



## Fall Conference

# 2025년도 한국소성·가공학회 추계학술대회 초록집



2025. 11. 5.(수)~7.(금)  
휘닉스 아일랜드 제주

주 최

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

후 원

KOFST

제주관광공사  
JEJU TOURISM ORGANIZATION

후 원 사

posco FMK  
FORGE MELT & MOLD

Hanwha Aerospace

JINHAP

solution lab

성우아이티

MFRC  
Metal Forming  
Research Corporation

AUTOFORM  
Forming Reality

CAETECH  
한국형제기술연구원

JK ED&C  
Electronic  
Design &  
Communication

KIMS  
한국재료연구원  
Korea Institute of Materials Science

소재부품산업기술개발기반구축사업  
신뢰성기반활용지원사업

## 제1발표회장

2025년 11월 5일(수)

아일랜드볼룸 1

11월 5일(수)

### 특별세션 : 고성능 부품제조를 위한 금형공구용 소재기술개발 심포지엄 ((주)세아창원특수강)

좌장 : 손동민 ((주)세아창원특수강)

13:30~13:40	KSTP_2025B_224	차세대 장수명 프리미엄급 열간공구강 개발 및 적용사례 김형신*((주)세아창원특수강)
13:40~13:50	KSTP_2025B_182	초고강도 소재 성형을 위한 고인성 냉간공구강 개발 박지우*((주)세아창원특수강)
13:50~14:00	KSTP_2025B_065	고쾌삭/고내식 플라스틱 사출용 정밀 금형 소재 개발 배재민*((주)세아창원특수강)
14:00~14:15	KSTP_2025B_219	알루미늄 다이캐스팅 부품 고성능-대형화에 따른 금형 개발 현황 및 신강종 적용 결과 송호섭*((주)삼기), 최지석, 유한결, 윤상일
14:15~14:30	KSTP_2025B_050	냉/열간 금형용 특수강의 현장 공정 모사 기반 가공 마모도 및 열변형 비교 연구 석주성*((주)신화에스티)
14:30~14:45	KSTP_2025B_296	금형 소재의 열처리 기술개발 및 질화기술 안정화 연구 노태열*((주)삼락열처리)
14:45~15:00	KSTP_2025B_206	개발 냉간 및 열간 금형강의 손상매커니즘 기반 특성평가 윤국태*(대구기계부품연구원), 김주업, 홍창완, 이락규, 김용유, 손동민
15:00~15:15	KSTP_2025B_281	초고강도 소재성형을 위한 장수명 공구강 및 고성능 플라스틱 금형강 제조기술 개발을 위한 미세조직 분석 김정웅*(포항공과대학교)
15:15~15:30	KSTP_2025B_123	플라스틱 금형강의 미세조직 특징과 물성 상관관계 오제훈*(서울대학교), 오규환
15:30~15:45		Break

좌장 : 구용모 ((주)창성)

15:45~16:00	KSTP_2025B_222	국산화 공구강 및 분말강을 적용한 차체 프레스 금형 평가 박성진*((주)신영), 홍재무, 서종덕
16:00~16:15	KSTP_2025B_036	전단금형 강화를 위한 이종금속 접합용 고강도 금속분말 양산화 기술 개발 구용모*((주)창성), 고창성, 여형성, 이기안
16:15~16:30	KSTP_2025B_121	금속적층제조 지능화 및 모니터링 융합 기술과 금형산업 응용 김대중*(AM솔루션즈)
16:30~16:45	KSTP_2025B_117	DED 적층제조공정으로 제조된 개량 G6 공구강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 분말산소 함량의 영향 전민수*(인하대학교), 박정현, 김대중, 전종배, 구용모, 이기안
16:45~17:00	KSTP_2025B_241	적층제조를 이용한 냉간 전단 금형의 수명향상 평가 김성욱*((재)포항산업과학연구원), 천창근, 장경현
17:00~17:15	KSTP_2025B_229	공구금형강 자립화 기술개발사업 총괄운영 및 최종평가 대응 안내 김태윤*(한국금속재료연구조합), 손동민, 구용모
17:15~		폐회

## 제2발표회장

2025년 11월 5일(수)

아일랜드볼룸 2

### 특별세션 : 고청정 고내식 Ni-Cr-Mo계 소재부품기술개발 심포지엄 (한국금속재료연구조합)

좌장 : 김덕령 ((주)세아창원특수강)

11월 5일(수)

14:00~14:15	KSTP_2025B_158	고청정-고내식 Hastelloy계 니켈합금의 봉강 및 무계목강관 소재 제조기술 개발 김덕령*(세아창원특수강), 정세지, 권순일, 박상훈, 안세호, 김영재, 정해창
14:15~14:30	KSTP_2025B_131	하스텔로이 C-22 무계목관의 열간 3축 률 압연 공정 기술 이준표*(세창스틸), 권진구, 홍성모
14:30~14:45	KSTP_2025B_231	Ni-Cr-Mo계 소재의 고온변형거동 및 열간성형 인자 분석 윤은유*(한국재료연구원), 최언준, 조주형, 우영운, 김덕령, 홍성모
14:45~15:00	KSTP_2025B_032	극한 부식 환경 대응 Ni-Cr-Mo계 합금의 합금 설계 및 특성 확보 전략 홍현욱*(국립창원대학교), 주하연, 김종훈
15:00~15:15	KSTP_2025B_238	Ni계 용융 합금 내 개재물 개질 방안 검토 강영조*(동아대학교), 김두연
15:15~15:30	KSTP_2025B_063	고청정 Ni-Cr-Mo계 합금 소재의 사업화(특히, 밸류체인) 전략 정철환*(한국금속재료연구조합), 김태윤, 이예린, 나미란
15:30~15:45		Break

### 특별세션 : 고청정 고내식 Ni-Cr-Mo계 소재부품기술개발 심포지엄 (한국금속재료연구조합)

좌장 : 성열주 ((주)아스플로)

15:45~16:00	KSTP_2025B_166	반도체용 Ni-Cr-Mo계 소재부품의 표면처리 및 제조공정기술 개발 이동윤*(주)아스플로), 이정표, 곽 훈, 성열주, 강두홍
16:00~16:15	KSTP_2025B_043	Ni-Cr-Mo계 고부식 저항 합금의 반도체 가스 제어용 유로 조도 제어를 위한 전해연마 공정 특성 연구 양현석*(고등기술연구원), 정우철, 한덕현, 최광수, 공만식

### 특별세션 : 고청정 고내식 Ni-Cr-Mo계 소재부품기술개발 심포지엄 (한국금속재료연구조합)

좌장 : 김성진 ((주)파이널텍)

16:15~16:30	KSTP_2025B_256	소재 압연 및 초전도재 버퍼층 타겟제조기술 김성진*((주)파이널텍)
16:30~16:45	KSTP_2025B_034	Ni-Cr-Mo계 금속기판과 산화물 소재 타겟을 이용한 고온초전도선재 제조 공정 개발 이재훈*(주)서남), 이유리, 신강환, 한진구, 이현주
16:45~17:00	KSTP_2025B_194	고온초전도선재 버퍼층 제조 및 소재의 구조적, 화학적 안정성 평가 김글하*(홍익대학교), 이정우
17:00~17:15	KSTP_2025B_223	용액공정을 통한 Eu-Doped Y2O3 초전도 버퍼층 제조 연구 정재한*(서울과학기술대학교), 배현우

17:15~

폐회

## 제7발표회장

**2025년 11월 5일(수)****원드홀 1,2**

11월 5일(수)

**특별세션 : 차세대 원통형 배터리 케이스 기술 (TCC스틸) (Closed)** **좌장 : 손지하 (TCC스틸)**

15:00~15:20 KSTP\_2025B\_096 4680 배터리 케이스용 니켈도금강판 개발  
김태근\*(TCC스틸)

15:20~15:40 KSTP\_2025B\_097 46xx 배터리용 도금강판의 열처리 조건에 따른 도금막 특성  
박우진\*(포항산업과학연구원), 강희수, 오윤석

15:40~16:00 KSTP\_2025B\_098 니켈 도금층의 미세조직 및 응력에 미치는 유기 첨가제의 영향  
손인준\*(경북대학교)

16:00~16:20 KSTP\_2025B\_099 배터리 케이스용 니켈 도금강판 도금 전산해석  
이규환\*(한국재료연구원), 박다정, 유병욱

16:20~16:35 *Break*

**특별세션 : 차세대 원통형 배터리 케이스 기술 (TCC스틸) (Closed)** **좌장 : 성홍석 (LT정밀)**

16:35~16:55 KSTP\_2025B\_104 46mm 원통형 배터리 케이스 개발  
성홍석\*(LT정밀)

16:55~17:15 KSTP\_2025B\_100 원통형 배터리케이스 리벳의 리벳팅시 박리현상 최소화를 위한 영향인자 분석  
강성천\*(두원)

17:15~17:35 KSTP\_2025B\_101 이온건을 이용한 4680 배터리 제조 금형용 저마찰 DLC코팅 기술 개발  
이의영\*(한국광기술원)

17:35~17:55 KSTP\_2025B\_102 배터리 케이스 공식저항성 평가 분석  
문종언\*(국립공주대학교)

17:55~18:15 KSTP\_2025B\_103 폐리시안화칼륨 및 황산동환경하 니켈도금강의 부식거동 및 도금결함  
검사법으로의 활용방안 연구  
이승환\*(포스코)

## 제1발표회장

2025년 11월 6일(목)

아일랜드볼룸 1

일반구두발표 : 금속유연공정 / 금형가공 / 제조공정 및 장비 / 성형에 의한 접합 / 재료거동 및 특성화

좌장 : 송재선 (대구기계부품연구원)

10:00~10:15	KSTP_2025B_119	플로우포밍 공정으로 제조된 핵연료 처분용 Pure Copper의 고온 압축 및 CREEP 특성 송노건*(인하대학교), 강태훈, 이영호, 김재득, 이기안
10:15~10:30	KSTP_2025B_198	프레스 특성 가시화 데이터 수집 및 형합 보정을 위한 프레스 변형량 측정 및 해석 강희원*(한국자동차연구원), 박건영, 최진영, 정정봉, 권경업, 김동욱
10:30~10:45	KSTP_2025B_215	3D 열간 자유 튜브 성형 공정변수에 따른 폐단면 관재에 미치는 영향 검토 김정욱*(한국재료연구원), 이승환, 김소연, 이석규, 권용남, 이동준, 석무영, 최현성, 박현일
10:45~11:00	KSTP_2025B_073	GFRP 적층 패턴에 따른 Flow Drilling Screw 크랙 발생 원인 분석 및 적층 패턴 최적화 연구 김성구*(주성우하이텍), 김지훈
11:00~11:15	KSTP_2025B_235	탄소성 유한요소해석 기반 급속 냉각 미세조직 제어에 따른 SnBi 음극의 부피변형 및 손상거동 평가 김태현*(성균관대학교), 박현서, 진미잠, 이은호, 김재훈
12:00~13:00		중식

## 특별세션 : LCA 방법을 이용한 수출규제 대응(한국생산기술연구원)

좌장 : 최요한 (한국생산기술연구원)

13:10~13:20		국가청정생산지원센터 소개 최태훈*(한국생산기술연구원)
13:20~13:50	KSTP_2025B_292	전과정평가 소개와 최신 동향 최요한*(한국생산기술연구원)
13:50~14:20	KSTP_2025B_298	EU 규제를 통해 본 에코이노베이션의 전략적 가치 유준혁*(딜로이트 안전회계법인)
14:20~14:30		<i>Break</i>
14:30~15:00	KSTP_2025B_293	철강기반 탄소발자국 저감 자동차 부품화 솔루션 김동진*(포스코), 이홍우, 강연식
15:00~15:30	KSTP_2025B_294	알루미늄 가공공정 LCA 사례 함진기*(글래스돔코리아), 윤양진, 문형종
15:30~16:00	KSTP_2025B_295	전자산업용 황동봉의 전과정평가(LCA)를 통한 환경성 및 자원순환성 분석 황윤빈*(켐토피아)

## 제2발표회장

2025년 11월 6일(목)

아일랜드볼룸 2

특별세션 : 복합발전용 가스터빈 압축기용 대형 단조부품 개발 심포지엄 (한국금속재료연구조합)

좌장 : 이진모 ((주)태웅)

09:00~09:20	KSTP_2025B_084	가스터빈 압축기 대형 단조부품 제조공정의 탄소배출 저감 전략과 CBAM 대응 방안 김남용*(주)태웅), 이채훈, 허상현, 윤선룡, 권하늘, 문지훈, 이진모
09:20~09:40	KSTP_2025B_133	가스터빈 압축기용 고청정 3.5NiCrMoV강의 열처리 조건에 따른 기계적 특성 및 잔류응력 거동 분석 김동배*(대구기계부품연구원), 이영민, 유가영
09:40~10:00	KSTP_2025B_110	3.5NiCrMoV강 응고거동 규명을 위한 미세조직 분석 및 CALPHAD 해석 이형수*(한국재료연구원), 윤대원, 정인용, 정희원, 유영수, 서성문
10:00~10:20		Break
10:20~10:40	KSTP_2025B_191	복합발전용 가스터빈 압축기 부품 제작을 위한 단조/링단조 공정 설계 김진용*(주)태상), 주병돈, 이인환, 김주희, 박영철
10:40~11:00	KSTP_2025B_153	열간자유단조 및 링롤링 공법으로 제조된 3.5NiCrMoV 합금의 기계적 특성에 관한 연구 권용철*(한국건설생활환경시험연구원), 김창홍, 주병돈
11:00~11:20	KSTP_2025B_207	가스터빈 압축기용 3.5NiCrMoV 강의 템퍼 취성 거동 김병구*(한국생산기술연구원), 최용욱
12:00~13:00		중식

**일반구두발표 : 박판성형**

**좌장 : 배기현 (한국생산기술연구원)**

13:00~13:15	KSTP_2025B_287	피어싱 공정에서 편치 선단의 기하학적 형상에 따른 구리 박판의 전단면 특성 평가 이종훈*(한국생산기술연구원), 전용준, 최현석, 이현택, 김동언
13:15~13:30	KSTP_2025B_180	자동차용 크로스멤버 최적 금형 설계에 대한 강건성 해석 손준혁*(전남대학교), 박 순, 나용근, 김대용
13:30~13:45	KSTP_2025B_196	Stainless 강판 성형 공정의 소작 거동에 관한 연구 문지환*(한국생산기술연구원), 이종균, 이명규, 송정한, 배기현
13:45~14:00	KSTP_2025B_067	롤포밍 초고장력강 소재 평탄도 확보 기술 개발 김재균*(주성우하이텍), 김덕현, 정윤성, 박상언, 손성만
14:00~14:15	KSTP_2025B_140	원통형 배터리 셀 캠 공정 개발 및 드로잉 공정 별 비교 연구 서예찬*(한국재료연구원), 지수민, 이세동, 성홍석, 윤은유, 홍종화

14:15~14:30

*Break*

**일반구두발표 : 박판성형**

**좌장 : 윤종현 (한양대학교)**

14:30~14:45	KSTP_2025B_155	Nimonic 80A 판재의 물성 평가 및 엔진 배기관 클램프 공정 기술 개발 윤건우*(한국재료연구원), 김진수, 서예찬, 홍종화
14:45~15:00	KSTP_2025B_018	이미지 분석을 활용한 아연도금층의 변형 모드별 박리량 및 크랙 측정 정규철*(한양대학교), 김태영, 이재욱, 임현교, 김성제, 조경현, 주형수, 정유형, 윤종현
15:00~15:15	KSTP_2025B_017	다단 성형 공정 설계에 대한 Python Optimal Transport(POT) 기법 적용 정한용*(포스코), 박기철
15:15~15:30	KSTP_2025B_057	양면 돌출 축 성형이 가능한 파인 블랭킹 복합성형 공법을 적용한 전자변속기용 사이클로이드 기어의 최적 성형기술 개발 박동환*(경북테크노파크), 최성돈, 신용호
15:30~15:45	KSTP_2025B_059	Deep Drawing 과정에서 금속-폴리머-금속 적층판재의 파단 및 주름 거동 김재훈*(포항공과대학교), 최연택, 김래언, 구강희, 권지혜, 서민홍, 김형섭

## 제3발표회장

2025년 11월 6일(목)

아일랜드볼룸 3

**특별세션 : 초고강도 핫스탬핑 강판 냉간 트림 기술 (현대자동차/(재)대구기계부품연구원)****좌장 : 윤국태 ((재)대구기계부품연구원)**

13:00~13:20	KSTP_2025B_212	탄소배출 저감을 위한 핫스탬핑 강판의 냉간트림 기술 연구 및 동향 손성국*(현대자동차), 이창욱, 박재명, 윤승채
13:20~13:40	KSTP_2025B_199	미세조직 제어 기반 핫스탬핑 냉간트림 적용연구 박재명*(현대제철), 손성국, 박계정, 손경주, 윤승채
13:40~14:00	KSTP_2025B_227	열간 성형된 HPF강의 기계적 전단 평가에 대한 예비 연구 소개 손현성*(포스코), 최종원, 김홍기, 남재복, 손현성
14:00~14:20		<i>Break</i>
14:20~14:40	KSTP_2025B_008	핫스탬핑 강판의 전단 특성 평가 송재선*((재)대구기계부품연구원), 윤국태, 전강국, 강익수, 허재영
14:40~15:00	KSTP_2025B_064	핫스탬핑 기계적 트림 적용에 따른 수소취성 거동 예측 윤승채*(현대제철), 박재명, 박계정, 손경주, 손성국
15:00~15:20	KSTP_2025B_086	금속 적층제조 기술을 활용한 금형 코어 적용 및 성능 향상 사례 최장욱*(아진산업(주)), 전현환, 이선화
15:20~15:40		토론 및 질의

## 제4발표회장

**2025년 11월 6일(목)****스톤홀 1****일반구두발표 : 미세구조 및 응용 / 표면 및 인터페이스 / 플라스틱가공** 좌장 : 김정기 (경상국립대학교)

10:00~10:15	KSTP_2025B_088	열처리 제어에 따른 미세조직 변화가 비조질강의 냉간 단조성에 미치는 영향 안민호*(한국재료연구원), 이영선, 박성혁, 우영윤
10:15~10:30	KSTP_2025B_203	전기화학적으로 유기된 마르텐사이트 상변태 메커니즘의 규명 채준영*(서울대학교), 이귀형, 이혁재, 조영근, 정다물, 권영균, 정인호, 김성준, 한홍남
10:30~10:45	KSTP_2025B_083	배터리용 파우치 필름 접합부의 고온다습 환경에서의 열화 및 T-peel 거동 해석 홍승효*(서울대학교), 이형림, 이명규
10:45~11:00	KSTP_2025B_188	초음파 나노표면개질 공정(UNSM)으로 유도된 잔류응력 크기 변화에 따른 인장 거동 분석 최언준*(한국재료연구원), 윤은유, 홍종화
11:00~11:15	KSTP_2025B_266	인서트 사출성형 기반 전극 내재형 미세유체 칩 제작 기술 유영은*(한국기계연구원), 정연정, 우상원, 진재호, 신경식
12:00~13:00		종식

특별세션 : International Session (KIMS)

좌장 : 우영윤 (한국재료연구원)

13:00~13:30	KSTP_2025B_246	Low friction behavior of hydrogen and boron containing DLC (a-C:H:B) in high temperature and high vacuum Noritsugu Umehara*(Nagoya University, Japan)
13:30~14:00	KSTP_2025B_248	Dataralization of Tool Stress using Semi-conductor Strain Sensor and Soft Sensing Technology for Tool Life Management in Cold Forging Sooyoung Kim*(Yamanaka Eng. Co.)
14:00~14:20	KSTP_2025B_249	Influence of Heat Treatment on Microstructure and Properties of TRIP-assisted Multiphase Steel Youngyun Woo*(Korea Institute of Materials Science), Youngseon Lee, Eun Yoo Yoon, Jonghwa Hong
14:20~14:40	KSTP_2025B_247	Synthetic Microstructural Image Generation of Cemented Carbides via a Diffusion Model Takumi Nakane*(Gifu University)
14:40~15:00	KSTP_2025B_265	Exploring the impact of intercritical annealing temperature on microstructural evolution and mechanical performance in low alloy multiphase TRIP-assisted steels Yoon-Uk Heo*(Pohang University of Science and Technology), Chang-Gon Jeong, T.T.T. Trang, Youngyun Woo, Eun Yoo Yoon, Youngseon Lee

15:00~15:15

Break

일반구두발표 : 복합재료가공

좌장 : 조훈휘(국립한밭대학교)

15:15~15:30	KSTP_2025B_037	CFRP 부품 제작의 시뮬레이션 기반 후변형 예측 서준영*(부산대학교), 류재창, 이찬주, 신도훈, 고대철
15:30~15:45	KSTP_2025B_040	열가소성 복합재의 가압 전도 용접 공정의 유한요소해석 채기현*(부산대학교), 류재창, 이찬주, 신도훈, 고대철
15:45~16:00	KSTP_2025B_109	CF/PPS 성형 중 냉각 과정 하중 변화가 표면 품질에 미치는 영향에 관한 연구 백종훈*(한국생산기술연구원), 소태영, 전용준, 최현석, 김동언, 이현택

## 제5발표회장

2025년 11월 6일(목)

스톤홀 2

특별세션 : 철강·금속 산업 디지털 전환(DX) 심포지엄 ((재)포항금속소재산업진흥원)

좌장 : 양해웅((재)포항금속소재산업진흥원)

10:00~10:20	KSTP_2025B_259	철강·금속산업 디지털전환 도입 사례 분석 김대욱*((재)포항금속소재산업진흥원), 양해웅
10:20~10:40	KSTP_2025B_260	머신러닝 기반 알루미늄 합금의 기계적 특성 예측 및 미세조직 검출 자동화 배영훈*((재)포항금속소재산업진흥원), 이용환
10:40~11:00	KSTP_2025B_261	No-Code 제조기술을 통한 중소기업 디지털 경쟁력 강화 고은용*((재)포항금속소재산업진흥원), 김대욱
11:00~11:20	KSTP_2025B_262	디지털트윈 시범구역(농어촌형) 조성을 통한 지역 문제 해결 이용환*((재)포항금속소재산업진흥원), 김경훈
11:20~11:40	KSTP_2025B_263	인공지능 모델을 활용한 La 첨가 알루미늄 합금 설계와 실험적 검증 이재원*((재)포항금속소재산업진흥원), 허우로
11:40~12:00	KSTP_2025B_264	Seamless 강관 대체형 전기차 현가장치용 ERW 인발 강관 개발 연구 허우로*((재)포항금속소재산업진흥원), 김대욱
12:00~13:00		중식

**특별세션 : DIC 활용기술 심포지엄 (POSCO)**

**좌장 : 임지호 (포스코)**

13:00~13:15	KSTP_2025B_202	DIC를 활용한 극박 순 타이타늄 판재의 성형한계선도 결정 봉혁종*(경상국립대학교), 김찬양, 민경문, 김경재
13:15~13:30	KSTP_2025B_002	멀티 카메라 디지털 영상 상관 기법을 이용한 재료 및 구조물의 물성 측정사례 및 데이터 분석 김태렬*(오엠에이콤), 김원섭
13:30~13:45	KSTP_2025B_186	DIC기법을 이용한 금속판재의 대변형 물성 분석 김민기*(한국생산기술연구원), 김용남
13:45~14:00	KSTP_2025B_035	멀티 DIC기법을 이용한 철강재 HER 시험편의 표면 변형 측정 방법 최재덕*(포스코), 오경석, 김지민, 임지호

14:00~14:15 *Break*

**특별세션 : DIC 활용기술 심포지엄 (POSCO)**

**좌장 : 김민기 (한국생산기술연구원)**

14:15~14:30	KSTP_2025B_022	DIC를 이용한 자동차강의 소부 후 파단물성 평가 임지호*(포스코), 이해아, 최지식
14:30~14:45	KSTP_2025B_243	디지털 이미지 상관법과 소형 펀치 시험을 이용한 판재 인장 물성 측정 도안 응웬 부*(부산대학교), 허현준, 이신애, 김지훈
14:45~15:00	KSTP_2025B_174	디지털 이미지 상관 신호의 잡음 및 진동 억제를 위한 CWT-SRS 통합 분석 프레임워크 임현용*(한국과학기술원), 윤정환
15:00~15:15	KSTP_2025B_162	디지털 이미지 상관기법(DIC)을 활용한 변형률 속도 변화에 따른 변형경로 분석 이상민*(공주대학교), 김정민, 홍석무
15:15~15:30	KSTP_2025B_272	돔 펀치 실험과 DIC를 활용한 Hosford-Coulomb 금속 연성 파단 모델 평가 김찬양*(국립군산대학교), 봉혁종
15:30~15:45		토론 및 질의

## 제6발표회장

2025년 11월 6일(목)

스톤홀 3

**특별세션 : 고품질 판재성형 부품 지능형 고속/고정밀 프레스 장비기술 개발 ((주)SIMPAC)****좌장 : 남진환 ((주)SIMPAC)**

10:00~10:20 KSTP\_2025B\_255 시계열데이터에 대한 유효지표 자동 생성 시스템  
윤상혁\*((주)SIMPAC)

10:20~10:40 KSTP\_2025B\_234 MLOps(Machine Learning Operations) 기반 스마트 제조를 위한 예지보전 및  
데이터 관리 프레임워크  
문건혁\*((주)유아이티), 우성환, 오정현, 김소정, 길성민, 김성태

10:40~11:00 KSTP\_2025B\_108 Archard's Law을 적용한 슬라이딩 접촉계의 마모 예측  
알리벡\*(서강대학교), Inseo Kim, Joonhee Park, Wonho Lee, Naksoo Kim

11:00~11:20 KSTP\_2025B\_077 체계적인 심층 전이학습을 이용한 금속 표면 불량 검출 모델 선정 연구  
김형중\*(건국대학교), 우종현, 박준혁

11:20~11:40 KSTP\_2025B\_163 다중 센서를 활용한 전단 공정 모니터링 기술 개발  
김경민\*(한국생산기술연구원), 이상오, 송정한, 김용배, 이수현, 노건우, 배기현

11:40~12:00 KSTP\_2025B\_136 볼트형 압전식 하중 센서를 활용한 프레스 상태 모니터링  
권오동\*((주)솔루션랩), 김수영, Matthias Brenneis, Jörg Stahlmann, 이경훈

12:00~13:00 중식

**일반구두발표 : 모델링 및 시뮬레이션**

**좌장 : 이진우 (울산대학교)**

13:00~13:15	KSTP_2025B_245	위상장 응집영역 모델링을 이용한 탄소성 다층 구조의 동적 파괴 해석 진미잠*(성균관대학교), 이은호
13:15~13:30	KSTP_2025B_177	텍스쳐 기반 소성 포텐셜 함수를 이용한 거시적 이방성 예측 박원진*(한국과학기술원), 정영웅, 윤정환
13:30~13:45	KSTP_2025B_164	다결정 탄점소성 유한 요소 해석 모델을 활용한 초고장력 강판의 굽힘 후 스프링백 거동 모사 전보혜*(국립창원대학교), 강주홍, 정영웅
13:45~14:00	KSTP_2025B_148	탄·소성 영역에서 수소취성 파단 해석을 위한 반응속도-확산-변형-손상 결합 모델 신건진*(서울대학교), 박진홍, 이명규
14:00~14:15	KSTP_2025B_116	딥 러닝을 이용한 공정 의존적 탄소성 인공지능 구성방정식의 개발, part2 문희범*(주솔루션랩), 이경훈

14:15~14:30

*Break*

**일반구두발표 : 모델링 및 시뮬레이션**

**좌장 : 봉혁종 (경상국립대학교)**

14:30~14:45	KSTP_2025B_055	크롬강 적층제조재의 이방성 거동에 대한 결정소성 기반 연구 유제현*(서울대학교), 이호영, 이명규
14:45~15:00	KSTP_2025B_053	GNB를 고려한 금속 판재 하중 반전 예측용 GND 기반 역응력 모델 심규장*(서울대학교), 유제현, 최성환, 김영재, 이충안, 김현기, 노동환, 이명규
15:00~15:15	KSTP_2025B_270	고속충돌 시 침투탄두 용접부의 변형 및 손상 분석 이주원*(한국과학기술원), 임현용, 장택진, 박주성, 윤태건, 고원기, 윤정환
15:15~15:30	KSTP_2025B_250	코일 스프링 템퍼링 공정의 DNN 기반 다목적 최적화 김민기*(부산대학교), 허지원, 차승훈, 임철현, 신정규, 고대철
15:30~15:45	KSTP_2025B_286	소성 메커니즘 기반 DSC 전력반도체용 금속 확산접합 모델 개발 전형주*(서울대학교), 신건진, 이명규

## 제7발표회장

2025년 11월 6일(목)

윈드홀 1

특별세션 : 고강도 소재 적용 전기자동차 샤시 및 배터리 케이스 제조를 위한  
접합 장비와 스마트 접합라인 개발 및 제품화 실증 ((주)화신) (Closed)

좌장 : 최현준 ((주)화신)

09:00~09:20	KSTP_2025B_089	멀티 툴 체인저 스마트 접합 자동화 시스템 활용 이종접합(FDS/Blind Nut) 요소기술 연구 이창훈*(주화신), 백승길, 이태규, 박종규
09:20~09:40	KSTP_2025B_090	가압력 보정을 통한 Blind Rivet Nut 장비의 드로잉력 균일화 연구 김태오*(나우테크), 이태규, 양형근, 이창훈
09:40~10:00	KSTP_2025B_091	박판 알루미늄 용접을 위한 AC Pulse MIG 용접의 아크 길이 제어 방법 김병진*(현대피엔에스), 이재현, 이창훈
10:00~10:20	KSTP_2025B_092	Fastener clinching 접합부의 에너지 특성 기반 접합 품질 분류 모델 개발 이솔미*(한국생산기술연구원), 김동윤, 김동혁, 주원중, 유지영, 이창훈
10:20~10:40		Break
10:40~11:00	KSTP_2025B_093	전기자동차의 에너지 효율 향상을 위한 배터리 케이스 설계 및 개발 서오석*(주화신), 이연표, 박종규
11:00~11:20	KSTP_2025B_094	인공신경망 기반, 이종소재 FDS 접합부 파단 강도 예측 모델 개발 김동건*(한국생산기술연구원), 이상오, 서오석, 이명규, 송정한
11:20~11:40	KSTP_2025B_095	마찰교반용접 후 알루미늄 초기 항복 예측을 위한 해석 및 데이터베이스 구축 자동화 기반 기계학습 기술 개발 이형림*(서울대학교), 서오석, 이명규
11:40~12:00	KSTP_2025B_025	배터리 팩 케이스의 용접 순서 최적화를 위한 유한요소 해석 구인환*(충북대학교), 전종호, 서오석, 조정호
12:00~13:00		중식

**특별세션 : 소재 형상교정 및 전단기술 심포지엄 (POSCO)**

**좌장 : 김태효 (포스코)**

13:00~13:15	KSTP_2025B_273	철강 가공센터 형상교정 및 슬리팅 기술 개발과 적용 사례 박기철*(포스코), 오경석, 구진모
13:15~13:30	KSTP_2025B_278	국내 고강도 철강재 전단기술(Shearing 및 Slitting) 동향 최도현*(대원인물㈜)
13:30~13:45	KSTP_2025B_239	GigaSteel의 평탄도 제어 기술 및 적용 사례 최대곤*(포스코)
13:45~14:00	KSTP_2025B_161	1.5GPa급 마르텐사이트강 평탄도 제어를 통한 롤포밍 차체 부품의 산포 저감 연구 박민호*(주)아산), 유성호, 권효성, 유정현, 이민혁, 김근호
14:00~14:15		<i>Break</i>
14:15~14:30	KSTP_2025B_014	판재 레벨링에서 유효곡률반경의 결정 방법에 대한 고찰 오경석*(포스코), 구진모, 박기철
14:30~14:45	KSTP_2025B_051	헤어핀 코일 직선화 공정의 실시간 최적화를 위한 디지털 트윈 프레임워크 김지훈*(성균관대학교), 한선우, 이민섭, 이은호

**일반구두발표 : 자율제조**

**좌장 : 박기철 (포스코)**

14:45~15:00	KSTP_2025B_039	가변 곡률 자동차 부품의 스프링백 저감을 위한 스마트 금형 제어기술 개발 구진모*(포스코), 이재욱, 김태효
15:00~15:15	KSTP_2025B_157	품질산포 대응을 위한 시트레일 스프링백 자동보정 금형 개발 김태효*(포스코), 구진모, 이재욱
15:15~15:30		<i>Break</i>

**일반구두발표 : 적층제조 및 유연공정**

**좌장 : 김정한 (국립한밭대학교)**

15:30~15:45	KSTP_2025B_001	레이저 기반 적층제조를 활용한 Ni기 초내열합금/세라믹 경사기능소재 제조 김정기*(경상국립대학교), 유현용, 유진영, 김태현, 이진수, 안성열, 김형섭, 이태경, 김세윤
15:45~16:00	KSTP_2025B_015	격자 구조에 따른 제올라이트 코팅 및 이산화탄소 흡착 특성 평가 이광규*(조선대학교), 안동규
16:00~16:15	KSTP_2025B_112	TPMS 단위체의 설계에 따른 도파관의 전자기적 특성 분석 범종찬*(조선대학교), 안동규
16:15~16:30	KSTP_2025B_276	TPMS 구조 기반 전자기파 간섭 차폐 필터의 주파수 변화에 따른 전기 전도도 및 차폐 효율 변화 고찰 한승현*(조선대학교), 범종찬, 이성준, 김창래, 안동규

## 제8발표회장

2025년 11월 6일(목)

윈드홀 2

특별세션 : 21th ICIM (International Consortium of Innovative Manufacturing)

Technical Forum (KAIST/Deakin University)

좌장 : 윤정환 (한국과학기술원)

09:00~09:15 KSTP\_2025B\_257 전기차 배터리 Cap-Can 레이저 용접부의 국부 기계적 거동 특성 평가  
조동혁\*(한국과학기술원), 이주원, Junjie Ma, Hassan Ghassemi-Armaki, Masoud M. Pour, Blair E. Carlson, 윤정환

09:15~09:30 KSTP\_2025B\_184 텁-버스바 이종 레이저 용접부 분석과 모델링  
이주원\*(한국과학기술원), 조동혁, Hassan Ghassemi-Armaki, Masoud M. Pour, Blair E. Carlson, 윤정환

09:30~09:45 KSTP\_2025B\_175 Automated Noise Correlation Method for DIC Data to Consider Material Property Variations  
임현용\*(한국과학기술원), 윤정환

09:45~10:00 KSTP\_2025B\_192 베이지안 최적화 알고리즘을 통한 롤러 오프셋 공정 알루미늄 강판 뒤틀림 최소화  
한동훈\*(한국과학기술원), Lu Huang, Thomas B. Stoughton, 안태균, 최현성, 윤정환

10:00~10:15 KSTP\_2025B\_171 비대칭 알루미늄-폴리머 적층형 복합재 필름의 층간 박리 거동 모사  
사공철\*(한국과학기술원), 장택진, 안태균, 윤정환

10:15~10:30 KSTP\_2025B\_274 알루미늄 파우치 성형에서의 베이지안 최적화 기반 가변 블랭크 홀딩력 제어  
안태균\*(한국과학기술원), 장택진, 사공철, 김재군, 윤정환

Discussion

12:00~13:00 종식

**특별세션 : 재료성형 공정의 유한요소해석 발자취 및 최신연구 동향 (서울과학기술대학교)**

좌장 : 박 근 (서울과학기술대학교)

