를 위한 다중충실도 데이터 기반 잠재 확산 모델 학습 방법

정재면<sup>1,#</sup>, 오세혁<sup>1</sup>, 김호혁<sup>1</sup>, 나주원<sup>1</sup>, 김세종<sup>2</sup>, 이호원<sup>2</sup>

## Multi-fidelity data based training of latent diffusion model for inverse microstructure design

J. Jung, S. Oh, H. Kim, J. Na, S.-J. Kim, H.W. Lee

### Abstract

Microstructure optimization is central to the development of advanced structural materials, as microstructural features critically influence mechanical and functional properties. While traditional trial-and-error methods for microstructural design are time-consuming and costly, recent advances in data-driven approaches have significantly accelerated this process. In particular, generative models have emerged as a promising alternative for inverse microstructure design because these models allow for one-shot generation of microstructures that satisfy target properties. Despite their potential, training the generative models remains challenging due to the need for large and diverse high-quality datasets. To address this limitation, we propose a multi-fidelity data driven strategy to train a 3D latent diffusion model that can generate 3D microstructures that satisfy target stress-strain curves. This approach leverages abundant low-fidelity finite element simulation data for pretraining and a small amount of high-fidelity data for parameter -efficient fine-tuning (PEFT) the latent diffusion model. Our results on training 3D latent diffusion model to design dual phase microstructures with target stress-strain curves demonstrate that the pretrained model achieves reasonable accuracy, and further fine-tuning the model with limited high-fidelity data yields significant performance improvements. This study underscores the potential of adopting multi-fidelity data-based PEFT for large generative models in inverse microstructure design.

**Keywords:** Multi-fidelity data approach; Deep learning; Generative model

---

1. 한국재료연구원 재료데이터·분석연구본부, 선임연구원

2. 한국재료연구원 재료데이터·분석연구본부, 책임연구원

# 한국재료연구원, 재료데이터·분석연구본부, 선임연구원, E-mail: jjm0475@kims.re.kr

## 11. 일반 구두 발표

압출 및 인발

압연

( 제 5 발표회장 )

# 다패스 인발공정에서 주요변수가 인발에 미치는 영향

신영빈<sup>1</sup>, 흥보승<sup>1</sup>, 정동석<sup>2</sup>, 전만수<sup>1#</sup>

## Effects of key process variables on drawing in a multi-pass drawing process

Y. B. Shin<sup>1</sup>, B. S. Hong<sup>1</sup>, D. S. Jung<sup>2</sup>, M. S. Joun<sup>1</sup>

### Abstract

A parametric study was conducted on the effects of friction, die angle, and number of passes on the virtual metal flow lines and residual stress in multi-pass unidirectional and bidirectional drawing processes. The results revealed the influence of each key factor on the drawing process. It is shown that the two drawing processes, unidirectional and bidirectional, have a negligible effect on the residual stress, but have a close relationship with the virtual metal flow lines.

**Keywords:** Multi-pass drawing(다단인발), Unidirectional (단방향), Bidirectional(양방향), Virtual metal flow lines (가상단류선)

### 1. 서론

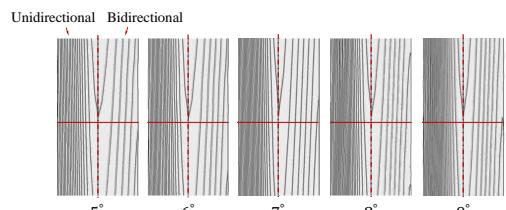
많은 인발공정은 다단 패스에 의존하며, 인발공정의 특징상 단과 단 사이에서 그립의 생성 및 길이의 변경이 필요하다. 이런 이유로 다단 인발공정의 FEM 응용연구가 부진한다. 이 문제를 최적의 해석모델과 이종 스텝 해석 기법으로 해결하였다 [1]. 이 연구에서는 이를 이용하여 주요 인발요소의 영향에 관하여 연구한다.

### 2. 본론

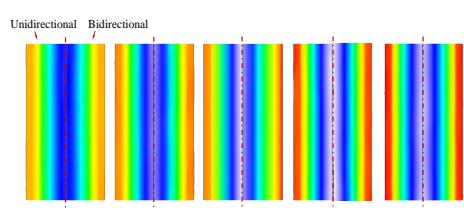
Fig. 1은 인발금형 각도의 영향을 나타낸다. 가상 단류선과 잔류응력이 각도에 큰 영향을 받고 있음을 보여 준다. 그리고 단방향과 양방향 인발공정이 가상 단류선 관점에서는 크게 차이를 나타내지만, 잔류응력 측면에서는 유사한다.

### 3. 결론

기 개발된 다단 인발공정의 해석기술을 활용하여 다양한 조건하에서 해석을 수행하여, 주요 인발 인자가 인발공정 및 제품에 미치는 영향을 밝혔다.



(a) Virtual metal flow lines



(b) Virtual metal flow lines

Fig. 1 Effect of semi-cone angle on the process  
사사

이 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20214000000520, 자원순환(재제조) 산업 고도화 인력양성)

### 참고문헌

- [1] Lee SW, Kim MC, Ryu HY, Joun MS. Effect of back tension in multi-pass drawing on central bursting defect. AIP Conf Proc 2013;1532:988-94  
<https://doi.org/10.1063/1.4806941>.

1. 경상국립대학교

2. (주)풍성정밀관

3. # 교신저자: 경상국립대학교

기계항공공학부 E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

# 원주방향 잔류응력을 고려한 후관 인발 공정의 최적화

강민성<sup>1</sup>, 허윤<sup>1</sup>, 이강휘<sup>2</sup>, 전만수<sup>1,#</sup>

## Optimization of the thick tube drawing process considering the circumferential residual stress

M.S. Kang<sup>1</sup>, Y. Heo<sup>1</sup>, K.H. Lee<sup>2</sup>, M. S. Joun<sup>1, #</sup>

### Abstract

In this study, the thick tube drawing process is optimized to minimize the residual stress in the circumferential direction using a combined elastoplastic finite element method and optimization technique [1]. The angles of the drawing die and plug and their relative position are dealt with as process design variables. The optimized process design is compared with the initial design to reveal its superiority.

**Keywords:** Thick tube (후관), Drawing (인발), Residual stress (잔류응력), Optimization (최적화)

### 1. 서론

후관 인발 공정에서 원주방향 잔류응력은 연속된 인발 또는 열처리 공정에서 관 방향 크랙을 야기하는 원인이다. 인발 공정은 오리피스에서 발생하는 국부적인 변형의 의존도가 높다. 후관 인발 공정의 최적화는 중요하지만, 이에 관한 연구는 충분하지 않다.

### 2. 본론

Fig. 1은 초기와 최적공정설계, Fig. 2는 잔류응력을 비교한다. 초기공정설계의 내·외경 잔류응력은 -400~190 MPa인 반면, 최적 공정은 내경에서 0에 가깝고, 외경에서 -50 MPa로 외경에 압축응력이 작용하는 것은 바람직하다.

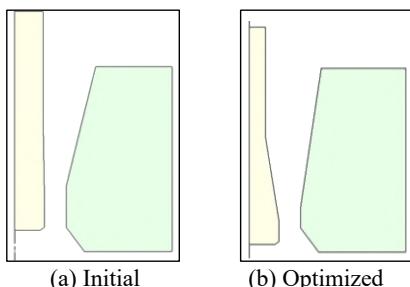


Fig. 1 Comparison of the initial and optimized design

1. 경상국립대학교 기계항공공학부

2. (주) 풍강

# 교신저자: 경상대학교 기계항공공학부, E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

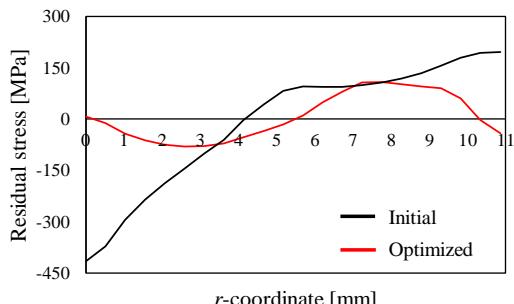


Fig. 2 Comparsion of residual stresses

### 3. 결론

원주 방향 잔류응력의 최적화를 통하여 후관 인발공정의 최적화가 이루어졌으며, 실용적인 결과가 획득이 되었다.

### 사사

이 연구는 MOTIE가 지원하는 202140000520의 사업의 결과물입니다.

### 참고문헌

- [1] Kim M C, Chung S H, Joun M S Optimal process design in hot forging in terms of grain flow quality, Int. J. Automot. Technol., V. 20, 2019, 45-56.

# 유한요소해석을 통한 인발 공정 중 표면 균열의 변형 거동 분석

이석의<sup>1</sup>·이영석<sup>#</sup>

## Deformation Behavior Analysis of Surface Cracks During Wire Drawing Using Finite Element Method

S. E. Lee, Y. S. Lee

### Abstract

최근 정밀 부품 제조 공정의 고도화와 품질 요구의 증가에 따라, 인발 공정에서 발생하는 미세 표면 결함에 대한 정밀 해석의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히 고속 인발 조건에서는 소재 표면에 존재하는 초기 균열이 제품의 최종 품질 및 파단에 직접적인 영향을 미치므로, 이를 정량적으로 예측하고 제어할 수 있는 기술 개발이 요구된다. 본 연구에서는 다양한 초기 균열 형상을 포함한 모델을 설계하고, 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 통해 인발 공정 중 균열의 변형 거동을 분석하였다. 축대칭 모델을 기반으로 손상 모사 및 소성변형 분석을 수행하였으며, 균열의 형상, 깊이, 위치에 따른 응력 집중과 변형률 분포를 비교하였다. 해석 결과, 균열은 조건에 따라 폐쇄되거나 성장하는 거동을 나타냈으며, 특히 인발 방향에 수직하거나 비스듬히 위치한 균열은 응력 삼축성 증가로 인해 파단 가능성이 높아지는 경향을 보였다. 또한 균열 주변 요소의 손상 변수 및 소성 이력 데이터를 기반으로, 인발 중 균열 진행의 임계 조건을 정량적으로 제시하였다. 본 연구는 초기 표면 결함이 인발 공정에 미치는 영향을 체계적으로 분석함으로써, 결함 허용 기준 설정 및 금형 설계 시 유용한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Wire drawing, Surface crack, Finite element analysis, Plastic deformation

---

1. 중앙대학교 기계공학부, 대학원생

# 중앙대학교 기계공학부, 교수, E-mail: ysl@cau.ac.kr

# 튜브 인발 공정에서의 최적 공정 설계

허윤<sup>1</sup>, 전만수<sup>1, #</sup>

## Optimal process design in the tube drawing process

Y. Heo<sup>1</sup>, M. S. Joun<sup>1, #</sup>

### Abstract

Drawn tubes should meet the tight tolerance and quality homogeneity of residual stress. High forming energy leads to the fracture of the material. In this study, an optimal process design was proposed in terms of forming energy and residual stress homogeneity in the tube drawing process.

**Keywords:** Residual stress homogeneity (잔류응력 균질성), Tube drawing process (튜브 인발 공정)

### 1. 서론

Kuboki 등[1]의 연구에 따르면, 튜브 인발 공정에서 소재의 두께 감소율이 클수록 축방향 잔류응력이 저하된다는 연구 결과가 있다.

이 논문에서는 성형 에너지와 축방향 잔류응력 차이를 최소화하는 공정설계가 제안되었다.

### 2. 본론

Fig. 1은 튜브 인발공정에서 플리그의 위치, 반각, 베어링부 길이와 금형의 반각을 설계변수로 취급하여 얻은 최적공정설계이다. 두가지 최적화를 진행한 결과 서로 상반되는 특징을 나타내었다.

### 3. 결론

최적화 결과 두 최적설계가 상반된 결과를 보였다. 이는 튜브 인발 공정에서 잔류응력과 성형에너지를 모두 고려해야 함을 의미한다.

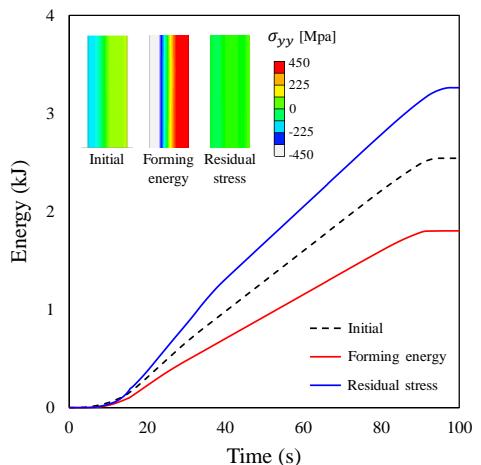


Fig.1 Comparsion of optimized process design, focusing on energy consumption

### 사사

이 연구는 MOTIE가 지원하는 202140000520의 사업과 RS-2024-00398425의 결과물입니다.

### 참고문헌

- [1] T. Kuboki, K. Nishida, T. Sakaki, M. Murata. Effect of plug on levelling of residual stress in tube drawing, J. Mater. Process. Technol., V. 204(1), 2008, 162-168.

1. 경상국립대학교 기계항공공학부

# 교신저자: 경상대학교 기계항공공학부, E-mail:

msjoun@gnu.ac.kr

## QForm UK 기반 압출 금형 설계 및 결함 예측

Ivan Kulakov<sup>1</sup> · 장창순<sup>2#</sup> · 곽호택<sup>3</sup>

### Predicting Extrusion Defects Using QForm UK Extrusion: Innovative Approaches and Solutions

Ivan Kulakov, Changsoon Jang, Hotaek Kwak

#### Abstract

Extrusion tool sets are intricate and rather sensitive mechanical tools that require thorough testing in real production environments to ensure optimal performance and quality in extruded profiles. Even skilled tool manufacturers may overlook issues that could impact product quality and the lifespan of dies. Traditionally, die design has been based more on experience than on scientific principles. However, the introduction of reliable, precise, and user-friendly extrusion simulation software represents a significant shift in the industry.

This research presents a comprehensive approach to the design and optimization of aluminum extrusion technology, covering the entire process from initial concept to quenching. The study begins with the design of an extrusion die for aluminum profiles, followed by virtual process simulation in QForm software to analyze material flow, identify potential defects, and optimize tool geometry. The QForm UK Extrusion software provides a detailed simulation of the entire process, enabling the virtual evaluation of tool performance before physical trials. The simulation accurately predicts critical aspects such as material flow balance, profile quality, die stresses, and tool deflection, ensuring improved die life and production efficiency.

Furthermore, the approach extends to the simulation of the quenching process, optimizing cooling parameters to achieve the desired mechanical properties in the extruded profiles. By integrating extrusion and quenching simulations, the proposed methodology minimizes trial-and-error in real production, reducing both time and costs. Recent advancements in extrusion simulation and die optimization allow for the assessment of newly designed dies in a virtual environment, significantly decreasing the need for physical testing.

The results demonstrate that a systematic approach combining die design, extrusion simulation, and quenching optimization leads to higher product quality, extended tool life, and enhanced process efficiency. This methodology not only bridges the gap between empirical knowledge and scientific analysis but also establishes a robust framework for the development of high-performance extrusion tools. QForm is now able to provide a comprehensive analysis of the whole production process: starting from tool design and extrusion itself and ending with the possibility to simulate profile behavior during the quenching process including the

prediction of mechanical properties of the final product. This makes it possible to design and optimize the whole technology in the virtual world (technology development 4.0). This leads to zero-trial projects (first time right) that significantly increase the on-time delivery (OTD) index and provide the user with decisive commercial benefits.

**Keywords:** Profile extrusion; quenching; underfilling; welding quality; streaking lines; simulation; defect; QForm; ALE approach; quality; FEM, aluminium

- 
1. Micas Simulations Limited Metal Extrusion Bureau, Team leader
  2. (주)씨에이이테크놀러지 기술자문1팀, 책임연구원
  3. (주)씨에이이테크놀러지 대표이사
- # 교신저자 E-mail: csjang@caetech.co.kr

## 2단 압출을 통한 생분해성 마그네슘 미세튜브 제조와 압출비 및 Mn, Sr 첨가 효과에 관한 연구

김재성<sup>1,2</sup>, 김재연<sup>1</sup>, 임창동<sup>1</sup>, 서병찬<sup>1</sup>, 김하식<sup>1</sup>, 이상은<sup>1</sup>, 서종식<sup>1,#</sup>

### Fabrication of Bioresorbable Mg Microtubes via Two-Step Extrusion: Effects of Extrusion Ratio and Mn, Sr Additions

J. S. Kim, J.Y Kim, C. D. Yim, B. C. Suh, H. S. Kim, S. E. Lee, J. S. Suh

#### Abstract

생분해성 정형외과 임플란트와 혈관질환 치료용 소재는 미래 생체 삽입형 의료기기의 핵심 기술 중 하나이다. 현재 사용되고 있는 혈관용 스텐트는 영구적으로 체내에 남는 stainless steel, Co-Cr 또는 nitinol 합금으로 제조되어 혈전증, 지속적인 염증 유발 등 부작용을 일으킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해 생분해성 스텐트가 대안으로 주목받고 있다. 마그네슘(Mg)은 생체 적합성과 생분해성으로 인해 체내 삽입형 스텐트용 금속소재로 각광받고 있다. 그러나 낮은 기계적 강도와 빠른 분해 속도, 가공성의 제약 등으로 인해 임상 적용에는 여전히 한계가 존재하며 현재 가공 열처리와 합금화를 통해 이를 개선하는 연구가 진행되고 있다. 스텐트 삽입술 중 혈관의 손상없이 복잡한 혈관을 통하여 원하는 위치에 안전하게 도달하기 위해서 얇은 스트럿 두께가 요구되며 이를 위해 우수한 기계적 물성 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 2단 직접 압출 공정을 활용하여 스텐트 제작에 필요한 미세튜브를 압출비를 달리하여 제조하여 미세튜브 형상의 치수와 벽 두께의 변화에 따른 물성과 생분해 거동을 평가하였으며, 그 후 Mn, Sr 원소의 첨가에 따른 물성과 생분해 거동의 변화도 비교 분석 하였다. 압출비가 증가할 수록 결정립 미세화를 통해 Mg 미세튜브의 강도가 증가하였고 결정립계 밀도의 증가에 따른 생분해 속도도 증가하는 것을 확인했으며, Mn, Sr의 첨가를 통해 결정립 미세화 및 석출 강화가 일어나 강도는 증가하였지만 석출상의 의한 갈바닉 부식으로 인해 생분해 거동이 더욱 가속화되는 것을 확인하였다.

**Keywords:** Biodegradable magnesium alloy, Microtube, Extrusion, Mechanical properties, In vitro degradation.

1. 한국재료연구원 경량재료연구본부

2. 부산대학교 재료공학과 석사과정

# 한국재료연구원, 경량재료연구본부, 책임연구원, E-mail: jssuh@kims.re.kr

# 롤의 탄성 변형을 고려한 선재 압연 공정에서 소재 단면 형상 및 롤에 걸리는 물리량 예측

김규태<sup>1</sup>·이영석<sup>#</sup>

## Prediction of material cross-sectional shape and physical quantities acting on rolls in wire rod rolling process considering elastic deformation of rolls

K. T. Kim, Y. Lee

### Abstract

본 연구에서는 기존의 3 차원(3D) 선재 압연 해석에서 강체(Rigid Body)로 가정하던 를을 탄성 변형이 가능한 변형체(Deformable Body)로 모델링하고, 하우징 및 베어링을 추가하여 실제 공정에서 사용되는 압연기 구조를 구현하였다. 이러한 모델링은 실제 공정 중 발생할 수 있는 를 움직임(Roll Movement) 및 를 벤딩(Roll Bending) 현상을 정밀하게 모사하기 위함이다.

변형체 를 모델은 를의 비대칭성과 공형 번호를 고려할 수 있는 구조적 특징을 갖고 있으며, 이를 구현하기 위해 ABAQUS를 활용한 동적 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 과정에서는 소재 온도, 치입 각도, 를의 공형 번호 변경, 연속 압연 여부 등 다양한 공정 조건을 변화시켜 이에 따른 소재의 단면 형상 변화를 비교하였다. 그 결과, 기존의 강체 를 모델 대비 변형체 를 모델을 적용한 경우 소재의 폭 펴짐은 약 1.3% 감소하였고, 높이는 0.3% 증가하였으며, 압연 하중은 약 3.5% 감소하는 효과를 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 실제 공정에서 압연된 소재의 단면 형상과의 정량적 비교를 통해 해석 결과의 신뢰성을 검증하는 실험적 연구가 병행되어야 할 것이다.