13:00~13:30	KSTP_2025B_078	이방성 소성 모델과 사면체 요소를 이용한 판재성형의 유한요소해석 정완진*(서울과학기술대학교), 전만수, 정석환, 전상윤
13:30~13:50	KSTP_2025B_033	고분자 가공에서 CAE의 응용 류민영*(서울과학기술대학교), 성승민, 정영현, 이현동, 최재웅
13:50~14:10	KSTP_2025B_072	이미지 기반 유한요소해석 대체 AI 모델 개발 이창환*(서울과학기술대학교), 노현도, 문승현, 배유빈
14:10~14:30	KSTP_2025B_016	다상 Q&P 강의 응력 상태 의존 마르텐사이트 상변태와 소성 거동 예측을 위한 결정소성 모델링 연구 박진홍*(서울과학기술대학교), 이명규
14:30~14:50	<i>Break</i>	

**특별세션 : 재료성형 공정의 유한요소해석 발자취 및 최신연구 동향 (서울과학기술대학교)**

좌장 : 이창환 (서울과학기술대학교)

14:50~15:20	KSTP_2025B_147	소성가공 시뮬레이션에서 유동특성과 마찰에 관한 고찰 전만수*(경상국립대학교)
15:20~15:40	KSTP_2025B_019	유한요소해석 기반 적층제조 특화 설계 적용 사례 박 근*(서울과학기술대학교)
15:40~16:00	KSTP_2025B_006	비선형 변형률 경로에서의 변형률속도 의존 왜곡경화 모델 및 U-드로 벤딩 해석 최현성*(한국재료연구원), 윤정환
16:00~16:20	KSTP_2025B_228	FEM 해석과 실험 데이터의 결합을 통한 전기자동차 부품 실시간 자율제조 공정 개발 이은호*(성균관대학교)
16:20~16:40	KSTP_2025B_075	적층제조공정의 유한요소해석 안동규*(조선대학교)

## 포스터 발표 A

2025년 11월 6일(목)

B동 2층 로비 14:30~16:30

좌장 : (한국생산기술연구원) 송정한 수석연구원, 서영호 수석연구원

번호	접수번호	논문제목 / 발표자
A01	KSTP_2025B_283	B-Spline 및 Gaussian Process를 이용한 Inconel 718 고온 유동 응력 예측 이나경*(한국생산기술연구원), 안지섭, 조아라, 이상곤, 이성민, 정명식, 황선광
A02	KSTP_2025B_181	전조 탭 수명 관리를 위한 기계학습 기반 성형 토크 특성 분석 이신명*(한국생산기술연구원), 정건우, 정선호, 유지민, 이경환, 양준일, 전필중, 이종섭
A03	KSTP_2025B_105	금속 적층제조 기술을 적용한 사출금형 코어의 경량화 및 냉각 성능 향상에 관한 연구 송승현*(한국생산기술연구원), 송진영, 황선광, 정경환, 박상민, 차경제
A04	KSTP_2025B_226	고온 환경에서 진공 챔버 벽 처짐 변형 예측 윤준섭*(한국생산기술연구원), 김민기
A05	KSTP_2025B_225	와이어 와운드 두께에 따른 고압 압력 용기의 파단 안전 성능 연구 이예찬*(한국생산기술연구원), 지민기, 김민기, 임성식
A06	KSTP_2025B_220	결정 소성과 변형 유도 마르텐사이트 변태 모델을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 저온 변형 거동 해석 최석현*(서울대학교), 이혁재, 홍성태, 이명규, 한홍남
A07	KSTP_2025B_209	이방성을 고려한 내열합금 후판재 률밴딩 공정 해석 박광수*((재)포항산업과학연구원), 신흥철, 최창혁, 김성우
A08	KSTP_2025B_185	전기자동차 배터리 팩 사이드멤버 단면 형상 토플로지 최적화 안민영*(전남대학교), 김대용
A09	KSTP_2025B_179	두 탄점소성 다결정 소성 모델을 이용한 DP980 강 C-rail 성형 후 스프링백 예측 비교 강주홍*(국립창원대학교), 전보혜, 정영웅
A10	KSTP_2025B_143	MMC 파단 모델을 이용한 고강도 알루미늄 합금 판재(7075-T6, 6061-T6)의 파단 특성 분석 오은채*(울산대학교), 박진현, 이진우
A11	KSTP_2025B_114	디퍼렌셜 케이스 성형 공정에서의 판단조 공법 적용성 검토 박준일*(한국생산기술연구원), 이현택, 전용준, 김동언, 신영철
A12	KSTP_2025B_031	광통신용 다채널 커넥터 사출성형에서 코어핀 변형 해석에 관한 연구 김명호*(한국생산기술연구원), 서영호

번호	접수번호	논문제목 / 발표자
A13	KSTP_2025B_026	클래드 소재 차체 부품의 전산해석을 통한 성능 평가 연구 오보라미*(주)일지테크), 배기만
A14	KSTP_2025B_190	구상흑연주철의 기계적 특성 확보를 위한 미세조직 안정화와 냉각속도 최적화 연구 홍지우*(한국생산기술연구원), 하진수, 최창영, 장진석, 송혜진, 정유현, 조용재
A15	KSTP_2025B_167	냉간단조용 다상조직강의 템퍼링 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화 좌리노*(한국재료연구원), 김상현, 안민호, 이영선, 우영윤
A16	KSTP_2025B_141	Al-Mg-Si계 A6082 합금의 열간단조 후 T6 열처리 시 용체화 온도에 따른 미세조직과 경도 특성평가 오재영*(주)일진글로벌), 이종석, 장광순, 김새한, 이선호
A17	KSTP_2025B_267	롤 포밍 공정을 이용한 자동차 차체 부품 개발 이철환*(주)디케이솔루션), 강용기, 임재은, 심우정, 김동규
A18	KSTP_2025B_253	전기자동차 모터용 접지부품의 판재성형 기반 형상 및 성형 공정 설계 전용준*(한국생산기술연구원),
A19	KSTP_2025B_200	배터리 모듈 앤드플레이트의 고유진동수 향상을 위한 토포그래피 최적화 박정빈*(전남대학교), 김대용
A20	KSTP_2025B_195	초고강도강 적용 EV 배터리 케이스 멤버의 스프링백 보정 해석 박현수*(전남대학교), 박 순, 나용근, 김대용
A21	KSTP_2025B_159	차세대 모빌리티용 초고강도강 성형 신뢰성 검증 및 설계 표준화 기술 개발 권수빈*(대구대학교), 배수민, 김경민, 김상훈, 최현준, 공호영, 유재현
A22	KSTP_2025B_137	롤포밍 공정에서의 벤딩거동 예측방법 정확도 평가 차명환*(포스코)
A23	KSTP_2025B_066	고강도 자동차 판재 부품용 3D 프린팅 플라스틱 금형 제조 검토 연구 김세호*(대구대학교), 유기혁, 박진상, 박건우, 장인혁, 도상현, 서종덕, 유재현
A24	KSTP_2025B_062	고분자전해질 수소연료전지분리판용 티타늄의 성형성 평가 정양진*(포스코)
A25	KSTP_2025B_007	초고장력강의 응력경로 변경 효과를 고려한 스프링백 성형 공정 연구 김기정*(현대제철), 진병극, 박영철, 김지영, 임기학, 전진화
A26	KSTP_2025B_178	Mg 합금의 기계적 성질 향상을 위한 보강재 첨가 마찰교반가공 연구 고경민*(국립순천대학교), 양경선, 최시훈
A27	KSTP_2025B_144	스틸-플라스틱 하이브리드 구조를 적용한 배터리팩 사이드프레임 개발 및 성능 평가 정창규*(포스코), 위상권, 박재현, 윤석현
A28	KSTP_2025B_071	구리 버스바 스프링백 평가 및 프로그레시브 금형 설계 최적화 정건우*(한국생산기술연구원), 정선호, 이신명, 유지민, 이경환, 박진수, 이종섭

번호	접수번호	논문제목 / 발표자
A29	KSTP_2025B_160	RFSSW을 적용한 6000계 알루미늄의 이종 소재 접합에 따른 Lab-shear 강도와 파괴거동 비교 백정웅*(한국생산기술연구원), 이인규, 정성화, 이성윤
A30	KSTP_2025B_118	초고강도 저합금강 용접부의 1GPa 인장 강도와 우수한 고주기 피로 특성 강민재*(인하대학교), 백민석, 김영균, 이기안
A31	KSTP_2025B_216	AI 학습과 형상분석 기반 스크랩 분류를 통한 고품질 알루미늄 재생 소재 생산 기술 김참일*(한국생산기술연구원), 강 헌
A32	KSTP_2025B_183	결정 방위의 편차와 영향 정의찬*(국립창원대학교), 정영웅
A33	KSTP_2025B_047	레이저 용접된 DP 강의 상분율 예측을 위한 계층적 군집화 기법의 적용 천민준*(국립한밭대학교), Soumyabrata Basak, 홍성태, 오용준, 조훈휘
A34	KSTP_2025B_028	조립 공정 불량 진단을 위한 신경망 학습에서의 하이퍼파라미터 영향 분석 박지우*(한국생산기술연구원), 곽봉석, 김민수
A36	KSTP_2025B_217	고반사 금속의 비접촉 표면분석 기반 정밀 형상 측정 김윤성*(한국생산기술연구원), 이강현, 황정하, 김민기
A37	KSTP_2025B_146	연속와인딩 적용 PAI 코팅 각형 와이어의 마찰·마모 특성 평가 이동규*(한국생산기술연구원), 김명현, 조유진, 안지섭, 황선광, 정명식
A38	KSTP_2025B_070	다양한 윤활 조건에서 베어링의 진동 및 음향방출 특성 분석 이창환*(서울과학기술대학교), 서승일, 서재원, 이대겸
A39	KSTP_2025B_145	피부 생체전자용 자가접착 액체금속 채널 패치: 텁 구조로 유도되는 밀착 결합과 누설 억제 김진서*(울산과학기술원), 송현석, 김재일, 박성진, 장혜진, 정훈의
A40	KSTP_2025B_060	전하 및 접착력의 프로그램 가능한 향상을 위한 메타물질-접착제 통합 트라이보일렉트릭 나노발전기 이상우*(울산과학기술원), 이희진, 강동관, 강정화, 정훈의
A41	KSTP_2025B_301	핵반응 제어봉 노즐 소재 및 제조기술 연구 김영득*(두산에너빌리티), 이민복, 마영화

## 제1발표회장

2025년 11월 7일(금)

아일랜드볼룸 1

**특별세션 : 항공엔진 ENSIP 기반 Critical Parts 설계-제조-인증 기술 개발 (한화에어로스페이스(주))**

좌장 : 이은호 (성균관대학교)

09:00~09:30	KSTP_2025B_288	고신뢰성 장수명 첨단항공엔진 개발을 위한 ENSIP Master Plan 이홍철*(한화에어로스페이스(주))
09:30~10:00	KSTP_2025B_237	항공엔진 ENSIP 기반 소재부품 기술 개발 손인수*(한화에어로스페이스(주)), 김영무, 윤삼순
10:00~10:25	KSTP_2025B_279	터보샤프트엔진 Critical Parts 임펠러/디스크 개발 기술 및 현황 권혁준*(한화에어로스페이스(주)), 오승철, 김지윤, 손인수
10:25~10:50	KSTP_2025B_244	터보팬 엔진 Critical Parts 블리스크/디스크 개발 기술 및 현황 김종식*(주)케이피씨엠), 주경준, 권용혁, 권혁준, 이기영
10:50~11:00		Break
11:00~11:25	KSTP_2025B_232	Critical Parts 베어링 소재 개발 기술 및 현황 김지윤*(한화에어로스페이스(주)), 권혁준, 손인수, 권용혁
11:25~11:50	KSTP_2025B_300	항공엔진 ENSIP 요구사항 Fretting Fatigue 특성 평가 연구 이동엽*(한화에어로스페이스(주)), 정상국, 김동혁, 김경희, 최동권
11:50~12:10	KSTP_2025B_269	Inconel 718의 δ 석출 열처리가 미세조직 변화 및 고온 가공성에 미치는 영향 안지섭*(한국생산기술연구원), 여승현, 김종식, 권혁준, 주경준, 조민지, 황선광

## 제2발표회장

2025년 11월 7일(금)

아일랜드볼룸 2

**일반구두발표 : 공정계산역학 / 재료거동 및 특성화**

좌장 : 김지훈 (부산대학교)

09:15~09:30 KSTP\_2025B\_087 직교이방성재료의 단순전단변형에서 유효변형률 정의  
안강환\*(포스코), 김홍기

09:30~09:45 KSTP\_2025B\_240 몬테카를로 기반 SHPB 재료 파라미터의 확률적 모델링  
김연복\*(부산대학교), 김 정

09:45~10:00 KSTP\_2025B\_068 등가 소성일 의존 진화형 매개변수를 이용한 순 타이타늄 판재의 성형한계선도 예측  
정의찬\*(영남대학교), 김민수, 김진재

10:00~10:15 Break

**일반구두발표 : 재료거동 및 특성화 / 공정계산역학**

좌장 : 홍종화 (한국재료연구원)

10:15~10:30 KSTP\_2025B\_213 알루미늄 압출재 기계가공 유한요소해석을 위한 구성방정식 예측 정확도 평가  
심현보\*(한국재료연구원), 정찬욱, 오석근, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성

10:30~10:45 KSTP\_2025B\_052 차량용 6000계 알루미늄 압출재의 인장 및 굽힘 특성과 압괴 지표 간의 상관관계 분석  
백민광\*(서울대학교), 원정윤, 신건진, 이상준, 강문구, 이명규

10:45~11:00 KSTP\_2025B\_193 환경응력균열 시험에서 오일에 의한 ABS 고분자의 기계적 물성 저하 및 파괴 거동  
이동윤\*(부산대학교), 전성봉, 박수일, 김지훈

## 제3발표회장

**2025년 11월 7일(금)****아일랜드볼룸 3**

일반구두발표 : 단조		좌장 : 이상곤 (한국생산기술연구원)
09:00~09:15	KSTP_2025B_106	열간 단조 공정에서 파단 모델을 고려한 예비 성형체 설계 신뢰성 확보 김부민*(영남대학교), 박준희, 김홍래, 김낙수
09:15~09:30	KSTP_2025B_149	링압축시험의 해석을 통한 마찰법칙의 평가 허 윤*(경상국립대학교), 박민철, 전병윤, 전만수
09:30~09:45	KSTP_2025B_151	판재인장시험 결과로부터 유동곡선 및 임계손상도의 획득 및 활용 이현민*(경상국립대학교), 전상윤, S. Paisringkorn, P. Jongpradist, 전만수
09:45~10:00	KSTP_2025B_152	육성용접된 열간단조금형을 사용한 단조공정의 해석 기술 김남윤*(경상국립대학교), 최영길, 장성민, 전만수
10:00~10:15	KSTP_2025B_154	혼합 손상도 모델과 손상계수의 결정 홍보승*(경상국립대학교), 이현민, 홍석무, 전만수
10:15~10:30	KSTP_2025B_168	윤활레짐변화에 관한 실험적 및 수치적 고찰 박민철*(경상국립대학교), 허 윤, 김동환, 김응주, 전만수

## 제4발표회장

2025년 11월 7일(금)

스톤홀 1

**특별세션 : 1.2GPa급 동합금 박판 소재 및 초소형 표면 실장용 커넥터 제조기술 개발 (주)풍산) (Closed)**

좌장 : 김준형 (주)풍산)

09:00~09:15	KSTP_2025B_020	인장강도 1.2GPa급 동합금 및 박판 압연재 제조기술 개발 김준형*(주)풍산), 박승훈, 최영철
09:15~09:30	KSTP_2025B_024	Cu-Ti 합금 석출 거동에 관한 제일원리 기반 연구 최은애*(한국재료연구원), 한승전
09:30~09:45	KSTP_2025B_113	고강도 Cu-Ti 2원계 동합금 임곳 및 압연재의 미세조직 특성 박우진*(재)포항산업과학연구원), 오윤석, 강희수
09:45~10:00	KSTP_2025B_230	투과전자현미경법을 이용한 합금원소 첨가에 따른 Cu-Ti 합금의 미세구조 특성에 관한 연구 임성환*(강원대학교), 이정구, 김준형, 최영철, 박철민
10:00~10:15	KSTP_2025B_122	Cu-Ti-(X) 합금 박판의 기계적 물성 평가 이정구*(울산대학교), 최재훈, 김연서, 정동습, 이소영, 송수민, 박승훈
10:15~10:30		Break
<b>특별세션 : 1.2GPa급 동합금 박판 소재 및 초소형 표면 실장용 커넥터 제조기술 개발 (주)풍산) (Closed)</b>		
		좌장 : 박승훈 (주)풍산)
10:30~10:45	KSTP_2025B_236	Ni 첨가에 따른 Cu-3%Ti 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가 김용근*(HVM), 이민숙, 나혜성
10:45~11:00	KSTP_2025B_042	Cu-Ti 합금의 화학적 특성 분석 및 가공 열처리 요소 기술 개발 최광수*(고등기술연구원), 양현석, 정항철, 공만식
11:00~11:15	KSTP_2025B_029	CFD 해석을 통한 Cu-Ti 합금 진공 주조 공정에서의 열·응고 거동 평가 강정석*(메탈젠텍(주))
11:15~11:30	KSTP_2025B_205	1.2GPa급 동합금 박판 소재 및 초소형 표면 실장용 커넥터 제조기술 개발 최재일*(협진커넥터주식회사), 성낙훈
11:30~11:45	KSTP_2025B_069	Cu-Ti 합금 판재의 굽힘 성형성 분석 이창환*(서울과학기술대학교), 이승현, 박민욱, 윤정식, 최인규, 노현도, 배유빈, 문승현, 성낙훈, 최재일
11:45~12:00	KSTP_2025B_254	Cu-Ti(티탄동) 시장 동향 - EU, 일본중심 이승훈*(한국비철금속협회)

## 제5발표회장

**2025년 11월 7일(금)****스톤홀 2****요석학술상 / 학술상 수상 기념 강연**

09:00~09:20	<b>제6회 요석학술상 수상 기념 강연</b> - 미세조직 디지털트윈의 생성과 활용 - 조재형*(한국재료연구원 재료공정연구본부 책임연구원)
09:20~09:40	<b>제14회 학술상 수상 기념 강연</b> - AI 기반 파라미트릭 자동 설계와 소성 가공 공정 해석 - 홍석무*(국립공주대학교 미래자동차공학과 교수)
09:40~10:00	<i>Break</i>
<b>일반구두발표 : 압연</b> <span style="float: right;">좌장 : 이계만 (포스코)</span>	
10:00~10:15	KSTP_2025B_169 응력 기반 파단 모델을 이용한 압연 공정에서의 에지 크랙 예측 및 메커니즘 규명 조대천*(한국과학기술원), 임현용, 윤정환
10:15~10:30	KSTP_2025B_120 냉간 연속 압연 시 워크 를 수직 변위 변동연구 이주성*(중앙대학교), 이석의, 전진표, 이영석
10:30~10:45	KSTP_2025B_115 선재압연라인 디지털 전환(DX)을 위한 하이브리드 데이터 기반 분석 (Hybrid Data-driven Analysis) 플랫폼 개발 김규태*(중앙대학교), 이영석
10:45~11:00	KSTP_2025B_046 압연설비 국산화를 위한 소형 냉간압연기의 통합 설계, 제작 및 시험 전진표*(중앙대학교), 이석의, 이영석
11:00~11:15	KSTP_2025B_003 페라이트계 스테인리스강 슬라브의 오프코너 크랙 진화와 표면결함 전이 이계만*(포스코), 이상진

## 제6발표회장

2025년 11월 7일(금)

스톤홀 3

특별세션 : 전기차용 휠 베어링 소재 부품 기술개발 ((주)일진글로벌) 좌장 : 김영광 (버추얼랩)

09:00~09:15	KSTP_2025B_173	인공지능과 열역학 계산을 활용한 베어링 강종 설계 최적화 방법론 김영광*(버추얼랩), 이민호
09:15~09:30	KSTP_2025B_142	DSC 분석을 통한 Al-Mg-Si계 합금 UCA 소재의 T6 열처리 조건에 따른 열-강도 특성평가 이종석*((주)일진글로벌), 오재영, 장광순, 김새한, 이선호
09:30~09:45	KSTP_2025B_290	베어링 강의 고주파 열처리에 의한 결정립 미세화와 기계적 성능 향상 홍성준*(한국생산기술연구원), 신우철, 송수민, 김태범, 이동근, 조균택
09:45~10:00	KSTP_2025B_010	치형 휠베어링 개발을 위한 표면 경화용 유도가열 시뮬레이션 기술 개발 문인용*(한국생산기술연구원), 정경환, 김건희, 이승표, 송영환

10:00~10:15 Break

특별세션 : 전기차용 휠 베어링 소재 부품 기술개발 ((주)일진글로벌) 좌장 : 이승표 ((주)일진글로벌)

10:15~10:30	KSTP_2025B_204	자동차 구조용 이종 소재 전기 보조 압력 점접합 연구 추수현*(울산대학교), 판반콩, 이창주, 남기석, 홍성태
10:30~10:45	KSTP_2025B_189	전기차용 휠베어링 허브 성형공정해석 유경두*(한국생산기술연구원), 박두현, 안정호, 이인하, 송정한
10:45~11:00	KSTP_2025B_135	복합단조 공정에서의 이종소재(AL-STEEL) 프리폼 형상 최적 설계 및 공정해석 기법 장창순*((주)씨에이이테크놀러지), 곽호택
11:00~11:15	KSTP_2025B_124	이종 소재(AL-Steel) 결합 검출 정확도 향상을 위한 AI 샘플링 데이터 증강에 관한 연구 김진구*((주)씨에이이테크놀러지), 이관규, 곽호택
11:15~11:30	KSTP_2025B_271	치형 베어링용 0.7 tCO2eq/ton 이하 및 900MPa이상 고청정·고강도 소재 개발 이기원*((주)세아베스틸), 최우성, 주승호
11:30~11:45	KSTP_2025B_061	단조설비의 과부하 방지를 위한 적정 스트로크 예측 장보영*((주)일진글로벌), 이인하, 안정호

## 제7발표회장

2025년 11월 7일(금)

윈드홀 1

### 일반구두발표 : 압출 및 인발

좌장 : 윤은유 (한국재료연구원)

09:00~09:15	KSTP_2025B_048	냉간 단조용 선재의 윤활피막 품질 평가 주호선*(포스코), 박성수, 이기호
09:15~09:30	KSTP_2025B_139	딥러닝 모델을 이용한 동복알루미늄 선재의 전기전도도 예측 김현준*(한국재료연구원), 강성훈, 윤준석, 김세종, 오영석
09:30~09:45	KSTP_2025B_170	유한요소해석을 이용한 Hastelloy C22 무계목관 열간 압출 공정 설계 김상현*(한국재료연구원), 윤은유, 이영선, 우영윤
09:45~10:00	KSTP_2025B_291	동복알루미늄 선재 이미지의 금속간 화합물 분석을 위한 군집화 알고리즘 적용 연구 오민기*(한국재료연구원), 김현준, 윤준석, 오영석, 강성훈

10:00~10:15

Break

### 일반구두발표 : 소재응용

좌장 : 조재형 (한국재료연구원)

10:15~10:30	KSTP_2025B_009	코발트계 고엔트로피 합금의 변형쌍정 형성 연구 김정한*(국립한밭대학교), 마흐디, 강주희
10:30~10:45	KSTP_2025B_282	상온 및 극저온에서 316L 스테인리스강의 이방성 압축 거동: 쌍정 및 상변태 메커니즘의 영향 최시훈*(국립순천대학교), Saurabh Pawar, K. U. Yazar, 서위걸, 정창곤, 허윤옥
10:45~11:00	KSTP_2025B_045	열처리와 Cu 첨가 조건이 Al-Mg-Si 합금의 기계적, 전기화학적, 석출 거동에 미치는 영향 홍현빈*(국립한밭대학교), Raj Narayan Hajra, 신은주, 김정한, 오용준, 김재황, 조훈휘
11:00~11:15	KSTP_2025B_299	금속기지복합재의 미시역학적 손상 실시간 분석 : 음향방출 및 중성자 회절 김동규*(건국대학교), 권종혁, 권대서

## 제8발표회장

**2025년 11월 7일(금)****윈드홀 2****특별세션 : 내식성 및 냉각성능이 향상된 두께 50 $\mu\text{m}$  이하급****열교환기용 클래드재 국산화 기술개발 ((주)한국클래드텍)****좌장 : 어광준 (한국재료연구원)**

09:00~09:20 KSTP\_2025B\_056 열교환기용 클래드재 국산화 기술개발  
박철민\*((주)한국클래드텍), 김민중, 이창민

09:20~09:40 KSTP\_2025B\_058 AI 합금 스크랩의 첨가가 열교환기용 소재 특성에 미치는 영향에 대한 연구  
김선기\*((주)나이스엘엠에스), 김경수, 노미란, 조대연, 이상현, 이근효, 구승현, 황종일

09:40~10:00 KSTP\_2025B\_027 알루미늄 스크랩 재활용 국내외 산업 및 기술이슈  
김명균\*((재)포항산업과학연구원), 김 덕, 하 원

10:00~10:20 KSTP\_2025B\_211 클래드용 판재 적용을 위한 스크랩 기반 AI-Mn계 합금의 주조 해석 시뮬레이션 및 특성 최적화  
강 헌\*(한국생산기술연구원), 김참일

10:20~10:40 *Break*

10:40~11:00 KSTP\_2025B\_201 4343/3003/4343 알루미늄 클래드 판재의 브레이징특성에 미치는 압연접합 공정의 영향  
김형욱\*(한국재료연구원), 정대한, 김원경, 어광준

11:00~11:20 KSTP\_2025B\_076 응축기용 알루미늄 클래드재의 균질화 및 브레이징 공정 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가  
신재혁\*(한국자동차연구원), 최효남, 한범석

11:20~11:40 KSTP\_2025B\_080 국산 클래드 적용 전기차 열관리 시스템 열교환기의 설계변수 영향도 분석 설계  
이현석\*(한국자동차연구원), 조병선, 권혁주, 배석정

## 포스터 발표 B

2025년 11월 7일(금)

B동 2층 로비 09:00~11:00

좌장 : (포스코) 차명환 수석연구원, 위상권 수석연구원

번호	접수번호	논문제목 / 발표자
B01	KSTP_2025B_210	순수 타이타늄 극박판의 인장 및 압축 응력-변형률 거동 측정 김민겸*(부산대학교), 김경표, 김현기, 김지훈
B02	KSTP_2025B_277	Inconel 718의 고온 링 압축 시험 및 유한요소 해석을 통한 미세조직과 마찰 특성 비교 분석 여승현*(한국생산기술연구원), 안지섭, 허수빈, 이나경, 조아라, 정명식, 황선광
B03	KSTP_2025B_268	구동모터 부품의 단조 공정 해석 김동규*(주)디케이솔루션, 이철환, 임재은, 박은수, 강용기
B04	KSTP_2025B_165	전기 기계식 브레이크용 일체형 Front Type Combi Drive 제작을 위한 냉간다단포머 성형공정개발 및 시제품 특성분석 김주업*(재)대구기계부품연구원), 강해동, 윤창배, 오상원, 이운학, 박휘동, 박희찬
B05	KSTP_2025B_134	치 성형 냉간단조 금형의 마모수명 향상을 위한 금형 소재 마모특성 평가 및 적용 임한비*(한국생산기술연구원), 신준호, 이성윤, 이상곤, 이인규
B06	KSTP_2025B_085	복합발전용 가스터빈 압축기용 대형 단조부품 개발 허상현*(주)태웅), 김남용, 이채훈, 윤선룡, 권하늘, 문지훈, 이진모
B07	KSTP_2025B_044	냉간성형 비구속 압출 공정에서 금형 패턴 형상 최적화 연구 이운학*(에스제이에프(주)), 오상원, 박휘동, 김주업, 박희찬, 윤창배
B08	KSTP_2025B_041	한쪽면이 막힌 형태를 가지는 로터 샤프트의 일체화 성형 기술 개발에 관한 연구 박은수*(경창산업(주)), 이성민, 김동규
B09	KSTP_2025B_030	각형 전기차 배터리용 집전체 부품 제조 공정의 유한요소해석 박기근*(주)태진다이텍), 이재성, 장성민, 전만수
B10	KSTP_2025B_172	Reverse 알고리즘 기반 응력-변형률 곡선을 활용한 DP980 압연 해석 및 인공지능 기반 변형거동 예측 서위걸*(국립순천대학교), Khushahal Thool, 최시훈
B11	KSTP_2025B_132	적층제조 다상조직강의 압연 공정에 따른 미세조직 분화 및 기계적 특성 분포 분석 강민성*(강릉원주대학교), 김대현, 한성희, 김보규, 김재우, 최인석, 조유연, 정효태, 서태현, 신승우, 윤수빈, 장지훈, 이류경, 신중호

번호	접수번호	논문제목 / 발표자
B12	KSTP_2025B_208	전기차용 경량 CCA 버스바 공정 최적화 진현승*(중원대학교), 손세한, 안영준, 홍준표, 박정섭, 강종훈
B13	KSTP_2025B_156	알루미늄 압출 금형 내 소재 유동 제어를 위한 비드 구조의 영향성 분석 정성화*(한국생산기술연구원), 이인규, 백정웅, 이성윤
B14	KSTP_2025B_130	핫 피어싱 공정을 이용한 액화수소용 고망간강 심리스 배관 제조기술 권진구*(주)세창스틸), 이준표, 홍성모
B15	KSTP_2025B_054	Zn 합금의 Si 합금 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성 유효상*(한국생산기술연구원), 김용호, 김철우, 조재익, 손현택
B16	KSTP_2025B_049	유한요소해석 기반 합금강 선재 인발 공정의 표면 거칠기 예측 홍현빈*(국립한밭대학교), Raj Narayan Hajra, 유종환, 오민규, 손동민, 김정한, 조훈휘
B17	KSTP_2025B_013	하나로 핵연료 피복압출 제조공정 변경을 통한 진직도 개선 황재준*(한국원자력연구원), 김종환, 소원재, 김호민, 박찬석, 정용진
B18	KSTP_2025B_005	알루미늄 압출 공법을 적용한 후륜 로어암 설계 최적화 연구 윤석진*(현대모비스), 문기람, 이준민, 이계호
B19	KSTP_2025B_280	마이크로필라 압축시험을 통한 AA6061 합금의 크기효과 및 변형속도 효과 규명 백인섭*(경상국립대학교), 팽정인, 이근호, 강성규
B20	KSTP_2025B_275	Inconel 718 소재의 열간단조 공정 중 변형률에 따른 동적 재결정 거동 특성에 관한 연구 허수빈*(한국생산기술연구원), 안지섭, 여승현, 이나경, 권혁준, 김종식, 황선광
B21	KSTP_2025B_138	고온압축시험 시 배럴링과 소성변형열을 고려한 와스팔로이 합금의 유동응력선도 평가 전지환*(한국생산기술연구원), 안지섭, 이인규, 이성윤, 권혁준, 김지윤, 이상곤
B22	KSTP_2025B_107	연속와인딩 모터 각형와이어 성형공정의 유한요소해석 및 분석 기법개발 조유진*(한국생산기술연구원), 안지섭, 이동규, 황선광, 정명식
B23	KSTP_2025B_012	플로우 포밍 공정에 따른 SCM440H의 기계적 특성 연구 이성민*((재)경북테크노파크), 오현준, 박은수
B24	KSTP_2025B_289	DED 공정을 이용한 Cu-H13 접합에서 중간층 적용에 따른 계면 및 열전달 특성 분석 박현태*(국립한국해양대학교), 남이정, 심도식
B25	KSTP_2025B_251	수지 광중합 공정으로 제조된 금속-폴리머 복합재의 접합부 내 금속 격자 형상의 영향 고민성*(국립한국해양대학교), 오창민, 심도식
B26	KSTP_2025B_197	매개변수 모델링 기반의 베지어 스플라인 경사기능 허니컴 구조 하태광*(조선대학교), 남궁길, 김재준
B27	KSTP_2025B_176	나노인덴테이션을 이용한 Co-WC 코팅층의 경도 및 내마모 특성 연구 이은세*(국립순천대학교), 김학윤, 최시훈

번호	접수번호	논문제목 / 발표자
B28	KSTP_2025B_111	Wire-Based Laser Additive Manufacturing 공정으로 제조한 Ti-6Al-4V 합금의 수소 취성 파괴 저항성 박정현*(인하대학교), 송노건, 김대중, 서진유, 이기안
B29	KSTP_2025B_081	직접용융증착된 IN718 합금의 후열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화 권시은*(경상국립대학교), 김정기
B30	KSTP_2025B_079	직접용융증착으로 제조된 CuNiAl 저합금강의 직접 시효에 따른 기계적 특성 변화 주수빈*(경상국립대학교), 노건우, 정종현, 류경희, 김형섭, 김정기
B31	KSTP_2025B_021	전자기장 해석 기반 고주파 유도가열 코일의 적층 제작 연구 김우성*(한국생산기술연구원), 이승엽, 김다혜, 흥명표, 성지현, 연시모, 박종규, 김건우
B32	KSTP_2025B_285	금형 캐비티 압력 프로파일을 활용한 인공신경망 기반 사출품 품질 예측에 관한 연구 노수연*(한국생산기술연구원), 김지우, 김종수, 김종선
B33	KSTP_2025B_284	사출성형공정 모니터링을 위한 엣지 디바이스 개발에 관한 연구 김지우*(고려대학교), 윤길상, 김종선, 김종수
B34	KSTP_2025B_258	주울 히팅을 이용한 아스팔트패드 통전시간별 융착성 평가 배기만*(주)일지테크), 오보라미, 백종진, 강상민, 김유민
B35	KSTP_2025B_150	AIoT 기반 다중 센서 데이터 분석을 통한 공구 수명 예측 연구 박기웅*(한국화학융합시험연구원), 박근혁, 오동현, 임순현
B36	KSTP_2025B_128	차체부품 산업의 확장형 공급망 적용위한 통합형 AI 최적화 플랫폼 구축 최현범*(주)호원), 이서한, 이정우, 이상현
B37	KSTP_2025B_127	열변형 차체부품 교정기 설계 이상현*(주)호원), 최현범, 이정우, 이서한, 김동근, 남경욱
B38	KSTP_2025B_126	범퍼빔 교정기 개발에 따른 설비용량 도출 이상현*(주)호원), 최현범, 이정우, 이서한, 김동근, 남경욱
B39	KSTP_2025B_125	가상해석 기반의 차체부품 소재비용 산출 최현범*(주)호원), 이서한, 이정우, 이상현
B40	KSTP_2025B_074	전기차 배터리 냉각판용 철강 기반 신공정 개발 및 성능 평가 위상권*(포스코), 박재현, 최한호, 정창규

본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥기금으로 추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술발전에 기여합니다.

This work is supported by the 'Lottery Fund' of the 'Ministry of Strategy and Finance' and the 'Science and Technology Promotion Fund' of the 'Ministry of Science and ICT', contributing to the realization of social value and the development of national science and technology.