**Keywords:** Abaqus, Elastic Roll Modeling, Rolling, Roll movement and Bending

---

1. 중앙대학교 기계공학부, 대학원생

# 중앙대학교, 기계공학부, 교수, E-mail: ysl@cau.ac.kr

# 간이등가회로를 이용한 모터 전류 기반 토크, 롤 힘 예측 연구

전진표<sup>1</sup>· 남규한<sup>1</sup>· 이동윤<sup>2</sup>· 이영석<sup>#</sup>

## A Study on Torque and Roll Torque Prediction Based on Motor Current Using a Simplified Equivalent Circuit

J. P. Jeon, G. H. Nam, D. Y. Lee and Y. S. Lee

### Abstract

본 연구에서는 압연기를 구동하는 3상 유도 전동기의 전류를 기반으로 롤 토크 및 압하력을 예측하는 방안을 제안하였다. 이를 위해 실험실 규모의 냉간 압연기를 설계·제작하여 압연 실험을 수행하였다. 실험 시편으로는 압연 전 두께 2mm, 길이 400mm의 순동 판재를 사용하였으며, 실험 변수로는 롤 직경(100, 85mm), 시편 폭(25, 40mm), 압하율(10, 15, 20%)을 설정하였다. 유도 전동기의 간이 등가회로를 바탕으로 입력 전류와 전압 간의 관계식을 도출하였고, 이를 통해 슬립(slip)을 계산하였다. 계산된 슬립은 환산 토크식에 적용하여 롤 토크를 예측하였으며, 유한요소해석(FEA) 결과와 비교하여 검증하였다. 또한 환산된 토크를 토크-압하력 관계식을 통해 압하력으로 환산하였고, 측정된 압하력 및 유한요소해석 결과와 비교하여 모델의 신뢰성을 평가하였다. 본 연구에선 압연 공정 중 발생하는 토크 및 압하력을 실시간으로 예측할 수 있는 보정 기반 환산 수식을 제안하였다. 분석 결과, 제안된 방법은 모터 전류 데이터를 활용하여 롤 토크는 13.8%, 압하력은 25.0% 오차 범위 내에서 신뢰성 있게 예측할 수 있음을 확인하였다. 이는 기존 유한요소해석을 대체하거나 병행하여 해석 시간을 단축하여, 센서 설치가 어려운 산업 현장에서도 실시간 모니터링 및 제어에 효과적으로 활용될 수 있는 실용적인 기술적 기반을 제공한다.

**Keywords:** Simplified Equivalent Circuit, Rolling Mill, Torque, Roll Force, Motor Current, Cold Rolling

---

1. 중앙대학교 기계공학부, 대학원생

2. University of Iowa, 대학원생

# 교신저자: 중앙대학교 기계공학부, 교수, E-mail: ysl@cau.ac.kr

# 바나듐이 첨가된 고망간강 열간압연재의 미세조직 분석 및 항복강도 예측 모델 개발

송호정<sup>1</sup>· 박시욱<sup>2</sup>· 김용진<sup>2</sup>· 박건우<sup>3</sup>· 이동호<sup>4</sup>· 장재훈<sup>5</sup>· 정재석<sup>6</sup>· 전종배<sup>#</sup>

## Development of yield strength prediction model based on microstructure analysis of V-added hot-rolled high-Mn steels

H. J. Song, S. W. Park, Y. J. Kim, G. W. Park, D. H. Lee, J. H. Jang, J. B. Jeon

### Abstract

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 미세조직 분석 및 항복강도 예측 모델 정밀화에 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 열역학 시뮬레이션으로 오스테나이트 내 각 원소의 고용도를 추정하였다. 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 석출물과 기지의 정합성을 분석 하기 위하여 HRTEM 분석을 진행하였다. HRTEM 분석 결과 일부 석출물이 기지와 정합성을 띤다는 것을 관측하였다. 이에 VC의 반경에 따라 석출물과 전위 간 상호작용을 dislocation looping mechanism과 dislocation shearing mechanism으로 나누어 석출강화를 분석하였다. 위의 방법들을 적용하여 항복강도를 예측한 결과, 선행연구에서 적용된 방법과 비교하여 실험값과의 오차가 줄어들었다. 본 연구를 통해 고망간강의 정밀한 항복강도 예측 모델의 적용을 시도하였으며, 예측 모델 적용 신뢰성 향상의 가능성을 제시하였다.

**Keywords:** High-Mn steel, Yield Strength Prediction, Strengthening Mechanism, Vanadium Carbide, Dislocation Shearing

- 
1. 동아대학교 금속공학과, 대학원생
  2. 국방과학연구소, 선임연구원
  3. 울산과학기술원 신소재공학과, 대학원생
  4. 포스코 기술연구원, 책임연구원
  5. 한국재료연구원 재료정밀분석실, 책임연구원
  6. 두산에너빌리티 기술연구원, 책임연구원

# 교신저자의 소속, 부서, 직위, E-mail: 동아대학교, 신소재공학과, 부교수, jbjeon@dau.ac.kr

## 12. 일반 구두 발표

모델링 및 시뮬레이션

금속 성형 분야의 디지털화/가상화

표면 및 인터페이스

자율 제조

( 제 6 발표회장 )

# 심리스 파이프 제조 공정에서 맨드렐 마모에 영향을 미치는 공정 변수의 영향 분석

윤용석<sup>1</sup>· 이정화<sup>1</sup>· 조의열<sup>2</sup>· 홍성모<sup>3</sup>· 이경훈<sup>#</sup>

## Analysis of the effect of process variables on mandrel wear in seamless pipe manufacturing

Y.S. Yoon, J.H. Lee, E.Y. Cho, S.M. Hong, K. Lee

### Abstract

심리스 파이프는 만네스만 피어싱 공정을 사용하여 제조되며, 이음매 없는 파이프를 만들 수 있어 용접 파이프에 비해 결함 발생 가능성이 낮다. 이러한 파이프는 고온, 고압 그리고 높은 내식성이 요구되는 환경에서 주로 사용된다. 장비 중심부에 위치한 맨드렐은 고온 상태에서의 지속적인 접촉으로 인해 과도한 마모가 발생하고, 이로 인해 빈번한 교체가 이뤄진다. 본 연구에서는 만네스만 피어싱 공정에서 발생하는 빌렛 중심부 파괴를 예측하기 위해 데미지 모델의 비교 분석과 맨드렐 마모를 개선하기 위해 관련 변수의 영향도를 평가하였다.

**Keywords:** Mannesmann, Seamless Pipe, Damage, Wear

- 
1. (주)솔루션랩
  2. 한국산업기술시험원
  3. (주)세창스틸

# (주)솔루션랩, klee@solution-lab.co.kr

# 소성 및 크리프를 고려한 하이브리드 본딩 계면 상호작용 및 잔류응력 분석

전형주<sup>1</sup>· 김사라은경<sup>2</sup>· 장혜진<sup>3</sup>· 이명규<sup>#</sup>

## Analysis of interface interaction and residual stress considering plasticity and creep in hybrid bonding

H. Jeon, S. E. Kim, H. Jang, M. G. Lee

### Abstract

본 연구에서는 Hybrid Bonding 공정 중 금속(Cu)과 절연층 계면의 복합 물리 거동을 반영한 유한요소 기반 통합 모델을 제안한다. Cu 계면 결합은 온도, 압력, 시간에 따라 발생하는 고상화산 및 온도 의존 소성 변형(plasticity)과 크리프(creep) 거동을 함께 고려하였으며, 절연층 간 결합은 계면 거리 변화에 따른 반데르발스 상호작용 기반으로 구성하였다. 각 계면 모델은 개별 물리 기반 거동으로 정의되었으며, 이를 heating-holding-cooling 의 열 사이클 전 구간에 걸쳐 연속적으로 해석 가능하도록 FEM 프레임워크에 통합하였다. 특히 금속 계면에서는 공정 조건에 따른 응력 집중(stress concentration), 잔류응력(residual stress) 분포, 그리고 본딩 인터페이스에서의 시간 의존 소성 변형률 누적을 해석하였다. 제안된 모델은 본딩 공정 변수에 따른 결합 민감도를 체계적으로 분석할 수 있는 기반을 제공하며, 고신뢰성 3D 패키징 설계를 위한 계면 물성 기반 해석 지침을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Hybrid bonding, Interfacial mechanics, Finite element analysis (FEA), Residual Stress, Bonding reliability prediction

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

2. 서울과학기술대학교 지능형반도체공학과, 교수

3. 서울대학교 재료공학부, 교수

# 서울대학교 재료공학부, 교수, E-mail: myounglee@snu.ac.kr

# 유한요소법을 이용한 축방향 자속 영구자석 모터용 각형 와이어 권선 공정의 굽힘성 평가

김진수<sup>1,2</sup>· 윤은유<sup>3</sup>· 권용남<sup>3</sup>· 홍종화<sup>#</sup>

## Bendability Evaluation of Flat-Wire Winding Process for Axial Flux Permanent Magnet Motor using Finite Element Method

J. Kim, E.-Y. Yoon, Y.-N. Kwon, J.-H. Hong

### Abstract

기존의 방사형 자속 영구자석(Radial Flux Permanent Magnet, RFPM) 모터에 비해 전력 밀도와 중량 효율이 현저히 우수한 축방향 자속 영구자석(Axial Flux Permanent Magnet, AFPM) 모터는 최근 전기차 모터 시장 성장의 주요 동력으로서 각광받고 있다. AFPM 모터의 높은 전력의 핵심은 독특한 모터 코어 설계와 권선 성형 방식에 있다고 볼 수 있다. 충진율을 극대화하기 위해 AFPM 모터는 기존의 원형 와이어 대신 직사각형 단면의 와이어를 사용하여 제작된다. 각형 와이어는 공간 효율을 현저히 높일 수 있는 장점이 있으나, 권선 성형 공정 중 변형에 상당히 취약하다는 단점이 있다. 따라서 높은 권선 밀도를 유지하면서 충분한 성형성을 보장할 수 있는 각형 와이어 권선 성형 공정을 개발할 필요가 있다. 특히, 직사각형 단면의 짧은 변 방향으로 권선을 굽혀가며 성형하는 공정의 특성상, 소재의 굽힘 성능에 따라 성형 공정의 품질이 크게 좌우된다. 따라서, 본 연구에서는 AFPM 모터에 사용되는 각형 구리 와이어의 굽힘성(Bendability)을 평가하기 위해 V형 다이 자유 굽힘(V-die air bending) 시험을 진행하고 이를 수치 해석 시뮬레이션으로 검증하였다. 먼저, 각형 구리 와이어의 인장시험을 통해 구리의 기본적인 기계적 물성을 확보하고, 다양한 조건에 따라 V형 다이 굽힘 시험을 수행하였으며, 이에 대응하는 유한 요소 해석 결과와 비교하여 구리 권선의 굽힘성을 평가하였다.

**Keywords:** Bendability, Flat-Wire Winding, V-die Air Bending, AFPM Motor, Numerical Simulation

- 
1. 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 학생연구원
  2. 과학기술연합대학원대학교(UST), 신소재공학, 박사과정
  3. 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 책임연구원

# 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 선임연구원, E-mail: jhong@kims.re.kr

# 니켈도금강판을 이용한 4680 배터리 셀 캔 다단 딥 드로잉 공정 최적화

서예찬<sup>1</sup> · 지수민<sup>2</sup> · 이세동<sup>2</sup> · 성홍석<sup>2</sup> · 윤은유<sup>1</sup> · 홍종화<sup>1, #</sup>

## Optimization of Multi-Step Deep Drawing Process for 4680 Battery Cell Can with Nickel-Plated Steel Sheets

Y. C. Seo, S. M. Ji, S. D. Lee, H. S. Seong, E.-Y. Yoon, J.-H. Hong

### Abstract

전기자동차 배터리 기술이 발전함에 따라 고용량과 내구성을 갖춘 원통형 배터리가 주목받고 있다. 또한 배터리 제조업체들은 생산성 향상과 품질 확보를 위한 다양한 공정 최적화 방안을 모색하고 있다. 이전 연구에서는 4680 배터리 셀 캔의 제작을 위해, 유한 요소 해석(Finite element analysis, FEA)을 활용하여 니켈도금강판을 적용한 다단 딥 드로잉 공정(Multi-step deep drawing process)을 개발하였다. 본 연구에서는 개발된 다단 딥 드로잉 공정 모델을 통해 공정에 영향을 미치는 요소에 대하여, 매개변수 연구(Parametric study)를 진행하였다. 각 공정 변수에 대한 민감도를 바탕으로 공정 최적화를 진행하였고, 형상 정밀도를 확보하고 균일한 두께가 유지되는 최적의 성형조건을 도출하였다. 본 연구를 통해 향후 4680 배터리 생산 공정에 적용할 수 있도록 조건을 반영하여, 이를 통해 캔 성형 공정에서 발생할 수 있는 두께 불균일, 균열, 주름 등의 결함을 예측하고 최소화하는 데 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

**Keywords:** 4680 Cylindrical Battery Cell Can, Multi-Step Deep Drawing Process, Nickel-Plated Steel Sheets, Finite Element Analysis (FEA), Process Optimization

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부

2. LT정밀, 연구개발팀

# 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 선임연구원, E-mail jhong@kims.re.kr

# 베어링 레이스웨이의 고주파 열처리 유한요소해석

송정우<sup>1</sup>· 강성훈<sup>2</sup>· 오영석<sup>#</sup> 강종훈<sup>##</sup>

## FE Analysis of Induction Heating Process of Bearing Raceway

J. W. Song, S. H. Kang, Y. S. Oh, J. H. Kang

### Abstract

풍력 발전기의 용량 증가에 따라 대형 슬루잉 베어링에서 발생하는 국부적인 접촉 응력을 헤르츠 접촉(HERTZIAN CONTACT) 메커니즘에 의해 4000 MPa 이상에 이를 수 있다. 이러한 극한 조건을 견디기 위해 레이스웨이는 충분히 깊은 경화층을 필요로 한다. 경화 깊이의 평가하는 방법 중 하나인 고주파 열처리의 유한요소해석을 수행하기 위해서는 전류 증폭기의 배수와 같은 매개변수 설정이 필수적이나, 제품마다 조건이 상이하고 정확한 수치를 얻기 현실적으로 어려운 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 기본 수식을 기반으로 매개변수를 설정하고 해석 과정을 최적화하는 데 초점을 두었다. 본 해석에서는 최소 5.9 MM의 경화 깊이를 확보하기 위해 전류값을 20,000 A로 설정하여 딥러닝 기법의 매개변수를 총 6가지의 조건에 대해 해석을 수행하였다. 두 개의 인덕터를 배치하고, 다양한 전류의 조합을 적용하여 유한요소해석을 진행하였다. 경화 깊이와 온도 간의 상관관계는 42CRM04 소재의 마르텐사이트 형성 온도를 기준으로 온도 해석만을 활용하여 분석하였으며, 이를 통해 해석 시간을 단축할 수 있었다. 분석 결과, 온도에 따른 예측 경화 깊이는 오차범위 0.01 이내로 실제 경화 깊이와 거의 일치하여, 온도 해석만으로도 충분한 정확도를 확보할 수 있음을 확인하였다. 또한, 딥 러닝 기법을 활용하여 활성함수 RELU와 최적화 알고리즘 ADAM을 적용하고, 총 22개의 예측 데이터를 기반으로 다양한 전류 조건에서의 경화 깊이를 예측하였다. 학습 결과, 학습 데이터가 결정계수 99.5%와 평균 제곱근 오차 0.026, 검증 데이터는 결정 계수 99.3%와 평균 제곱근 오차 0.02의 높은 정확도를 나타냈다. 특히, 첫 번째 인덕터에 8,000 A, 두 번째 인덕터에 11,000 A를 인가한 조건과, 첫 번째 인덕터에 9,000 A, 두 번째 인덕터에 11,000 A를 인가한 조건에서 유한요소해석을 통해 도출된 예측 경화 깊이는 실험 결과와 높은 일치도를 보여, 예측 기법의 유효성을 입증하였다.

이 연구는 고주파 열처리의 핵심 매개변수를 도출함과 동시에, 유한요소해석과 딥러닝을 결합한 새로운 접근법을 통해 해석 시간과 비용을 절감할 수 있는 효율적인 설계 방안을 제시하였다.

**Keywords:** Slewing bearing(슬루잉 베어링), Finite element simulation (유한 요소 해석), Induction heating (고주파 열처리), Deep neural network(심층신경망), Skin depth(경화 깊이)

1. 한국재료연구원 재료공정본부, 연구원

2. 한국재료연구원 재료공정본부, 본부장/책임연구원

# 한국재료연구원 재료공정본부, 책임연구원

## 중원대학교, 무인항공기계학과, 부교수, jhkang@jwu.ac.kr

# ALE 기법을 이용한 유체가 담긴 그릇의 낙하 및 충돌 거동 시뮬레이션 및 실험 검증

황순재<sup>1</sup> · 홍석무<sup>2,\*</sup>

## Simulation and Experimental Validation of the Drop Behavior of a Water-Filled Container Using the ALE Method

S. J. Hwang, S. Hong

### Abstract

다양한 산업 분야에서 유체가 포함된 구조물의 낙하 및 충돌 거동을 정확히 예측하여 이때 발생하는 문제를 사전에 방지하는 것으로 중요한 과제로 떠오르고 있다. 특히 구조물 낙하 및 충돌 거동은 유체-구조 간 상호 작용 (Fluid-Structure Interaction, FSI)을 통해 실시간으로 두 영역이 상호작용하며 변화하는 모습을 고려한 해석을 진행할 필요가 있다. 따라서 본연구에서는 유체가 담긴 그릇의 낙하 시 유체와 그릇에 발생하는 거동을 실시간으로 상호 작용하는 해석을 통해 예측하려 하며 이를 실험을 통해 검증하려 한다. 이때 낙하 충돌 과정에서 발생하는 유체와 구조물 간의 복잡한 상호 작용을 고려한 해석을 진행하기 위한 방법으로 ALE(Arbitrary Lagrangian–Eulerian) 기반 유한요소 해석을 수행하였다. 본 해석을 통해 그릇과 유체가 실시간으로 상호 작용하며 발생하는 거동을 예측할 수 있었다. 본 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 동일한 조건 하에 실제 실험을 진행하였으며, 초고속 카메라를 이용해 낙하 시 그릇 내부 유체 거동을 측정하였다. 해석 결과와 실험결과를 통해 획득한 유체의 거동을 비교 분석하였으며 두 결과간 차이가 거의 없음을 확인하였다. 이를 통해 유체가 포함된 구조물의 낙하 및 충돌 거동을 예측하여 이때 발생하는 문제를 사전에 방지 가능할 것으로 기대된다.

**Keywords:** FEM(Finite Element Method), ALE(Arbitrary Lagrangian–Eulerian) method, FSI(Fluid-structure interaction), Drop experiment simulation, Solid-fluid coupling analysis

- 
1. 공주대학교 미래융합공학부, 대학원생
  2. 공주대학교 미래자동차공학과·그린카기술연구소, 교수

# Corresponding Author: Department of Future Automotive Engineering,  
Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr

# Computational material design based on dislocation plasticity

Ill Ryu

## Abstract

Dislocation is known as the source of plastic deformation in most crystalline metals. In this study, we employed a newly developed mesoscale defect dynamics model coupling dislocation dynamics (DD) and finite element modeling (FEM) to investigate mechanical behavior of metals, focusing on the role of dislocation plasticity. Using the coupled model, we could keep track of the dynamic motion of dislocations under complex loading and environmental conditions, as well as predicting macroscopic mechanical response. In contrast to continuum based phenomenological models, our model could provide a unique opportunity to investigate detailed dynamic evolution of defect microstructure, which could allow us to obtain fundamental understanding of deformation mechanisms. Finally, new computational design guidelines for enhancing mechanical properties of metal alloy will be presented especially for nano-structural metals.

---

1. Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, South Korea

## 디지털트윈 및 AI 를 통한 제조 혁신

문명수<sup>1</sup>

### Manufacturing Innovation through Digital Twins and AI

M. S. Moon

#### Abstract

As an industrial tool, digital twins are used in various fields to virtually predict the outcomes of manufacturing processes. Additionally, various application technologies, such as utilizing existing data through AI and machine learning, are being attempted.

These two concepts are complementary technologies that will be key drivers in the thin sheet manufacturing sector, enabling productivity improvement, cost reduction, quality enhancement, process optimization, and predictive maintenance. Especially, AI is expected to play a crucial role in building a more intelligent and efficient thin sheet manufacturing system by enhancing the data analysis capabilities and real-time control functions of digital twins.

AutoForm Group aims to explain the application of digital twins and AI, the features of the technologies they can provide, and the products and services used in their application, based on their experience in introducing and maximizing the use of innovative digital product lines in existing metal manufacturing processes.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Smart Production, Press Stamping, Digital Twin, Digital Transformation

---

1. 오토�om엔지니어링코리아 컨설팅본부, 부장

# 오토�om엔지니어링코리아 컨설팅본부, 부장, E-mail:  
myungsoo.moon@autoform.kr

# 대면적 전자빔 공정에서 발생하는 크레이터의 형성 최소화 를 위한 GAN 기반 예측 모델 개발

오민기<sup>1</sup>· 윤준석<sup>1</sup>· 오영석<sup>1</sup>· 강성훈<sup>1</sup>· 이호원<sup>2</sup>· 김지수<sup>##</sup>· 오세혁<sup>#</sup>

## Deep learning-based prediction of crater formation in a large pulsed electron beam (LPEB) irradiation process

Mingi Oh, Junseok Yoon, Young-Seok Oh, Seong-Hoon Kang, Ho Won Lee, Jisoo Kim, Sehyeok Oh