# 목 차

## 1. 특별세션 (제 1 발표회장)

### ○ 고성능 부품제조를 위한 금형공구용 소재기술개발 심포지엄 (주)세아창원특수강

- 개발 냉간 및 열간 금형강의 손상매커니즘 기반 특성평가  
..... 윤국태\*(대구기계부품연구원), 김주업, 홍창완, 이락규, 김용유, 손동민 / 53
- 전단금형 강화를 위한 이종금속 접합용 고강도 금속분말 양산화 기술 개발  
..... 구용모\*(주)창성), 고창성, 여형성, 이기안 / 55
- DED 적층제조공정으로 제조된 개량 G6 공구강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 분말산소 함량의 영향  
..... 전민수\*(인하대학교), 박정현, 김대중, 전종배, 구용모, 이기안 / 56
- 적층제조를 이용한 냉간 전단 금형의 수명향상 평가  
..... 김성욱\*((재)포항산업과학연구원), 천창근, 장경현 / 58

## 2. 특별세션 (제 2 발표회장)

### ○ 고청정 고내식 Ni-Cr-Mo계 소재부품기술개발 심포지엄 (한국금속재료연구조합)

- 고청정-고내식 Hastelloy계 니켈합금의 봉강 및 무계목강관 소재 제조기술 개발  
..... 김덕령\*(세아창원특수강), 정세지, 권순일, 박상훈, 안세호, 김영재, 정해창 / 60
- 하스텔로이 C-22 무계목관의 열간 3 축 률 압연 공정 기술  
..... 이준표\*(주)세창스틸), 권진구, 홍성모 / 61
- Ni-Cr-Mo계 소재의 고온변형거동 및 열간성형 인자 분석  
..... 윤은유\*(한국재료연구원), 최언준, 조주형, 우영윤, 김덕령, 홍성모 / 62
- 극한 부식 환경 대응 Ni-Cr-Mo계 합금의 합금 설계 및 특성 확보 전략  
..... 홍현욱\*(국립창원대학교), 주하연, 김종훈 / 63
- Ni-Cr-Mo계 고부식 저항 합금의 반도체 가스 제어용 유로 조도 제어를 위한 전해연마 공정 특성 연구  
..... 양현석\*(고등기술연구원), 정우철, 한덕현, 최광수, 공만식 / 64
- Ni-Cr-Mo계 금속기판과 산화물 소재 타겟을 이용한 고온초전도선재 제조 공정 개발  
..... 이재훈\*(주)서남), 이유리, 신강환, 한진구, 이현주 / 65
- 고온초전도선재 버퍼층 제조 및 소재의 구조적, 화학적 안정성 평가  
..... 김글하\*(홍익대학교), 이정우 / 66
- 용액공정을 통한 Eu-Doped Y2O3 초전도 버퍼층 제조 연구  
..... 정재한\*(서울과학기술대학교), 배현우 / 67

### 3. 특별세션 (제 7 발표회장)

#### ○ 차세대 원통형 배터리 케이스 기술 (TCC스틸)

- 46xx 배터리용 도금강판의 열처리 조건에 따른 도금막 특성

.....박우진\*(포항산업과학연구원), 강희수, 오윤석 / 69

### 4. 일반 구두 발표 / 특별세션 (제 1 발표회장)

#### ○ 금속유연공정 / 금형가공 / 제조공정 및 장비 / 성형에 의한 접합 / 재료거동 및 특성화

- 플로우포밍 공정으로 제조된 핵연료 처분용 Pure Copper의 고온 압축 및 CREEP 특성

.....송노건\*(인하대학교), 강태훈, 이영호, 김재득, 이기안 / 71

- 프레스 특성 가시화 데이터 수집 및 형합 보정을 위한 프레스 변형량 측정 및 해석 연구

.....강희원\*(한국자동차연구원), 박건영, 최진영, 정정봉, 권경업, 김동옥 / 73

- 3D 열간 자유 튜브 성형 공정변수에 따른 폐단면 관재에 미치는 영향 검토

.....김정욱\*(한국재료연구원), 이승환, 김소연, 이석규, 권용남, 이동준, 석무영, 최현성, 박현일 / 74

- GFRP 적층 폐단에 따른 Flow Drilling Screw 크랙 발생 원인 분석 및 적층 폐단 최적화 연구

.....김성구\*(주성우하이텍), 김지훈 / 75

- 탄소성 유한요소해석 기반 급속 냉각 미세조직 제어에 따른 SnBi 음극의 부피변형 및 손상거동 평가

.....김태현\*(성균관대학교), 박현서, 진미잠, 이은호, 김재훈 / 76

#### ○ LCA 방법을 이용한 수출규제 대응(한국생산기술연구원)

- 전과정평가 소개와 최신 동향

.....최요한\*(한국생산기술연구원) / 77

- EU 규제를 통해 본 에코이노베이션의 전략적 가치

.....유준혁\*(딜로이트 안진회계법인) / 78

- 철강기반 탄소발자국 저감 자동차 부품화 솔루션

.....김동진\*(포스코), 이홍우, 강연식 / 79

- 알루미늄 가공공정 LCA 사례

.....함진기\*(글래스돔코리아), 윤양진, 문형중 / 80

- 전자산업용 황동봉의 전과정평가(LCA)를 통한 환경성 및 자원순환성 분석

.....황윤빈\*(켐토피아) / 81

### 5. 특별세션 / 일반 구두 발표 (제 2 발표회장)

#### ○ 복합발전용 가스터빈 압축기용 대형 단조부품 개발 심포지엄 (한국금속재료연구조합)

- 가스터빈 압축기 대형 단조부품 제조공정의 탄소배출 저감 전략과 CBAM 대응 방안

.....김남용\*(주)태웅), 이채훈, 허상현, 윤선룡, 권하늘, 문지훈, 이진모 / 83

- 가스터빈 압축기용 고청정 3.5NiCrMoV강의 열처리 조건에 따른 기계적 특성 및 잔류응력 거동 분석  
.....김동배\*(대구기계부품연구원), 이영민, 유가영 / 84
- 3.5NiCrMoV강 응고거동 규명을 위한 미세조직 분석 및 CALPHAD 해석  
.....이형수\*(한국재료연구원), 윤대원, 정인용, 정희원, 유영수, 서성문 / 85
- 복합발전용 가스터빈 압축기 부품 제작을 위한 단조/링단조 공정 설계  
.....김진용\*(주)태상), 주병돈, 이인환, 김주희, 박영철 / 86
- 열간자유단조 및 링롤링 공법으로 제조된 3.5NiCrMoV 합금의 기계적 특성에 관한 연구  
.....권용철\*(한국건설생활환경시험연구원), 김창홍, 주병돈 / 87
- 가스터빈 압축기용 3.5NiCrMoV 강의 템퍼 취성 거동  
.....김병구\*(한국생산기술연구원), 최용욱 / 88

## ○ 박판성형

- 피어싱 공정에서 편치 선단의 기하학적 형상에 따른 구리 박판의 전단면 특성 평가  
.....이종훈\*(한국생산기술연구원), 전용준, 최현석, 이현택, 김동언 / 90
- 자동차용 크로스멤버 최적 금형 설계에 대한 강건성 해석  
.....손준혁\*(전남대학교), 박 순, 나용근, 김대용 / 91
- Stainless 강판 성형 공정의 소착 거동에 관한 연구  
.....문지환\*(한국생산기술연구원), 이종균, 이명규, 송정한, 배기현 / 92
- 롤포밍 초고장력강 소재 평탄도 확보 기술 개발  
.....김재균\*(주)성우하이텍), 김덕현, 정윤성, 박상언, 손성만 / 93
- 원통형 배터리 셀 캔 공정 개발 및 드로잉 공정 별 비교 연구  
.....서예찬\*(한국재료연구원), 지수민, 이세동, 성홍석, 윤은유, 홍종화 / 95
- Nimonic 80A 판재의 물성 평가 및 엔진 배기관 클램프 공정 기술 개발  
.....윤건우\*(한국재료연구원), 김진수, 서예찬, 홍종화 / 96
- 이미지 분석을 활용한 아연도금층의 변형 모드별 박리량 및 크랙 측정  
.....정규철\*(한양대학교), 김태영, 이재욱, 임현교, 김성제, 조경현, 주형수, 정유형, 윤종현 / 97
- 다단 성형 공정 설계에 대한 Python Optimal Transport(POT) 기법 적용  
.....정한용\*(포스코), 박기철 / 98
- 양면 돌출 축 성형이 가능한 파인 블랭킹 복합성형 공법을 적용한 전자변속기용 사이클로이드 기어의 최적 성형기술 개발  
.....박동환\*(경북테크노파크), 최성돈, 신용호 / 99
- Deep Drawing 과정에서 금속-폴리머-금속 적층판재의 파단 및 주름 거동  
.....김재훈\*(포항공과대학교), 최연택, 김래언, 구강희, 권지혜, 서민홍, 김형섭 / 100

## 6. 특별세션 (제 3 발표회장)

### ○ 초고강도 핫스탬핑 강판 냉간 트림 기술 (현대자동차/(재)대구기계부품연구원)

- 탄소배출 저감을 위한 핫스탬핑 강판의 냉간트립 기술 연구 및 동향  
.....손성국\*(현대자동차), 이창욱, 박재명, 윤승채 / 102
- 미세조직 제어 기반 핫스탬핑 냉간트립 적용연구  
.....박재명\*(현대제철), 손성국, 박계정, 손경주, 윤승채 / 103
- 열간 성형된 HPF강의 기계적 전단 평가에 대한 예비 연구 소개  
.....손현성\*(포스코), 최종원, 김홍기, 남재복, 손현성 / 104
- 핫스탬핑 강판의 전단 특성 평가  
.....송재선\*((재)대구기계부품연구원), 윤국태, 전강국, 강익수, 허재영 / 105
- 핫스탬핑 기계적 트립 적용에 따른 수소취성 거동 예측  
.....윤승채\*(현대제철), 박재명, 박계정, 손경주, 손성국 / 106
- 금속 적층제조 기술을 활용한 금형 코어 적용 및 성능 향상 사례  
.....최장욱\*(아진산업(주)), 전현환, 이선희 / 107

## 7. 일반 구두 발표 / 특별세션 (제 4 발표회장)

### ○ 미세구조 및 응용 / 표면 및 인터페이스 / 플라스틱가공

- 열처리 제어에 따른 미세조직 변화가 비조질강의 냉간 단조성에 미치는 영향  
.....안민호\*(한국재료연구원), 이영선, 박성혁, 우영윤 / 109
- 전기화학적으로 유기된 마르텐사이트 상변태 메커니즘의 규명  
.....채준영\*(서울대학교), 이귀형, 이혁재, 조영근, 정다물, 권영균, 정인호, 김성준, 한홍남 / 110
- 배터리용 파우치 필름 접합부의 고온다습 환경에서의 열화 및 T-peel 거동 해석  
.....홍승효\*(서울대학교), 이형립, 이명규 / 112
- 초음파 나노표면개질 공정(UNSM)으로 유도된 잔류응력 크기 변화에 따른 인장 거동 분석  
.....최언준\*(한국재료연구원), 윤은유, 홍종화 / 113
- 인서트 사출성형 기반 전극 내재형 미세유체 칩 제작 기술  
.....유영은\*(한국기계연구원), 정연정, 우상원, 진재호, 신경식 / 114

### ○ International Session (KIMS)

- Exploring the impact of intercritical annealing temperature on microstructural evolution and mechanical performance in low alloy multiphase TRIP-assisted steels  
.....Yoon-Uk Heo\*(Pohang University of Science and Technology), Chang-Gon Jeong, T.T.T. Trang, Youngyun Woo, Eun Yoo Yoon, Youngseon Lee / 115

### ○ 복합재료가공

- CFRP 부품 제작의 시뮬레이션 기반 후변형 예측  
.....서준영\*(부산대학교), 류재창, 이찬주, 신도훈, 고대철 / 116
- 열가소성 복합재의 가압 전도 용접 공정의 유한요소해석  
.....채기현\*(부산대학교), 류재창, 이찬주, 신도훈, 고대철 / 117

- CF/PPS 성형 중 냉각 과정 하중 변화가 표면 품질에 미치는 영향에 관한 연구  
..... 백종훈\*(한국생산기술연구원), 소태영, 전용준, 최현석, 김동언, 이현택 / 118

## 8. 특별세션 (제 5 발표회장)

### ○ 철강·금속 산업 디지털 전환(DX) 심포지엄 ((재)포항금속소재산업진흥원)

- 철강·금속산업 디지털전환 도입 사례 분석  
..... 김대우\*((재)포항금속소재산업진흥원), 양해웅 / 120
- 머신러닝 기반 알루미늄 합금의 기계적 특성 예측 및 미세조직 검출 자동화  
..... 배영훈\*((재)포항금속소재산업진흥원), 이용환 / 121
- No-Code 제조기술을 통한 중소기업 디지털 경쟁력 강화  
..... 이동훈\*((재)포항금속소재산업진흥원), 김대우 / 122
- 디지털트윈 시범구역(농어촌형) 조성을 통한 지역 문제 해결  
..... 이용환\*((재)포항금속소재산업진흥원), 김경훈 / 123
- 인공지능 모델을 활용한 La 첨가 알루미늄 합금 설계와 실험적 검증  
..... 이재원\*((재)포항금속소재산업진흥원), 허우로 / 124
- Seamless 강판 대체형 전기차 현가장치용 ERW 인발 강판 개발 연구  
..... 허우로\*((재)포항금속소재산업진흥원), 김대우 / 125

### ○ DIC 활용기술 심포지엄 (POSCO)

- DIC를 활용한 극박 순 타이타늄 판재의 성형한계선도 결정  
..... 봉혁종\*(경상국립대학교), 김찬양, 민경문, 김경재 / 126
- 멀티 카메라 디지털 영상 상관 기법을 이용한 재료 및 구조물의 물성 측정사례 및 데이터 분석  
..... 김태렬\*(오엠에이콤), 김원섭 / 127
- DIC기법을 이용한 금속판재의 대변형 물성 분석  
..... 김민기\*(한국생산기술연구원), 김용남 / 128
- 멀티 DIC기법을 이용한 철강재 HER 시험편의 표면 변형 측정 방법  
..... 최재덕\*(포스코), 오경석, 김지민, 임지호 / 129
- DIC를 이용한 자동차강의 소부 후 파단물성 평가  
..... 임지호\*(포스코), 이해아, 최지식 / 130
- 디지털 이미지 상관법과 소형 편치 시험을 이용한 판재 인장 물성 측정  
..... 도안 응웬 부\*(부산대학교), 허현준, 이신애, 김지훈 / 131
- 디지털 이미지 상관 신호의 잡음 및 진동 억제를 위한 CWT-SRS 통합 분석 프레임워크  
..... 임현용\*(한국과학기술원), 윤정환 / 132
- 디지털 이미지 상관기법(DIC)을 활용한 변형률 속도 변화에 따른 변형경로 분석  
..... 이상민\*(공주대학교), 김정민, 홍석무 / 133

- 둠 편치 실험과 DIC를 활용한 Hosford-Coulomb 금속 연성 파단 모델 평가

..... 김찬양\*(국립군산대학교), 봉혁종 / 134

## 9. 특별세션 / 일반 구두 발표 (제 6 발표회장)

### ○ 고품질 판재성형 부품 지능형 고속/고정밀 프레스 장비기술 개발 (㈜SIMPAC)

- 시계열데이터에 대한 유효지표 자동 생성 시스템

..... 윤상혁\*(㈜SIMPAC) / 136

- MLOps(Machine Learning Operations) 기반 스마트 제조를 위한 예지보전 및 데이터 관리 프레임워크

..... 문건혁\*(㈜유아이티), 우성환, 오정현, 김소정, 길성민, 김성태 / 137

- Archard's Law을 적용한 슬라이딩 접촉계의 마모 예측

..... 알리백\*(서강대학교), Inseo Kim, Joonhee Park, Wonho Lee, Naksoo Kim / 138

- 체계적인 심층 전이학습을 이용한 금속 표면 불량 검출 모델 선정 연구

..... 김형중\*(건국대학교), 우종현, 박준혁 / 139

- 다중 센서를 활용한 전단 공정 모니터링 기술 개발

..... 김경민\*(한국생산기술연구원), 이상오, 송정한, 김용배, 이수현, 노건우, 배기현 / 140

- 볼트형 압전식 하중 센서를 활용한 프레스 상태 모니터링

..... 권오동\*(㈜솔루션랩), 김수영, Matthias Brenneis, Jörg Stahlmann, 이경훈 / 141

### ○ 모델링 및 시뮬레이션

- 위상장 응집영역 모델링을 이용한 탄소성 다층 구조의 동적 파괴 해석

..... 진미잠\*(성균관대학교), 이은호 / 142

- 텍스쳐 기반 소성 포텐셜 함수를 이용한 거시적 이방성 예측

..... 박원진\*(한국과학기술원), 정영웅, 윤정환 / 143

- 다결정 탄점소성 유한 요소 해석 모델을 활용한 초고장력 강판의 굽힘 후 스프링백 거동 모사

..... 전보혜\*(국립창원대학교), 강주홍, 정영웅 / 144

- 탄·소성 영역에서 수소취성 파단 해석을 위한 반응속도-화산-변형-손상 결합 모델

..... 신건진\*(서울대학교), 박진홍, 이명규 / 145

- 딥 러닝을 이용한 공정 의존적 탄소성 인공지능 구성방정식의 개발, part2

..... 문희범\*(㈜솔루션랩), 이경훈 / 146

- 크롬강 적층제조재의 이방성 거동에 대한 결정소성 기반 연구

..... 유제현\*(서울대학교), 이호영, 이명규 / 147

- GNB를 고려한 금속 판재 하중 반전 예측용 GND 기반 역응력 모델

..... 심규장\*(서울대학교), 유제현, 최성환, 김영재, 이충안, 김현기, 노동환, 이명규 / 148

- 고속충돌 시 침투탄두 용접부의 변형 및 손상 분석

..... 이주원\*(한국과학기술원), 임현용, 장택진, 박주성, 윤태건, 고원기, 윤정환 / 149

- 코일 스프링 템퍼링 공정의 DNN 기반 다목적 최적화  
..... 김민기\*(부산대학교), 허지원, 차승훈, 임철현, 신정규, 고대철 / 150
- 소성 메커니즘 기반 DSC 전력반도체용 금속 확산접합 모델 개발  
..... 전형주\*(서울대학교), 신건진, 이명규 / 151

## 10. 특별세션 / 일반 구두 발표 (제 7 발표회장)

### ○ 고강도 소재 적용 전기자동차 샤시 및 배터리 케이스 제조를 위한 접합 장비와 스마트 접합라인 개발 및 제품화 실증 (㈜화신)

- 배터리 팩 케이스의 용접 순서 최적화를 위한 유한요소 해석  
..... 구인환\*(충북대학교), 전종호, 서오석, 조정호 / 153

### ○ 소재 형상교정 및 전단기술 심포지엄 (POSCO)

- 철강 가공센터 형상교정 및 슬리팅 기술 개발과 적용 사례  
..... 박기철\*(포스코), 오경석, 구진모 / 154
- 국내 고강도 철강재 전단기술(Shearing 및 Slitting) 동향  
..... 최도현\*(대원인물㈜) / 155
- GigaSteel의 평탄도 제어 기술 및 적용 사례  
..... 최대곤\*(포스코) / 156
- 1.5GPa급 마르텐사이트강 평탄도 제어를 통한 롤포밍 차체 부품의 산포 저감 연구  
..... 박민호\*(주)아산), 유성호, 권효성, 유정현, 이민혁, 김근호 / 157
- 판재 레밸링에서 유효곡률반경의 결정 방법에 대한 고찰  
..... 오경석\*(포스코), 구진모, 박기철 / 158
- 헤어핀 코일 직선화 공정의 실시간 최적화를 위한 디지털 트윈 프레임워크  
..... 김지훈\*(성균관대학교), 한선우, 이민섭, 이은호 / 159

### ○ 자율제조

- 가변 곡률 자동차 부품의 스프링백 저감을 위한 스마트 금형 제어기술 개발  
..... 구진모\*(포스코), 이재우, 김태효 / 160
- 품질산포 대응을 위한 시트레일 스프링백 자동보정 금형 개발  
..... 김태효\*(포스코), 구진모, 이재우 / 161

### ○ 적층제조 및 유연공정

- 레이저 기반 적층제조를 활용한 Ni기 초내열합금/세라믹 경사기능소재 제조  
..... 김정기\*(경상국립대학교), 유현용, 유진영, 김태현, 이진수, 안성열, 김형섭, 이태경, 김세윤 / 162
- 격자 구조에 따른 제올라이트 코팅 및 이산화탄소 흡착 특성 평가  
..... 이광규\*(조선대학교), 안동규 / 163

- TPMS 단위체의 설계에 따른 도파관의 전자기적 특성 분석  
..... 범종찬\*(조선대학교), 안동규 / 164
- TPMS 구조 기반 전자기과 간섭 차폐 필터의 주파수 변화에 따른 전기 전도도 및 차폐 효율 변화 고찰  
..... 한승현\*(조선대학교), 범종찬, 이성준, 김창래, 안동규 / 165

## 11. 특별세션 (제 8 발표회장)

### ○ 21th ICIM (International Consortium of Innovative Manufacturing) Technical Forum (KAIST/Deakin University)

- 전기차 배터리 Cap-Can 레이저 용접부의 국부 기계적 거동 특성 평가  
..... 조동혁\*(한국과학기술원), 이주원, Junjie Ma, Hassan Ghassemi-Armaki, Masoud M. Pour, Blair E. Carlson, 윤정환 / 167
- 탭-버스바 이종 레이저 용접부 분석과 모델링  
..... 이주원\*(한국과학기술원), 조동혁, Hassan Ghassemi-Armaki, Masoud M. Pour, Blair E. Carlson, 윤정환 / 168
- Automated Noise Correlation Method for DIC Data to Consider Material Property Variations  
..... 임현용\*(한국과학기술원), 윤정환 / 169
- 베이지안 최적화 알고리즘을 통한 를러 오프셋 공정 알루미늄 강판 뒤틀림 최소화  
..... 한동훈\*(한국과학기술원), Lu Huang, Thomas B. Stoughton, 안태균, 최현성, 윤정환 / 170
- 비대칭 알루미늄-폴리머 적층형 복합재 필름의 층간 박리 거동 모사  
..... 사공철\*(한국과학기술원), 장택진, 안태균, 윤정환 / 171

### ○ 재료성형 공정의 유한요소해석 발자취 및 최신연구 동향 (서울과학기술대학교)

- 이방성 소성 모델과 사면체 요소를 이용한 판재성형의 유한요소해석  
..... 정완진\*(서울과학기술대학교), 전만수, 정석환, 전상윤 / 172
- 고분자 가공에서 CAE의 응용  
..... 류민영\*(서울과학기술대학교), 성승민, 정영현, 이현동, 최재웅 / 173
- 이미지 기반 유한요소해석 대체 AI 모델 개발  
..... 이창환\*(서울과학기술대학교), 노현도, 문승현, 배유빈 / 174
- 다상 Q&P 강의 응력 상태 의존 마르텐사이트 상변태와 소성 거동 예측을 위한 결정소성 모델링 연구  
..... 박진홍\*(서울과학기술대학교), 이명규 / 175
- 소성가공 시뮬레이션에서 유동특성과 마찰에 관한 고찰  
..... 전만수\*(경상국립대학교) / 176
- 유한요소해석 기반 적층제조 특화 설계 적용 사례  
..... 박근\*(서울과학기술대학교) / 177
- 비선형 변형률 경로에서의 변형률속도 의존 애곡경화 모델 및 U-드로 벤딩 해석  
..... 최현성\*(한국재료연구원), 윤정환 / 178
- FEM 해석과 실험 데이터의 결합을 통한 전기자동차 부품 실시간 자율제조 공정 개발  
..... 이은호\*(성균관대학교) / 179

- 적층제조공정의 유한요소해석

.....안동규\*(조선대학교) / 180

## 12. 포스터 발표 A

### ○ 금속 성형 분야의 디지털화/가상화

- B-Spline 및 Gaussian Process를 이용한 Inconel 718 고온 유동 응력 예측

.....이나경\*(한국생산기술연구원), 안지섭, 조아라, 이상곤, 이성민, 정명식, 황선광 / 182

- 전조 텁 수명 관리를 위한 기계학습 기반 성형 토크 특성 분석

.....이신명\*(한국생산기술연구원), 정건우, 정선호, 유지민, 이경환, 양준일, 전필중, 이종섭 / 183

### ○ 금형가공

- 금속 적층제조 기술을 적용한 사출금형 코어의 경량화 및 냉각 성능 향상에 관한 연구

.....송승현\*(한국생산기술연구원), 송진영, 황선광, 정경환, 박상민, 차경제 / 184

### ○ 모델링 및 시뮬레이션

- 고온 환경에서 진공 챔버 벽 처짐 변형 예측

.....윤준섭\*(한국생산기술연구원), 김민기 / 185

- 와이어 와운드 두께에 따른 고압 압력 용기의 파단 안전 성능 연구

.....이예찬\*(한국생산기술연구원), 지민기, 김민기, 임성식 / 186

- 결정 소성과 변형 유도 마르텐사이트 변태 모델을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 저온 변형 거동 해석

.....최석현\*(서울대학교), 이혁재, 홍성태, 이명규, 한홍남 / 187

- 이방성을 고려한 내열합금 후판재 롤밴딩 공정 해석

.....박광수\*((재)포항산업과학연구원), 신홍철, 최창혁, 김성욱 / 188

- 전기자동차 배터리 팩 사이드멤버 단면 형상 토플로지 최적화

.....안민영\*(전남대학교), 김대용 / 189

- 두 탄점소성 다결정 소성 모델을 이용한 DP980 강 C-rail 성형 후 스프링백 예측 비교

.....강주홍\*(국립창원대학교), 전보혜, 정영웅 / 190

- MMC 파단 모델을 이용한 고강도 알루미늄 합금 판재(7075-T6, 6061-T6)의 파단 특성 분석

.....오은재\*(울산대학교), 박진현, 이진우 / 191

- 디퍼렌셜 케이스 성형 공정에서의 판단조 공법 적용성 검토

.....박준일\*(한국생산기술연구원), 이현택, 전용준, 김동언, 신영철 / 192

- 광통신용 다채널 커넥터 사출성형에서 코어핀 변형 해석에 관한 연구

.....김명호\*(한국생산기술연구원), 서영호 / 193

- 클래드 소재 차체 부품의 전산해석을 통한 성능 평가 연구

.....오보라미\*(주)일지테크), 배기만 / 194

## ○ 미세구조 및 응용

- 구상흑연주철의 기계적 특성 확보를 위한 미세조직 안정화와 냉각속도 최적화 연구  
.....홍지우\*(한국생산기술연구원), 하진수, 최창영, 장진석, 송혜진, 정유현, 조용재 / 195
- 냉간단조용 다상조직강의 템퍼링 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화  
.....좌리노\*(한국재료연구원), 김상현, 안민호, 이영선, 우영윤 / 196
- Al-Mg-Si계 A6082 합금의 열간단조 후 T6 열처리 시 용체화 온도에 따른 미세조직과 경도 특성평가  
.....오재영\*(㈜일진글로벌), 이종석, 장광순, 김새한, 이선호 / 197

## ○ 박판성형

- 롤 포밍 공정을 이용한 자동차 차체 부품 개발  
.....이철환\*(㈜디케이솔루션), 강용기, 임재은, 심우정, 김동규 / 198
- 전기자동차 모터용 접지부품의 판재성형 기반 형상 및 성형 공정 설계  
.....전용준\*(한국생산기술연구원) / 199
- 배터리 모듈 엔드플레이트의 고유진동수 향상을 위한 토포그래피 최적화  
.....박정빈\*(전남대학교), 김대용 / 200
- 초고강도강 적용 EV 배터리 케이스 멤버의 스프링백 보정 해석  
.....박현수\*(전남대학교), 박순, 나용근, 김대용 / 201
- 차세대 모빌리티용 초고강도강 성형 신뢰성 검증 및 설계 표준화 기술 개발  
.....권수빈\*(대구대학교), 배수민, 김경민, 김상훈, 최현준, 공호영, 유재현 / 202
- 롤포밍 공정에서의 벤딩거동 예측방법 정확도 평가  
.....차명환\*(포스코) / 203
- 고강도 자동차 판재 부품용 3D 프린팅 플라스틱 금형 제조 검토 연구  
.....김세호\*(대구대학교), 유기혁, 박진상, 박건우, 장인혁, 도상현, 서종덕, 유재현 / 204
- 고분자전해질 수소연료전지분리판용 티타늄의 성형성 평가  
.....정양진\*(포스코) / 205
- 초고장력강의 응력경로 변경 효과를 고려한 스프링백 성형 공정 연구  
.....김기정\*(현대제철), 진병국, 박영철, 김지영, 임기학, 전진화 / 206

## ○ 복합재료가공

- Mg 합금의 기계적 성질 향상을 위한 보강재 첨가 마찰교반가공 연구  
.....고경민\*(국립순천대학교), 양경선, 최시훈 / 207
- 스틸-플라스틱 하이브리드 구조를 적용한 배터리팩 사이드프레임 개발 및 성능 평가  
.....정창규\*(포스코), 위상권, 박재현, 윤석현 / 208

## ○ 비금속 재료의 성형

- 구리 버스바 스프링백 평가 및 프로그래시브 금형 설계 최적화  
.....정건우\*(한국생산기술연구원), 정선호, 이신명, 유지민, 이경환, 박진수, 이종섭 / 209

## ○ 성형에 의한 접합

- RFSSW을 적용한 6000 계 알루미늄의 이종 소재 접합에 따른 Lab-shear 강도와 파괴거동 비교  
.....백정웅\*(한국생산기술연구원), 이인규, 정성화, 이성윤 / 210
- 초고강도 저합금강 용접부의 1GPa 인장 강도와 우수한 고주기 피로 특성  
.....강민재\*(인하대학교), 백민석, 김영균, 이기안 / 211

## ○ 소재응용

- AI 학습과 형상분석 기반 스크랩 분류를 통한 고품질 알루미늄 재생 소재 생산 기술  
.....김참일\*(한국생산기술연구원), 강현 / 213
- 결정 방위의 편차와 영향  
.....정의찬\*(국립창원대학교), 정영웅 / 214
- 레이저 용접된 DP 강의 상분율 예측을 위한 계층적 군집화 기법의 적용  
.....천민준\*(국립한밭대학교), Soumyabrata Basak, 홍성태, 오용준, 조훈희 / 215

## ○ 자율제조

- 조립 공정 불량 진단을 위한 신경망 학습에서의 하이퍼파라미터 영향 분석  
.....박지우\*(한국생산기술연구원), 곽봉석, 김민수 / 216

## ○ 표면 및 인터페이스

- 연속와인딩 적용 PAI 코팅 각형 와이어의 마찰·마모 특성 평가  
.....이동규\*(한국생산기술연구원), 김명현, 조유진, 안지섭, 황선광, 정명식 / 217
- 다양한 윤활 조건에서 베어링의 진동 및 음향방출 특성 분석  
.....이창환\*(서울과학기술대학교), 서승일, 서재원, 이대겸 / 218

## ○ 플라스틱가공

- 피부 생체전자용 자가접착 액체금속 채널 폐치: 텁 구조로 유도되는 밀착 결합과 누설 억제  
.....김진서\*(울산과학기술원), 송현석, 김재일, 박성진, 장혜진, 정훈의 / 219
- 전하 및 접착력의 프로그램 가능한 향상을 위한 메타물질-접착제 통합 트라이보일렉트릭 나노발전기  
.....이상우\*(울산과학기술원), 이희진, 강동관, 강정화, 정훈의 / 220

## ○ 단조

- 핵반응 제어봉 노즐 소재 및 제조기술 연구  
.....김영득\*(두산에너빌리티), 이민복, 마영화 / 221

## 13. 특별세션 (제 1 발표회장)

### ○ 항공엔진 ENSIP 기반 Critical Parts 설계-제조-인증 기술 개발 (한화에어로스페이스㈜)

- 터보샤프트엔진 Critical Parts 임펠러/디스크 개발 기술 및 현황  
.....권혁준\*(한화에어로스페이스㈜), 오승철, 김지윤, 손인수 / 224

- 터보팬 엔진 Critical Parts 블리스크/디스크 개발 기술 및 현황  
.....김종식\*(㈜케이피씨엠), 주경준, 권용혁, 권혁준, 이기영 / 225
- Critical Parts 배어링 소재 개발 기술 및 현황  
.....김지윤\*(한화에어로스페이스㈜), 권혁준, 손인수, 권용혁 / 226
- Inconel 718 의  $\delta$  석출 열처리가 미세조직 변화 및 고온 가공성에 미치는 영향  
.....안지섭\*(한국생산기술연구원), 여승현, 김종식, 권혁준, 주경준, 조민지, 황선광 / 227

## 14. 일반 구두 발표 (제 2 발표회장)

### ○ 공정계산역학 / 재료거동 및 특성화

- 직교이방성 재료의 단순전단변형에서 유효변형률 정의  
.....안강환\*(포스코), 김홍기 / 229
- 몬테카를로 기반 SHPB 재료 파라미터의 확률적 모델링  
.....김연복\*(부산대학교), 김정 / 230
- 등가 소성일 의존 진화형 매개변수를 이용한 순 타이타늄 판재의 성형한계선도 예측  
.....정의찬\*(영남대학교), 김민수, 김진재 / 231
- 알루미늄 압출재 기계가공 유한요소해석을 위한 구성방정식 예측 정확도 평가  
.....심현보\*(한국재료연구원), 정찬욱, 오석근, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성 / 232
- 차량용 6000 계 알루미늄 압출재의 인장 및 굽힘 특성과 압괴 지표 간의 상관관계 분석  
.....백민광\*(서울대학교), 원정윤, 신건진, 이상준, 강문구, 이명규 / 233
- 환경응력균열 시험에서 오일에 의한 ABS 고분자의 기계적 물성 저하 및 파괴 거동  
.....이동윤\*(부산대학교), 전성봉, 박수일, 김지훈 / 234

## 15. 일반 구두 발표 (제 3 발표회장)

### ○ 단조

- 열간 단조 공정에서 파단 모델을 고려한 예비 성형체 설계 신뢰성 확보  
.....김부민\*(영남대학교), 박준희, 김홍래, 김낙수 / 236
- 링압축시험의 해석을 통한 마찰법칙의 평가  
.....허윤\*(경상국립대학교), 박민철, 전병윤, 전만수 / 237
- 판재인장시험 결과로부터 유동곡선 및 임계손상도의 획득 및 활용  
.....이현민\*(경상국립대학교), 전상윤, S. Paisingkorn, P. Jongpradist, 전만수 / 238
- 육성용접된 열간단조금형을 사용한 단조공정의 해석 기술  
.....김남윤\*(경상국립대학교), 최영길, 장성민, 전만수 / 239
- 혼합 손상도 모델과 손상계수의 결정  
.....홍보승\*(경상국립대학교), 이현민, 홍석무, 전만수 / 240

- 윤활레짐변화에 관한 실험적 및 수치적 고찰

.....박민철\*(경상국립대학교), 허윤, 김동환, 김웅주, 전만수 / 241

## 16. 특별세션 (제 4 발표회장)

### ○ 1.2GPa급 동합금 박판 소재 및 초소형 표면 실장용 커넥터 제조기술 개발 (주)풍산)

- 인장강도 1.2GPa급 동합금 및 박판 압연재 제조기술 개발

.....김준형\*(주)풍산), 박승훈, 최영철 / 243

- Cu-Ti 합금 석출 거동에 관한 제일원리 기반 연구

.....최은애\*(한국재료연구원), 한승전 / 244

- 고강도 Cu-Ti 2 원계 동합금 잉곳 및 압연재의 미세조직 특성

.....박우진\*((재)포항산업과학연구원), 오윤석, 강희수 / 245

- 투과전자현미경법을 이용한 합금원소 첨가에 따른 Cu-Ti 합금의 미세구조 특성에 관한 연구

.....임성환\*(강원대학교), 이정구, 김준형, 최영철, 박철민 / 246

- Cu-Ti-(X) 합금 박판의 기계적 물성 평가

.....이정구\*(울산대학교), 최재훈, 김연서, 정동습, 이소영, 송수민, 박승훈 / 248

- Ni 첨가에 따른 Cu-3%Ti 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가

.....김용근\*(HVM), 이민숙, 나혜성 / 249

- Cu-Ti 합금의 화학적 특성 분석 및 가공 열처리 요소 기술 개발

.....최광수\*(고등기술연구원), 양현석, 정항철, 공만식 / 250

- CFD 해석을 통한 Cu-Ti 합금 진공 주조 공정에서의 열·응고 거동 평가

.....강정석\*(메탈젠텍(주)) / 251

- Cu-Ti 합금 판재의 굽힘 성형성 분석

.....이창환\*(서울과학기술대학교), 이승현, 박민욱, 윤정식, 최인규, 노현도, 배유빈, 문승현, 성낙훈, 최재일 / 252

## 17. 수상 기념 강연 / 일반 구두 발표 (제 5 발표회장)

### ○ 제 6 회 요석학술상 수상 기념 강연

- 미세조직 디지털트윈의 생성과 활용

.....조재형\*(한국재료연구원 재료공정연구본부 책임연구원) / 254

### ○ 압연

- 응력 기반 파단 모델을 이용한 압연 공정에서의 에지 크랙 예측 및 메커니즘 규명

.....조대천\*(한국과학기술원), 임현용, 윤정환 / 255

- 냉간 연속 압연 시 워크 를 수직 변위 변동연구

.....이주성\*(중앙대학교), 이석의, 전진표, 이영석 / 256

- 선재압연라인 디지털 전환(DX)을 위한 하이브리드 데이터 기반 분석 (Hybrid Data-driven Analysis) 플랫폼 개발  
..... 김규태\*(중앙대학교), 이영석 / 258
- 압연설비 국산화를 위한 소형 냉간압연기의 통합 설계, 제작 및 시험  
..... 전진표\*(중앙대학교), 이석의, 이영석 / 260
- 폐라이트계 스테인리스강 슬라브의 오프코너 크랙 진화와 표면결함 전이 메커니즘  
..... 이계만\*(포스코), 이상진 / 262