### Abstract

대면적 전자빔 공정은 전자빔의 에너지를 이용해 소재 표면을 짧은 시간동안 용융 및 재응고시켜 기계적 물성, 화학적 안정성, 표면 조도 등을 향상시키는 표면처리 기법이다. 하지만 해당 공정 과정에서 비금속 재료의 증발로 인해 발생하는 크레이터는 표면 품질을 저하시키기 때문에 전자빔 공정을 적용할 때는 크레이터의 형성을 최소화하는 공정 변수 최적화가 필수적으로 요구된다. 이전에 전자빔이 조사되었을 때 온도 분포나 용융층의 깊이 등을 예측하는 연구는 이루어 졌으나, 직접적으로 크레이터의 생성을 예측하는 것은 어려웠다. 본 연구에서는 대면적 전자빔 공정 변수와 소재 조건에 따른 크레이터 형성을 예측할 수 있는 생성적 적대 신경망 기반의 예측 모델을 제안한다. 모델의 입력으로 전자빔 공정에서 에너지밀도 및 전자빔 조사 횟수가 사용되었으며 소재 조건으로는 4개 합금 (SKD11, SKD61, NAK80 및 KP1)의 조성비, 그리고 열확산도 값을 사용하였다. 모델의 출력은 전자빔 조사면의 광학현미경 이미지이다. 예측모델이 생성한 이미지는 별도의 비지도 학습 모델을 통해 크레이터와 그 외 배경을 서로 구분하는 과정을 거친다. 이어서 노이즈 제거 과정을 거친 이미지에 대해 정량 분석을 수행하여 실제 이미지와 예측 모델이 생성한 이미지 간에 크레이터의 형상 및 분포가 일치하는지 비교하였다. 비교 기준은 크레이터들의 평균 지름, 총 크레이터 개수, 거리에 따른 분포이다. 9개의 테스트 데이터를 이용하여 정확도를 비교했을 때, 크레이터의 지름에 대한 평균 정확도는 84.5 %, 평균 절대값 오차는  $3.7 \mu\text{m}$ 로 확인되었다. 이어서 총 크레이터 개수에 대해서 93.8 %의  $R^2$ 값을 보였으며 거리에 따른 분포의 유사도는 Jensen-Shannon divergence를 이용해 측정했을 때 88.9 %로 확인되었다. 이러한 정량 분석 결과를 바탕으로 예측 모델이 실제 공정 결과와 유사한 크레이터 분포가 나타나도록 이미지를 생성하고 있음을 확인할 수 있었다. 정량 분석 외에 공정 조건 중 학습 과정에서 사용된 값들 사이로 점진적으로 값을 변경해 가며 이미지를 생성하는 실험도 수행하였다. 해당 실험은 예측 모델이 이미지를 생성할 때 단순히 학습 데이터를 보간해서 출력하는 것인지, 혹은 실제로 입력 값에 해당하는 이미지를 새롭게 생성하는지 확인하기 위함이다. 실험 수행 결과 입력 값이 학습 시 사용되었던 값

들 사이를 이동할 때 정상적인 이미지를 생성하는 동시에 입력 값의 변화에 따라 이미지 역시 점진적으로 변하는 것을 확인하였으며 이를 통해 본 모델이 이미지의 입력 값에 따라 실제 이미지를 생성하고 있음을 확인할 수 있었다. 예측 이미지를 생성하는데 소요되는 시간은 0.22초로 짧은 시간 내에 이미지 생성이 가능하므로 해당 예측 모델을 통해 최적화된 공정 변수 탐색에 드는 시간과 비용을 절약할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Metals and alloys, Mechanical properties, Computer simulations, Large pulsed electron beam (LPEB) Craters, Deep learning

- 
1. 한국재료연구원, 재료공정연구본부
  2. 한국재료연구원, 재료데이터·분석연구본부
- # 한국재료연구원, 재료데이터·분석연구본부, 선임연구원, shoh@kims.re.kr  
## 경북대학교, 정밀기계공학과, 부교수, js.kim@knu.ac.kr  
경북대학교, 미래과학기술융합학과, 부교수, js.kim@knu.ac.kr  
경북대학교, 정밀기계화학시스템융합연구소, 부교수, js.kim@knu.ac.kr

# 알루미늄 박판의 표면결함 검출 시스템 개발을 위한 AI 기반 합성 데이터 생성 기법에 관한 연구

김진구<sup>1#</sup>· 이관규<sup>2</sup>· 곽호택<sup>3</sup>

## Study on Synthetic Data Generation Using AI for Development of Surface Defect Detection System of Aluminum Sheet

Jingu Kim, Gwangyu Lee, Hotaek Kwak

### Abstract

전기차 및 2차 전지 산업의 성장으로 고품질 알루미늄 박판의 수요가 증가함에 따라, 표면 품질 관리의 중요성 또한 커지고 있다. 이러한 품질 관리를 위해 AI 기반 비전 검사가 주목 받고 있으나, 실제 제조 현장에서는 크랙, 흑점 등 주요 결함의 발생 빈도가 낮아 학습용 결함 데이터 확보에 어려움이 존재한다. 본 연구는 소량의 실제 결함 데이터를 활용하여 Diffusion 기반 이미지 생성 모델로 고품질의 증강 합성 데이터를 생성하였다. 이를 기반으로 YOLO 객체 탐지 모델을 학습하여 결함 검출이 가능한 AI 모델을 개발하는 것을 목표로 한다. 실험 방법은 정상 이미지와 실제 결함 데이터를 수집한 후, 텍스처와 형태를 묘사한 합성 결함 이미지를 다양하게 생성하고, YOLOv12 모델을 활용한 학습을 수행하였다. 또한 생성 데이터의 품질은 FID, SSIM, LPIPS 등의 지표로 평가하고, 최종 모델은 실제 테스트 이미지로 성능을 검증하였다. 본 연구를 통해 제한된 데이터 환경에서도 적용 가능한 검출 모델의 가능성을 제시하고, 제조 현장의 품질 검사 자동화에 기여하고자 한다.

**Keywords:** Aluminum Sheet, Diffusion Model, YOLOv12, Synthetic Data, Data Augmentation

### 후기(Acknowledgments)

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(제도부경도 600Hv, 경량화율 10% 이상 이종소재 치형 휠베어링 개발, RS-2024-00430258, 산업통상자원부)

---

1. (주)씨에이이테크놀러지, 책임연구원

2. (주)씨에이이테크놀러지, 사원

3. (주)씨에이이테크놀러지, 대표이사

# 교신저자 E-mail: jgkim@caetech.co.kr

## 13. 일반 구두 발표

International Session

- Material

- Process

( 제 7 발표회장 )

# 열처리 중 구상화 반응 속도 시뮬레이션

모하마드카스완디라자리<sup>1</sup>· 정석환<sup>1</sup>· 김민철<sup>1</sup>· 전만수<sup>#</sup>

## Simulating Spheroidization Kinetics during Heat Treatment

M. K. Razali, S. H. Chung, M. C. Kim, M. S. Joun

### Abstract

This study examines the spheroidization kinetics of cementite in Fe–0.8%C steel through numerical simulation using the metal forming software AFDEX. By replicating time-temperature profiles derived from prior experiments, the simulation models the evolution of cementite morphology during heat treatment involving repeated thermal cycling. The analysis quantifies changes in the spheroidization ratio over time, demonstrating a consistent increase with each cycle. The simulated results closely match experimental trends, validating the approach and showcasing the potential of simulation tools in predicting cementite transformations during heat treatment processes.

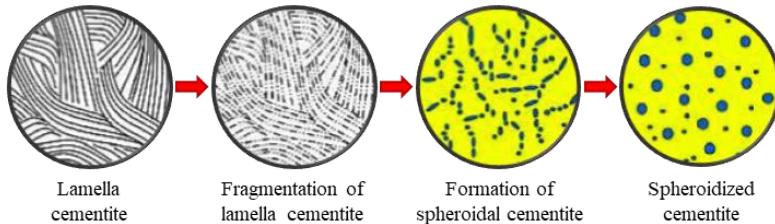


Fig. 1 Spheroidization kinetics of cementite [1]

**Keywords:** Spheroidization Kinetics, Cementite, Heat Treatment, Numerical Simulation

### 1. Introduction

Cyclic heat treatment has been shown to significantly influence the spheroidization behavior of cementite in high carbon steels. According to previous studies, alternating rapid heating and isothermal holding can accelerate the

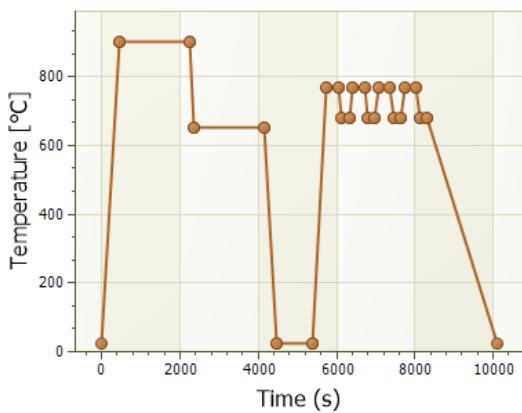
transformation of lamellar cementite into a spheroidized form, enhancing mechanical properties and processability. Building on this approach, the present study uses numerical simulation to analyze the kinetics of this transformation under repeated thermal cycling.

1. (주)엠에프알씨 기술연구소

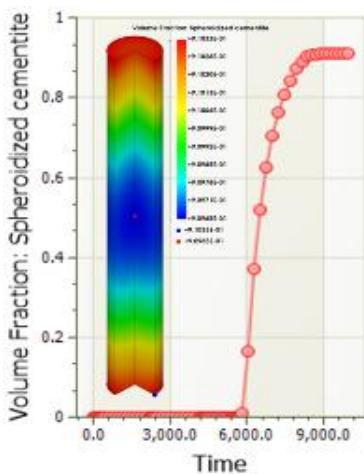
# 교신저자: 경상국립대학교 기계공학부, 교수.  
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

## 2. Heat treatment and spheroidization kinetics

Figure 1 shows the heat treatment cycle applied in this study. The corresponding prediction of cementite spheroidization kinetics is presented in Figure 2, quantitatively illustrating the change in spheroidization ratio over time.



**Fig. 2 Heat treatment cycle**



**Fig. 3 Spheroidized cementite**

## 3. Conclusion

In this study, the spheroidization kinetics of cementite under cyclic heat treatment conditions was predicted and quantified using numerical simulation. The simulation results showed trends consistent with experimental data, demonstrating the effectiveness of simulation tools in predicting microstructural changes during heat treatment.

## Acknowledgement

This research was supported by the Smart Manufacturing Innovation R&D Program (RS-2024-00446241) of the Ministry of SMEs and Startups.

## References

- [1] V. A. Alza, 2021, Spheroidizing in steels: Processes, mechanisms, kinetic and microstructure-A review. IOSR J. Mech. Civ. Eng. Vol. 18, pp.63-81.
- [2] Z. Q. Lv, B. Wang, Z. H. Wang, S. H. Sun, W. T. Fu, 2013, Effect of cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of cementite in high carbon steel. Mater. Sci. Eng. A, Vol. 574, pp.143-148.

# A fully coupled VPSC-dDRX(CA) model for predicting microstructure evolution during thermo-mechanical deformation of magnesium alloys

Wenjie Wu<sup>1</sup>, Wenzhen Chen<sup>2</sup>, Myoung-Gyu Lee <sup>\*</sup>

## Abstract

This study presents a fully integrated multi-scale modeling framework, VPSC-dDRX(CA), which combines a viscoplastic self-consistent crystal plasticity model with a physically based dynamic recrystallization (dDRX) scheme and cellular automaton. The model is designed to simulate the microstructural development of AZ31 magnesium alloys subjected to hot deformation, with particular attention to texture evolution influenced by dDRX mechanisms. Calibration was performed using isothermal uniaxial compression tests across a broad range of temperatures (523–673 K) and strain rates (0.001–10 s<sup>-1</sup>), from which constitutive expressions for dislocation hardening and recrystallization kinetics were derived. Model validation against experimental results demonstrated strong agreement, achieving less than 5% error in grain size prediction and below 10% deviation in texture orientation. At elevated temperatures and reduced strain rates, simulations revealed an increased activation of prismatic <a> slip and intensified dDRX, resulting in the attenuation of the <0002>/CD texture and the emergence of ring-like <0002>∠TD30° textures. In the case of multi-directional forging, alternating strain paths triggered non-basal slip, producing multi-component basal texture and promoting grain refinement, with an average size of 6.2 μm due to high nucleation efficiency and limited grain boundary mobility. For conical-die extrusion, heterogeneity between center and edge regions was closely linked to variations in local deformation paths, which altered the prevailing slip systems and dDRX responses. Overall, the proposed model offers a predictive and scalable approach for analyzing microstructure–texture interactions and guiding process design in magnesium alloy thermo-mechanical processing.