## 18. 특별세션 (제 6 발표회장)

### ○ 전기차용 휠 베어링 소재 부품 기술개발 (주)일진글로벌

- 인공지능과 열역학 계산을 활용한 베어링 강종 설계 최적화 방법론  
..... 김영광\*(비추얼랩), 이민호 / 264
- DSC 분석을 통한 Al-Mg-Si계 합금 UCA 소재의 T6 열처리 조건에 따른 열-강도 특성평가  
..... 이종석\*((주)일진글로벌), 오재영, 장광순, 김세한, 이선호 / 265
- 베어링 강의 고주파 열처리에 의한 결정립 미세화와 기계적 성능 향상  
..... 홍성준\*(한국생산기술연구원), 신우철, 송수민, 김태범, 이동근, 조균택 / 266
- 치형 휠베어링 개발을 위한 표면 경화용 유도가열 시뮬레이션 기술 개발  
..... 문인용\*(한국생산기술연구원), 정경환, 김건희, 이승표, 송영환 / 268
- 자동차 구조용 이종 소재 전기 보조 압력 점접합 연구  
..... 추수현\*(울산대학교), 판반콩, 이창주, 남기석, 홍성태 / 269
- 전기차용 휠베어링 허브 성형공정해석  
..... 유경두\*(한국생산기술연구원), 박두현, 안정호, 이인하, 송정한 / 270
- 복합단조 공정에서의 이종소재(AL-STEEL) 프리폼 형상 최적 설계 및 공정해석 기법  
..... 장창순\*((주)씨에이이테크놀러지), 곽호택 / 271
- 이종 소재(AL-Steel) 결합 검출 정확도 향상을 위한 AI 샘플링 데이터 증강에 관한 연구  
..... 김진구\*((주)씨에이이테크놀러지), 이관규, 곽호택 / 272
- 치형 베어링용 0.7 tCO<sub>2</sub>eq/ton 이하 및 900MPa 이상 고정정·고강도 소재 개발  
..... 이기원\*((주)세아베스틸), 최우성, 주승호 / 273
- 단조설비의 과부하 방지를 위한 적정 스트로크 예측  
..... 장보영\*((주)일진글로벌), 이인하, 안정호 / 275

## 19. 일반 구두 발표 (제 7 발표회장)

### ○ 압출 및 인발

- 냉간 단조용 선재의 윤활피막 품질 평  
..... 주호선\*(포스코), 박성수, 이기호 / 277

- 딥러닝 모델을 이용한 동복알루미늄 선재의 전기전도도 예측  
..... 김현준\*(한국재료연구원), 강성훈, 윤준석, 김세종, 오영석 / 278
- 유한요소해석을 이용한 Hastelloy C22 무계목관 열간 압출 공정 설계  
..... 김상현\*(한국재료연구원), 윤은유, 이영선, 우영윤 / 279
- 동복알루미늄 선재 이미지의 금속간 화합물 분석을 위한 군집화 알고리즘 적용 연구  
..... 오민기\*(한국재료연구원), 김현준, 윤준석, 오영석, 강성훈 / 280

## ○ 소재응용

- 코발트계 고엔트로피 합금의 변형쌍정 형성 연구  
..... 김정한\*(국립한밭대학교), 마흐디, 강주희 / 281
- 상온 및 극저온에서 316L 스테인리스강의 이방성 압축 거동: 쌍정 및 상변태 메커니즘의 영향  
..... 최시훈\*(국립순천대학교), Saurabh Pawar, K. U. Yazar, 서위걸, 정창곤, 허윤우 / 282
- 열처리와 Cu 첨가 조건이 Al-Mg-Si 합금의 기계적, 전기화학적, 석출 거동에 미치는 영향  
..... 홍현빈\*(국립한밭대학교), Raj Narayan Hajra, 신은주, 김정한, 오용준, 김재황, 조훈휘 / 283
- 금속기지복합재의 미시역학적 손상 실시간 분석 : 음향방출 및 중성자 회절  
..... 김동규\*(건국대학교), 권종혁, 권대서 / 284

## 20. 특별세션 (제 8 발표회장)

### ○ 내식성 및 냉각성능이 향상된 두께 50 $\mu\text{m}$ 이하급 열교환기용 클래드재 국산화 기술개발 (주)한국클래드텍

- 열교환기용 클래드재 국산화 기술개발  
..... 박철민\*(주)한국클래드텍), 김민중, 이창민 / 286
- Al 합금 스크랩의 첨가가 열교환기용 소재 특성에 미치는 영향에 대한 연구  
..... 김선기\*(주)나이스엘엠에스), 김경수, 노미란, 조대연, 이상현, 이근효, 구승현, 황종일 / 287
- 알루미늄 스크랩 재활용 국내외 산업 및 기술이슈  
..... 김명균\*((재)포항산업과학연구원), 김덕, 하원 / 288
- 클래드용 판재 적용을 위한 스크랩 기반 Al-Mn계 합금의 주조 해석 시뮬레이션 및 특성 최적화  
..... 강현\*(한국생산기술연구원), 김참일 / 289
- 4343/3003/4343 알루미늄 클래드 판재의 브레이징특성에 미치는 압연접합 공정의 영향  
..... 김형우\*(한국재료연구원), 정대한, 김원경, 어광준 / 290
- 응축기용 알루미늄 클래드재의 균질화 및 브레이징 공정 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가  
..... 신재혁\*(한국자동차연구원), 최효남, 한범석 / 291
- 국산 클래드 적용 전기차 열관리 시스템 열교환기의 설계변수 영향도 분석 설계  
..... 이현석\*(한국자동차연구원), 조병선, 권혁주, 배석정 / 292

## 21. 포스터 발표 B

### ○ 공정계산역학

- 순수 타이타늄 극박판의 인장 및 압축 응력-변형률 거동 측정

.....김민겸\*(부산대학교), 김경표, 김현기, 김지훈 / 295

### ○ 단조

- Inconel 718 의 고온 링 압축 시험 및 유한요소 해석을 통한 미세조직과 마찰 특성 비교 분석

.....여승현\*(한국생산기술연구원), 안지섭, 허수빈, 이나경, 조아라, 정명식, 황선광 / 296

- 구동모터 부품의 단조 공정 해석

.....김동규\*(주)디케이솔루션), 이철환, 임재은, 박은수, 강용기 / 297

- 전기 기계식 브레이크용 일체형 Front Type Combi Drive 제작을 위한 냉간단조포머 성형공정개발 및 시제품 특성분석

.....김주업\*((재)대구기계부품연구원), 강해동, 윤창배, 오상원, 이운학, 박휘동, 박희찬 / 298

- 치 성형 냉간단조 금형의 마모수명 향상을 위한 금형 소재 마모특성 평가 및 적용

.....임한비\*(한국생산기술연구원), 신준호, 이성윤, 이상곤, 이인규 / 299

- 복합발전용 가스터빈 압축기용 대형 단조부품 개발

.....허상현\*(주)태웅), 김남용, 이재훈, 윤선룡, 권하늘, 문지훈, 이진모 / 300

- 냉간성형 비구속 압출 공정에서 금형 패턴 형상 최적화 연구

.....이운학\*(에스제이에프주), 오상원, 박휘동, 김주업, 박희찬, 윤창배 / 301

- 한쪽면이 막힌 형태를 가지는 로터 샤프트의 일체화 성형 기술 개발에 관한 연구

.....박은수\*(경창산업주), 이성민, 김동규 / 302

- 각형 전기차 배터리용 집전체 부품 제조 공정의 유한요소해석

.....박기근\*(주)태진다이텍), 이재성, 장성민, 전만수 / 303

### ○ 압연

- Reverse 알고리즘 기반 응력-변형률 곡선을 활용한 DP980 압연 해석 및 인공지능 기반 변형거동 예측

.....서위걸\*(국립순천대학교), Khushahal Thool, 최시훈 / 305

- 적층제조 다상조직강의 압연 공정에 따른 미세조직 변화 및 기계적 특성 분포 분석

.....강민성\*(강릉원주대학교), 김대현, 한성희, 김보규, 김재우, 최인석, 조유연, 정효태, 서태현, 신승우, 윤수빈, 장지훈, 이류경, 신중호 / 306

### ○ 압출 및 인발

- 전기차용 경량 CCA 버스바 공정 최적화

.....진현승\*(중원대학교), 손세한, 안영준, 홍준표, 박정섭, 강종훈 / 307

- 알루미늄 압출 금형 내 소재 유동 제어를 위한 비드 구조의 영향성 분석

.....정성화\*(한국생산기술연구원), 이인규, 백정웅, 이성윤 / 308

- 핫 피어싱 공정을 이용한 액화수소용 고망간강 심리스 배관 제조기술

.....권진구\*(주)세창스틸), 이준표, 홍성모 / 309

- Zn 합금의 Si 합금 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성  
.....유효상\*(한국생산기술연구원), 김용호, 김철우, 조재익, 손현택 / 310
- 유한요소해석 기반 합금강 선재 인발 공정의 표면 거칠기 예측  
.....홍현빈\*(국립한밭대학교), Raj Narayan Hajra, 유종환, 오민규, 손동민, 김정한, 조훈희 / 311
- 하나로 핵연료 피복압출 제조공정 변경을 통한 진직도 개선  
.....황재준\*(한국원자력연구원), 김종환, 소원재, 김호민, 박찬석, 정용진 / 312
- 알루미늄 압출 공법을 적용한 후륜 로어암 설계 최적화 연구  
.....윤석진\*(현대모비스), 문가람, 이준민, 이계호 / 314

## ○ 재료거동 및 특성화

- 마이크로필라 압축시험을 통한 AA6061 합금의 크기효과 및 변형속도 효과 규명  
.....백인섭\*(경상국립대학교), 팽정인, 이근호, 강성규 / 315
- Inconel 718 소재의 열간단조 공정 중 변형률에 따른 동적 재결정 거동 특성에 관한 연구  
.....허수빈\*(한국생산기술연구원), 안지섭, 여승현, 이나경, 권혁준, 김종식, 황선광 / 316
- 고온압축시험 시 배럴링과 소성변형열을 고려한 와스팔로이 합금의 유동응력선도 평가  
.....전지환\*(한국생산기술연구원), 안지섭, 이인규, 이성윤, 권혁준, 김지윤, 이상곤 / 317
- 연속와인딩 모터 각형와이어 성형공정의 유한요소해석 및 분석 기법개발  
.....조유진\*(한국생산기술연구원), 안지섭, 이동규, 황선광, 정명식 / 318
- 플로우 포밍 공정에 따른 SCM440H의 기계적 특성 연구  
.....이성민\*((재)경북테크노파크), 오현준, 박은수 / 319

## ○ 적층제조 및 유연공정

- DED 공정을 이용한 Cu-H13 접합에서 중간층 적용에 따른 계면 및 열전달 특성 분석  
.....박현태\*(국립한국해양대학교), 남이정, 심도식 / 321
- 수지 광중합 공정으로 제조된 금속-폴리머 복합재의 접합부 내 금속 격자 형상의 영향  
.....고민성\*(국립한국해양대학교), 오창민, 심도식 / 323
- 매개변수 모델링 기반의 베지어 스플라인 경사기능 허니컴 구조  
.....하태광\*(조선대학교), 남궁길, 김재준 / 324
- 나노인덴테이션을 이용한 Co-WC 코팅층의 경도 및 내마모 특성 연구  
.....이은세\*(국립순천대학교), 김학윤, 최시훈 / 325
- Wire-Based Laser Additive Manufacturing 공정으로 제조한 Ti-6Al-4V 합금의 수소 취성 파괴 저항성  
.....박정현\*(인하대학교), 송노건, 김대중, 서진유, 이기안 / 326
- 직접용융증착된 IN718 합금의 후열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화  
.....권시은\*(경상국립대학교), 김정기 / 328
- 직접용융증착으로 제조된 CuNiAl 저합금강의 직접 시효에 따른 기계적 특성 변화  
.....주수빈\*(경상국립대학교), 노건우, 정종현, 류경희, 김형섭, 김정기 / 329

- 전자기장 해석 기반 고주파 유도가열 코일의 적층 제작 연구

.....김우성\*(한국생산기술연구원), 이승엽, 김다혜, 홍명표, 성지현, 연시모, 박종규, 김건우 / 330

## ○ 제조공정 및 장비

- 금형 캐비티 압력 프로파일을 활용한 인공신경망 기반 사출품 품질 예측에 관한 연구

.....노수연\*(한국생산기술연구원), 김지우, 김종수, 김종선 / 331

- 사출성형공정 모니터링을 위한 엣지 디바이스 개발에 관한 연구

.....김지우\*(고려대학교), 윤길상, 김종선, 김종수 / 332

- 주울 히팅을 이용한 아스팔트패드 통전시간별 응착성 평가

.....배기만\*(주)일지테크, 오보라미, 백종진, 강상민, 김유민 / 333

- AIoT 기반 다중 센서 데이터 분석을 통한 공구 수명 예측 연구

.....박기웅\*(한국화학융합시험연구원), 박근혁, 오동현, 임순현 / 334

- 차체부품 산업의 확장형 공급망 적용위한 통합형 AI 최적화 플랫폼 구축

.....최현범\*(주)호원, 이서한, 이정우, 이상현 / 335

- 열변형 차체부품 교정기 설계

.....이상현\*(주)호원, 최현범, 이서한, 이정우, 김동근, 남경욱 / 336

- 범퍼빔 교정기 개발에 따른 설비용량 도출

.....이상현\*(주)호원, 최현범, 이서한, 이정우, 김동근, 남경욱 / 337

- 가상해석 기반의 차체부품 소재비용 산출

.....최현범\*(주)호원, 이서한, 이정우, 이상현 / 338

- 전기차 배터리 냉각판용 철강 기반 신공정 개발 및 성능 평가

.....위상권\*(포스코), 박재현, 최한호, 정창규 / 339

# 1. 특 별 세션

고성능 부품제조를 위한  
금형공구용 소재기술개발 심포지엄  
(주)세아장원특수강

( 제 1 발표회장 )

## 개발 냉간 및 열간 금형강의 손상 메커니즘 기반 특성 평가

윤국태<sup>1#</sup> · 김주업<sup>2</sup> · 홍창완<sup>2</sup> · 이락규<sup>2</sup> · 김용유<sup>2</sup> · 손동민<sup>3</sup>

### Evaluation of cold & hot work tool steels based on failure mechanisms

K.T.Youn, J.U.Kim, C.W.Hong, R.G.Lee, Y.Y.KIM, D.M.Son

#### Abstract

최근 자동차, 가전 및 정보기기 부품의 고정도화와 형상 복잡화, 그리고 일체형 성형 또는 대형부품화 등의 추세에 따라 성형난이도 증가, 고속생산화와 함께 성형 피가공재도 GPa급 이상 초고강도 판재와 경량 비철금속 소재의 적용성이 높아지고 있어 냉간 또는 열간 금형으로 쓰이는 범용 공구강의 특성한계가 발생하고 있으며 이에 각 용도에 대응이 가능한 장수명 공구강 개발이 요구되고 있다. 금형용 공구강은 피가공재 종류와 성형 온도에 따라 냉간 또는 열간 공구강, 플라스틱, 고무성형용 금형강 등으로 분류되며, 용도에 따른 요구 특성이 상이하고 사용되는 공구강도 다양하게 고려된다. 유럽, 일본 등에서는 성형 대상 소재의 특수성과 사용 환경 요구특성에 적합한 금형용 공구강을 시리즈로 개발하여 현재 30여종에 이르는 제품을 시장에 공급하고 있으며, 최근에는 저가 수입산 공구강 사용을 늘어나는 추세로 국내 공구강 제조기업의 차별화와 대중소기업간, 가치사슬간 산업 경쟁력 제고를 위한 프리미엄급 금형 소재 및 제조공정 기술 확보가 요구된다.

금형용 소재는 냉간 및 열간 공구강의 사용환경에 따른 손상 메커니즘이 상이함에 따라 이를 기반한 특성 확보를 목표로 합금조성 개발과 탄화물 및 미세조직 제어를 위한 제조공정기술, 그리고 열처리 기술이 병행된 개발이 요구된다. 냉간 공구강의 주요 손상 메커니즘은 wear, chipping, cracking, plastic deformation와 fatigue fracture 등이 있고, 열간 공구강의 경우 열피로에 의한 heat checking(thermal fatigue cracking), 용순(melt-out, soldering) 또는 galling(sticking)과 wear 등의 현상에 의해 금형의 수명이 저하됨에 따라 사용환경과 손상 메커니즘에 따른 모사시험과 정량적 평가 분석 방법의 개발, 이를 적용한 개발 금형 공구강의 특성 검증이 요구된다. 또한, 공구강을 이용하는 금형제작 기업 입장에서는 일반적 금형열처리 공정을 따르거나 열변형이 적고 가공성이 우수한 경우 작업성이 양호하여 선호도가 높다.

본 연구에서는 국내외 범용 공구강과 프리미엄급 소재의 미세조직과 경도, 충격, 피로 등 기계적 특성 분석과 함께 사용조건에 따른 손상 메커니즘을 기반한 모사시험법을 다양화하여 평가함으로써 개발 소재의 유효성을 검증하였다. 냉간 공구강의 경우, 마모시험은 GPa급 냉간 초고장력강판 제품성형시 성형해석 결과에서 도출된 접촉하중을 고려하여 ball on disc 마모

시험에 대한 접촉해석을 실시하여 수직하중 범위를 확인하고, 1kgf 저하중 조건에서 윤활 및 무윤활 환경하의 마모거동을 고찰하였으며, 5kgf 고하중 조건의 마모시험 후 무게감량과 ring on disc 면접촉 마모시험 평가 등을 통하여 특성 결과를 교차평가함으로써 신뢰도를 확보하고자 하였다. 그리고 열간 공구강은 고온 ball on disc 마모시험과 알루미늄 다이캐스팅시 발생되는 용손현상을 모사하여 용탕침적 후 공구강-Al 합금 반응에 의한 생성 금속간화합물과 표면탈락 정도를 평가하고, 고주파가열-water spray 방식 열피로시험 장비를 이용하여 heat checking 발생 및 균열진전 양상을 고찰하고 각 총 균열 개수, 최대 균열길이, 평균 균열길이 등 지표별로 비교평가하였다. 또한 각 공구강에 대한 피로시험을 통하여 수명을 평가하고, 절삭가공성은 공구강 시험재에 대한 절삭력과 공구의 마모 정도를 비교 고찰하였다. 각 시험은 범용 공구강과 각 grade별 선진사 비교재 특성을 비교하였으며, 미세조직과 기계적 특성과의 상관관계 고찰을 통하여 개발 공구강 특성의 우수성을 확인하였다.

**Keywords:** Hot work tool steel, Cold work tool steel, Thermal fatigue, Melt-out, Wear, Microstructure

#### Acknowledgement

본 연구는 소재부품기술개발사업(전략핵심소재기술개발, 20010988)으로 수행된 연구결과입니다.

---

1. 대구기계부품연구원 소재부품연구본부
2. 대구기계부품연구원 소재부품연구본부 소재부품연구팀
3. 세아창원특수강

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

# 전단금형 강화를 위한 이종금속 접합용 고강도 금속분말 양산화 기술개발

여형성<sup>1</sup>· 고창성<sup>2</sup>· 이기안<sup>3</sup>· 구용모<sup>#</sup>

## Development of mass production technology for high-strength metal powder for joining dissimilar metals to strengthen shear molds.

H. S. Yeo, C. S. Ko, K. A. Lee, Y. M. Koo

### Abstract

자동차용 초고장력강의 시장은 친환경, 고연비 기준 강화요구로 지속 성장하고 있다. 이에, 초고강도 소재부품 제조를 위해 성형 조건이 가혹화되고 있어 고성능 금형 소재가 요구된다. 최근 금속 적층제조 기술을 이용하여 기계적 물성이 우수한 분말 소재를 금형 국소부위에 선택적 적층하여 금형의 기계적 물성 향상 및 내구성 향상을 꾀하려는 시도가 이루어지고 있다. 이는 궁극적으로 금형의 전주기 비용을 감소시켜 금형 제작의 경제성을 회기적으로 제고할 수 있다. 국내 이종 소재 적층제조 기술 개발과 이에 적합한 금속분말을 개발하고 양산화하는 기술을 진행하였다. 양산 라인에서 제조된 금속분말을 이용하여 적층시 발생 가능한 적층 결함에 대한 해석과 개선방안에 대한 제안을 통해 금속분말의 특성을 추가 개선한 결과를 확인하였다

**Keywords:** 금형강, 적층제조, 이종금속 적층, 고강도

---

1. (주) 창성 분말 사업부장 이사

2. (주) 창성 분말 사업부 제조팀장 부장

3. 인하대학교 신소재공학부

# DED 적층 제조 공정으로 제조된 개량 G6 공구강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 분말 산소 함량의 영향

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

## Effect of Powder Oxygen Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Modified G6 Tool Steel Fabricated by DED Additive Manufacturing

M. S. Jeon<sup>1</sup>, J. H. Park<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, 공구강 소재 부품에 금속 적층제조 공정을 적용하는 다양한 연구들이 진행되고 있다. 그 중 direct energy deposition(DED) 공정은 높은 적층 속도, 이종 소재 적층, 국부 영역의 보수 등의 공정적 장점을 바탕으로, 공구강에 효율적으로 적용될 수 있는 공정으로서의 가능성이 검토되고 있다. 그러나 탄소함량이 높은 공구강의 경우 적층 과정에서 균열이 발생해 벌크 형태 샘플 제조가 어렵다고 알려져 있다. 또한, 적층제조 공정에 사용되는 분말의 산소 함량은 제조된 소재의 미세조직과 기계적 특성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 Gridur 6 중탄소 강을 기반으로 C과 Cr을 저감하여 균열 민감도를 줄이고, Mn과 Si을 증가시켜 고용 강화 효과를 높인 modified 조성을 설계한 조성을 사용하였다. 이 개량 합금에 대하여 각각 대기 분사(G6-A)와 진공 분사(G6-V) 두 가지 방식으로 분말들을 제조하였고 DED 공정에 적용하였으며, 결과적으로 균열이 없는 벌크 시편을 제조할 수 있었다. G6-V는 평균  $2.35 \mu\text{m}$  크기의 미세 martensite block과 columnar PAG 구조를 형성하였으며, 2333 MPa의 인장 강도와 9.2%의 연신율을 확보하였다. 반면, G6-A는 조대한 크기의 martensite block(평균  $3.39 \mu\text{m}$ )과 equiaxed PAG 구조를 형성하였으며, 1834 MPa의 인장 강도와 20.8%의 연신율을 나타냈다. 상기 결과들을 바탕으로, 분말의 제조 방식에 따른 산화물이 DED G6 modified 공구강의 계층적 미세조직과 기계적 변형 및 파괴 거동에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

**Keywords:** Direct Energy Deposition, Medium-Carbon tool steel, Oxygen Content Powder, Microstructure, Mechanical Properties

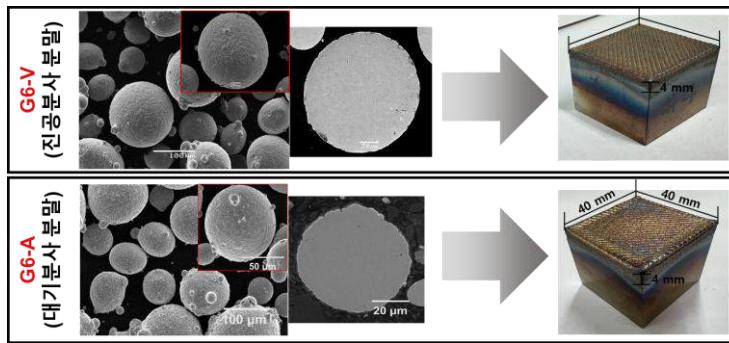
1. 인하대학교 신소재공학과, 박사 후 연구원, 대학원생, 교수

2. (주)에이엠솔루션즈, 대표이사

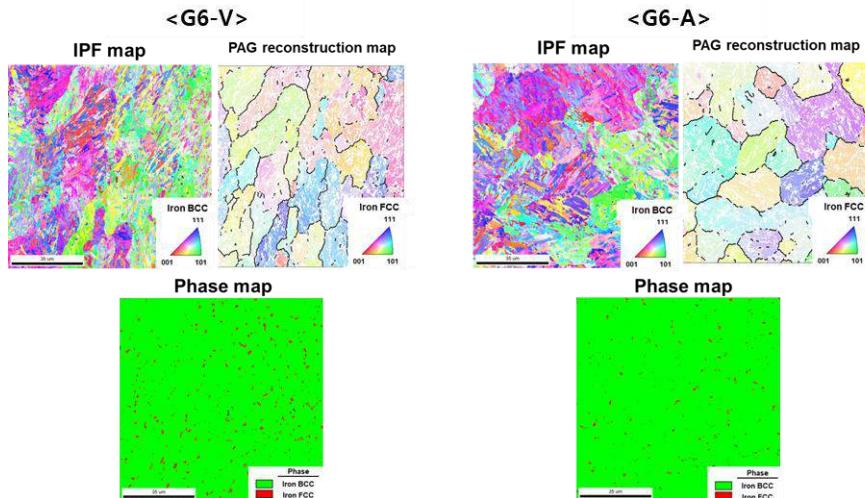
3. 동아대학교 신소재공학과, 교수

4. (주)창성, 이사

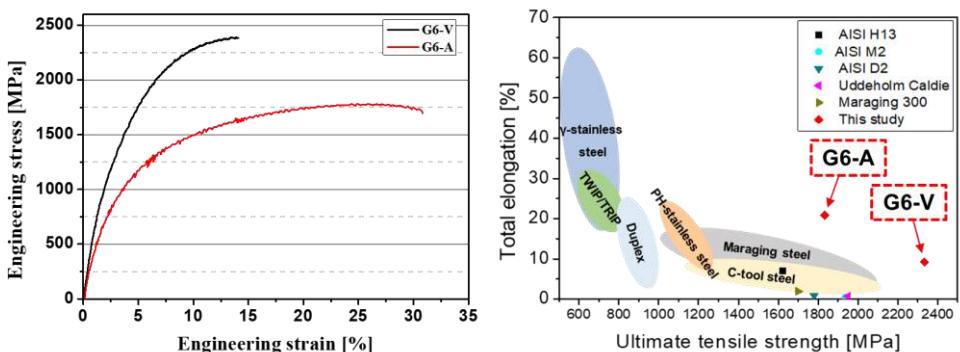
# 교신저자: 인하대학교 신소재공학과, 교수, E-mail: keeahn@inha.ac.kr



**Fig. 1.** SEM images of G6-V and G6-A powders and each sample manufactured by direct energy deposition



**Fig. 2** EBSD image of as-built G6-V and G6-A sample manufactured by direct energy deposition



**Fig. 3** Tensile stress-strain curve of as-built G6-V and G6-A sample manufactured by direct energy deposition and compare with other additive manufacturing tool steel.

# 적층제조를 이용한 냉간 전단 금형의 수명 향상 평가

김성욱<sup>1</sup> · 장경현 · 천창근

## Evaluation of lifespan improvement for cold shear molds using additive manufacturing

Sungwook Kim, Gyeonghyeon Jang, Chang-keun Chun

### Abstract

전단 금형은 상/하 세트로 구성되어 있으며, 소재 투입시 상부 금형이 상하로 이동하면서 일정간격으로 절단하는 구조이다. 통상적으로 전단 금형은 투입 소재와의 마찰로 인하여 마모가 발생하게 되는데, 투입 소재의 강도가 증가하면 마찰도 증가하여 금형의 수명이 짧아지게 된다. 특히 최근 자동차 차체에 초고강도 소재의 사용량이 증가하면서 금형의 수명은 급격히 단축되고 있으며, 이를 향상시키고자 하는 노력이 진행되고 있다.

금속 적층제조 공정은 금속분말이나 와이어를 이용하여 매우 적은 영역의 용융/응고과정을 통하여 원하는 분위의 형상을 구현하는 기술로 다양한 분야에 활용되고 있다. 특히 상기의 마모된 금형의 경우 금속 적층제조 공정을 이용하여 마모된 부분만 국부적으로 재생을 하거나, 금형의 제작 초기에 주 마모부위에 보강을 통하여 기존 대비 수명을 향상시킬 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 금속 적층제조 공정을 이용하여 초고강도 소재의 전단에 사용되는 금형의 수명을 향상시키고자 하였으며, 기존 금형과의 수명을 비교하였다. 시험 결과 적층제조 금형은 주 마모부위의 국부적 보강이 가능하여 기존 금형대비 높은 수준의 수명을 나타내는 것으로 확인되었다.

**Keywords:** High hardness, Tool steel, UHSS, DED(directed energy deposition)

---

1. 포항산업과학연구원 신소재연구소 RIST, 67 Cheongam-ro, Pohang-si, 37673, Korea

## 2. 특별세션

고청정 고내식 Ni-Cr-Mo 계  
소재부품기술개발 심포지엄  
(한국금속재료연구조합)

(제 2 발표회장)

## 고청정-고내식 Hastelloy계 니켈합금의 봉강 및 무계목강관 소재 제조기술 개발

김덕령 · 정세지 · 권순일 · 박상훈 · 안세호 · 김영재 · 정해창

### Abstract

본 연구는 반도체 및 에너지 산업에서 요구되는 고청정-고청정 Ni-Cr-Mo계 Hastelloy 합금의 봉강 및 무계목강관 소재 개발을 목표로 한다.

이를 달성하기 위해 선진사 소재 특성평가 및 문헌조사 결과를 바탕으로 용도특화 합금설계 및 개재물 조성을 최적화하는 연구를 진행하였다.

더불어 봉강 및 무계목강관 소재 제작에 필요한 요소기술을 도출하였으며, 제작된 소재를 활용해 선진사 소재와 그 특성을 비교 평가하였다.

본 연구결과는 반도체, 에너지, 화학 장비 등 고부식 환경용 핵심 부품의 수명 연장 및 비용 절감에 기여할 수 있으며,

고내식 합금 소재의 국산화 관련 경쟁력 강화에 중요한 기반을 제공할 것으로 기대된다.

**Keywords:** Hastelloy, ALLOYC22, ALLOYC276, 개재물

# 하스텔로이 C-22 무계목관의 열간 3축 률 압연 공정 기술

이준표<sup>1</sup>· 권진구<sup>1</sup>· 홍성모<sup>1#</sup>

## Hot three-axis rolling process for hastelloy C-22 seamless pipe

J. P. Lee, J. G. Kwon, S. M. Hong

### Abstract

본 연구는 고온강도와 내식성이 우수한 Ni-Cr-Mo계 합금 하스텔로이 C-22소재의 압출 무계목관을 대상으로, 열간 3축 률 압연 공정을 통한 치수제어 및 품질 확보를 목표로 하고 있다. 3축 률 압연은 1100°C 이상으로 가열된 무계목관 내부에 플러그를 삽입한 후, 회전하는 3개의 롤러에 의해 외경과 두께를 동시에 사이징하는 공정이다. 하스텔로이 C-22는 고온에서도 높은 강도를 유지하므로 압연시 가공 부하가 크고 성형 환경이 가혹한 특성을 보인다. 이러한 조건에서 외경과 두께를 감소시키기 위한 압연 안정성 확보를 위하여, 본 연구에서는 적정 열간공정 온도를 도출하고, 롤거리 · 롤각도등의 압연 세팅 조건과 핵심 툴(맨드릴플러그, 롤러)을 설계하였다. 또한 열간압연에 적용되는 분말 및 액상 형태의 윤활제를 적용한 시험을 통해 적합한 윤활 조건을 마련하였다. 도출된 공정조건을 기반으로 하스텔로이 C-22 무계목관에 대해 3축 압연을 수행하였으며, 치수 및 두께 균일성과 표면 품질 분석 결과를 통해 하스텔로이 C-22 무계목관에 적합한 열간 3축 률 압연 공정조건 마련이 가능함을 확인하였다.

**Keywords:** Hastelloy C-22, Seamless pipe, Three-axis rolling, Lubricant

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발 폐기지형(RS-2024-00431423)과제의 지원을 통해 수행되었음.

---

1. (주)세창스틸 중앙연구소

# (주)세창스틸, 중앙연구소, 연구소, E-mail: hsm@scsteel.net

# Ni-Cr-Mo계 소재의 고온 변형거동 및 열간성형 인자 분석

윤은유<sup>1,#</sup> · 최언준<sup>1,2</sup> · 조주형<sup>1</sup> · 우영윤<sup>1</sup> · 김덕령<sup>3</sup> · 홍성모<sup>4</sup>

## High-Temperature Deformation Behavior and Hot-working parameter analysis of Ni-Cr-Mo alloy

E. Y. Yoon, E. J. Choi, J. H. Cho, Y. Y. Woo, D. Y. Kim, S. M. Hong

### Abstract

Ni-Cr-Mo계 합금은 우수한 고온강도와 내식성으로 인해 항공엔진, 화학장치, 원자력 등 고온 환경 부품에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 C-22라고 알려진 Ni-Cr-Mo계 합금을 대상으로 고온변형거동을 체계적으로 분석하고, 열간성형 공정 설계를 위한 재료의 성형인자를 도출하고자 하였다. 900–1150 °C 범위의 온도와 10<sup>-3</sup>–10 /s의 변형속도 조건에서 압축시험을 수행하여 유동응력 곡선을 획득하였다. 유동응력곡선으로부터 이용하여 Dynamic Materials Model에 기반한 변형률 민감도(m)와 에너지 효율( $\eta$ )을 processing map을 작성하고, 안정 및 불안정 변형영역을 구분하였다. 또한, 고온압축실험 시편의 미세조직의 변화를 주사전자현미경을 이용하여 분석 결과, 변형온도와 변형속도 변화에 따라 결정립 크기와 집합조직이 뚜렷하게 달라졌으며, 특히 1100 °C 이상에서는 완전한 동적재결정이 유도되어 균질한 미세조직이 형성됨을 확인하였다. 이러한 미세조직 진화는 유동응력 곡선의 피크 응력 감소 및 변형 연화 현상과 상관관계를 분석하고자 하였다

**Keywords:** Ni-Cr-Mo alloy, High-temperature deformation behavior, Processing map, Dynamic recrystallization, Microstructure evolution

---

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부

2. 경상국립대학교

3. 세아창원특수강

4. 세창스틸

# 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 책임연구원, Email: eyyoon@kims.re.kr

# 극한 부식 환경 대응 Ni-Cr-Mo계 합금의 합금 설계 및 특성 확보 전략

홍현욱<sup>1</sup>· 주하연<sup>2</sup>· 김종훈<sup>3</sup>

## Alloy Design and Property Enhancement Strategies for Ni-Cr-Mo Alloys under Extreme Corrosive Environment

H. U. Hong, H. Y. Joo, J. H. Kim

### Abstract

최근 반도체 및 에너지 산업의 고도화에 따라 극한 부식 환경에서도 우수한 내식성을 발휘하는 Ni-Cr-Mo계 소재에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히, 반도체 산업에서는 고집적 반도체 소재 개발 시, 발열 및 성능 저하 문제로 인해 기존의 회로선 및 전극선 재료인 텅스텐, 코발트 등이 몰리브덴계 소재로 대체되고 있다. 몰리브덴계 소재 증착을 위해선 공정 가스 역시 고부식성의  $\text{NOCl}$ 계로 전환되어야 한다. 이로 인해, 기존에 반도체 공정 가스를 이송하던 스테인리스 스틸(STS)소재의 사용이 어려워져 Ni-Cr-Mo계 합금 소재가 해당 공정가스 이송용 부품 소재로 주목받고 있다. 그러나 국내에서 해당 소재의 생산 기반이 미비하여 해외 소재를 활용한 산업 시스템이 형성되는 상황으로, 원가절감을 통한 경제성 향상 도모 및 해외 기업 의존도 해소를 위한 소재 국산화 및 자립화 기술 개발이 필요한 상황이다. 소재 제조 기술 자립화를 위해선 우선, 기존 제조 공정 및 환경을 고려한 합금 설계 및 최적화가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 합금 성분에 변화에 따른 부식·기계적 특성·미세조직 간의 상관성을 고찰하고, 이를 바탕으로 하여 열역학 및 속도론 기반의 합금 설계를 통해 극한 부식환경에서도 우수한 성능을 나타내는 최적화된 Ni-Cr-Mo계 소재를 개발하는 것을 목표로 한다.

**Keywords:** Ni-Cr-Mo alloy, Alloy design, Microstructure, Corrosion Resistance, Mechanical properties

---

1. 국립창원대학교, 소재융합시스템공학과, 정교수, E-mail: huhong@changwon.ac.kr

2. 국립창원대학교 소재융합시스템공학과, 대학원생

3. 국립창원대학교 소재융합시스템공학과, 대학원생

# Ni-Cr-Mo계 고부식 저항 합금의 반도체 가스 제어용 유로 조도 제어를 위한 전해연마 공정 특성 연구

양현석<sup>1</sup>· 정우철<sup>1</sup>· 한덕현<sup>1</sup>· 최광수<sup>1</sup>, 공만식<sup>#</sup>

## Electropolishing Behavior of Ni-Cr-Mo Alloys for Ultrapure Gas Channels in Semiconductor Equipment

H. S. Yang, W. C. Jung, D. H. Han, K. S. Choi, M. S. Kong

### Abstract

To ensure ultra-clean gas delivery performance in advanced semiconductor manufacturing, inner surface roughness control of gas transport components is critical. This study investigates the electropolishing (EP) characteristics of Ni-Cr-Mo alloys applied to semiconductor gas channels. Various acid-based electrolytes were evaluated for their effectiveness in reducing surface roughness while minimizing elemental leaching of key alloy constituents. Surface characterization techniques, including roughness (Ra) measurements and weight loss analysis, were used to assess EP performance. The correlation between ICP-based dissolution behavior and post-EP surface quality was also analyzed to evaluate the process selectivity. The findings suggest that optimized EP conditions can achieve sub-0.1  $\mu\text{m}$  roughness while maintaining the chemical integrity of the alloy surface, supporting its applicability in ultra-high purity gas systems.

**Keywords:** Electropolishing (EP), NiCrMo Alloy, Surface Roughness (Ra), Semiconductor gas line, Corrosion resistance

### Acknowledgement

This research was supported by funding from the Ministry of Trade, Industry and Energy and the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) in 2024 (00431424).

---

1. 고등기술연구원 신소재공정센터, 책임연구원
2. 고등기술연구원 신소재공정센터, 선임연구원
3. 고등기술연구원 신소재공정센터, 선임연구원

# 고등기술연구원 신소재공정센터, 수석연구원 E-mail: mskong@iae.re.kr

# Development of High-Temperature Superconducting Wire Fabrication Process Using Ni–Cr–Mo Alloy Substrate and Oxide Thin Films

Jae-Hun Lee, Yu-Ri Lee, Kang Hwan Shin, Jin Gu Han, Hunju Lee, and Seung-Hyun Moon

## Abstract

This study focuses on the development of fabrication processes for high-temperature superconducting (HTS) coated conductors using Ni–Cr–Mo alloy substrates and oxide thin-film buffer layers. FinalTech Co., Ltd. designed and fabricated an electrolytic-polishing (EP) system for Hastelloy substrates and optimized the process to enhance surface roughness and crystallinity for various commercial materials.

SuNAM Co., Ltd. focused on the subsequent buffer-layer and superconducting-layer deposition processes. Using oxide targets ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), RF sputtering was employed to control crystallinity and surface morphology of the buffer layers, while metal targets were deposited by reactive sputtering, where gas composition (Ar/O<sub>2</sub> ratio), target voltage, and reactive mode transitions were systematically investigated. These complementary sputtering processes enabled optimization of phase formation and adhesion characteristics at the buffer/substrate interface. REBCO( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ) superconducting layers were subsequently deposited using PLD(Pulsed Laser Deposition) and RCE-DR(Reactive Co-Evaporation by Deposition and Reaction) techniques, and the correlation between buffer-layer adhesion and critical current ( $I_c$ ) was analyzed.

Although REBCO films exhibit excellent electrical performance, their ceramic nature limits mechanical strength. Therefore, current research efforts focus on enhancing both mechanical robustness and interfacial reliability to meet the demanding conditions of fusion reactors that use strong magnetic fields and other high-field applications. HTS conductors play a crucial role in such fusion systems, where the need for high-field, low-loss conductors is rapidly growing worldwide.

The integrated process technology combining Ni–Cr–Mo alloy substrate, oxide buffer layers, and REBCO superconducting films established in this study provides a solid foundation for high-strength, high-performance HTS wire production, contributing to the advancement of next-generation energy and fusion technologies.

This work was supported by the Technology Innovation Program(RS-2024-00431425) funded By the Ministry of Trade Industry & Energy(MOTIE, Korea)

---

\* SuNAM Co., Ltd., Anseong, Korea

# Surface Planarization of Metal Substrates by $\text{Y}_2\text{O}_3$ Solution Coating

김글하<sup>1</sup>· 오주현<sup>1</sup>· 이정우<sup>#</sup>

## Abstract

This study investigates surface planarization strategies for buffer layers in high-temperature superconducting (HTS) coated conductors to achieve atomically smooth interfaces and enhanced epitaxial growth. The research focuses on optimizing planarization of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  layers deposited on Ni–Cr–Mo alloy substrates through combined electro-polishing and solution deposition planarization (SDP) techniques. By carefully tuning the processing conditions, the buffer surface evolved into a highly uniform and defect-free morphology. Through systematic thermal analysis, the onset of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  crystallization was identified, allowing determination of the maximum annealing temperature at which excellent planarization could be maintained without inducing grain growth. This planarization-based buffer engineering approach offers a robust and scalable route to achieve smooth, chemically stable interfaces, which are essential for enhancing current-carrying performance and long-term reliability in REBCO-type superconducting wires and next-generation energy conversion systems.

**Keywords:** Solution Deposition Planarization (SDP),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  precursor solution, High-temperature superconductor, Coated conductor, Surface planarization, IBAD-MgO buffer layer, Delamination

**Acknowledgement:** This work was supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) (RS-2024-00431425).

---

1. Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Sejong, Korea

# 용액공정을 통한 Eu-Doped $\text{Y}_2\text{O}_3$ 초전도 버퍼층 제조 연구

배현우<sup>1</sup>, 정재한<sup>#</sup>

## **Eu-Doped $\text{Y}_2\text{O}_3$ Superconducting Buffer Layer Fabrication via Solution Process**

**H.W. Bae, J.H. Jung**

### **Abstract**

본 연구는 용액공정을 이용해 Eu가 도핑된  $\text{Y}_2\text{O}_3$  초전도 버퍼층을 제조하고, Eu 도핑 농도가 박막 형성과 물성에 미치는 영향을 체계적으로 규명하는 것을 목표로 한다. 우선 서로 다른 Eu 도핑량에 따라 합성한 전구체 용액을 스판 코팅하여 버퍼층을 제작하고, 박막의 결정성 및 두께 균일성을 비교·분석한다. 제작된 박막은 주사전자현미경을 통한 표면 미세구조 관찰과 AFM을 통한 거칠기 분석으로 표면 특성을 평가한다. 또한 XRD을 이용해 결정 구조 및 Eu 도핑에 따른 격자 변화와 상 안정성을 조사하고, 광학적 특성과 발광 거동을 분석한다. 이러한 결과를 통해 Eu 도핑이  $\text{Y}_2\text{O}_3$  기반 초전도 버퍼층의 구조적·광학적 특성 및 잠재적 초전도층 적합성에 미치는 영향을 규명하고, 고성능 초전도 선재용 버퍼층 설계에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

**Keywords:** Solution deposition,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  Buffer layer, Superconductor

---

1. 서울과학기술대학교 신소재공학과, 대학원생

#서울과학기술대 신소재공학과 조교수, jaehan@seoultech.ac.kr

### 3. 특별세션

차세대 원통형 배터리 케이스 기술  
(TCC 스틸)

(제 7 발표회장)

## 46xx 배터리용 도금강판의 열처리 조건에 따른 도금막 특성

박우진<sup>#</sup> · 강희수 · 오윤석

### Plating film characteristics According to heat treatment conditions of nickel plated steel sheets for 46xx battery cases

#### Abstract

전기차 주행거리 향상을 위한 노력의 일환으로 기존 원통형 배터리의 직경을 2xxx급에서 4xxx급으로 교체하고자 하는 시도가 테슬라를 비롯한 대부분의 전기차 제조사 주도로 활발히 진행되고 있다. 4xxx급 원통형 배터리는 2xxx급 보다 5배 이상의 단위 부피 증가와 전기차 배터리팩의 에너지 밀도 향상을 가능하게 하므로, 전기차의 주행거리를 향상시킬 수 있는 대표적인 방법으로 알려져 있지만, 제조 및 사용에 있어서 중대한 단점도 포함되어 있을 수 밖에 없다. 즉, 4xxx급 원통형 배터리의 구조적 복잡성으로 인한 제조 공정상 수율 저하, 대형화에 따른 기하학적 형상 유지 및 뒤틀림 발생, 그리고 충·방전에 따른 배터리 내부 열/압력 증가 및 이에 따른 안전성 저하 등이 대표적이 단점이라고 할 수 있다. 이러한 단점은 4xxx급 원통형 배터리의 케이스 소재인 도금강판의 도금층 내구성과도 밀접하게 연관되어 있으므로, 본 연구에서는 원통형 배터리 케이스용 니켈 도금강판의 열처리 조건에 따른 도금층 미세조직 및 물성평가를 통해 배터리 케이스용 도금강판 제조 공정 적정화에 필요한 기초자료를 제공하고 한다.

## 4. 일반 구두 발표 / 특별 세션

금속유연공정 / 금형가공  
제조공정 및 장비 / 성형에 의한 접합  
재료거동 및 특성화

LCA 방법을 이용한 수출규제 대응

(한국생산기술연구원)

(제 1 발표회장)

# 플로우포밍 공정으로 제조된 핵연료 처분용 Pure Copper의 고온 압축 및 CREEP 특성

송노건<sup>1</sup>· 강태훈<sup>1,2</sup>· 이영호<sup>3</sup>· 김재득<sup>3</sup>· 이기안<sup>1, #</sup>

## High-Temperature Compressive & Creep Properties of Pure Copper for Nuclear Waste Canisters via Flow Forming

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

### Abstract

사용 후 핵연료봉은 높은 방사선 준위와 열을 장기간에 걸쳐 지속적으로 방출한다. 이를 안전하게 격리, 보관하기 위한 처분 시스템은 극한 환경에서의 구조적 안정성을 수백 년 이상 확보해야 한다. 사용 후 핵연료봉 처분용기는 일반적으로 지하 약 500m 심도에 위치한 심지층에 설치되며, 이 때 핵연료봉에서 발생하는 붕괴열에 의한 고온 환경. 지하수 압완충재의 팽창압 등의 복합적인 열적 기계적 하중에 장기간 노출된다. 따라서 이러한 조건에서 외부용기로 적용될 재료의 고온 기계적 특성 및 크리프 내구성 평가는 필수적이다. 무산소동(Oxygen-Free High Conductivity Copper)은 우수한 가공성, 높은 열전도율, 그리고 안정적인 기계적 특성으로 인해 외부처분용기용 유망 소재로 제시되고 있다. 본 연구에서는 플로우포밍(Flow Forming) 공정을 통해 제조된 무산소동의 고온 성능을 평가하고자 하였다. 이를 위해 주조 상태의 무산소동과 플로우포밍 공정이 적용된 무산소동을 대상으로, 미세조직 및 고온에서의 압축 특성, 크리프 거동을 비교 분석하였다. 주조재는 평균 결정립 크기 약 210  $\mu\text{m}$ 의 조대한 등축조직과 무방향성(random) 텍스처를 나타낸 반면, 플로우포밍 공정을 거친 시편은 강한 소성변형에 의해 평균 결정립 크기 약 2.71  $\mu\text{m}$ 의 미세한 층상조직이 형성되었고, 시편의 방향에 따라 뚜렷한 결정 조직 이방성을 보였다. 175 °C, 300 °C, 450 °C의 고온 조건에서 수행된 압축 시험 및 크리프 시험 결과, 모든 온도 구간에서 플로우포밍재가 주조재에 비해 약 50~100% 수준으로 더 높은 압축 항복강도와 크리프 저항성을 나타내었다. 상기 결과를 바탕으로, 본 연구는 플로우포밍 공정이 무산소동의 고온 강도 향상에 미치는 영향을 규명하였다.

**Keywords:** Oxygen-Free High Conductivity Copper, Flow Forming, high temperature properties, CREEP Behavior

---

1. 인하대학교 신소재공학과, 박사 후 연구원, 대학원생
2. (재)포항산업과학연구원, 분석평가센터, 책임연구원
3. 한국원자력연구원, 처분성능검증연구센터, 수석연구원

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

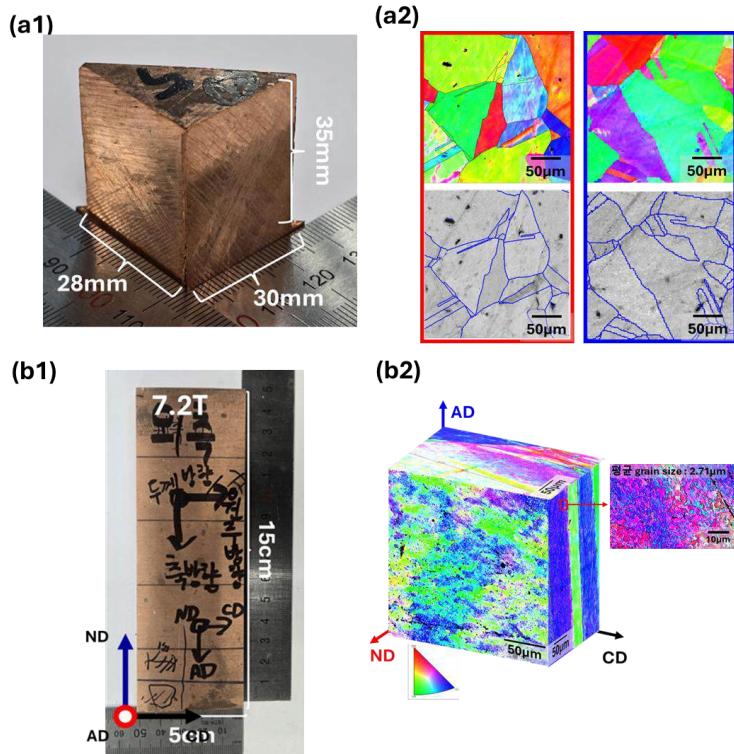


Fig. 1 Shape of the specimen (a1: casting material, b1: flowforming material) and initial microstructure EBSD analysis results: (a2) casting material, (b2) flowforming material

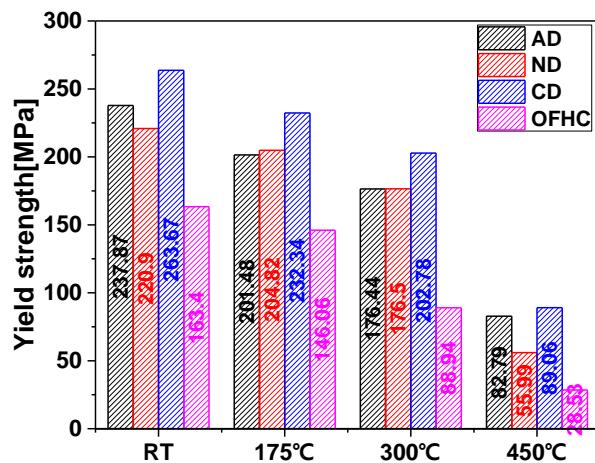


Fig. 2 Comparison graph of compressive yield strength by temperature for each specimen and direction (OFHC: cast material, AD: Axial Direction, ND: Normal Direction, CD: Circumferential Direction)

# 프레스 특성 가시화 데이터 수집 및 형합 보정을 위한 프레스 변형량 측정 및 해석 연구

강희원<sup>1</sup>· 박건영<sup>1</sup>· 최진영<sup>2</sup>· 정정봉<sup>3</sup>· 권경업<sup>4</sup>· 김동옥<sup>#</sup>

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

H. W. Kang, G. Y. Park, J. Y. Choi, J. B. Jeong, K.U. Kwon, D. O. Kim

### Abstract

자동차 차체 외판 부품 생산은 주로 프레스 공정과 금형에 의존하며, 도어, 후드, 트렁크 리드 등의 외판 패널의 품질은 차량의 시장 경쟁력에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 외판 금형은 고난도의 제작 공정이 요구되어, 양산 수준의 품질을 달성하기까지 반복적인 수작업 사상 과정이 불가피하고 개발 기간과 비용의 부담이 큰 상황이다. 이러한 반복적인 금형 사상 작업은 금형 형합 과정에서 매우 빈번하며, 이는 금형의 가공 편차 뿐만 아니라 프레스의 탄성 변형, 틸팅 등에 의해서도 발생될 수 있는 것으로 보고되고 있다. 현재 금형 제조현장에서는 금형 설계 및 제작 시 적용 프레스에 따라 경험치에 의한 단순 보정을 주고 있으며 이는 사용 프레스가 변경될 경우 반복적인 사상 작업 문제를 야기시킬 가능성이 있다. 이러한 비효율적인 과정을 해소하고자 관련 연구와 개선 활동이 활발히 이루어지고 있으며, 본 연구에서는 차체 외판 생산 과정의 사상 공정을 최소화하기 위해 프레스의 볼스터 및 램의 특성을 데이터화 한 후, 시뮬레이션을 통해 프레스 탄성 변형을 예측하고자 하였다. 이를 위해 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 센서를 통해 프레스 하중별 볼스터 및 램의 탄성변형량을 측정하여 데이터를 수집하였고, 측정된 변형량을 기반으로 AutoForm의 ETD(Elastic Tool Deflect) 기능을 활용하여 변형량이 적용된 금형의 판재 성형해석을 진행하였다. 본 연구를 통해 측정 및 확보된 프레스의 탄성 변형 데이터는 향후 프레스의 금형 사상 공정의 자동화 및 형합 보정에 유용한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Press Deformation, Press Characteristic, Forming Accuracy Calibration, AutoForm, ETD

### 후기

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

1. 한국자동차연구원 첨단구조소재연구센터, 연구원

2. (주)신영하이테크, 과장

3. (주)신영하이테크, 이사

4. (주)로파, 이사

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

## 3D 열간 자유 투브 성형 공정변수에 따른 폐단면 관재에 미치는 영향 검토

김정욱<sup>1</sup>· 이승환<sup>1</sup>· 김소연<sup>2</sup>· 이석규<sup>2</sup>· 권용남<sup>1</sup>· 이동준<sup>1</sup>· 석무영<sup>1</sup>· 최현성<sup>1</sup>· 박현일<sup>#</sup>

### A Study on the Effects of 3D-HTFF Process Parameters on Closed-Section Tubes

J. W. Kim, S. H. Lee, S. Y. Kim, S. K. Lee, Y. N. Kwon, D. J. Lee, M. Y. Seok, H. S. Choi, H. I. Park

#### Abstract

폐단면 관재는 경량화와 구조 강성을 동시에 달성할 수 있어 차세대 항공 모빌리티(UAM) 분야의 핵심 부재로 주목받고 있으나, 기존의 롤포밍 및 3D-CNC 벤딩 공정은 복잡한 3차원 형상 구현 시 곡률 반경의 제약을 갖는 한계가 있습니다. 이러한 기술적 난제를 극복하기 위한 대안으로, 본 연구에서는 소재의 유도 가열, 로봇 벤딩, 급속 냉각이 연속적으로 이루어지는 3D 열간 자유 투브 성형(3D-HTFF) 기술의 주요 공정 변수가 최종 부품의 품질에 미치는 영향을 종합적으로 검토하였습니다. 구체적으로, 고온 물성을 반영한 유한요소(FE) 해석을 통해 가열 및 냉각 속도가 소재의 미세조직 안정성과 잔류응력 제어에 미치는 영향을 분석하고, 성형 속도가 주름이나 파단과 같은 성형 결함에 미치는 영향을 고찰했습니다. 현재 자동차 구조 부품을 중심으로 연구가 진행되고 있으나, 본 검토 결과는 향후 UAM과 같은 고성능 모빌리티에 적용될 항공용 경량 합금으로의 확장 가능성을 제시하며, 차세대 관재 부품 제조를 위한 설계-공정 연계 전략수립에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** UAM, 경량 소재, 3D-HTFF, FEM

---

1. 한국재료연구원 항공우주재료실증센터
2. 현대자동차

# 교신저자의 소속, 부서, 직위, E-mail: 한국재료연구원, 항공 우주재료실증센터, 선임연구원, hipark@kims.re.kr

## GFRP 적층 패턴에 따른 Flow Drilling Screw 크랙 발생 원인 분석 및 적층 패턴 최적화 연구

김성구<sup>1</sup>· 김지훈<sup>1, #</sup>· 박병준<sup>2</sup>· 최용민<sup>2</sup>· 박상현<sup>2</sup>

### Analysis of Crack Formation in Flow Drilling Screws According to GFRP Stacking Patterns and Optimization of Laminate Design

S. K. Kim<sup>1</sup>, J. H. Kim<sup>1, #</sup>, B.J. Park<sup>2</sup>, Y.M.Chi<sup>2</sup>, S.H.Park<sup>2</sup>

#### Abstract

본 연구에서는 유리섬유강화플라스틱(GFRP) 적층 패턴에 따른 Flow Drilling Screw(FDS) 체결부의 크랙 발생 메커니즘을 심층적으로 분석하고, 이를 기반으로 최적의 적층 구조를 제안하고자 하였다. 연구를 위해 Woven과 Chop 패턴을 포함한 다양한 적층 시편을 제작하였으며, FDS 체결 후 CT 단면 촬영 및 현미경 분석을 통해 크랙 발생 위치, 전파 경로, 및 잔류 토크에 따른 파단 모드를 관찰하였다. 실험 결과, Chop 영역에서 국부적 변형률 집중으로 인해 초기 크랙이 발생하는 반면, Woven층은 상대적으로 높은 균열 저항성을 나타냈다. 특히 조인트 모서리 부와 같이 모멘트 암이 큰 영역에서 높은 변형률이 집중되며 크랙이 진행되는 현상이 확인되었다. 또한 인장(ASTM D638), 굴곡(ASTM D790), 전단(ASTM D2344) 시험을 통해 적층 패턴별 기계적 물성을 정량적으로 비교한 결과, 표면에 Woven층을 배치하고 대칭 구조를 이루는 Woven/Chop/Woven 적층 방식이 크랙 억제와 기계적 강도 향상에 가장 효과적인 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구는 FDS 접합 시 적층 패턴 설계가 체결 신뢰성과 복합재 구조 부품의 성능 확보에 결정적 역할을 한다는 점을 규명하였으며, 향후 전기차 배터리 하부 커버 및 경량화 구조 부품 설계에 중요한 지침을 제공할 수 있을 것으로 기대된다

**Keywords:** Flow Drilling Screw, GFRP, 적층 패턴, 크랙 발생, 적층 최적화

---

1. 성우하이텍, 신사업전략팀, 책임연구원
2. 성우하이텍, 스마트제조기술팀, 책임연구원

# 탄소성 유한요소해석 기반 급속 냉각 미세조직 제어에 따른 SnBi 음극의 부피변형 및 손상거동 평가

김태현<sup>1</sup> · 박현서<sup>1</sup> · 진미잠<sup>1</sup> · 김재훈<sup>2,3#</sup> · 이은호<sup>1,2,3#</sup>

## Volume Change and Damage Behavior of SnBi Anodes under Rapid-Quenched Microstructure Control: Elasto-Plastic Finite Element Evaluation

T. H. Kim, H. S. Park, M. C. Chen, J. Kim, E. H. Lee

### Abstract

SnBi 합금은 높은 이론 체적용량과 Bi의 취성을 Sn이 상보적으로 완화하는 특성으로 차세대 리튬이온전지(LIB) 음극재로 유망하다. 그러나 상온에서의 매우 낮은 고용한도 때문에 상분리가 용이하고, 리튬화/탈리튬화에 따른 큰 부피팽창으로 인한 균열, 전극의 전기적 성능 저하, 수명 열화로 이어지는 문제가 존재한다. 본 연구는 급속냉각공법을 적용하여 SnBi의 미세립을 균일 분산시키고 상(phase) 간 상보적 역할을 극대화하도록 미세조직을 제어하였다. 이어서 합금 반응에 따른 조성, 상분율 변화가 기계적 물성(탄성, 소성 계수)에 미치는 영향을 반영한 탄소성 유한요소해석(FEM)을 수행하여, 리튬화/탈리튬화 사이클 동안의 부피 팽창, 소성 변형을 평가하였다. 해석 결과, 급속냉각에 의해 미세조직이 미세화, 균질화될수록 상계면의 집중 응력과 누적 소성변형이 감소하고, Sn 영역의 베퍼효과가 강화되어 부피변형에 의한 손상이 지연되며, 전극 내부 전기화학적 성능 열화가 완화되는 경향을 확인하였다. 또한 동일 C-rate 조건에서 미세립 분포가 불균일한 경우 대비 최대 등가응력 및 소성변형률 지표가 낮아지는 것을 비교 검증하여 미세조직 제어에 따른 변형 메커니즘을 규명하고, 전기화학적 성능을 향상하는 합금계 음극재의 모델을 제시하였다.

**Keywords:** Lithium Ion Battery, SnBi Alloy Anode, Rapid Cooling Process, Microstructure Control, Buffer Effect, Elasto-Plastic Finite Element Method

---

1. 성균관대학교 지능형팹테크융합, 대학원생

2. 성균관대학교 기계공학과, 교수

3. 성균관대학교 지능형로봇학과, 교수

# 성균관대학교, 기계공학과, 교수, E-mail: e.h.lee@skku.edu

## 전과정평가 소개와 최신 동향

최요한<sup>1#</sup>

### An Introduction of the Life Cycle Assessment and its Status of the Art

Y.H. Choi

#### Abstract

The life cycle assessment (LCA) has been introduced as an international standard since 1996. It was too complex and costly, took a long time, and was challenging to achieve reliability. Therefore, many countries and organizations gave up on following up and improving the LCA method. And this market failure caused a dark decade of LCA in Korea. And the impact of the European Green Deal shakes and awakens people to recognize that, given Industry 4.0 circumstances, LCA is no longer high cost, time-consuming, or low in reliability. Nowadays, an LCA is applied not only to products but also to all activities. However, the LCA method is still improving and evolving.

Recently, the LCA method has been integrated with social impact assessment, leading to the introduction of social LCA as ISO 14075. And the LCA method is integrated with the techno-economic analysis (TEA), leading to the introduction of eco-techno-economic analysis (e-TEA) as defined in ISO 14076. And ISO 14077, the chain of custody approaches in life cycle assessment, is under development to help identify materials and substances that cannot be determined as environmentally friendly using conventional analytical methods, such as recycled content.

Soon, the LCA method will connect to organizational environmental management, and in the climate change area, it has already been done. In the areas of resources, toxicity, waste, etc., the LCA will enable science-based quantification of environmental impacts, enabling humans to manage the adverse impacts more closely in real time. To do so, industrial production sites should rely more on data acquisition, uncertainty management, calculation, weighting, sovereignty, and so on. Plasticity and material processing are fundamental sectors of the industrial supply chain, so they should be ready for this change.

**Acknowledgement:** 본 연구는 산업통상부(MOTIR)와 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20020890)

**Keywords:** Life cycle assessment, e-TEA, Social LCA, CoC-LCA

---

1. 한국생산기술연구원 기획평가조정실, 팀장

# 한국생산기술연구원 기획평가조정실 팀장, E-mail: yhchoi10@kncpc.re.kr

# EU 규제를 통해 본 에코이노베이션의 전략적 가치

유준혁<sup>1</sup>

## The Strategic Value of Eco-Innovation through the Lens of EU Regulations

J.H. Yoo

### Abstract

본 발표는 EU의 규제정책을 통해 드러난 에코이노베이션(Eco-Innovation)의 전략적 가치를 조명한다. 2025년 6월 도입된 클린 인더스트리얼 딜 국가보조금 프레임워크(CISAF, Clean Industrial Deal State Aid Framework)는 기존의 산업 보호 중심 보조금 제도를 넘어, 지속가능성과 기술혁신을 중심으로 한 산업 구조 재설계의 제도적 전환점으로 평가된다. EU는 이를 통해 단순한 환경규제를 넘어, 지속가능성을 산업경쟁력의 핵심 조건으로 제시하고 있으며, 이는 글로벌 제조업 전반의 에코이노베이션 관점의 전략 방향을 재정의하고 있다.

또한, 디지털 제품 여권(Digital Product Passport, DPP) 제도의 도입은 ESG 검증의 측이 기업에서 제품으로 이동하는 근본적 변화를 의미한다. 제품 단위의 지속가능성 검증은 공급망 전반의 투명성과 기술 역량을 요구하며, 기업으로 하여금 디지털 전환과 데이터 기반 관리체계의 재설계를 필수화하고 있다.

본 연구는 이러한 EU의 규제 프레임워크가 단순한 법적 제약이 아닌, 산업 혁신과 시장 진입 전략을 결정짓는 '전환의 언어'로 작동하고 있음을 분석한다. 결과적으로, EU 규제는 기업에게 리스크가 아닌 기회로, 에코이노베이션을 통한 프리미엄 시장 진입의 새로운 전략적 경로로 기능하고 있음을 강조한다.

**Keywords:** 에코이노베이션, 지속가능성, EU규제, 산업전환, 디지털제품여권

---

1. 딜로이트 안전회계법인, 경영자문본부, 파트너, junyoo@deloitte.com

## 철강기반 탄소발자국 저감 자동차 부품화 솔루션

김동진<sup>1</sup>, 이홍우<sup>1</sup>, 강연식<sup>2</sup>

### Steel-Based Solutions for Automotive Component to Reduce Carbon Footprint

D. J. Kim, H.W. Lee, Y.S. Kang

#### Abstract

최근 자동차 산업에서는 기후변화 대응과 탄소중립 실현을 위한 노력이 가속화되고 있으며, 이에 따라 자동차의 전 생애주기에서 발생하는 탄소배출 저감이 중요한 과제로 부각되고 있다. 또한, 글로벌 차원의 탄소중립과 연계된 순환경 요구가 강화됨에 따라, 자동차에 적용되는 소재의 재활용성과 이에 따른 탄소발자국 저감 가능성의 중요성이 증가하고 있다.

본 연구에서는 철강을 기반으로 한 자동차 부품화 솔루션을 개발하여, 기존 소재 대비 우수한 기계적 성능을 유지하면서도 탄소발자국을 효과적으로 저감할 수 있는 방안을 소개하고자 한다. 먼저, 자동차의 전 생애주기 분석을 바탕으로 생산 단계에서 탄소발자국에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 이를 경제적으로 저감할 수 있는 방안을 도출하였다. 또한, 구조적 안정성을 고려한 자동차 부품 설계안을 제시하고, 알루미늄 등 대체 소재와의 비교를 통해 철강의 환경적·경제적 장점을 분석하였다.

아울러, 기가 스틸 적용, 최적화된 설계 및 제조 공정 개발, 그리고 전 생애주기 평가를 통해 부품 단위의 탄소배출 저감 효과를 분석하였다. 이를 바탕으로 철강 기반 솔루션이 경제성과 환경성을 동시에 확보할 수 있는 대안임을 확인하였으며, 지속가능한 모빌리티 실현에 기여할 수 있음을 제시하였다.

**Keywords:** LCA, Carbon footprint, Automotive component, Application solution, Giga steel

---

1. 포스코 기술연구원, 수석연구원

2. 포스코 기술연구원, 연구위원

# LCA를 통한 알미늄 가공 기업들의 탄소규제 대응 현황

합진기<sup>1</sup>· 윤양진<sup>2</sup>· 문형중<sup>3</sup>

## Current Status of Carbon Regulation Compliance among Aluminum Processing Companies through Life Cycle Assessment (LCA)

J. K. Ham, Y. J. Yoon, H. J. Moon

### Abstract

2026년부터 EU 배터리 규제와 CBAM(탄소국경조정제도)이 본격 시행되면서, 알미늄 수출 기업들은 제품의 전 과정 탄소 데이터를 정밀하게 관리해야 하는 상황에 직면했다. 이에 글래스돔은 알미늄 압연, 중합, 소둔, 단재 등 주요 가공 공정에서 실측 데이터 기반 LCA(Life Cycle Assessment)를 적용하여 제품탄소발자국(PCF)과 CBAM을 산정했다. 기존 공정 데이터를 체계적으로 정리하고, 원재료 투입량 및 산출량, 연료, 전기, 스텀, 냉매 등의 에너지 소모량, 공기, 가스, 용수 등의 유ти리티 소모량 및 폐기물량을 계측하는 장비로부터 직접 수집한 데이터를 기반으로 실제 배출량을 정량화했다. 또한 제품의 탄소 영향도가 큰 공급망 협력사의 PCF 및 CBAM 데이터를 동일한 체계로 관리하고 전달함으로써, EU에서 책정한 기본값 대비 수출 경쟁력이 높은 실측 탄소 수치를 적용할 수 있었다. 즉, 공급망까지 확장된 데이터 기반 탄소관리 체계를 구축함으로써 원청사와 협력사 간 생산 과정의 투명한 데이터 흐름을 확보하고, 제3자 검증기관을 통해 검증을 완료함으로써 EU 배터리 규정 및 ISO 14067 국제표준에 부합하는 신뢰성 높은 결과로 인정받았다. 결과적으로 글래스돔은 알미늄 산업 내에서 데이터 기반 LCA를 통한 정밀 탄소관리 모델을 제시하며, 수출기업들이 강화되는 EU 규제 환경 속에서도 경쟁력을 유지할 수 있는 기반을 마련했다. 향후에는 각 공정별 데이터 기반 Hot Spot 및 공급망 분석을 통해 실질적인 탄소 감축 방향성을 제시하고자 한다.

**Keywords:** 전과정평가(LCA), 배터리 규정, 탄소국경조정제도(CBAM), 제품탄소발자국(PCF)

---

1. 글래스돔 대표
2. 글래스돔코리아 PCF 컨설팅 이사
3. 글래스돔코리아 사업개발 팀장

# 전자산업용 황동봉의 전과정평가(LCA)를 통한 환경성 및 자원순환성 분석

신호용<sup>1</sup> · 김지은<sup>2</sup> · 강예령<sup>3</sup> · 황윤빈<sup>#</sup>

## LCA-Based Evaluation of Environmental Impact and Resource Circularity of Brass Rods for Electronics Industry

Hoyong Shin, Jieun Kim, Yerryeong Kang, Yunbin Hwang

### Abstract

제품의 Life Cycle에서 직접·간접적으로 발생하는 탄소 배출량에 대한 규제는 EU의 탄소 국경조정제도 뿐만 아니라, 에코디자인 규정과 미국의 청정경쟁법(CCA) 등 다양한 국가별 규제로 확산되고 있다. 특히, 모빌리티와 전기·전자 제품같이 복잡한 공급망의 구조를 가진 조립 산업의 경우, 모기업의 1차 ~ N차 벤더사까지 탄소 관리 규제를 받고 있는 실정이다. 제품의 탄소중립 전략은 정확한 탄소배출량 산정이 기본 원칙이며, 공급망의 소재 및 단품 영역에서의 LCA(Life Cycle Assessment) 수행과 LCI DB 확보에 대한 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 전기전자 산업에서 Bottom-up 방식으로 LCA 결과 기반 탄소배출량이 취합될 수 있도록, 부품의 최하위 소재인 황동봉에 대한 LCA를 수행하였다. 또한 황동봉의 제조과정에서 탄소감축 방안과 자원순환 전략을 통해 전기전자 산업의 지속가능한 발전에 기여하고자 한다.