**Keywords:** Polycrystal plasticity, cellular automaton, Dynamic recrystallization, Thermo-mechanical, Microstructure, Magnesium alloys

---

1. Department of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Ph.D. candidate

2. Department of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, professor

# Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, professor, E-mail: myounglee@snu.ac.kr

# 비이상적인 단순 전단 변형 하에서의 전단 변형률 평가

한국봉<sup>1</sup>·윤정환<sup>#</sup>

## Shear strain evaluation under nonideal simple shear deformation

G. F. Han, J. W. Yoon

### Abstract

Simple shear tests are extensively adopted to reveal the stress-state-dependent mechanisms of material microstructure evolution with their corresponding mechanical properties, to develop sophisticated constitutive models capturing complex mechanical behaviors, and to precisely characterize the failure limits for shear-dominated or large-strain deformation processes. It has become a topic of growing interest because of its various distinctive capacities. In the current stage, the community lacks a widely-accepted and standardized procedure to conduct tests and to evaluate results, which makes the interpretation and comparation on experimental results to be indirect and difficult. Shear strain is commonly used to characterize the degree of deformation, but the method to estimate shear strain in experimental mechanics is often different from one to another, and uncertainties will appear due to the inconsistence. In this work, some representative methods to evaluate shear strain will be compared analytically and numerically. The influence of nonideal simple shear deformation (that is, the emergence of normal strain and rotation in ideal simple shear deformation, which is common in experiments due to the difficulty to reproduce ideal simple shear experimentally) will be investigated, and it was indicated that some specific shear strain estimations will lead to a certain degree of error at large deformation levels. The results provided are expected to enhance the understanding of experimental mechanics of simple shear test.

**Keywords:** Simple Shear Test, Nonideal Simple Shear Deformation, Shear Strain Evaluation

---

1. 한국과학기술원 기계공학과, 포스트닥터

# 한국과학기술원 기계공학과, 교수, E-mail: j.yoon@kaist.ac.kr

# 재료 편차를 고려한 스프링백 예측을 위한 응력 기반 그래프 신경망

왕후이<sup>1</sup>· 임현용<sup>2</sup>· 윤정환<sup>#</sup>

## Stress-Aware Graph Neural Network for Springback Prediction Considering Material Variations

H. Wang, H. Lim, J. W. Yoon

### Abstract

Accurate prediction of springback values is imperative in the cold forming process of Advanced High Strength Steel (AHSS) to determine the compensation coefficient. However, the inherent challenges in AHSS fabrication arise from notable variations in material properties influenced by process parameters. This study addresses the impact of material variation in AHSS and strives to enhance the efficiency of springback prediction through a synergistic application of Finite Element (FE) analysis and machine learning techniques. Initially, an accurate FE model was developed using LS-DYNA software, incorporating the Yoshida-Uemori (Y-U) kinematic hardening model to capture the Bauschinger effect. The material variation effect was accounted for by fine-tuning Y-U parameters to accurately reflect variations in material properties. Based on the FE simulation results, a graph neural network (GNN) was built and trained to predict the cross-section shape as well as stress distributions of the specimen. This integrated approach not only considers the material variations in AHSS but also leverages both FE analysis and GNN to provide a more robust and efficient springback prediction methodology.

**Keywords:** Springback, Graph Neural Network, Material Variation, Finite Element Methods

---

1. 한국과학기술원 기계공학과, 박사과정

#한국과학기술원 기계공학과, 교수 Email: j.yoon@kaist.ac.kr

# 압력 민감 재료의 이방성-차등 경화 거동을 위한 Lode 종 속 응력 불변 기반 항복 함수

왕송신<sup>1</sup>· 윤정환<sup>#</sup>

## Lode-dependent stress-invariant-based yield function for anisotropic-differential hardening of pressure sensitive materials

S. C. Wang, J. W. Yoon

### Abstract

Accurate characterization of strength difference covering full typical stress states, anisotropic hardening and strength differential effect is important for reliable numerical simulation of forming process of metal components, such as bending and deep drawing. Two stress-invariant-based functions are additively coupled by a weight function about stress triaxiality to accurately characterize the differential hardening behaviors from plane strain compression to equi-biaxial tension. The comprehensive experimental data of AA2195 are obtained, including uniaxial tension, uniaxial compression, plane strain tension and plane strain compression along rolling direction, diagonal direction and transverse direction as well as equi-biaxial tension and three-point bending, to evaluate the performance of the proposed model in terms of both theoretical prediction and numerical simulation. The experimental results show that AA2195 shows obvious plastic anisotropy and strength difference of different stress states. Theoretically, the proposed model combines the advantages of two coupled stress invariant-based functions and can accurately describe the plastic evolution of six typical stress states. Additionally, the deformation profiles and mechanical responses of different stress states and three-point bending simulated by the new model are consistent with the experimental values for AA2195. These evaluations illustrate the reliability and effectiveness of the new model in describing differential hardening behavior.

**Keywords:** Lode-dependent Anisotropic-asymmetric Frame, Stress-invariant-based Yield Function, Differential Hardening, Plastic Anisotropy, Strength Differential Effect

---

1. 한국과학기술원 기계공학과, 박사과정

# 한국과학기술원 기계공학과, 교수, E-mail: j.yoon@kaist.ac.kr

## 상온 및 극저온에서 316L 스테인리스강의 이방성 압축 거동: 트윈링과 변형 메커니즘의 영향

사우라브 파와르<sup>1</sup>, 야자르<sup>2</sup>, 쿠샤할 툴<sup>1</sup>, 위걸 서<sup>1</sup>, 창곤 정<sup>3</sup>, 허윤욱<sup>3</sup>, 최시훈<sup>1</sup>

### Anisotropic Compression Behavior of 316L Stainless Steel at Room and Cryogenic Temperatures: The Influence of Twinning and Transformation Mechanisms

Saurabh Pawar<sup>1</sup>, K. U. Yazar<sup>2</sup>, Khushahal Thool<sup>1</sup>, Wi-Geol Seo<sup>1</sup>, Chang-Gon Jeong<sup>3</sup>, Yoon-Uk Heo<sup>3</sup>, Shi-Hoon Choi\*<sup>1</sup>

#### Abstract

This study investigates the microstructural evolution and deformation behavior of 316L stainless steel (SS) fabricated via the direct energy deposition (DED) technique under controlled compressive loading. Compression tests were conducted at both room temperature (RT) and cryogenic temperature (CT), along with the scanning direction (SD) and the transverse direction (TD) of the material. A combination of experimental techniques electron backscatter diffraction (EBSD), transmission electron microscopy (TEM), and electron channeling contrast imaging (ECCI) alongside dislocation density-based crystal plasticity modeling (DAMASK), was employed. Microstructural analysis of the as-fabricated DED samples revealed columnar grain structures with cellular substructures, where δ-ferrite cell boundaries enriched in Cr and Mo were observed due to elemental segregation. At RT, deformation in the SD samples was primarily governed by dislocation glide and twinning in [001]-oriented grains. In contrast, TD samples predominantly deformed via slip. A marked difference in yield strength between SD and TD samples at CT was observed, indicating significant mechanical anisotropy. This anisotropy is attributed to variations in grain morphology, local stress heterogeneities due to variant selection, and the activation of martensitic transformations ( $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$  and  $\gamma \rightarrow \alpha'$ ). Simulations incorporating transformation-induced plasticity (TRIP) and twinning-induced plasticity (TWIP) mechanisms revealed that grains oriented near [110] and [111] relative to the loading direction (LD) exhibited higher deformation resistance. This correlates well with the experimental observation of reduced twinning and martensite formation in such orientations. Overall, the deformation mechanisms were strongly influenced by the loading temperature. At RT, twinning dominated the deformation process, accompanied by dislocation slip primarily mediated by screw dislocations. At CT, the mechanical response anisotropy was governed by the interaction between hard and soft phases, with martensite variant selection playing a key role in the overall deformation behavior. Furthermore, the activation of TWIP and TRIP mechanisms was found to be highly dependent on crystallographic orientation.

**Keywords:** 316L SS, Direct energy deposition, Cryogenic deformation, Crystal plasticity, Phase transformation.

- 
1. Department of Advanced Component and Material Engineering, Sunchon National University, Suncheon, ROK
  2. Centre for Innovative Manufacturing Research, Vellore Institute of Technology, Vellore, Tamil Nadu, India
  3. GIFT, Pohang University of Science and Technology, Pohang, ROK

\*Corresponding author: [shihoon@scnu.ac.kr](mailto:shihoon@scnu.ac.kr)

## 점성 플라스틱 자체 일관성 시뮬레이션을 사용한 마찰 교반 처리된 AA6xxx 시트의 미세 질감 진화

프리탐 알루리<sup>1</sup>, 라리트 카우식<sup>1</sup>, 쿠사할 툴<sup>1</sup>, 아만 굽타<sup>1</sup>, 아비셰크 쿠마르 싱<sup>1</sup>, 최시훈<sup>1#</sup>

### **Evolution of Microtexture in the Friction Stir Processed AA6xxx Sheets using Visco-Plastic Self Consistent Simulations**

**Preetham Alluri<sup>1</sup>, Lalit Kaushik<sup>1</sup>, Kushahal Thool<sup>1</sup>, Aman Gupta<sup>1</sup>, Abhishek Kumar Singh<sup>1</sup>,  
Shi-Hoon Choi<sup>1#</sup>**

#### **Abstract**

The transformation of microstructure and microtexture in the stir zone (SZ) of friction stir processed (FSP) AA6xxx sheets was investigated using electron back scatter diffraction (EBSD) analysis, transmission electron microscopy (TEM), and polycrystal modelling. EBSD analysis revealed fine equiaxed grains with grain size average ( $GS_{avg}$ ) 2 um in the SZ regions. TEM results supported the dynamic recrystallization (DRX) phenomena in the SZ by revealing the presence of fine dislocation free grains. Finite element analysis (FEA) was used to track and extract the thermomechanical history data at different material points (Retreating Side (RS), Center, Advancing Side (AS)) in the SZ during the FSP simulation and fed as an input to the visco-plastic self-consistent (VPSC) polycrystal model. For the evolution of microtexture evolution in the SZ, a DRX scheme was incorporated into the VPSC model that featured Zener-Hollomon parameter-dependent microscopic hardening. The shear components of velocity gradient  $L_{21}$  and  $L_{23}$  were found to be prime contributors for the texture formation in the RS and Center regions, while  $L_{21}$ ,  $L_{23}$  and  $L_{13}$  were the prime contributors for the texture transformation in the AS region.