**Keywords:** LCA of Brass Rod, Life Cycle Assessment, Supply Chain Carbon Management, Resource Circulation, Brass Fabrication

### Acknowledgement

본 연구는 산업통산자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.RS-2024-00400653)

1. (주)켐토피아 탄소전략팀, 차장

2. (주)켐토피아 탄소전략팀, 대리

3. (주)켐토피아 탄소전략팀, 주임

# (주)켐토피아 탄소전략팀, 팀장, E-mail: hyb@chemtopia.net

## 5. 특별세션 / 일반 구두 발표

복합발전용 가스터빈 압축기용  
대형 단조부품 개발 심포지엄

(한국금속재료연구조합)

박판성형

(제 2 발표회장)

# 가스터빈 압축기 대형 단조부품 제조공정의 탄소배출 저감 전략과 CBAM 대응 방안

김남용<sup>1</sup>· 이채훈<sup>1</sup>· 허상현<sup>1</sup>· 윤선룡<sup>1</sup>· 권하늘<sup>1</sup>· 문지훈<sup>1</sup>· 이진모<sup>#</sup>

## Carbon Reduction Strategies in Large Forgings for Gas Turbine Compressors and CBAM Response

N. Y. Kim, C. H. Lee, S. H. Heo, S. R. Yoon, H. N. Kwon, J. H. Moon, J. M. Lee

### Abstract

최근 전 세계적으로 CBAM(Carbon Border Adjustment Mechanism) 및 탄소중립 정책이 강화됨에 따라 철강 및 단조 산업은 제조공정 전반에서의 탄소 배출량 저감과 정량적 산정 체계 확립이 핵심 과제로 부상하고 있다. 본 연구에서는 (주)태웅이 주관하여 수행 중인 “50톤급 대형 가스터빈 압축기 소재 및 단조부품 개발” 과제의 연구내용 중 탄소배출 산정 및 절감 활동에 초점을 맞추어 발표한다.

제강 및 대형 단조공정에서의 Scope 1·2 배출원 정의, 에너지 사용량 모니터링, 공정별 배출 계수 수집을 통해, 국제 기준(ISO 14040, ISO 14025)과 CBAM 평가체계를 반영한 온실가스 원단위(GHG intensity)를 도출하였다. 그 결과, 2024년 대비 2025년 상반기까지 일부 공정에서 배출량 절감 효과가 확인되었으며, 제품 형상의 특성을 세분화·평가하여 강종 및 형상별 배출량 관리 전략을 제시하였다.

또한, 수냉 랜스시스템, 제강 조업 공정 최적화, 열처리 재가열 횟수 최적화 및 단조비 개선 등 공정 에너지 효율화 방안을 통한 추가적인 감축 가능성을 검토하였다. 아울러, 제품 전주기 평가(LCA)를 기반으로 한 EPD(Environmental Product Declaration) 인증 추진 현황을 소개함으로써, 투명한 환경영향 정보 공개와 글로벌 고객사의 탄소중립 목표 달성을 기여할 수 있는 비전을 제시한다.

본 발표는 가스터빈 압축기용 대형 핵심부품 개발과정에서의 저탄소 제조기술 확보 전략을 공유하고, 향후 국내 철강·단조 산업의 글로벌 경쟁력 강화와 지속가능 제조 전환에 기여할 수 있는 시사점을 제공할 것이다.

본 연구는 「2024 소재부품기술개발사업 패키지형(RS-2024-00488236)」의 지원을 받아 수행하였습니다.

**Keywords:** Gas Turbine Compressor Component, Large Forging Technology, Carbon Emission, CBAM

---

1. (주)태웅

# (주)태웅, 기업부설연구소, 연구소장, E-mail: jinmo.lee@taewoong.com

# 가스터빈 압축기용 고청정 3.5NiCrMoV강의 열처리 조건에 따른 기계적 특성 및 잔류응력 거동 분석

김동배<sup>1</sup> · 이영민<sup>2</sup> · 유가영<sup>3</sup>

## Analysis of Mechanical Properties and Residual Stress Behavior of 3.5NiCrMoV Steel for Gas Turbine Compressor

D.B. Kim, Y.M. Lee, G.Y. Yoo

### Abstract

복합발전용 가스터빈 압축기 부품은 사용온도과 약 400 °C 이상으로, 고속회전 환경에 항상 노출되어 템퍼취성 제어 및 소재의 고청정화가 요구된다. 이러한 요구 조건을 만족하는 부품을 제조하기 위해서는 원소재 단계부터 기존 정련 기술과는 차별화된 불순물 제어를 포함한 고청정 특수 합금강 제조 기술 개발이 요구되어지며, 더불어 소재의 안정적인 기계적 특성과 잔류응력 제어가 필수적이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 고청정 3.5NiCrMoV 단조재를 대상으로 열처리 조건에 따른 미세조직, 기계적 특성, 잔류응력 거동을 체계적으로 평가하고자 하였다. 소재의 열처리 (Quenching-Tempering) 조건을 변화시켜 인장강도, 경도, 충격특성을 분석하고, SEM-EDS를 통해 미세조직과 개재물의 특성을 검증하였다. 또한 템퍼링 온도와 유지시간 변화에 따른 잔류응력 분포를 측정하여 조직 안정성과의 상관성을 도출하고자 하였다.

**Keywords:** 고청정강, 가스터빈 압축기, 열처리 조건, 잔류응력

본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 [한국산업기술기획평가원]의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호:RS-2024-00488236, 과제명:50톤급 대형 가스터빈 압축기 소재 단조부품 개발)

---

1. 대구기계부품연구원, 본부장
2. 대구기계부품연구원, 책임연구원
3. 대구기계부품연구원, 선임연구원

## 3.5NiCrMoV강 응고거동 규명을 위한 미세조직 분석 및 CALPHAD 해석

이형수<sup>1</sup> · 윤대원<sup>1</sup> · 정인용<sup>1</sup> · 정희원<sup>1</sup> · 유영수<sup>1</sup> · 서성문<sup>1#</sup>

### Investigation of solidification behavior in 3.5NiCrMoV steel via microstructural characterization and CALPHAD analysis

Hyungsoo Lee, Dae Won Yun, Inyong Jung, Hi Won Jeong, Young Soo Yoo, Seong-Moon Seo

#### Abstract

가스터빈 압축기의 회전 부품은 약 400°C의 상대적으로 낮은 온도에서 운용되지만, 고속 회전에 따른 충격하중과 이물질(FOD) 손상에 취약하다. 따라서 압축기용 소재 개발에서는 고청정화와 템퍼 취성 억제를 통한 인성 확보가 중요한 요소이다. 본 연구는 3.5NiCrMoV 강의 주조 및 단조 소재를 대상으로 미세조직을 분석하고, CALPHAD 기반 열역학 해석을 통해 응고 거동을 설명하고자 하였다. 우선 10 kg 규모의 실험용 잉고트를 제작하여 응고 속도 변화에 따른 거시 및 미세 편석과 수지상 조직 발달 양상을 관찰하였다. 수지상간 영역에는 합금 원소 편석과 함께 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnS 등의 개재물이 집중적으로 분포하는 특징이 확인되었다. 반면, 단조 시편에서는 고온 변형 및 재결정을 거치며 등축정 조직이 발달하였고, 주조 상태에서 뚜렷했던 수지상 조직과 개재물은 크게 줄어들었다. 또한 평형 응고 모델과 함께 Scheil 및 Back-diffusion 모델을 적용하여 CALPHAD 기반 해석을 진행하였다. 주요 합금 원소(Ni, Cr, Mo, V)의 응고 편석 거동을 분석하여, Mo와 V의 액상으로의 편석도가 가장 심함을 확인했고, 이는 실험 결과와도 일치하였다. 더불어 액상점도 · 밀도 · 열전도도 · 엔탈피 등 물리적 특성을 예측하여 주조 공정 해석의 기초 자료로 활용할 수 있음을 제시하였다. 이러한 연구 결과는 대형 잉고트 제조 시 응고 특성 및 개재물 제어 전략 수립에 중요한 근거를 제공하며, 장기적으로는 발전용 구조재의 안정적 생산과 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

**Keywords:** Gas Turbine, Compressor, Casting, Forging, Calphad

#### Acknowledgement

본 연구는 산업통산자원부 한국산업기술평가원이 지원하는 소재부품기술개발(00488236) 사업의 일환으로 수행되었습니다.

1. 한국재료연구원, 항공우주재료연구센터

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

## 복합발전용 가스터빈 압축기 부품 제작을 위한 단조/링단조 공정 설계

김진용<sup>1</sup>· 주병돈<sup>2</sup>· 이인환<sup>3</sup>· 김주희<sup>4</sup>· 박영철<sup>5, #</sup>

### Process Design of Forging and Ring Rolling for Gas Turbine Compressor Components in Combined Cycle Power Generation

J. Y. Kim, B. D. Joo, I. H. Lee, J. H. Kim, Y. C. Park

#### Abstract

환경 친화적 에너지 정책에 따라 복합화력발전에 사용되는 발전용 대형 가스터빈의 수요는 확대되고 있으며, 이에 따른 기술 개발이 지속적으로 이루어지고 있으나, 주로 고온영역에 사용되는 소재/부품에 집중되고 있다. 가스터빈 압축기는 NiCrMoV 강으로 제작되어 400°C 부근의 온도에서 고속회전을 하는 부품으로 뛰임 취성 및 진동에 대한 저항성이 요구되며, 이를 달성하기 위한 공정 기술 개발은 물론, 경제성 확보를 위한 공정 개발 또한 필요하다.

본 연구에서는 가스터빈 압축기에 사용되는 토크튜브(Torque Tube) 및 어댑터(Adapter) 부품의 경쟁력 확보를 위하여 준정형 성형 공정 적용을 위한 설계 및 검토를 수행하였으며, 단조 및 열처리 세부 공정 측면에서 부품 요구 특성 달성을 위한 공정 별 관리 인자에 대한 비교 분석을 실시하였다.

**Keywords:** Gas Turbine Compressor, Near Net Shape, Open Die Forging, Ring Rolling, Process Design

#### 후기

본 연구는 「2024 소재부품기술개발사업 패키지형(RS-2024-00488237)」의 지원을 받아 수행하였습니다.

---

1. (주)태상 기업부설연구소, 대리
2. (주)태상 기업부설연구소, 연구소장
3. (주)태상 기업부설연구소, 차장
4. (주)태상 기업부설연구소, 사원
- 5, #. (주)태상, 생산총괄, 이사, E-mail: youngchul.park@taesang.com

# 열간자유단조 및 링롤링 공법으로 제조된 3.5NiCrMoV 합금의 기계적 특성에 관한 연구

권용철<sup>1#</sup>· 윤영섭<sup>2</sup>· 주병돈<sup>3</sup>

## A Study on the mechanical properties of 3.5NiCrMoV alloy manufactured by open die forging and ring rolling methods

Y. C. Kwon, Y. S. Yoon, B. D. Joo

### Abstract

발전설비 소재의 가장 핵심적 부품인 로터(Rotor) 및 디스크(Disc) 재료는 발전소의 효율향상과 내구성 향상을 중심으로 개발되어왔다. 특히 기존에 사용되고있는 NiCoV 와 NiCrMoV 강을 중심으로 새로운 재료 개발 보다는 제강 정련 및 조괴 기술의 개선으로 불순물 함량을 극속화 함으로써 초청정(Superclean)강의 개발에 주력하고 있다. 저압 터빈용 부품에 적용되는 3.5NiCrMoV 강은 ASTM A470으로 베이나이트(Bainitic) 구조를 갖는 고강도 저합금 강이다. 이러한 베이나이트 구조는 탄화물이 고밀도의 전위와 결합하여 미세하게 분포되어있는 형태로 강의 강도와 인성을 적당히 조화시킨 재료이다.

본 연구에서는 3.5NiCrMoV 강으로 제조된 잉고트(Ingots)를 사용하여 열간자유단조 및 링롤링 공법으로 각각 제조된 단강품을 이용하여 열처리 전, 후 기계적 특성 평가를 수행하였다. 열처리는 퀸칭(Quenching) 및 템퍼링(Tempering)을 수행하였고, 질량효과(Mass Effect)에 따른 위치별 미세조직, 강도, 경도 및 샤르피 충격 특성 등 비교 분석하였다.

**Keywords:** Superclean Alloy, 3.5NiCrMoV Alloy, Open Die Forging, Ring Rolling, Mass Effect

### 후기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술기획평가원의 연구비 지원을 받아 수행된 연구결과입니다(과제번호 : RS-2024-00388237).

1. 한국건설생활환경시험연구원 영남본부, 책임연구원

2. 한국건설생활환경시험연구원 영남본부, 선임연구원

3. (주)태상, 연구소장

# 한국건설생활환경시험연구원, 영남본부, 책임연구원 E-mail : yckwon@kcl.re.kr

# 가스터빈 압축기용 3.5NiCrMoV 강의 템퍼 취성 거동

최용욱<sup>1</sup>· 김병구<sup>1#</sup>

## Temper embrittlement behavior of 3.5NiCrMoV steel for gas turbine compressors

Yong-Wook Choi, Byoungkoo Kim

### Abstract

가스터빈은 고온·고압의 연소가스를 이용하여 터빈을 구동하는 회전형 내연기관으로, 발전, 복합발전 및 열병합발전 시스템의 핵심 장치로 널리 활용되고 있다. 미국, 독일, 일본 등 주요 선진국에서는 가스터빈 기술을 전략 산업으로 지정하고 있어 핵심 기술의 이전이 제한적이며, 이에 따라 국내에서는 독자적인 기반 기술 개발과 자립이 요구된다. 또한 가스터빈 기술은 분산 발전, 열병합 발전, 차세대 연료전지와의 하이브리드 시스템 등 다양한 에너지 분야에 응용 가능하며, 민수용뿐만 아니라 군수용으로도 활용도가 높다.

가스터빈은 압축기에서 생성된 고온·고압의 공기에 연료를 분사하여 연소시킴으로써 발생한 연소가스를 통해 터빈을 회전시키며, 이를 통해 기계적 에너지를 전기에너지로 변환한다. 가스터빈은 약 4만여 개의 부품으로 구성되어 있고, 압축기 부품이 400°C 이상의 고온에서 고속 회전하며 장기간 운전 중 지속적인 진동과 응력을 받기 때문에, 해당 소재에는 우수한 고온강도, 내피로 특성 및 템퍼취성 저항성이 요구된다. 그러나 고온 터빈 부품에 비해 압축기 부품에 대한 연구는 상대적으로 부족하며, 특히 소재의 장기 신뢰성 확보를 위한 체계적인 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 가스터빈 압축기용 소재인 3.5NiCrMoV 강의 템퍼취성 경향을 평가하기 위해 step cooling 열처리와 연성-취성 전이온도(DBTT), 파단면 전이온도(FATT)를 분석하였다. Step cooling 열처리는 240시간의 단계별 열처리를 통해 수만 시간의 노출 시험을 대체할 수 있으며, 2주 이내에 소재의 템퍼취성 경향을 평가할 수 있는 효율적인 방법이다. 열역학 상태도 분석과 dilatometer 실험을 통해 적정 훈칭 온도 범위를 설정하였으며, 다양한 훈칭 및 템퍼링 조건에 따른 경도 분포를 측정하여 템퍼링 마스터 커브를 확보하고 후보 열처리 조건을 선정하였다. 각 후보 조건에 대해 인장, 충격, 경도 시험을 수행하여 부품 요구 수준을 만족하는 품질 열처리 조건을 확정하였다. 이후 품질 열처리된 소재에 대해 step cooling 열처리를 적용하고, 열처리 전후의 인장, 충격, DBTT, FATT 특성을 평가하였다. 이를 통해 소재의 템퍼취성 경향, 파단면 특성 및 미세조직 변화 간의 상관관계를 분석하였다.

본 논문은 2024년도 산업통상자원부의 소재부품기술개발사업\_소재부품패키지형기술개발사업 'Near-net shape 적용 준정형 가스터빈 압축기 단조부품 개발'의 지원을 받아 연구되었음(RS-2024-00488237)

**Keywords:** Gas turbine, Compressor, 3.5NiCrMoV, Temper embrittlement, Step cooling heat treatment

---

1. 한국생산기술연구원, 동남기술상용화본부

# 한국생산기술연구원, 동남기술실용화본부, 수석연구원, bungkim@kitech.re.kr

## 피어싱 공정에서 편치 선단의 기하학적 형상에 따른 구리 박판의 전단면 특성 평가

이종훈<sup>1,2</sup>· 전용준<sup>2</sup>· 최현석<sup>2</sup>· 이현택<sup>1#</sup>· 김동언<sup>2#</sup>

### Evaluation of Sheared Edge Characteristics of Copper Thin Sheet According to Geometrical Variations of Punch End in Piercing Process

J. H. Lee<sup>1,2</sup>, Y. J. Jeon<sup>2</sup>, H. S. Choi<sup>2</sup>, H. T. Lee<sup>1#</sup>, D. E. Kim<sup>2#</sup>

#### Abstract

전기차 및 AI 발전에 따른 데이터센터 산업에서 전력반도체의 수요가 급증함에 따라 리드 프레임의 수요 또한 증가하는 추세이다. 리드 프레임의 고품위 전단면은 칩과 PCB 간 전기적 연결성 및 신뢰성 확보에 핵심적인 역할을 하며, 단락 및 접촉 불량을 일으키는 과도한 놀림면과 벼와 같은 제품 결함을 최소화하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 피어싱 공정에서 코너부 반경이 서로 다른 편치를 적용하여, 전단 후 단면 특성을 평가하고자 하였다. 주요 공정 변수로 클리어런스 5%를 적용하고 C10100 구리 소재(두께 0.6mm)에 대하여 R0.15, R0.3, R0.5, R0.6 조건에서 전단 시험 후 단면 분포를 평가하였다. 측정 결과, 코너부 반경이 감소할수록 놀림면이 증가하는 경향이 확인되었다. 이는 코너부의 반경이 감소할수록 국부 응력 집중과 굽힘 모멘트가 증가하여 초기 소성 변형 단계에서 놀림이 더 크게 발생하기 때문이라고 판단된다.

**Keywords:** Piercing process, Copper thin sheet, Power semiconductor, Lead frame, Rollover

---

1. 인하대학교 기계공학과

1#. 인하대학교, 기계공학과, 조교수, E-mail: htlee@inha.ac.kr

2. 한국생산기술연구원 지역산업혁신부문(성장동력)

2#. 한국생산기술연구원, 지역산업혁신부문(성장동력), 수석연구원, E-mail: kdu0517@kitech.re.kr

# 자동차용 크로스멤버 최적 금형 설계에 대한 강건성 해석

손준혁<sup>1</sup>· 박 순<sup>2</sup>· 나용근<sup>3</sup>· 김대용<sup>4, #</sup>

## Robustness Analysis of Optimized Die Designs for Automotive Crossmembers

J. H. Son, S. Park, Y.-G. Na, D. Kim

### Abstract

본 연구에서는 자동차용 크로스멤버의 드로잉 금형을 대상으로 성형 결함을 줄일 수 있는 최적 여유부 형상 설계안을 도출하고 최적 설계안에 대하여 제조 공정에서 발생할 수 있는 잡음 인자들에 대한 품질 강건성을 평가하였다. 인장강도 500 MPa급 2.3mm 두께의 고강도강판이 적용된 크로스멤버는 이단 분할 된 드로잉 공정으로 제조된다. 첫 번째 드로잉 금형의 최적 여유부 형상 설계안을 계산하기 위하여 여유부의 상·하단 반경, 벽면 기울기, 윗단 너비를 설계 변수로 정의하고 두께 감소율, 주름 및 스프링백 크기를 목적 함수로 하여 각각을 최소화할 수 있는 최적화 해석을 수행하였다. 도출된 최적 설계안에 대해서 제조 공정 중 발생할 수 있는 잡음 인자를 강판 두께, 강판 물성, 마찰 계수, 패드 하중으로 설정하고 품질 강건성 해석을 수행하였으며 공정능력지수(process capability index)를 통하여 강건성을 평가하였다. 최적 설계안 도출과 품질 강건성 해석을 위해서 상용 유한요소해석 프로그램인 AutoForm의 Sigma 모듈을 활용하였다. 최적 여유부 형상 설계안은 초기 설계안 대비 성형 결함을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 잡음 인자들에 대한 품질 강건성이 우수함을 확인하였다. 본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업단지공단의 지원을 받아 수행된 연구임(GBGM2502, 산업집적지경쟁력강화사업)

**Keywords:** Automotive Crossmember, High Strength Steel, Finite Element Analysis, Die Design Optimization, Robustness

1. 전남대학교 미래모빌리티융합학과, 석사과정

2. (주)은혜기업, 책임연구원

3. (주)은혜기업, 대표

4. 전남대학교 미래모빌리티학과, 교수

#Corresponding Author: Department of Future Mobility, Chonnam National University, E-mail: daeyong.kim@jnu.ac.kr

# Stainless 강판 성형 공정의 소착 거동에 관한 연구

문지환<sup>1,2</sup>· 이종균<sup>1</sup>· 이명규<sup>2</sup>· 송정한<sup>1</sup>· 배기현<sup>#</sup>

## A Study on Galling Behavior of Stainless Steel Sheet Metal Forming

J. H. Moon, J. G. Lee, M. G. Lee, J. H. Song, G. H. Bae

### Abstract

판재 성형 공정에서는 표면 손상을 방지하기 위해 일반적으로 비닐과 같은 보호 필름을 부착 한다. 그러나 보호 필름 사용은 원가 상승과 환경 오염을 유발하는 문제점이 있으며, 이에 따라 필름을 제거한 상태에서 성형 공정을 진행하려는 시도가 이루어지고 있다. 특히 STAINLESS STEEL 판재의 경우 표면 품질이 중요한데, 필름을 제거하면 금형과 소재가 직접 접촉하게 되어 소착(GALLING) 현상으로 인한 표면 불량 발생 시점이 기존보다 앞당겨지는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 STAINLESS STEEL 성형 공정에서 발생하는 소착 현상의 메커니즘을 규명하기 위하여 실제 성형 공정을 모사한 편면 마찰 시험을 수행하였다. HERTZIAN 접촉 이론에 기반한 선 접촉 마찰 인덴터를 제작하고, AUTOFORM 해석을 통해 실제 공정 중 최대 압력을 산출하여 시험 조건에 반영하였다. 시험은 편면 마찰기를 이용하여 압력과 속도를 변수로 설정하였으며, 이를 통해 조건 변화에 따른 소착 양상의 차이를 분석하였다. 연구 결과, 압력과 속도의 증가는 소착 발생을 가속화하는 주요 인자로 확인되었으며, 특히 시험 중 발생한 이물이 금형-소재 계면에 포집되어 접착 마모를 촉진하는 것이 소착 발생의 핵심 메커니즘임을 규명하였다. 본 연구는 STAINLESS STEEL 판재 성형에서의 소착 발생 원인에 대한 기초적 이해를 제공하며, 향후 필름 없는 친환경·저비용 성형 공정의 설계 및 최적화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Metal forming, Friction, Galling, Debris, Pressure, Drawing velocity

### Acknowledgement

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(고품질 판재성형 부품의 대량 고속 생산을 위한 AI기반 모니터링·예지보전·품질검사가 가능한 0.05 mm/m급 지능형 고속·고정밀 프레스 장비 개발, RS-2025-16063279, 산업통상자원부)

1. 한국생산기술연구원 유연생산연구부문

2. 서울대학교 재료공학부

#. 한국생산기술연구원 유연생산연구부문 수석연구원, Email: baegh@kitech.re.kr

## 롤포밍 초고장력강 소재 평탄도 확보 기술 개발

김재균<sup>1</sup> · 김덕현<sup>1</sup> · 정윤성<sup>1</sup> · 박상언<sup>2</sup> · 손성만<sup>3</sup>

### Development of Flatness Control Technology for Roll-Forming Ultra High Strength Steel

J.K. Kim, D.H. Kim, Y.S. Chung, S.E. Park, S.M. Shon

#### Abstract

자동차 차체 부품 제조업 분야에서는 고연비, 친환경을 위한 차량 경량화에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 인장강도 1,470MPa 이상의 초고장력 강판에 대한 수요가 급격히 확대되고 있으며, 이러한 초고장력 강판은 차체 골격 부품, 충돌 에너지 흡수 부품 등에 적용되어 안전성과 경량화를 동시에 확보할 수 있는 핵심 소재로 부상하고 있다.

초고장력 강판은 높은 항복강도와 낮은 연신율로 인해 전통적인 프레스 공정으로는 스프링 백, 크랙 등 성형 결함이 빈번히 발생한다. 이러한 결함을 극복하기 위해 롤포밍 공법이 각광받고 있으며, 롤포밍 공법은 연속적인 롤링 공정을 통해 긴 길이의 부품을 높은 치수 정밀도로 성형할 수 있는 장점이 있다. 그러나 평탄도 및 직진도가 확보되지 않은 소재를 사용하여 롤포밍 진행 할 경우, 성형 과정에서 단면 변형, 웨이브, 함몰 등의 결함이 발생할 가능성이 높다. 이러한 현상은 곧 제품 품질 불량과 생산성 저하로 연결되어 양산에 심각한 문제를 초래할 수 있다.

소재 평탄도 문제를 개선하기 위하여 코일 레벨러를 활용한 기계적 보정을 롤포밍 공정 전에 적용하고 있으나, 레벨러 탑입은 코일이 감긴 방향성만 해소될 뿐, 코일의 평탄도 및 직진도 불량을 해소하는 효과가 미미하다.

특히 1,470MPa 이상의 강도 영역에서는 기존의 레벨링 및 보정 기술이 소재 내부에 존재하는 미세 구조적 응력 집중을 효과적으로 해소하지 못하는 경우가 많고, 이는 곧 제품 불량으로 이어지는 현실이다. 또한 기존 연구들은 주로 980~1,180MPa 수준의 강도를 대상으로 하는 경우가 많아서 초고장력강 소재에 대한 체계적인 평탄도 확보 기술 연구는 미흡한 현실이다.

롤포밍 공정의 특성상, 소재 공급 단계에서 평탄도가 확보되지 않을 경우, 후속 성형에서 발생하는 결함을 보정하기는 어렵다. 이에 따라 원소재 단계에서부터 잔류응력 제거를 통한 평탄도 확보 방안이 반드시 마련되어야 한다.

본 연구는 1,470MPa 이상의 초고장력강 강판을 롤포밍 공법으로 제조하는 과정에서 발생하는 평탄도 및 직진도 문제를 해결하기 위한 유한 요소 해석의 기술적 접근을 모색하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 평탄도가 미흡한 초고장력강판을 모델링 하여, 그 제품을 비드를

성형하는 롤금형과 성형된 비드를 다시 평판으로 해소하는 2개의 롤금형을 통과시켜 평탄도 개선의 적용 가능성을 분석한다.

이를 통해 초고장력강 강판의 성형을 안정적으로 하여, 자동차 차체 부품 산업의 양산성 확보에 기여할 수 있는 기술적 기반을 마련하고자 한다.

**Keywords:** Ultra High Strength Steel, Roll-Forming, Flatness, Bead

---

1. 성우하이텍 연구본부, 책임연구원
2. 성우하이텍 연구본부, 사업부장
3. 성우하이텍 연구본부, 센터장

# 원통형 배터리 셀 캔 공정 개발 및 드로잉 공정 별 비교 연구

서예찬<sup>1</sup> · 지수민<sup>2</sup> · 이세동<sup>2</sup> · 성홍석<sup>2</sup> · 윤은유<sup>1</sup> · 홍종화<sup>1, #</sup>

## Development of a Cylindrical Battery Cell Can Process and a Comparative Study of Each Drawing Process.

Y. C. Seo, S. M. Ji, S. D. Lee, H. S. Seong, E.-Y. Yoon, J.-H. Hong

### Abstract

최근 원통형 배터리 시장은 전기차와 에너지저장장치 수요 증가에 힘입어 빠르게 성장하고 있다. 원통형 배터리 중 4680 배터리는 주요 전기차 제조사들이 생산 확대에 나서면서 주목을 받고 있다. 이에 따라 원통형 배터리 성형 공정에서 요구되는 성능 향상 및 품질 확보를 위한 연구의 필요성이 커지고 있다. 이전 연구에서는 다단 딥 드로잉 공정변수에 대하여 각 공정별 민감도를 분석하였다. 본 연구는 각 공정에서 나오는 실측 형상 데이터를 확보하여 해석 결과와 직접 비교 분석하는 것을 목적으로 하였다. 이를 통해 공정별로 두께분포와 성형 높이 등 중간 제품을 통하여 얻을 수 있는 정보를 해석 결과와 비교하여 모델의 예측 정밀도를 검증하였다. 또한, 실 공정에서 제한적인 정보인 각 공정별 편치 하중을 예측하여, 공정별 금형 수명 관리에 참고할 수 있도록 하였다. 본 연구를 통해 해석 모델의 신뢰성을 확보하였으며, 이는 추후 2세대 46XX 배터리 캔 생산 공정에 효과적으로 참고가 될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** 4680 Cylindrical Battery Cell Can, Multi-Step Deep Drawing Process, Nickel-Plated Steel Sheets, Finite Element Analysis (FEA)

---

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부

2. LT정밀, 연구개발팀

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

## Nimonic 80A 판재의 물성 평가 및 엔진 배기관 클램프 공정 기술 개발

윤건우<sup>1</sup> · 김진수<sup>1</sup> · 서예찬<sup>1</sup> · 홍종화<sup>1, #</sup>

### Properties Evaluation of Nimonic 80A Sheets and Development of Engine Exhaust Pipe Clamping Process Technology

G. W. Yoon, J. S. Kim, Y. C. Seo, J.- H. Hong

#### Abstract

Nimonic 80A는 극한의 환경에서도 우수한 기계적 성능을 유지하는 니켈 기반 초합금으로, 항공우주, 조선, 방위 산업 등 극한 조건이 요구되는 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히, 이 합금은 고온 강도, 내산화성, 피로 저항성을 동시에 요구하는 부품에 적합하며, 복잡한 다단 성형으로 부품이 제작되는 경우가 많아지면서, 정밀한 물성과 성형성 그리고 공정 제어가 필수적이다. 본 연구는 초고온 내열 합금인 Nimonic 80A 판재를 활용한 엔진 배기관 클램프 성형 공정 기술 개발을 목표로 한다. 이를 위하여, 재료 물성 평가와 성형성 분석을 수행하고, 유한 요소 해석(Finite Element Analysis, FEA) 기반 시뮬레이션을 통해 공정 예측 모델을 구축하였다. 기초적인 기계적 시험을 통하여 물성을 평가하였고, 성형 한계도(Forming Limit Diagram) 시험을 통하여 Nimonic 80A 판재의 성형성을 측정하였다. 이후, 클램프 성형 공정에 해석을 수행함으로써 제조 시 파손과 같은 결함의 가능성 등을 사전에 예측하였다. 본 연구를 통해 초고온 내열 합금 소재 성형 공정의 불량률을 효과적으로 감소시켜 공정 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Nimonic 80A, Nickel-Super Alloy, Engine Clamp, Formability, Finite Element Analysis(FEA)

---

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부

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

# 이미지 분석을 활용한 아연도금층의 변형 모드별 박리량 및 크랙 측정

정규철<sup>1</sup>· 김태영<sup>1</sup>· 이재욱<sup>2</sup>· 임현교<sup>1</sup>· 김성제<sup>1</sup>· 조경현<sup>1</sup>· 주형수<sup>1</sup>· 정유형<sup>1</sup>· 윤종현<sup>#</sup>

## Image analysis for peeling-off and cracking of Zn-coated steel under various deformation modes

K. C. Jeong, T. Y. Kim, J.W. Lee, H.K. Lim, S.J. Kim, G.H. Cho, J.H. Yoon

### Abstract

아연도금은 강판의 내식성 향상을 위해 널리 적용되며, 스테인리스강 대비 경제성이 높고 생산 과정의 온실가스 배출도 적다. 그러나 도금강판 성형 시 모재의 성형성과는 별개로 도금층 박리와 도금층 균열로 인한 모재 노출이 발생하며 내식성이 저하될 수 있다. 기준 규격(ASTM B571 등)은 육안 관찰 기반의 상대적이고 정성적인 평가에 의존하며, 산업 현장에서는 주로 헤밍(Hemming) 시험이나 더블 올슨(Double Olsen) 시험으로 성형 시 손상을 비교해 왔다. 본 연구는 도금층 성형 손상을 정량화하고 다양한 변형 모드별 경향을 파악하기 위해, 상이한 응력 삼축도를 구현하는 인장과 굽힘 시편 및 시험법을 제안하고, 광학현미경 이미지 분석으로 코팅층의 박리 면적과 균열 영역을 계량화하였다. 또한 도금층 파단으로 인해 디지털 이미지 상관법을 이용한 실험적 표면 변형률 측정이 불가능하여, 유한요소해석 모델로 표면 변형률과 응력 삼축도를 계산하였다. 각 응력 삼축도와 등가 소성변형률에 따른 도금층 상태를 정량적으로 모델링하고, 이를 바탕으로 유한요소해석과 연계 가능한 코팅층의 성형 한계 지표를 제안하였다.

**Keywords:** Zinc-coated steel, delamination, coating cracking, image analysis, formability limit

---

1. 한양대학교ERICA 기계공학과, 대학원생

2. 포스코 철강솔루션연구소 성형연구그룹, 수석연구원

# 한양대학교ERICA 기계공학과, 교수, E-mail: jyoon@hanyang.ac.kr

# 다단 성형 공정 설계에 대한 Python Optimal Transport(POT) 기법 적용

정한용<sup>1#</sup>, 박기철<sup>2</sup>

## A Python Optimal Transport(POT) Based Approach to Die Surface Design in Multi-Stage Forming Process

H. Y. Jung, K. C. Park

### Abstract

This study proposes a method for applying the Python Optimal Transport (POT) technique to the multi-stage forming process design of prismatic battery cell cases. By utilizing POT, intermediate shapes between the initial circular and final prismatic geometries are derived stepwise, and these are used as the basis for designing die surfaces at each forming stage. The point data calculated by POT are fitted to curves and applied to die surface design using CAD software, and forming simulations showed that results comparable to conventional design methods can be achieved. In addition, the analytical model based on POT was effectively used to verify practical manufacturing issues, such as ironing ratio distribution at each stage, corner shape optimization, and forming process number optimization. This study demonstrates that POT-based intermediate shape design is a practical approach to improving the efficiency and precision of multi-stage forming process design for prismatic battery cell cases, and suggests the potential for extension to various materials and geometries in the future.

**Keywords:** Python Optimal Transport, POT, Multi-Stage Forming, Die Surface Design

---

1. 포스코 기술연구원 수석연구원

2. 포스코 기술연구원 수석연구원

# 포스코 기술연구원, 철강솔루션연구소, 성형연구그룹,  
수석연구원, lazenc98@posco.com

# 양면 돌출 축 성형이 가능한 파인 블랭킹 복합성형 공법을 적용한 전자변속기용 사이클로이드 기어의 최적 성형기술 개발

박동환<sup>1, #</sup>· 최성돈<sup>2</sup>· 신용호<sup>3</sup>

## Development of Optimal Forming Technology for Cycloid Gear of Electronic Transmissions using Fine Blanking Complex Forming Method capable of Double-sided Protrusion Forming

D. H. Park, S. D. Choi, Y. H. Shin

### Abstract

파인 블랭킹 가공은 높은 정밀도를 요구하는 부품을 한 번의 공정으로 절단하는 기술로 일반적인 절단 방식과 다르게 부드럽고 깨끗한 절단면을 만들어 2차 가공이 필요 없는 것이 특징이다. 양면 돌출 축 형상의 사이클로이드 기어는 차세대 전자식 변속기 액추에이터에 들어가는 핵심 부품으로 전자식 레버 혹은 스위치로 대신하여 운전자의 변속단을 전기신호로 전달 후 액추에이터를 구동하여 변속단을 선택하는 구조로 이루어져 있다. 이러한 사이클로이드 기어는 사이클로이드 곡선 형태의 치형을 가진 특수 기어로 높은 토크를 전달하며, 백래시(backlash)가 적고, 크기가 작아 로봇 관절이나 전자 변속기와 같은 정밀한 분야에 주로 사용된다. 파인 블랭킹 공정은 단순한 전단 작업이 아니며 재료의 기계적 성질, 화학 성분, 조직 등 재료의 성질이 파인 블랭킹의 성공여부에 큰 영향을 미친다. 파인 블랭킹 금형 내에서 판단조 복합기술인 판단조(Sheet Forging) 공법을 적용한 양면 돌출 축 형상 제작이 가능한 사이클로이드 기어의 파인 블랭킹 금형을 개발하기 위하여 공정설계를 진행하였다. 본 연구는 파인 블랭킹 복합성형 기술을 적용하여 자동차 전자변속기용 사이클로이드 기어 부품의 최적 공정설계와 판단조 성형해석을 실시하여 전자변속기용 사이클로이드 기어의 최적 성형기술을 개발하였다.

**Keywords:** Cycloid Gear, Fine Blanking, Electronic Transmissions, Complex Forming, Protrusion Forming

1. 경북테크노파크 AI자율제조디지털혁신센터, 연구위원

2. (주)아스피, 차장

3. (주)아스피, 실장

# 경북테크노파크, 연구위원, E-mail: pdh@gbtp.or.kr

# Deep Drawing 과정에서 금속-폴리머-금속 적층판재의 파단 및 주름 거동

김재훈<sup>1</sup>· 최연택<sup>1</sup>· 김래언<sup>2</sup>· 구강희<sup>1</sup>· 권지혜<sup>1</sup>· 서민홍<sup>3</sup>· 김형섭<sup>4, #</sup>

## Fracture and Wrinkling Behavior of Metal–Polymer–Metal Laminated Sheets during Deep Drawing

J. H. Kim<sup>1</sup>, Y. T. Choi<sup>1</sup>, R. E. Kim<sup>2</sup>, G. H. Gu<sup>1</sup>, J. Kwon<sup>1</sup>, M. H. Seo<sup>3</sup>, H. S. Kim<sup>4, #</sup>

### Abstract

금속-폴리머-금속(MPM) 적층판재는 높은 비강도와 우수한 굽힘 강성을 바탕으로 항공, 자동차, 선박 산업에서 경량 구조재로 각광받고 있다. 그러나 성형 과정에서 다양한 파손 모드가 발생하여 실용적 적용에 제약이 따른다. 본 연구에서는 deep drawing 공정을 대상으로 실험과 유한요소해석을 병행하여 MPM 판재의 성형 거동을 체계적으로 고찰하였다. 파단 및 이어링 거동 예측을 위해 폴리머 코어의 기여가 제한적임을 고려하여 금속 커버층에 Hill 1948 이방성 항복 모델과 modified Hosford–Coulomb 파단 모델을 적용하였으며, 그 결과는 실험과 잘 일치하였다. 이는 성형 시 파단 및 이어링 거동이 금속 층에 의해 지배됨을 보여준다. 한편, 주름은 실험과 post-buckling 해석을 통해 분석하였으며, 단일재 금속 판재와 달리 표면 주름(surface wrinkling)이 발생하였다. 흥미롭게도, 이 현상은 적층판의 기계적 성능에 큰 영향을 미치지 않는 폴리머 코어의 영률에 의해 제어되는 것이 유한요소해석을 통해 확인되었다. 본 연구는 MPM 판재의 deep drawing 과정에서 주요 손상 및 주름 거동의 지배 인자를 규명하고, 이를 정량적으로 예측할 수 있는 해석적 접근을 제시한다.

**Keywords:** Metal-polymer-metal laminates, Deep drawing test, Ductile fracture, Wrinkling, Finite element method

---

1. 포항공과대학교 신소재공학과, 대학원생
2. 포항공과대학교 친환경소재대학원, 대학원생
3. 포스코 기술연구원, 수석연구원
4. 포항공과대학교 친환경소재대학원, 교수

# 교신저자: 포항공과대학교 친환경소재대학원 E-mail: hskim@postech.ac.kr

## 6. 특 별 세션

초고강도 핫스탬핑 강판 냉간 트림 기술

(현대자동차 / (재)대구기계부품연구원)

( 제 3 발표회장 )

# 탄소배출 저감을 위한 핫스탬핑 강판의 냉간트림 기술 연구 및 동향

손성국<sup>1, #</sup>· 이창욱<sup>1</sup>· 박재명<sup>2</sup>· 윤승재<sup>2</sup>

## Research and Trends in Cold Press Trimming Technology for Hot-Stamped Steel to Reduce Carbon Emissions

S. G. Son, C. W. Lee, J. M. Park, S. C. Yoon

### Abstract

최근 차량의 연비 향상을 위한 경량화 및 강화된 충돌 법규에 대응하기 위하여 핫스탬핑 강판의 적용이 확대되고 있다. 그러나 핫스탬핑 부품은 열처리 성형 후 강도 상승으로 인해 기계적 트리밍 적용에 제한이 많으므로 비접촉식 가공 방법인 레이저 트리밍 공법을 적용 중이나, 높은 에너지 손실 및 공정 시간 증가로 공정 비용이 높다. 이에 탄소배출 저감을 위해 기존 레이저 트림을 대체할 수 있는 프레스 트림 기술 확보가 필요하며, 다양한 연구 사례를 바탕으로 연구 방향을 공유하고자 한다.

본 연구에서는 핫스탬핑 강판 2종의 대하여, 냉간 프레스 트림 속도가 전단면 품질과 수소취성에 미치는 영향을 확인하였으며, 일부 핫스탬핑 강판의 경우 냉간 프레스 트림으로도 기존 레이저 트리밍 품질 수준과 동등 수준으로 확보 가능함을 확인하였다. 이 후 주요 인자별 시편 단위 평가 및 부품 단위 고속 트리밍 금형 제작을 통한 실물 검증으로 기존 레이저 트리밍 기술과 비교하여 냉간 프레스 트림 기술의 가능성을 평가하였다.

**Keywords:** Cold Press Trimming, Trimming, Hot Stamped Steel, Shear-cutting mechanism

---

1. 현대자동차 연구개발본부, 책임연구원

2. 현대제철 연구개발본부, 책임연구원

# 교신저자의 소속, 부서, 직위, E-mail: 현대자동차 연구개발본부, 차체재료개발팀, 책임연구원,  
sgson@hyundai.com

## 미세조직 제어 기반 핫스탬핑 냉간트림 적용연구

박재명<sup>1</sup> · 손성국<sup>2</sup> · 박계정<sup>1</sup> · 손경주<sup>1</sup> · 윤승채<sup>1#</sup>

### Microstructure-Controlled Press-Hardened Steel for Mechanical Trimming

J. M. Park, S. G. Son, K. J. Park, K. J. Sohn, S.C. Yoon

#### Abstract

Press-hardened steel (PHS) has been widely adopted in the automotive industry due to its effectiveness in achieving both lightweight vehicle structures and high crash safety performance. However, the laser trimming process commonly used for PHS components suffers from low productivity, low energy efficiency, and significant carbon emissions during processing. Mechanical trimming offers higher productivity, but its application has traditionally been restricted by the risk of hydrogen-induced delayed fracture. Therefore, the development of technologies enabling the broader application of mechanical trimming is essential for ensuring the sustainable competitiveness of PHS.

In this study, relief patterns (RPs) were introduced on the die surface to control the cooling rate and induce localized softening, thereby improving shear quality and enhancing resistance to delayed fracture. Furthermore, the proposed approach was applied to newly developed PHS grades with superior delayed fracture resistance, confirming the practical feasibility and scalability of mechanical trimming in PHS applications.

**Keywords:** Press-hardened steel (PHS), Mechanical trimming, Delayed fracture resistance, Relief patterns, Localized softening

---

1. 현대제철 연구개발본부, 차체응용기술팀

2. 현대자동차 남양연구소, 차체재료개발팀

# 현대제철 연구개발본부, 차체응용기술팀, 책임연구원, E-mail: scyoon@hyundai-steel.com

# 열간 성형된 HPF강의 기계적 전단 평가에 대한 예비 연구 소개

손현성<sup>1#</sup>· 최종원<sup>2</sup>· 김홍기<sup>2</sup>· 남재복<sup>3</sup>

## Introduction to a Preliminary Study on the Mechanical Trimming Evaluation of Hot-formed HPF Steel

H. S. Son, J. W. Choi, H. G. Kim, J. B. Nam

### Abstract

자동차 산업에서는 지구 환경 보호를 위한 CO<sub>2</sub> 배출 억제와 차량 충돌 시 운전자의 안전성 확보를 위해 경량화가 필수적이다. 일정한 품질 및 원가 측면을 고려하면, 자동차 업체는 초고 강도강(UHSS, Ultra High Strength Steel) 적용을 우선적으로 고려할 수밖에 없다. 대량 부품 양산에 적용하기 위해서는 레이저 절단 또는 금형 전단 작업과 같은 후속 가공이 필요한데, 산업 현장에서는 금형 마모로 인한 비용 발생이나 수소와 높은 인장 응력이 동시에 발생할 때 일어나는 지연 파괴(Delayed Fracture)와 같은 안전 문제가 우려되어 레이저 가공을 선호하는 것이 일반적이다. 이로 인해 금형 전단 가공에 관한 연구 자료는 많지 않고, 공론화되지 않는 분위기도 현실이다. 본 논문에서는 초고강도강 중 열간 성형된 HPF(Hot Press Forming)강을 중심으로 전단 작업 시 생성되는 전단면 특성을 분석하기 위한 실험적 방법을 소개하고, 아울러 금형 재질 및 클리어런스 등과 같은 실험 변수에 대한 결과도 논의하고자 한다.

**Keywords:** Ultra High Strength Steel, Delayed Fracture, Hot Press Forming

---

1. POSCO 기술연구원 미래철강연구소 차세대철강연구센터 수석연구원

2. POSCO 기술연구원 철강솔루션연구소 성형연구그룹 수석연구원

3. POSTECH 친환경소재대학원 퇴임교수

# POSCO 기술연구원 미래철강연구소 차세대철강연구센터 수석연구원, E-mail: hsson@posco.com

## 핫스탬핑 강판의 전단 특성 평가

송재선<sup>1, #</sup>· 윤국태<sup>2</sup>· 전강국<sup>3</sup>· 강의수<sup>4</sup>· 허재영<sup>5</sup>

## Evaluation of shear properties of hot-stamping sheet

J. S. Song, K. T. Youn, K. K. Jeon, I. S. Kang, J. Y. Heo

### Abstract

차체 경량화와 동시에 충동 안전성을 향상시켜야 하는 자동차에 중량 대비 강도가 뛰어난 초고강도강판(ultra high strength steel; UHSS)을 적용한 차체의 제조가 증가하고 있다. 초고강도의 강판은 낮은 연신율, 높은 강도로 인해 성형성이 낮을 뿐만 아니라 큰 스프링백, 높은 성형하중 및 금형의 내구성 저하 등의 문제점을 야기시키지만 핫스탬핑(hot stamping) 공정은 이러한 성형의 문제점을 해결할 수 있어 고강도가 요구되는 차량 부품들의 생산에 많이 적용되고 있으며, 적용 범위 또한 확대되고 있다. 핫스탬핑 공법으로 성형된 부품 형상의 불필요한 부분을 제거하는 트림 공정에 있어서 냉간 트리밍(cold trimming or press trimming) 시 금형의 마모, 치핑 등의 문제로 현재 대부분의 핫스탬핑 부품은 레이저(laser)를 이용하여 트림하고 있다. 그러나, 레이저 트림의 낮은 생산성 및 높은 생산 단가의 개선과 고강도강판 부품의 제조공정상 발생되는 탄소배출량 저감이 요구되고 있는 실정이다. 현재의 레이저 트리밍을 대체하기 위한 기술로 냉간 트리밍 공법은 지속적으로 검토되었으나, 냉간 트리밍 시 발생되는 버(burr), 자연 파단, 금형 마모/파손 등의 한계 극복과 수소취성과 전단 품질에 대한 솔루션의 확보가 필요 하여 본 연구에서는 냉간 트리밍 공정에서의 공정 조건 변화에 따른 전단 시험과 조건별 전단면과 금형의 분석을 통하여 전단면의 품질, 금형의 마모 등을 평가하고 공정 조건의 유효성을 검증하였으며, 전단면 품질을 평가하기 위한 시험 방법을 정례화 하였다.

**Keywords:** Hot Stamping, Cold Trimming, Shear Surface, Die Wear

---

1. 대구기계부품연구원, 소재부품연구본부, 책임연구원
2. 대구기계부품연구원, 소재부품연구본부, 본부장
3. 대구기계부품연구원, 기업성장지원본부, 선임연구원
4. 대구기계부품연구원, 첨단공구·가공사업단, 본부장
5. 대구기계부품연구원, 첨단공구·가공사업단, 선임연구원

# 대구기계부품연구원, 소재부품연구본부, 책임연구원, E-mail: jssong@dmi.re.kr

# 핫스탬핑 기계적 트림 적용에 따른 수소취성 거동 예측

윤승재<sup>1,#</sup>· 박재명<sup>1</sup>· 박계정<sup>1</sup>· 손경주<sup>1</sup>· 손성국<sup>2</sup>

## Prediction of hydrogen embrittlement behavior in hot-stamped parts for mechanical trimming applications

S. C. Yoon, J. M. Park, K. J. Park, K. J. Sohn, S. G. Son

### Abstract

The adoption of hot-stamped body components has increased rapidly to achieve lightweighting and enhanced crash safety, and in electric vehicles this need has been further amplified by battery protection requirements and the added battery mass. The hot-stamping process is composed of heating-forming and cooling-trimming stages, and trimming is presently performed predominantly by laser cutting. However, laser trimming has been associated with high equipment and energy costs as well as a significant cycle-time burden that can cause bottlenecks; accordingly, the feasibility of mechanical trimming was systematically evaluated from the perspective of hydrogen embrittlement. A finite element method-based pre-assessment procedure for hydrogen embrittlement was established for the hot-stamping process (heating-forming/cooling-trimming), in which cut-edge damage and stress triaxiality induced by mechanical trimming were considered. By varying hot-stamping process variables, the spatial distributions of local hydrogen concentration, maximum principal stress, and a damage index were mapped so that potential initiation sites and high-risk regions could be identified, and process sensitivity could be analyzed. The results demonstrated that the effects of process adjustments in the mechanical trimming line can be evaluated in advance and are intended to support integrated design-process decision-making that secures cost, energy, and cycle-time advantages over laser trimming for EV body components.

**Keywords:** Hot Stamping, Mechanical Trimming, Finite Element Method, Hydrogen Embrittlement

---

1. 현대제철 연구개발본부, 차체응용기술팀

2. 현대자동차 남양연구소, 차체재료개발팀

# 현대제철 연구개발본부, 차체응용기술팀, 책임연구원, E-mail: scyoon@hyundai-steel.com

# 금속 적층제조 기술을 활용한 금형 코어 적용 및 성능 향상 사례

최장욱<sup>1</sup>· 전현환<sup>2</sup>· 이선화<sup>3</sup>

## Application of Metal Additive Manufacturing Technology to Die Cores for Performance Improvement

J. W. Choi, H. H. Jeon, S. H. Lee

### Abstract

The demand for extended tool life and improved stamping performance in automotive mass production has driven the exploration of metal additive manufacturing technologies for die repair and enhancement. Conventional press dies often experience localized wear or damage, resulting in costly downtime and frequent tool replacement. In this study, a directed energy deposition (DED) process was applied to locally rebuild damaged areas of die cores after machining the worn surfaces. By depositing a compatible metal alloy onto the processed regions, the repaired dies were restored to their original geometry while benefiting from enhanced material properties introduced during the additive process. The DED-repaired die cores exhibited a significantly longer tool life compared to conventional repair methods, and the stamped parts demonstrated improved quality, meeting the required standards. These results highlight the potential of DED as a sustainable solution for extending die service life and reducing production costs. This work confirms that localized additive repair of damaged press dies provides both economic and technological benefits. These findings support the broader application of metal additive manufacturing in high-volume automotive production.

**Keywords:** Metal Additive Manufacturing, Directed Energy Deposition, Die Repair, Tool Life Extension

---

1. 아진산업(주) 기술연구소, 팀장, cjh@wamc.co.kr

2. 아진산업(주) 기술연구소, 과장, final07@wamc.co.kr

3. 아진산업(주) 기술연구소, 대리, leesh7809@wamc.co.kr

## 7. 일반 구두 발표 / 특별 세션

미세구조 및 응용  
표면 및 인터페이스 / 플라스틱가공  
복합재료가공

International Session  
(KIMS)

(제 4 발표회장)

## 열처리 제어에 따른 미세조직 변화가 비조질강의 냉간 단조성에 미치는 영향

안민호<sup>1</sup> 이영선<sup>2</sup> 박성혁<sup>3</sup> 우영윤<sup>1,#</sup>

### Effect of Microstructural Changes Induced by Heat Treatment Control on the Cold Forgeability of Non-Heat-Treatment Steel

M.H. An, Y.S. Lee, S.H. Park, Y.Y. Woo

#### Abstract

지속적으로 심화되는 지구 온난화에 대응하기 위한 탄소배출 저감 방안 중 하나로 냉간 단조 품생산시 열처리 공정 단순화에 대한 필요성이 증가하고 있고, 그에 따른 방안 중 하나인 비조 질강에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 열처리는 구상화 어닐링 된 소재를 냉간 단조 후 조질 처리(Quenching&Tempering)하여 완제품을 생산하였는데 반해, 비조질강은 냉간 단조 이후 조질처리를 생략함으로써 효율적인 완제품 생산이 가능하기에 탄소 배출 저감과 경제 성 향상에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 0.25C-1.5Si-1.5Mn 조성의 다상조직강을 대상으로 딜라토미트리 실험을 통해 단상역 및 이상역 어닐링 조건을 도출하였으며, 이를 바탕으로 등온 변태 열처리를 수행하였다. 열처리 조건에 따라 소재의 단조성을 평가하기 위해 각 열처리 시 편에 대해 단축 압축 시험을 실시하여 단조성을 비교 분석하였다. 또한, 열처리에 따른 미세조 직 변화를 분석하기 위해 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM), 전자후방산란회절(EBSD) 분석을 통해 기계적 특성과 미세조직 간의 상관관계를 확인하였다.

**Keywords:** Non-heat-treatment-steel, Multiphase-steel, Heat treatment, Microstructure

---

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부, 연구원
2. 한국재료연구원 극한소재 실증연구기반조성 사업단, 책임 연구원
3. 경북대학교 첨단소재공학부, 교수

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

# 전기화학적으로 유기된 마르텐사이트 상변태 메커니즘의 규명

채준영<sup>1</sup>, 이귀형<sup>1</sup>, 이혁재<sup>1</sup>, 조영근<sup>2</sup>, 정다물<sup>3</sup>, 권영균<sup>4</sup>, 정인호<sup>5</sup>, 김성준<sup>6</sup>, 한홍남<sup>#</sup>

## Elucidation of the Mechanism Governing Electrochemically-Induced Martensitic Transformation

J. Chae, G. Lee, H. Lee, Y. Cho, D. Jeong, Y.-K. Kwon, I.-H. Jung, S.-J. Kim, H. N. Han

### Abstract

준안정 오스테나이트계 스테인리스강에서 양극 전해연마(AEP)와 음극 수소 차징(CHC) 과정 모두에서 마르텐사이트 변태가 관찰되었다.

AEP의 경우, EBSD, XRD, 페라이트스코프 분석 결과 마르텐사이트 변태가 시편 표면에 국한되어 발생함이 확인되었다. 변태 기작을 규명하기 위해 COMSOL Multiphysics 시뮬레이션을 통해 전압 조건 및 표면 요철의 기하학적 특성을 달리하며 전하 분포를 계산하였다. 계산된 전하량을 바탕으로, 격자 내 유입된 전하가 기계적인 특성 변화에 미치는 영향을 파악하는 제1 원리 계산을 수행하였다. 그 결과, 시편 표면에서의 전하 축적으로 인해 격자 내부에 상당한 크기의 응력(>390 MPa)이 유발되어, 전해연마 중 준안정 오스테나이트계 스테인리스강 표면에 응력 유기 마르텐사이트 변태(Mechanically induced Martensitic Transformation, MIMT)가 발생할 수 있다는 것을 규명하였다.

한편, CHC의 경우 임계 전류 밀도와 임계 시간을 초과하는 조건에서 장입된 수소에 의해 마르텐사이트 변태가 발생하는 것이 EBSD 분석을 통해 관찰되었다. 수소의 전하 상태를 파악하기 위해, CHC 중 외부 자기장을 도입하여 로렌츠 힘을 발생시키고 이를 통해 수소 종의 확산 거동을 선택적으로 제어하는 실험을 고안하였다. 경도 분포와 EBSD 분석 결과, 로렌츠 힘 방향과 일치하는 경도 및 마르텐사이트 분율의 구배가 확인되었으며, 이는 확산 수소가 양이온 ( $H^+$ )으로 존재하며 로렌츠 힘과 정전기적으로 상호작용함을 의미한다. FEM-DFT 연계 해석 결과,  $H^+$ 는 단순한 침입형 부피 팽창을 넘어 전하 불균형 효과로 국소 응력을 크게 증대시켰으며,  $H^+$  분율이 약 53%를 초과할 경우 MIMT 임계 에너지(623 J/mol)를 상회함을 확인하였다. 이러한 효과는 FCC 격자의 옥타헤드랄 간극에 자리한  $H^+$ 가 유효 포텐셜을 변화시켜 평형 원자 거리를 조정하기 때문에 발생한다. 종합하면, 본 연구는 금속 내 수소가 중성 원자로만 확산한다는 고전적 통념을 넘어,  $H^+$ 가 전기-기계적 상호작용을 통해 상변태를 촉진한다는 새로운 관점을 제시한다.

**Keywords:** Austenite-to-martensite phase transformation, Hydrogen diffusion, First-principles calculations, Finite element modeling, Transformation kinetics

---

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생
2. 포항공과대학교 친환경소대학원, 대학원생
3. 경희대학교 물리학과, 대학원생
4. 경희대학교 물리학과, 교수
5. 서울대학교 재료공학부, 교수
6. 포항공과대학교 친환경소대학원, 교수

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

# 배터리용 파우치 필름 접합부의 고온다습 환경에서의 열화 및 T-peel 거동 해석

홍승효<sup>1</sup>· 이형립<sup>2</sup>· 이명규<sup>#</sup>

## Hydrothermal degradation and T-peel performance of sealing interfaces in battery pouch films

S. H. Hong<sup>1</sup>, H. L. Lee<sup>2</sup>, W. J. Jeong<sup>3</sup>, D. W. Kim<sup>4</sup>, M. G. Lee<sup>#</sup>

### Abstract

배터리용 파우치 필름은 일반적으로 PET-Al-PP의 고분자-금속 다층 구조로 이루어지며 내부 PP층 간의 열접합은 기밀성 및 기계적 신뢰성 확보에 중요하다. 외부 환경 변화에 따른 열과 습도 노출을 고려할 때, 파우치 필름의 열접합부의 안정성 평가는 필수적이다. 본 연구의 목적은 파우치 필름의 열접합부를 대상으로 고온다습 환경에서의 열화가 T-peel 거동 및 계면 접합 강도에 미치는 영향을 정량 평가하고 이를 Cohesive Zone Model(CZM)을 적용하여 모델 상수를 결정하는 데 있다. 이를 위해 초기 상태의 시편과 고온다습 조건에서 인위적으로 열화를 유도한 파우치 필름 열접합 시편을 준비하여 T-peel 시험을 진행하고 하중-변위 곡선을 통해 접합 특성 변화를 측정하였다. 실험결과의 해석을 위해 CZM 기반 유한요소해석을 진행했으며, 실험 데이터와의 역해석을 통해 열화 전후 각각의 CZM 인자들로 획득하였다. 해석 결과 열화에 따른 접합 특성 변화가 T-peel 거동에 반영되었으며 역해석을 통해 획득한 CZM 파라미터는 각 조건의 실험결과를 성공적으로 재현하였다. 본 연구를 통해 파우치 필름 열접합 부의 T-peel 거동 변화를 정량적으로 재현할 수 있음을 확인하였다.

**Keywords:** Pouch films, Cohesive Zone Model, T-peel test, Hydrothermal aging, Adhesion

---

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

2. 서울대학교 재료공학부, 연구교수

# 서울대학교, 재료공학부, 교수, E-mail: myounglee@snu.ac.kr

# 초음파 나노표면개질 공정(UNSM)으로 유도된 잔류응력 크기 변화에 따른 인장 거동 분석

최언준<sup>1,2</sup> · 김정기<sup>2</sup> · 홍종화<sup>1, #</sup> · 윤은유<sup>1, ##</sup>

## Analysis of Tensile Behavior with Variations of Residual Stress Magnitude Induced by UNSM

E. J. Choi, J. G. Kim, J.-H. Hong, E. Y. Yoon

### Abstract

표면 강소성(Surface Severe Plastic Deformation, SSPD) 공정은 표면에 미세한 나노 결정립 조직으로 개질함과 동시에 재료의 표면 경도, 항복 강도와 피로 수명과 같은 기계적 특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 일부 연구에서는 표면 강소성 공정 후 항복 강도가 오히려 감소하는 상반된 결과가 보고되었으며, 이는 표면에 유도된 압축 잔류응력과 동시에 내부에 형성되는 인장 잔류응력의 상호작용에 기인하는 것으로 해석된다. 이러한 선행 연구는 표면 강소성 공정으로 인한 재료의 물성 변화 말고도 그로 인하여 생기는 잔류응력 분포 역시 인장 거동에 중요한 영향을 미친다는 점을 보여준다. 본 연구에서는 표면 강소성 공정 중 하나인 초음파 나노표면개질(Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, UNSM) 공정을 적용하여 Nimonic 80A 합금의 인장 거동을 분석하고자 한다. 특히, 선행 실험 및 문헌 검토 결과 초음파 나노표면개질 공정의 공정 변수 중 하중이 표면 경화층의 형성과 잔류응력 분포에 가장 큰 영향을 주는 것으로 확인되었으므로, 본 연구에서는 하중 조건에 따른 잔류응력 분포에 대한 영향을 중심으로 항복 거동에 대한 차이를 분석하였다. 이를 통해 초음파 나노표면개질 공정에서 하중 제어에 따른 잔류응력 분포와 잔류응력 제어가 인장 거동에 미치는 영향의 상관성을 규명하고자 한다.

**Keywords:** Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM), Surface Severe Plastic Deformation (SSPD), Residual Stress, Nimonic 80A

---

1. 한국재료연구원 재료공정연구본부

2. 경상국립대학교

# 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 선임연구원, Email:jhong@kims.re.kr

## 한국재료연구원, 재료공정연구본부, 책임연구원, Email:eyyoon@kims.re.kr

# 인서트 사출성형 기반 전극 내재형 미세유체 칩 제작 기술

유영은<sup>1#</sup>, 정연정<sup>2</sup>, 우상원<sup>3</sup>, 진재호<sup>4</sup>, 신경식<sup>5</sup>

## Fabrication of Embedded-Electrode Microfluidic Chips via Insert Injection Molding

Yeong-Eun Yoo<sup>1,\*</sup>, Yeun-Jung Jung<sup>2</sup>, Sang-Won Woo<sup>3</sup>, Jae-Ho Jin<sup>4</sup>, Kyeong-Sik Shin<sup>5</sup>

### Abstract

본 연구에서는 혈액 등 소량의 시료 및 전기화학적 반응을 이용하여 실용적인 질병 진단을 위하여, 전극이 내재된 양산 가능한 플라스틱 미세유체 칩 설계 및 제작 기술을 개발하였다. 미세유체 칩과 같이 액체 시료 적용이 필요한 경우, PCB 기반 전자 소자는 미세유로에 대한 밀폐성 등 구조 및 사용성, 경제성 등 실용성 측면에서의 한계를 가진다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 PCB 없이 전극이 내부에 일체형으로 내재화된 미세유체 칩 구조를 설계하고, 이를 전극 인서트 사출성형을 위한 금형 및 공정 기술에 대한 연구를 수행하였다.

또한, 미세유체 칩에 내재된 전극과 바이오센서의 효율적인 전기적 연결 및 미세유체 칩의 패키징을 위한 캔틸레버 형태의 전극 및 전극/센서 기계적 연결, 미세유체 칩 패키징에 대한 주요 설계 변수, 제작을 위한 금형 및 성형 공정 주요 변수를 도출하고 이에 의한 전기적 연결 및 미세유로 밀폐 특성을 분석하고 최적화를 수행하였다.

제작된 미세유체 칩을 이용한 시료의 유동 및 바이오마커 검출 특성에 대한 분석을 통하여 사출성형 기반 전극 내재형 미세유체 칩의 양산이 가능한 진단 플랫폼으로서의 가능성을 확인하였다.

**Keywords:** microfluidic chip, electrode embedded, injection molding, diagnostic, scalable process

---

1.# 한국기계연구원/UST, 나노리소그래피연구센터/첨단바이오융합, 책임연구원/교수, yeyoo@kimm.re.kr

2. 한국기계연구원/UST, 나노리소그래피연구센터/첨단바이오융합, 학생연구원/박사과정

3. 우영솔루션, 대표이사

4. (주)네오나노텍, 전임연구원

5. (주) 바이오소닉스, 대표이사

# 이상역 소둔 열처리 온도가 다상 조직강의 미세조직과 기계적특성 변화에 미치는 영향

정창곤<sup>1</sup>· T.T.T. Trang<sup>1</sup>· 우영윤<sup>2</sup>· 윤은유<sup>2</sup>· 이영선<sup>3</sup>· 허윤욱<sup>#</sup>

## Exploring the impact of intercritical annealing temperature on microstructural evolution and mechanical performance in low alloy multiphase TRIP-assisted steels

C.-G. Jeong<sup>1</sup>, T.T.T. Trang<sup>1</sup>, Y. Y. Woo<sup>2</sup>, E. Y. Yoon<sup>2</sup>, Y. Lee<sup>3</sup>, Y.-U. Heo<sup>\*</sup>

### Abstract

Understanding the role of the constituent phase on mechanical properties is the key strategy for achieving advanced mechanical properties in multiphase TRIP-assisted steels. This work unravels the opposing role of ferrite on tensile ductility and impact toughness in the constituent phase fraction-controlled multiphase TRIP-assisted steel. The specimens were subjected to three different intercritical annealing (IA) temperatures (775 °C, 800 °C, and 825 °C) for 20 minutes, followed by continuous bainitic isothermal transformation (BIT) at 400 °C for 30 minutes. With an increase in the IA temperature, the bainite fraction and the stability of retained austenite increased, accompanied by a decrease in the ferrite fraction. In-situ EBSD observation revealed the crack initiation at the deformation-induced martensite/ferrite interface. The strain localization in ferrite, facilitated by the transformation of neighboring austenite to martensite, promoted crack initiation during the tensile test. The tensile elongation decreased from about 28 % to 17 % due to the lower strain partitioning in ferrite originating in the reduced ferrite fraction and TRIP amounts as the IA temperature increased. However, the refined grain size and the reduced ferrite fraction resulting from a higher IA treatment improve impact toughness by approximately 60% at room temperature. This study on the imbalance between tensile elongation and impact toughness sheds light on the microstructure design for advanced mechanical properties in multiphase TRIP-assisted steels.

**Keywords:** Multiphase TRIP-assisted Steels; Phase Transformation; Intercritical Annealing Temperature; Ductility; Impact Toughness

---

1. 포항공과대학교 친환경소재대학원, 대학원생/졸업생
2. 한국재료연구원 재료공정연구본부, 선임/책임연구원
3. 한국재료연구원 극한소재 실증연구 기반조성 사업추진단, 책임연구원

# 포항공과대학교 친환경소재대학원, 교수, E-mail: yunuk01@postech.ac.kr

# CFRP 부품 제작의 시뮬레이션 기반 후변형 예측

서준영<sup>1</sup>· 류재창<sup>2</sup>· 이찬주<sup>3</sup>· 신도훈<sup>4</sup>· 고대철<sup>#</sup>

## Prediction of process induced deformation for manufacturing of CFRP part

J. Y. Seo, J. C. Ryu, C. J. Lee, D. H. Shin, D. C. Ko

### Abstract

Recently, Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic (CFRTP) is investigated to produce components in the aerospace industry. Generally, CFRTP components were manufactured using autoclave and resin transfer molding(RTM) process. However, these methods are not suitable for mass production. Stamping process has emerged as an alternative process to satisfy mass production. In addition, it is important to satisfy dimensional accuracy of composite part. In this study, Finite Element (FE) simulation was conducted to predict spring-in of CFRTP part manufactured by stamping considering whole manufacturing processes. First, FE simulation of thermal expansion was performed to obtain shape of mold after heating process. Second, forming simulation of CFRTP part was conducted using expanded mold. Subsequently, FE simulation of cooling process was performed to evaluate the spring-in of CFRTP part. Finally, a CFRTP part was manufactured and compared with FE results.

**Keywords:** Spring-in, Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP), Finite Element Method

### Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (RS-2024-00431591, Development of Technology for Integration of 2.5m-class Cargo Door Composite Structure for Aircraft) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)

---

1. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과
2. 부산대학교 부품소재산학협력연구소
3. 한국생산기술연구원 대경본부 모빌리티 부품그룹
4. 대한항공, 부장

# 부산대학교 대학원 나노메카트로닉스공학과, 교수, Email: dcko@pusan.ac.kr

# 열가소성 복합재의 가압 전도 용접 공정의 유한요소해석

채기현<sup>1</sup>· 류재창<sup>1</sup>· 이찬주<sup>2</sup>· 신도훈<sup>3</sup>· 고대철#

## Finite Element Analysis of Press Conduction Welding of Thermoplastic Composite

K. H. Chae, J. C. Ryu, C. J. Lee, D. H. Shin, D. C. Ko

### Abstract

There is a growing demand in joining techniques for carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRTP) as an alternative to mechanical fastening and adhesive bonding. Among joining methods, press conduction welding offers advantages such as high bond strength and good reproducibility. However, the heating and pressing involved in this process can induce process-induced deformation (PID), which may result in shape distortion and increased manufacturing costs. In this study, a sequentially coupled thermo-mechanical analysis of press conduction welding for CFRTP parts was performed using Abaqus. Temperature-dependent material properties of CFRTP were applied in the simulation, and the results were compared with experimental data to validate the accuracy of the analysis. Based on the simulation results, the causes of PID were identified, and the influence of cooling conditions, such as demolding temperature and cooling rate, on PID was evaluated. In addition, effect of CFRPT crystallization on press conduction welding was investigated to identify its influence on deformation of CFRPT part.