**Keywords:** AA6xxx, VPSC, EBSD, FSP, DRX, FEA.

---

1. Department of Advanced Components and Materials Engineering, Sunchon National University, ROK

# Corresponding author: E-mail address: shihoon@senu.ac.kr (Shi-Hoon Choi)

# 자기유체역학 기반 레이저 파우더 베드 융합 공정에서의 용융풀 유동 및 결함 제어

팜닥푹<sup>1</sup>·단정통<sup>1</sup>·정경환<sup>2</sup>·김동규<sup>1, #</sup>

## Magnetohydrodynamic effects on melt pool dynamics and defect reduction in laser powder bed fusion

Dac-Phuc Pham<sup>1</sup>, Zhengtong Shan<sup>1</sup>, Kyung-Hwan Jung<sup>2</sup>, Dong-Kyu Kim<sup>1, #</sup>

### Abstract

Laser powder bed fusion (LPBF) utilizes a laser beam to melt specific regions of a metal powder in a layer-by-layer manner to fabricate specimens with intricate geometry. Porosity formation that negatively impacts the part quality is one of the challenges presented by LPBF. An external magnetic field has been discovered to be useful in controlling melt pool behavior and porosity defects. Thus, in this study, a multiphysics numerical model considering magnetic field effects, heat transfer, and fluid flow was developed to investigate melt pool behavior under an external magnetic field. Simulation results indicate that the application of a 0.4 T magnetic field increases the melt pool volume and controls the pattern of fluid flow. The Lorentz force, specifically, smooths out the flow field and prevents vortices from forming within the melt pool. This change in flow dynamics causes a reduction in porosity by up to 80%, avoiding lack-of-fusion defects. Additionally, the study indicates that the effectiveness of pore suppression depends on the relative orientation between the direction of laser scanning and the magnetic field. This relationship governs the direction of the Lorentz force due to the thermoelectric effect. Whereas Marangoni forces create flow as a result of surface tension, the Lorentz force can augment or counter this flow as a function of applied magnetic field orientation and polarity.

**Keywords:** Laser powder bed fusion, Magnetic field, Porosity, Melt pool dynamics, Computational fluid dynamics

- 
1. 건국대학교 기계공학부
  2. 한국생산기술연구원 강원기술실용화본부 기능성소재부품그룹
- # 교신저자: 건국대학교 기계공학부 E-mail: dongkyukim@konkuk.ac.kr

# A novel asynchronous double-sided underwater friction stir processing for enhanced strength-ductility synergy in hetero-structural duplex steel

**Renhao Wu<sup>a,\*</sup>, Fujun Cao<sup>b</sup>, Peihao Geng<sup>c,\*</sup>, Zaigham Saeed Toor<sup>a</sup>, Hyoung Seop Kim<sup>b,d</sup>**

## Abstract

The friction stir welding and processing (FSW/P) of high melting-point structural materials present several challenges in manufacturing, equipment, and application. Submerged FSW/P offers a cost-effective manufacturing solution by inducing dynamic recrystallization, which achieves fine-grain strengthening in steels. However, the strength-ductility trade-off in the processed region remains an issue, limiting the application of this technique in related structures. This study introduces an asynchronous double-sided underwater friction stir processing (DUFSP) technique. Through integrated experiments and multiscale simulations, including the Coupled Eulerian and Lagrangian method and crystal plasticity modeling, the thermo-mechanical behavior and microstructural evolution were thoroughly analyzed. The results reveal distinct dynamic recrystallization mechanisms in  $\alpha$ -ferrite and  $\gamma$ -austenite grains, which are crucial for grain refinement and structural stability in two-pass DUFSP. The simulations show that DUFSP can effectively control heat input, and the accumulated plastic strain on two overlapping layers increases significantly and uniformly. Additionally, the resulting bimodal heterostructure, with ultrafine gradient grains and retained nearly equal dual-phase ratio, significantly enhances the material's strength and ductility. This work demonstrates the potential of DUFSP for producing high-performance duplex stainless steel, with applications in industries.

**Keywords:** Underwater friction stir processing; Duplex stainless steel; Bimodal heterostructured grains; Multiscale modeling; Enhanced strength-ductility synergy

---

<sup>a</sup> Graduate Institute of Ferrous & Eco Materials Technology, Pohang University of Science & Technology, Pohang, 37673, Korea

<sup>b</sup> College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA), Nanjing, 211106, China

<sup>c</sup> Department of Industrial and Manufacturing Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, 16802, PA, USA

<sup>d</sup> Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, 37673, South Korea

\* Corresponding authors:

E-mail address: wurenhao@postech.ac.kr (R. Wu); pzh5317@psu.edu (P. Geng).



## The Innovating Pioneer for a Sustainable Tomorrow

We create sustainable technologies to protect  
human-beings and our planet.





# 철에는 판타지가 있다

포스코는 상상합니다

탄소 걱정 없이 물로 철을 만드는  
마법 같은 세상을

친환경 철강의 꿈  
하이렉스 기술로 이뤄가겠습니다

# 신뢰성기반 활용지원사업(금속)

## 01 사업소개

금속소재·부품·장비 활용분야의 글로벌 경쟁력 확보를 위해 중소·중견기업을 대상으로 금속분야 연구개발기관의 인프라(인력 및 장비)를 활용하여 신뢰성 및 소재성능 향상 지원

- 정기형 : 중소·중견기업 대상 금속소재 핵심기술(국산화·자립화) 신뢰성·경쟁력 지원

- 수시형 : 중소·중견기업 대상 금속소재 단기(적시) 신뢰성 향상 지원

▪ 부처 | 산업통상자원부

▪ 전담기관 | 한국산업기술진흥원

▪ 수행기관 | [주관] 한국재료연구원 [참여] 포항산업과학연구원, 오송첨단의료산업진흥재단, 고등기술연구원

## 02 신뢰성 메뉴판



신뢰성평가



고장분석



평가기법  
개발



물성성능  
분석



데이터 및  
기술정보



가상공학  
시뮬레이션



소재 및 공정  
테스트베드

## 03 지원기관 및 서비스 제공 분야

지원기관	구축장비 및 서비스 제공 분야	강점분야	지원항목
한국 재료연구원	금속소재 종합 센터 구축 - 국내 개발 소재의 사업화 촉진을 위한 상용화 개발 지원 - 금속소재 양산화 검증 장비(압연, 주조, 용해로, 동방기압설비 등) - 금속 소재부품 산업에서 요구되는 소재부터 완제품까지의 기술 개발과 제조 공정에 요구되는 금속소재 시험평가, 고장분석, 내구 수명 평가 및 기술 지원을 위한 단일 창구 지원 체계 구축	별용 금속소재/부품에 대해 대부분 시제품제작 기반으로 구축	- 신뢰성 평가 - 신뢰성비교평가 - 고장분석 - 원인분석 - 테스트베드 활용 - 사용환경 조건에서의 실증지원 - 소재정보서비스(DB활용) - 시뮬레이션 - 기술개발 연계 시험분석평가 - (해외)인증획득용 시험분석평가 - 가속시험법 등 평가기법 개발 - 응복합 설계 및 신뢰성 설계 - 전문인력 현장 지원
포항산업 과학연구원	소재부품 신뢰성평가 및 고장분석 핵심센터 - 종합품질보증을 위한 신뢰성평가 및 인증 서비스 지원 - 불량원인규명을 통한 고장분석 및 손상원인 해석 서비스 지원 - 신속 정확한 솔루션 제공을 위한 종합해석 컨설팅 지원 - 연구개발, 품질관리 및 종합적 해석평가를 위한 시험분석 지원	철강 및 각종 금속소재에 대한 신뢰도 높은 종합분석 솔루션 제공 및 평가 기반 구축	
오송첨단 의료산업 진흥재단	소재개발을 위한 전주기적 서비스 지원 기반 구축 - 소재개발을 위한 연구기획 단계부터 품목허가, 인증지원까지 전주기적 서비스 지원 - 금속 소재를 기반으로 제작된 시제품의 신뢰성평가 및 인증지원 - 금속/전기전자/바이오/전자파분야 등 지원	소재, 부품 및 의료기기 개발을 위한 전주기적 서비스 지원 기반 구축	
고등기술 연구원	원천기술부터 실증화 기술까지의 토탈솔루션 제공 - 기능성 부품소재 기술, 고부가 소재화 기술, 유기금속 자원순환 기술 등 금속소재 실용화 기술개발 지원 - 금속소재 공정해석, 정치해석, 경계설평가, 환경선평가, 신뢰성평가, 3차원 모델링, 데이터분석 기술개발 지원	고기능성 금속 소재화 기술, 폐자원 재활용 및 유용자원화 기술, 금속 나노 소재화 기술, CAE 응용 금속 소재 해석/설계 기술	

# COLDFORM®

COLDFORM is TRANSVALOR's software solution for the simulation of coldforming processes.

- Sheet metal forming
  - Flow forming
  - Electromagnetic impulse forming
  - Glass forming
  - Induction heating
  - Continuous casting
  - Foundry casting
  - Ingot casting
  - Centrifugal casting
  - Sand casting / Gravity casting
- Automatic design tool
  - Metal flow
  - Underfilling
  - Folds / Laps
  - Yield improvement
  - Optimization
  - Consolidate expertise
  - Piercing / Trimming
  - Die stress analysis
  - Cold/Hot forging
  - EMS simulation with THERCAST
  - Low & High pressure die casting
- Die life / Forging load

# FORGE®

FORGE is a world leading unnumerical simulation software for all metal forming processes.

FMK  
FORGE MASTER KOREA

# THERCAST®

THERCAST is simulation software for all casting field.

## 소성가공전용소프트웨어

70여개 이상의 소성가공 템플릿 제공  
상변태 해석을 위한 CCT/TTT 생성률 제공  
티타늄, 알루미늄 합금의 열처리 해석 제공  
전자기장을 이용한 고주파 및 성형 해석 제공  
전후처리/슬버 통합의 새로운 환경 제공

FTDZ

FTWR

대용량 병렬 아키텍처  
200코어 이상의 대용량 서버 지원  
고화전체문제의 해석 시간 절감을 위한 베이스 제공  
MS-MPI 및 리눅스기반 Atair PBS-Pro 지원  
Bi-Mesh 및 Air 경계를 표현한 전자기장 지원  
CAD연계 및 대용량 최적화기법 제공

FTWD

FORGE  
COLDFORM®

## 파워풀 & 어드밴스

인원수 제약없는 FORGE NXT 뉴인터페이스  
티타늄열처리 ( $\alpha+\beta$ ) forging & recrystallization  
알루미늄열처리(precipitation hardening) 해석  
FORGE Optimization, Maxwell equation  
판재성형을 고려한 FLD, 이방성 criteria

CSF

FTDZ

THERCAST™

## 주조/단조 커플링 해석

주조해석 결과를 단조해석으로 연계 해석  
주조결함 (segregation, Porosity)을 포함한 단조해석  
FORGE/ABAQUS/ANSYS 결과와 크랙 진전 예측 해석  
단조결과의 크랙 진진 및 피로 파괴 거동 모사  
Forging->Crack propagation

Zset

FSTZ

FORGE M ASTER K OREA

(주)에프엠케이 FORGE Master Korea  
경상남도 창원시 의창구 평산로 33 신화더플렉스시티 1707호  
[www.forgemaster.net](http://www.forgemaster.net), [support@forgemaster.net](mailto:support@forgemaster.net)  
전화 : 055-713-9100, 010-8865-1003

# 소성가공 공정을 위한 설계환경

**DEFORM**은 유한요소법(FEM)을 이용하여 소성가공 공정을 시뮬레이션하는 엔지니어링 프로그램으로서 최신의 해석 기술을 적용하여 복잡한 3차원 해석을 매우 쉽고 빠르게 수행합니다.

**JMatPro**는 열역학계산에 기반하여 다양한 합금의 고온물성을 예측합니다.

## 소성가공 시뮬레이션

- ✓ 단조, 압연 압출, 인발
- ✓ 스피닝, 코킹/스웨이징, 링롤링
- ✓ 절삭, 절삭 후 변형
- ✓ 멀티스케일 RVE, FSW, 적층 가공
- ✓ DOE 최적화, 빅데이터 분석

## 금속 열처리 시뮬레이션

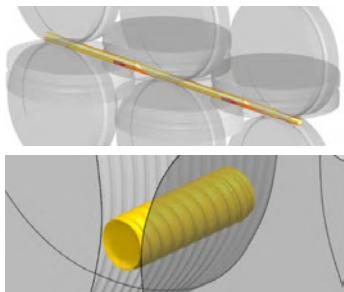
- ✓ 퀸칭, 템퍼링, 용체화/시효
- ✓ 응력제거, 침탄 및 질화
- ✓ 유도 가열 저항 가열, 용접
- ✓ 미세조직(재결정, 집합조직)
- ✓ 변수 역추적, 데이터 피팅

## JMatPro 고온물성계산

- ✓ 주조, 열간성형, 용접, 열처리 해석용 물성 출력
- ✓ 열역학계산, 응고물성 계산
- ✓ 고온 기계/열/탄성 물성 계산
- ✓ TTT/CCT/TTA/TTP 선도 계산

## The Applications of DEFORM System

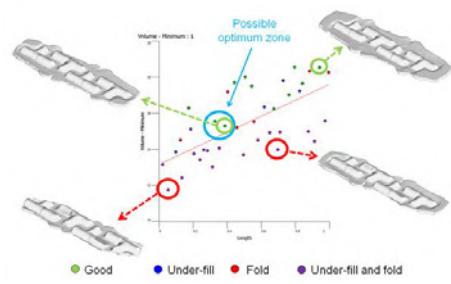
### Rolling



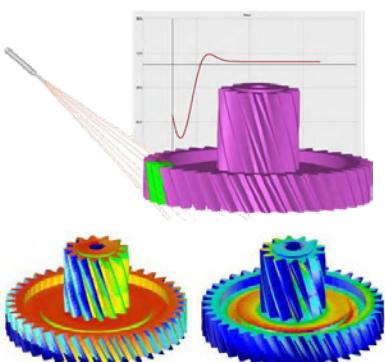
### Extrusion



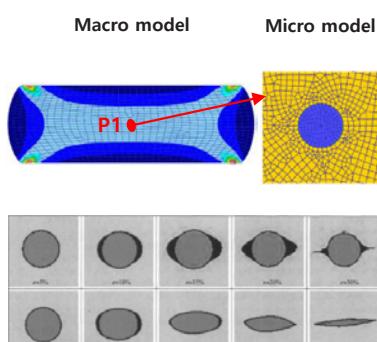
### DOE/Optimization



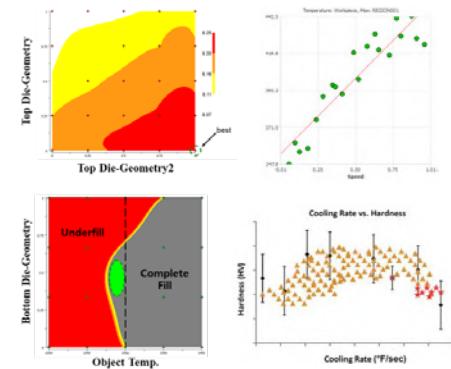
### Shot Peening



### Multiscale



### Data Analytics



# 미래를 향한 기술 혁신, CTR이 안전하게 만들어갑니다.

CTR그룹은 창원에 본사를 두고 세계 각지에 생산 공장과 법인을 운영하며  
자동차 부품, 디지털 전환 솔루션, 로봇 자동화 설비, 태양광 발전 등의 사업으로  
미래를 선도하는 글로벌 기업입니다.

(2024년 기준 그룹 매출 1.9조원)



## 지주사

**CTR** Holdings

## 자동차 부품 제조

OEM **CTR**

**CTR** Mobility

**CTR** EcoForging

**CTR** CHINA

**CTR** AMERICA

AM **CTR**

**CTR** VINA

**CTR** AMERICA

**CTR** EUROPE

**CTR** RUS

## 디지털 전환 솔루션

**FORMATION LABS**

## 로봇 자동화 플랫폼

**CTR** Robotics

## 신재생 에너지

**CTR** Energy

# MTDI X TESTCOR



MTDI와 TESTCOR는 축적된 기술력과 정밀한 품질을 바탕으로,  
시험 장비 개발·제작부터 시험 용역까지 신뢰할 수 있는 솔루션을 제공합니다.

## FLD시험기

고온/중온/상온에서 소재의  
성형성을 분석하기 위한  
장치이며, 여러가지 방법의  
시험기 가능하다.



## 4K 저저온 재료시험기

액화 헬륨을 이용하여  
4K~8K(-269°C~-265°C) 환경이  
조성된 상황에서 정밀한 속도 제어,  
하중 제어 실험이 가능하다.



## Metallography



Abrasive Cut Off Machine



Precision Diamond Cutter



Auto Mounting Press



Polisher & Grinder

## Materials Testing Machines



다양한 그립

Furnace & Chamber



Creep  
Tester



Universal  
Testing  
Machine





Adviser for metal Forming process Design EXPert

## Intelligent Forging Simulation Software for Metal Forming

Master Metal Forming with AFDEX  
**Faster, Easier, and More Accurate!**



AFDEX website AFDEX YouTube AFDEX LinkedIn

AFDEX (Adviser for Metal Forming Process Design EXPert) is a high-accuracy and user-friendly forging simulation software designed to help manufacturers optimize their cold forming, hot forming, extrusion, drawing, ring rolling, plate forging, sheet metal forming, and other metal forming processes with unmatched accuracy and efficiency.

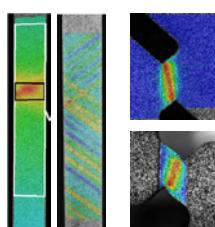
With its intuitive user interface and high-precision simulation technology, AFDEX empowers engineers to minimize defects, enhance product quality, and maximize manufacturing efficiency.



# DIC

Digital Image Correlation

A: 대전시 유성구 문지로 299번길 66  
E: support@omagom.co.kr  
T: 042-822-9503  
[www.omagom.co.kr](http://www.omagom.co.kr)



## 2D-DIC Solutions

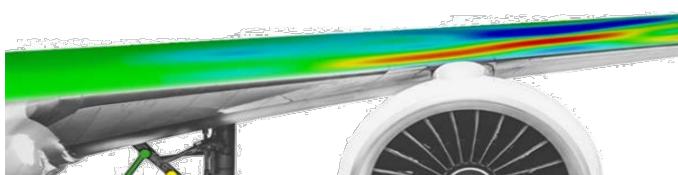
- 저렴한 비용
- 면내 변위/변형률 측정
- Video Extensometer 기능
- 인장, 전단, 굽힘 실험
- 필름, 초소형 등 시편



## 3D-DIC Solutions

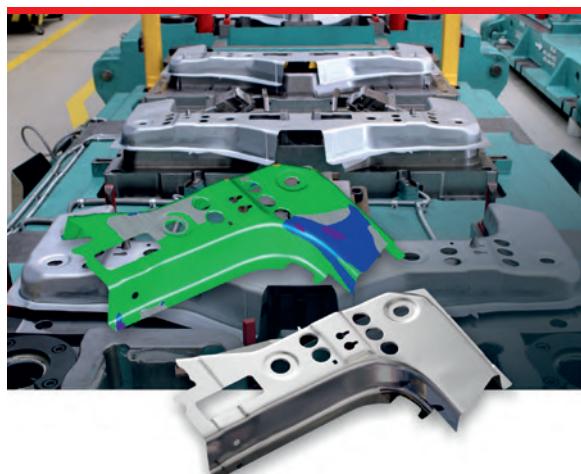
- 성형한계곡선 (ISO12004)
- 진동 주파수 및 모드 측정
- 대형 구조물 변위/변형 측정
- 충격/낙하/폭파 시험

누구나 쉽게 DIC를 쓸 수 있을 그날까지 노력하겠습니다.



## AutoForm Forming R12

### 스탬핑 공정의 강화된 성형성 평가 및 검증



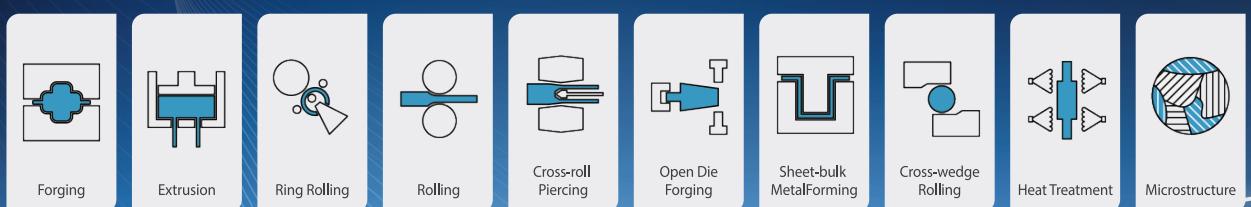
AutoForm 소프트웨어를 통해 디지털화를 확대하고  
복잡한 문제를 사전에 해결할 수 있습니다.

**AUTOFORM**  
Forming Reality

# 정확한 해석! 최적의 해석!

(주)씨에이이테크놀러지 소성가공 솔루션

### QFORM 소성가공 공정해석 소프트웨어



STAMPACK Xpress

판재성형 공정해석 소프트웨어



(주)씨에이이테크놀러지 서울시 강서구 화곡로 416 더스카이밸리5차 지식산업센터 813, 814호(등촌동) T. 02 2658 5695 E. info@caetech.co.kr