**Keywords:** Finite Element Analysis (FEA), Press Conduction Welding, Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic (CFRTP), Joining, Process-Induced Deformation (PID), Crystallization

### Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (RS-2024-00431591, Development of Technology for Integration of 2.5m-class Cargo Door Composite Structure for Aircraft) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)

---

1. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과
2. 한국생산기술연구원 대경본부 모빌리티 부품그룹
3. 대한항공 R&D 센터

# 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 교수, Email: dcko@pusan.ac.kr

# CF/PPS 성형 중 냉각 과정 하중 변화가 표면 품질에 미치는 영향에 관한 연구

백종훈<sup>1,3</sup>·소태영<sup>2</sup>·전용준<sup>1</sup>·최현석<sup>1</sup>·김동언<sup>1,#</sup>·이현택<sup>3,#</sup>

## Effect of Load Variation During Cooling on Surface Quality of CF/PPS Laminates

J. H. Baek, T. Y. So, Y. J. Jeon, H. S. Choi, D. E. Kim, H. T. Lee

### Abstract

탄소섬유 강화 열가소성 복합재(Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic, CF RTP)는 최근 경량성과 우수한 기계적 성질로 인해 다양한 산업 분야에서 활용이 확대되고 있다. 그러나 성형 중 냉각 시 발생하는 결정화 및 고화 거동에 의해 라미네이트의 두께 방향으로 수축이 발생할 수 있으며, 이는 표면 불량, 섬유 노출 등의 문제를 초래할 수 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해 사출 성형의 보압 개념을 이용하여 냉각 공정 중 수축 보상을 위한 추가 하중을 통해 개선하고자 한다. 본 연구에서는 CF/PPS의 수축 과정을 결정화 시작 전, 중, 후 3가지 구간으로 나누어 어느 구간에서 하중 조건 조절이 가장 영향력 있는지 분석하고자 한다. 성형 공정은 300 °C에서 10 bar로 15분간 유지하였으며, [0/90]s 적층 형태로 제작하였다. 냉각 단계에서는 초기 하중을 40 bar로 가한 후, 특정 온도에서 가열판과 접촉만 유지될 수 있도록 0.1 bar로 감소시켰다. 하중 해제 온도는 프리프레그 시차주사열량분석(Differential Scanning Calorimetry, DSC) 결과를 바탕으로 결정화 시작( $T_c$  onset), 결정화 종료( $T_c$  end), 유리 전이 온도( $T_g$ )를 기준으로 3가지 구간(300 °C~ $T_c$  onset,  $T_c$  onset~ $T_c$  end,  $T_c$  end~ $T_g$ )으로 설정하였다. 각 조건에서의 표면 품질 변화는 이미지 프로세싱(Image Processing) 기법을 활용하여 정량적으로 분석하였으며, DSC 분석을 통해 열적 특성 변화를 비교 검토하였다.

**Keywords:** Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic(CFRTP), CF/PPS, Load Variation Temperature, Image Processing, Surface Quality

---

1. 한국생산기술연구원 지역산업혁신부문(성장동력), 연구원
2. 한국생산기술연구원 소재공급망연구부문, 연구원
3. 인하대학교 기계공학과, 대학원생

1, # 한국생산기술연구원, 지역산업혁신부문(성장동력), 수석연구원, E-mail: kdu0517@kitech.re.kr  
3, # 인하대학교, 기계공학과, 조교수, E-mail: htlee@inha.ac.kr

## 8. 특별세션

철강·금속 산업 디지털 전환(DX) 심포지엄  
((재)포항금속소재산업진흥원)

DIC 활용기술 심포지엄  
(POSCO)

(제 5 발표회장)

## 철강·금속산업 디지털전환 도입 사례 분석

김대욱<sup>1</sup>· 양해웅<sup>#</sup>

### Analysis of Digital Transformation Adoption Cases in the Steel and Metal Industry

D. W. Kim<sup>1</sup>, H. W. Yang<sup>#</sup>

#### Abstract

대한민국의 철강·금속산업은 자동차, 조선, 건설 등 주요 산업계의 핵심적인 소재를 공급하면서 국가 경제가 크게 성장하였다. 하지만 최근 세계철강산업 경쟁 심화, 중국의 저가 철강재 공급 등의 문제로 성장정체를 겪으며 국내 철강산업은 지속적으로 부진하며 어려움을 겪고 있다. 국내 철강 및 금속 기업의 생산과 수출의 감소 문제를 해결하기 위하여 기존 철강산업의 4차 산업혁명 대응은 필수적이며, 그 중 디지털전환기술을 통한 디지털 제조 혁신으로 생산성 향상, 신산업 창출 등 국내 철강업계의 발전과 경쟁력을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 국내외 주요 철강 기업의 디지털전환 사례를 분석하고 스마트 제조 시스템의 도입, 빅데이터 기반 예측 모델 개발, 사물인터넷(IoT) 기반 실시간 모니터링 시스템 구축 등 다양한 디지털 기술의 도입 사례와 산업현황을 분석하여 국내 철강·금속 산업의 지속가능한 성장을 위한 디지털전환 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Digital Transformation , Steel Industry , Big Data , Digital Twin , IoT

---

1. (재)포항금속소재산업진흥원, 산업지능화연구실, 선임연구원

# (재)포항금속소재산업진흥원 산업지능화연구실, 실장, E-mail: hwyang@pomia.or.kr

# 머신러닝 기반 알루미늄 합금의 기계적 특성 예측 및 미세조직 검출 자동화

배영훈<sup>1</sup>, 이용환<sup>#</sup>

## Machine Learning Approach for Predicting Mechanical Properties and Automated Microstructural Characterization of Aluminum Alloys

Y. H. Bae<sup>1</sup>, Y. H. Lee<sup>#</sup>

### Abstract

알루미늄 합금은 대표적인 경량 소재로 항공우주, 자동차, 국방 산업 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 그중 Al-Si-Cu 합금은 우수한 유동성과 기계적 특성으로 인해 주조재로 널리 적용되고 있다. 본 연구에서는 머신러닝 회귀 기법을 활용하여 Al-Si-Cu-xLa 합금의 조성 변화에 따른 기계적 특성을 정량적으로 예측하였다. 합금의 조성은 wavelength-dispersive X-ray fluorescence (WD-XRF, M4 Tornado, Bruker)로 분석하였고, Micro-Vickers 경도 시험을 통해 데이터 셋을 구축하였다. 수집된 데이터를 Gradient Boosting, Random Forest, Extra Trees, XGBoost 등 회귀 알고리즘에 학습시켜 La 함량 변화에 따른 경도 예측 모델을 구현하였다.

또한, 미세조직 분석을 위해 OpenCV 기반 이미지 처리와 PCA를 이용한 형태 분석 기법을 적용하여 석출물의 면적, 직경 등을 정량화 및 선형 교차법(lineal intercept method)을 자동화하여 평균 입도(grain size)를 계산함으로써 기계적 특성과의 상관성을 검증하였다.

**Keywords:** Machine learning, Aluminum alloys, Mechanical property prediction, Microstructure analysis, Automated grain size measurement, Image analysis

---

1. (재)포항금속소재산업진흥원 산업지능화연구실, 연구원

# (재)포항금속소재산업진흥원 산업지능화연구실, 선임연구원, E-mail: yhlee@pomia.or.kr

## No-Code 제조기술을 통한 중소기업 디지털 경쟁력 강화

고은용<sup>1</sup> · 김대욱<sup>#</sup>

### No-Code Manufacturing for Digital Transformation: Case Study of Enterprise Innovation Support

E. Y. Ko<sup>1</sup>, D. W. Kim<sup>#</sup>

#### Abstract

최근 제조업 현장에서는 비용 절감, 생산성 향상, 경쟁력 강화를 위해 디지털 전환의 중요성이 급격히 증가되고 있다. 그러나 중소·중견 기업들은 글로벌 경기 침체와 인력·인프라 부족으로 디지털 전환(DX)에 어려움을 겪고 있으며 이는 제조산업 전반의 경쟁력 약화로 이어지고 있다. 본 사업에서는 스마트 제조 기반 조성을 위해 No-Code 기반 제조혁신 생태계를 구축하여 제조업에서 발생하고 있는 문제를 해결하고자 하였다.

본 사업은 대학-연구소-기업-지자체 협력을 통해 노코드 기반 SW 솔루션을 제조기업에 지원하여 전통제조산업 기업의 디지털 역량 강화를 도모하고 자생적 산업 혁신 생태계를 구축하고자 하였다. 이를 위해 개방형 실험실 및 장비 인프라를 구축하고 실증 테스트베드 운영을 통해 No-Code 솔루션 도입을 지원하였다. 또한 NC Hub를 중심으로 표준공정모델개발, 기술 컨설팅을 추진하여 자생적이고 확산 가능한 No-Code 생태계 조성을 도모하고자 하였다.

본 사업을 통해 지역 제조기업의 디지털 전환을 촉진·실현하고 생산성 향상, 비용 절감과 공정 최적화 등 실질적인 효과를 낼 수 있을 것이라 생각한다. 나아가 본 사업을 통해 AI 내재화 기반을 마련하여 지역 제조업의 지속 가능한 성장에 기여할 것으로 전망된다.

**Keywords:** No-Code Manufacturing, Digital transformation, Smart Manufacturing Platform, NC Hub

---

1. (재)포항금속소재산업진흥원, 산업지능화연구실, 연구원

# (재)포항금속소재산업진흥원 산업지능화연구실, 선임연구원, E-mail: wooki@pomia.or.kr

## 디지털트윈 시범구역(농어촌형) 조성을 통한 지역 문제 해결

이용환<sup>1</sup>· 김경훈<sup>#</sup>

### Solving Regional Issues through the Establishment of a Digital Twin Pilot Zone Rural Type

Y. H. Lee, K. H. Lee

#### Abstract

우리나라 어촌 지역은 인구감소와 고령화로 인한 소멸 위기에 직면하고 있으며, 특히 구룡포항은 어획량 감소, 인구 유출, 기반시설 노후화로 인해 재난·안전 문제와 교통 혼잡이 심화되고 있다. 또한 기후변화에 따른 해양재해와 사회·경제적 침체는 주민 삶의 질 저하로 이어지고 있어 혁신적 대응 방안이 요구된다. 본 사업에서는 구룡포항부터 호미곶 일대를 대상으로 디지털트윈 기반 시범구역을 구축하여 지역 사회문제 해결을 모색하였다. 주요 사업내용으로는 클라우드 기반 통합플랫폼을 바탕으로 침수예측 및 대응 서비스, 보행자 이동 안전 예측 및 경보 서비스, 수산물 유통 정보화 서비스가 구현되었다. 이를 통해 공공데이터와 지역 데이터를 연계·활용하여 실시간 모니터링과 예측 모델을 개발하고, 지자체 및 주민의 정책 활용을 지원하는 체계를 마련하였다. 이 사업은 지역 재난 대응의 골든타임 확보, 교통·물류 최적화, 주민 안전 강화 등의 효과를 기대할 수 있으며, 공공데이터 활용 확산과 해외 수출 가능성을 통해 경제적 파급효과 또한 크다. 농어촌형 디지털트윈 시범구역 조성은 어촌 지역의 지속가능한 성장과 스마트 해양도시 구현을 위한 중요한 발판이 될 것이다.

**Keywords:** Digital Twin, 통합플랫폼, 데이터 연계

---

1. (재)포항금속소재산업진흥원 산업지능화연구실, 선임연구원

# (재)포항금속소재산업진흥원 전략기획팀, 팀장, E-mail: kkh@pomia.or.kr

## 인공지능 모델을 활용한 La 첨가 알루미늄 합금 설계와 실험적 검증

이재원<sup>1</sup>· 허우로<sup>#</sup>

### Design and Experimental Verification of La-Added Aluminum Alloys Using Artificial Intelligence Models

J. W. Lee<sup>1</sup>, U. R. Heo<sup>#</sup>

#### Abstract

The development and design of metallic materials have traditionally relied on experimental methods and theoretical simulations. With the rapid advancement of artificial intelligence (AI), there has been increasing interest in applying machine learning to accelerate material discovery and optimization. In particular, AI has been utilized to investigate the effects of rare-earth element additions in aluminum alloys, aiming to enhance corrosion resistance and mechanical properties. Despite these efforts, experimental validation of AI predictions in metallic materials research remains limited. In this study, we developed and evaluated machine learning algorithms for predicting the hardness of aluminum alloys with lanthanum (La) additions, using a dataset of 1,210 samples comprising nine alloying elements. Four regression models—Adaptive Boosting (ADA), Gradient Boosting (GBR), Random Forest (RF), and Extra Trees (ET)—were employed and comparatively analyzed. Among them, the ET model exhibited the highest predictive accuracy. Experimental verification confirmed that the microstructure was refined and hardness reached a maximum at 0.5 wt.% La, followed by a decrease with further La additions. Importantly, the ET model successfully reproduced this trend, demonstrating both strong predictive capability and experimental consistency. These findings highlight the potential of integrating AI with experimental validation as a powerful approach for the design of advanced metallic materials.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Machine Learning, Aluminum Alloys, Lanthanum

---

1. Pohang Institute of Materials Industry Advancement, Strategic Planning Team, Assistant Research Engineer

# Pohang Institute of Materials Industry Advancement, Industrial Intelligence Department, Assistant Research Engineer  
E-mail: uro@pomia.or.kr

## Seamless 강관 대체형 전기차 현가장치용 ERW 인발 강관 개발 연구

허우로<sup>1</sup>· 김대욱<sup>#</sup>

### Development of ERW Drawn Steel Tubes as a Substitute for Seamless Tubes for Electric Vehicle Suspension Systems

U. R. Heo<sup>1</sup>, D. W. Kim<sup>#</sup>

#### Abstract

전기차는 배터리 무게로 인해 내연기관 차량 대비 전체 중량이 약 10~20% 증가하므로, 전비 향상을 위한 차체 경량화가 필수적이다. 해외 주요 전기차 업체들은 이미 현가장치용 부품에 환봉형태 대신 인발 강관의 하나인 Seamless 강관을 적용하여 개발을 추진하고 있다. 그러나 Seamless 강관은 높은 가격으로 인해 생산 단가가 높다는 한계가 존재한다. 반면, ERW 인발 강관은 우수한 표면 품질과 높은 생산성, 그리고 Seamless 강관 대비 뛰어난 가격 경쟁력을 갖추고 있으나, 용접부의 응력 집중으로 인한 파손 위험과 직진도 및 편차에 따른 제조 공정상의 어려움이 단점으로 지적된다. 이에 본 연구에서는 ERW 인발 강관의 용접부 응력 집중 문제를 해소함으로써, Seamless 강관을 대체할 수 있는 전기차 경량부품용 ERW 인발 강관을 개발하고자 하였다.

**Keywords:** Seamless Tube, ERW, Suspension Component, Weld Stress Concentration

---

1. (재)포항금속소재산업진흥원 산업지능화연구실, 주임연구원

# (재)포항금속소재산업진흥원 산업지능화연구실, 선임연구원, E-mail: wooki@pomia.or.kr

# DIC를 활용한 극박 순 타이타늄 판재의 성형한계선도 결정

봉혁종<sup>1, #</sup>· 김찬양<sup>2</sup>· 민경문<sup>3</sup>· 김경재<sup>3</sup>

## Determining the Forming Limit Diagram of Ultra-Thin CP-Ti Sheet Using Digital Image Correlation

H. J. Bong, C. Kim, K. M. Min, K. J. Kim

### Abstract

This work experimentally established forming-limit diagrams (FLDs) for a 0.10-mm commercially pure titanium (CP-Ti) sheet designed for fuel-cell bipolar plates using the digital image correlation technique. FLDs were measured with the major loading axis aligned either with the rolling direction (RD) or the transverse direction (TD). The sheet shows markedly greater formability when loaded along TD, and the overall FLD topology depends on the loading direction. To rationalize this anisotropic response, crystal-plasticity simulations were conducted to quantify the relative activity of slip and twinning systems. Complementary fractographic observations were used to assess fracture characteristics under the different loading paths and stress states. The combined simulation and experimental evidence clarifies why the investigated CP-Ti sheet possesses direction-dependent formability and explains the distinct FLD shapes obtained for RD and TD.

**Keywords:** Digital Image Correlation, CP-Titanium, Forming Limit Diagram, Fuel Cell, Anisotropy

---

1. 경상국립대학교, 나노신소재공학부, 교수

2. 군산대학교, 신소재공학과, 교수

3. 한국재료연구원

# 경상국립대학교, 나노신소재공학부, 교수

, E-mail: h.bong@gnu.ac.kr

# 멀티 카메라 디지털 영상 상관 기법을 이용한 재료 및 구조물의 물성 측정사례 및 데이터 분석

김태렬<sup>1#</sup>· 김원섭<sup>2</sup>

## Material and Structural Property Measurement and Data Analysis Using Multi-Camera Digital Image Correlation

T.R. Kim, W.S Kim

### Abstract

디지털 영상 상관 기법은 카메라를 사용하여 시편 또는 구조물의 변형 전, 후의 사진을 촬영하여 전체 영역의 변위 및 변형률을 측정하는 기법이며 현재 재료 물성 측정 및 구조물 변형 측정 분야에서 널리 사용되고 있다. DIC 기법의 단점 중 하나는 카메라가 촬영하는 위치의 데이터만 취득할 수 있다는 단점이 있는데 이를 극복하기 위하여 2대 이상의 측정 시스템을 동기화하여 사용하는 멀티 카메라 촬영 기법을 사용한다. 본 연구에서는 2대 또는 이상의 스테레오카메라를 사용하는 방법과 이를 활용하여 재료와 구조물의 변형을 측정하는 사례를 소개하였다.

**Keywords:** Digital Image Correlation, Multi Camera

---

1. 오엠에이콤 유한회사, GOM팀, 차장

2. 오엠에이콤 유한회사, GOM팀, 이사

# 오엠에이콤 유한회사, GOM팀, 차장, E-mail: tykim@omagom.co.kr

## **DIC기법을 이용한 금속판재의 대변형 물성 분석**

김민기<sup>1</sup>· 김용남<sup>#</sup>

### **Analysis of Material Properties in Large Deformation for Sheet Metals Based on DIC Method**

**M. Kim, Y. Kim**

#### **Abstract**

This study is concerned with analysis of material properties of sheet metals for a large strain based on the DIC (Digital image correlation) method. Target sheet metals were determined with a steel sheet of DP980 and an aluminum alloy sheet of Al6000 series. Tensile tests were conducted at a quasi-static state with a specimen shape following the ASTM E8 standard. Loading directions were set to RD, DD, and TD to confirm the anisotropic properties. From the DIC analysis, many stress-strain curves were extracted from an apparent one, which was directly obtained from the tensile test applying the conventional method. This method for local analysis leads to getting material properties in large deformation to overcome the limitation that the stress-strain curve can be obtained for a strain corresponding to the ultimate tensile strength (UTS) with the conventional method. Detailed identification procedure was proposed to acquire reliable material properties especially for a large strain considering the anisotropy in sheet metals by conducting simple tensile tests.

**Keywords:** Digital Image Correlation, Sheet Metal, Large Strain, Local Analysis, Stress-Strain Curve

#### **Acknowledgement**

This study was supported by the funding grant by the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) (No. KITECH JE-25-0006).

---

1. 한국생산기술연구원, 유연생산연구부문, 선임연구원

# 한국재료연구원, 재료분석센터, 선임연구원, E-mail: kimyn@kims.re.kr

# 멀티 DIC기법을 이용한 철강재 HER 시험편의 표면 변형 측정 방법

최재덕<sup>1</sup>· 오경석<sup>1</sup>· 김지민<sup>1</sup>· 임지호<sup>1</sup>

## Surface strain measurement method for steel sheet HER test specimens using Multi DIC technique

J. D. Choi, K. S. Oh, J. M. Kim, J. H. Lim

### Abstract

HER 시험은 시험편 중앙에 직경 10 mm의 Hole을 다양한 방식(기계가공, 금형가공)으로 타공한 후, Hole 주변에 압력을 가하고 편치를 상승시켜 Hole 옆지에 균열이 발생하는 시점에서 정지한다. 이후 Hole의 최종 직경을 측정하여 강종 간 옛지파단성을 평가한다. 그러나 작업자 숙련도에 균열감지성이 상이하여, 반복 실험 시 최종 균열시점 Hole 크기에 편차가 발생하는 문제가 있다. 방사형 그리드를 시험편 표면에 마킹하여 변형량을 측정하고 공칭 변형율을 계산하였으나, 그리드 마킹의 센터링 편심 문제, 파단 이후 측정 시 균열 길이 제거의 부정확, 변형률 구배 측정에 따른 시간 소요 등의 한계가 존재한다. 기존 DIC 기반 측정법은 Hole 균열 발생 시 표면의 급격한 각도 변화로 카메라 시야에서 벗어나 정확한 변형율을 측정이 어려웠다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자, 시험편 표면의 급격한 각도 변화에 대응할 수 있도록 다수의 DIC 시스템을 적절한 위치에 설치하는 멀티 DIC 측정법을 제안하였다. 정면 DIC 시스템은 Hole의 크기 및 초기 이미지를, 경사 DIC 시스템은 균열 발생 시점의 표면 변형율을 측정하며, 각 시스템의 이미지 데이터를 매칭하여 분석하였다. 시험은 직경 10 mm 및 30 mm Hole을 가진 철강재를 이용하였다. 부품정적굽힘시험기로 Hole 시험편에 하중을 부여하였다. 2개 이상의 3차원 DIC 시스템을 적용하여 표면 변형율을 측정하였고, Hole 직경에 따른 최적 카메라 해상도, 다수 DIC 시스템의 매칭 방법, 측정된 이미지의 ARAMIS 분석법 등을 도출하였다. 제안한 멀티 DIC 측정법을 적용한 결과 HER 반복 시험 시 Hole 균열시점의 크기 편차가 기준 대비 감소하였으며, 철강재 표면 변형율과 Hole 균열 발생 시점의 연관성을 확인할 수 있었다. 작업자의 주관이 반영된 측정의 한계를 극복하고, 변형률 구배의 측정 시간을 단축할 수 있었다.

**Keywords:** Digital Image Correlation(DIC), Steel sheet, Hole expansion ratio(HER), Fracture strain

## DIC를 이용한 자동차강의 소부 후 파단물성 평가

임지호<sup>1#</sup> · 이해아<sup>1</sup> · 최지식<sup>1</sup>

### Evaluation of fracture properties of automotive steels after baking using DIC

Jiho Lim, Haea Lee, Jisik Choi

#### Abstract

자동차강은 부품으로 성형하고 도장공정을 거치는데, 일반적으로 성형 시 소성 변형이 발생한 부위의 소재강도가 증가한다. 자동차 설계 시 충돌성능을 CAE로 평가하기 때문에 해석의 정확도를 높이기 위하여 이러한 소부경화 특성을 해석물성으로 고려할 필요가 있다. 특히 경량화를 위하여 모재 파단 가능성이 큰 AHSS를 많이 사용하는 추세에서 정확한 소부 후 파단특성의 중요하다.

본 논문은 DIC를 이용하여 자동차강의 소부 후 파단물성을 평가하였다. 넥킹 이후 가공경화 선도를 측정하기 위하여 로드셀에서 측정한 하중과 DIC에서 측정한 변형률로 계산한 하중이 일치하도록 가공경화선도를 계산하는 DIC inverse법을 적용하였다. UHSS는 예변형이 수 % 이상 일 경우 소부 후 인장시험에서 전단밴드 파단이 발생하여 가공경화선도를 구할 수 없는데, DIC inverse법은 전단밴드 파단의 경우에도 가공경화선도를 구할 수 있다. 소부 후 소재강도는 대체로 증가하는데 소재강도가 증가할수록 소부경화능이 더 크다. 특히 1180TRIP강의 소부경화능이 가장 크게 측정되었다. 예변형 시편을 소부 한 후 전단, 인장, 굽힘, 이축인장 모드에 대한 파단 변형률을 DIC를 이용하여 측정하였다. 소부 후 소재 강도가 증가함에도 불구하고 대부분의 자동차강의 소부 후 파단 변형률은 원소재에 비하여 대체로 동등 이상의 경향을 보였다.

**Keywords:** Bake Hardening, Digital Image Correlation(DIC), Fracture Strain, Stress-Strain Curve, DIC inverse method

---

1. 포스코 철강솔루션연구소 성형연구그룹, 수석연구원

# 포스코 철강솔루션연구소, 성형연구그룹, 수석연구원, [jiholim@posco.com](mailto:jiholim@posco.com)

## 디지털 이미지 상관법과 소형 펀치 시험을 이용한 판재 인장 물성 측정

도안 응웬 부<sup>1</sup>· 허현준<sup>1</sup>· 이신애<sup>1</sup>· 김지훈<sup>2, #</sup>

### Measurement of tensile properties of sheet metals using small punch test with digital image correlation

N. V. Doan, H. J Hur, S.A Lee, J. H. Kim

#### Abstract

The small punch test (SPT) is a widely used technique for evaluating mechanical properties from limited material volumes, making it particularly valuable when the source material is scarce, expensive, or difficult to procure. Accurate application of SPT relies on establishing robust correlations between punch deflection and conventional tensile properties. However, single-point SPT data often fail to uniquely capture tensile behavior due to the heterogeneous deformation inherent in the test. To address this limitation, this study combines advanced three-dimensional (3D) digital image correlation (DIC) with SPT to obtain full-field strain and deflection measurements. By integrating 3D DIC with finite element simulations, a methodology is proposed to reconstruct stress-strain curves from SPT results. The derived curves are compared against standard tensile test data, and the accuracy of the approach is assessed.

**Keywords:** Digital image correlation, small punch test, tensile properties, finite element analysis

---

1. 부산대학교 기계공학부, 대학원생

2. 부산대학교 기계공학부, 교수

# Corresponding Author: J.H Kim, School of Mechanical Engineering,  
Pusan National University  
E-mail: kimjh@pusan.ac.kr,  
ORCID : 0000-0001-9334-0503

# 디지털 이미지 상관 신호의 잡음 및 진동 억제를 위한 CWT-SRS 통합 분석 프레임워크

임현용<sup>1</sup>, 윤정환<sup>1,2#</sup>

## CWT-SRS Integrated Framework for Material Parameter Identification : Handling Noises and Vibrations in Digital Image Correlation

H. Lim, J.W. Yoon

### Abstract

This study proposes an automated signal processing framework that integrates Continuous Wavelet Transform (CWT) and Smoothing Regression Splines (SRS) to improve the reliability and interpretability of full-field strain signal obtained by Digital Image Correlation (DIC). The framework addresses two major sources of error in DIC—systematic fluctuations caused by sub pixel interpolation and environmental Gaussian noise—through a two-stage denoising process. To ensure consistent processing across large datasets, a signal evaluation criterion was developed that enables automation with minimal user intervention. In this study, the proposed framework was shown to effectively removes noise and fluctuations from the signal while preserving the resolution of local strain values at various test conditions. Moreover, the framework enables full-field DIC data—traditionally used for visualization—to be reliably utilized as a quantitative input for high resolution material characterization and large-scale mechanical data analysis. The framework's performance under diverse loading conditions and large-scale datasets makes it particularly suitable for DIC-based structural monitoring and deformation analysis where accurate strain and strain rate measurements are essential.

**Keywords:** Digital Image Correlation, Continuous wavelet transformation, Smoothing Regression Splines, Automation, Material parameter identification. Noise and fluctuations.

---

1. 한국과학기술원 기계공학과.

2. School of Engineering, Deakin University.

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

# 디지털 이미지 상관기법(DIC)을 활용한 변형률 속도 변화에 따른 변형경로 분석

이상민<sup>1</sup> · 김정민<sup>1</sup> · 홍석무<sup>2, #</sup>

## Strain Path Analysis under Varying Strain Rates Using Digital Image Correlation (DIC)

S. Lee, J. Kim, S. Hong

### Abstract

변형경로(strain path)는 소재가 성형 중에 경험하는 누적 변형의 방향성과 경로를 의미하며, 판재 성형 공정에서 금형 설계와 성형 조건 설정 시 중요한 고려 요소이다. 특히, 재료의 파손을 예측하기 위해 적용되는 TFD(Triaxiality Failure Diagram)는 유효 변형률과 응력 삼축성(triaxiality)에 기반한 파단 기준을 정립하는 데 사용된다. TFD를 구축하기 위해서는 인장, 전단, 평면 변형 등 다양한 하중 조건 하에서의 유효변형률 측정이 필요하다. DIC(Digital Image Correlation) 기법은 시편 표면의 변형률을 실시간으로 측정할 수 있어, 초기 변형부터 파단에 이르기까지의 변형경로 추적이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 DIC를 활용하여 복합 하중 조건에서 소재의 변형경로를 측정하고, 이를 바탕으로 TFD를 분석하기 위한 기초 실험을 수행하였다. 특히, 판재 성형 공정에서의 변형률 속도 의존성을 고려하기 위해, 0.1/s부터 100/s 범위의 변형률 속도에서 둘 장출시험을 수행하였다. 그 결과, 각 조건에 따른 변형경로를 TFD 상에 도시함으로써, 해당 소재의 변형률 속도 민감도 및 변형 특성을 파악할 수 있었고, 이는 보다 정밀한 손상 해석 및 물성 정의에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Digital Image Correlation, Highspeed Test, Sheet Metal, Strain Path, Strain Rate, Triaxiality Failure Diagram

### 후기

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

1. 공주대학교 미래융합공학과, 대학원생

2. 공주대학교 미래자동차공학과, 교수

# 공주대학교 그린카기술연구소, 교수,

E-mail: smhong@kongju.ac.kr

## 돔 펀치 실험과 DIC를 활용한 Hosford-Coulomb 금속 연성 파단 모델 평가

김찬양<sup>1, #</sup> · 봉혁종<sup>2</sup>

### Evaluation of the Hosford-Coulomb metal ductile fracture model using dome punch test and the DIC

C. Y. Kim, H. J. Bong

#### Abstract

최근 10년간 금속 소성가공 공정의 유한요소해석에서 소성변형 뿐 아니라 파단현상의 예측이 활발히 진행되고 있다. 이때 여러 현상학적 연성 파단 모델이 사용되는데, 특히 Extended Mohr-Coulomb, Hosford-Coulomb 모델 등이 사용된다. 이들 모델은 보통 응력상태를 나타내는 지수인 삼축응력비와 로드각지수에 의존하는 임계 파단변형률 함수 형태로 주어지며, 2-3개 또는 그 이상의 재료상수를 갖는다. 파단변형률이 응력상태에 의존하므로, 소재 별 재료 상수 획득을 위해서는 전단, 일축인장, 평면변형 등 서로 다른 변형 상태에 대한 파단거동 평가 및 파단지점에서 응력상태와 변형률을 이력을 확보해야 한다. 기존에는 보통 인장 기반 비규격 시편으로 실험을 수행하고, 이와 같은 조건에서 유한요소해석을 수행하여 응력상태와 변형률을 이력을 확보하는 실험-시뮬레이션 복합법이 널리 활용되었다. 그러나 이는 파단 실험 외에 유한요소해석을 추가적으로 수행해야 하며, 구성방정식을 포함한 유한요소해석 모델의 정합성에 획득된 파단모델의 정확성이 의존하게 된다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석 없이 파단모델의 재료상수를 평가하기 위해 주로 FLD 성형성평가에서 사용되던 돔펀치와 DIC를 활용한 새로운 평가 실험을 고안하였다. 유한요소해석을 활용하여 인장과 평면변형이 잘 유지되는 시편형상을 설계하였다. 설계된 시편으로 STS430 스테인리스강 판재의 Hosford-Coulomb 모델 재료상수모델을 획득했으며, 이를 기준 실험-시뮬레이션 복합법 기반 결과와 비교하여 검증하였다.

**Keywords:** Ductile Fracture Model, Experiment-Simulation Hybrid optimization, Digital Image Correlation, Dome Punch Test, Inverse Optimization

1. 국립군산대학교 신소재공학과, 조교수

2. 경상국립대학교 나노 · 신소재공학부, 조교수

# 국립군산대학교, 신소재공학과, 조교수, E-mail: c.kim@kunsan.ac.kr

## 9. 특별세션 / 일반 구두 발표

고품질 판재성형 부품 지능형  
고속/고정밀 프레스 장비기술 개발

(주)SIMPAC)

모델링 및 시뮬레이션

(제 6 발표회장)

## 시계열데이터에 대한 유효지표 자동 생성 시스템

윤상혁<sup>1</sup>

### Autonomous Indicator Generation System for Time Series Data without Domain Knowledge

Sang-Hyuk Yun

#### Abstract

전 세계적으로 제조업체들이 스마트팩토리 구축에 집중하면서, 설비에 부착된 수많은 센서로부터 방대한 양의 시계열 데이터가 수집되고 있다. 그러나 저장 용량의 한계로 인해 원본 데이터는 평균값과 같은 단순 통계 지표로 변환되어 저장되는 경우가 많으며, 이 지표들은 설비 예지보전이나 제품 품질예측과 같은 특정 과제에 있어 유의미하다는 보장은 없다. 본 논문에서는 도메인 지식 없이 시계열 데이터에 대해 의미 있는 지표들을 자동으로 생성하는 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 통계, 시계열, 주파수 영역을 아우르는 광범위한 지표 후보군을 생성하고, 그중에서 주어진 과제에 대해 가장 유의미한 지표들을 자동으로 선별한다.

이러한 접근 방식은 시계열데이터 기반의 분류 및 회귀 문제에서, 설명력이 뛰어난 머신러닝 또는 룰기반 알고리즘의 활용 가능성을 높여 복잡한 딥러닝 모델을 대체할 수 있게 한다. 결과적으로 모델의 해석 가능성을 크게 향상시키고, 유효한 지표만을 선별하여 저장함으로써 데이터 관리의 효율성 또한 높일 수 있다. 제안 시스템의 우수성은 베어링 고장 진동 데이터, 심전도(ECG) 이상 신호 데이터, 항공기 노후화 전류 데이터를 이용한 실험을 통해 검증하였다.

**Keywords:** Press, Time Series Data, Indicator Generation, Feature Engineering, Prognostics and Health Management

---

1. SIMPAC, AI LAB, 팀장, E-mail: sanghyuk.yun@simpac.com

# MLOps(Machine Learning Operations) 기반 스마트 제조를 위한 예지보전 및 데이터 관리 프레임워크

길성민<sup>1</sup>· 우성한<sup>1</sup>· 오정현<sup>1</sup>· 김소정<sup>1</sup>· 김성태<sup>2</sup>· 문건혁<sup>#</sup>

## MLOps for Smart Manufacturing: A Framework for Predictive Maintenance and Data Management

**Sungmin Gil, Sunghan Woo, Junghyeon Oh, Sojeong Kim, Seongtae Kim, Geonhyeok Moon**

### Abstract

현대 스마트 제조 환경에서는 AI 기반 모니터링과 예지보전이 제조 경쟁력의 핵심 요소로 부상하고 있다. 본 연구는 0.05 mm/m급 고정밀 프레스 장비의 효율성과 품질 안정성 확보를 위해, MLOps 기반 쿠버네티스(Kubernetes) 데이터 분석 프레임워크를 제안한다. MLOps는 머신러닝 모델의 개발, 배포, 운영 전 과정을 자동화하여 AI 시스템의 성능과 안정성을 지속적으로 유지하는 방법론이다. 센서 데이터는 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport) 프로토콜을 통해 실시간으로 수집되어 시계열 데이터베이스에 저장되며, 수집된 데이터는 정밀 모니터링 및 이상 탐지에 활용된다. 데이터 파이프라인의 재사용성과 모델 일관성을 확보한다. 학습된 모델은 정상/비정상 패턴 분류, 이상 탐지, 근본 원인 분석 등 예지보전 기능을 제공하며, CI(Continuous Integration)/CD(Continuous Deployment or Delivery) 및 주기적 업데이트를 통해 자동화된 방식으로 운영된다. 본 연구는 MLOps 기반의 실시간 데이터 분석 아키텍처를 제조 현장에 적용한 사례로, 스마트 제조 분야의 AI 활용에 대한 실증적 기여를 제공한다.

**Keywords:** Predictive Maintenance, MLOps, Kubeflow, MQTT, Time-Series Database, Anomaly Detection

### Acknowledgements

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행되었음.  
(No. RS-2025-16063279)

---

1. (주) 유아이티, 기업부설연구소, 연구원

2. (주) 유아이티, 기업부설연구소, 대표이사

# (주) 유아이티, 기업부설연구소, 연구소장, E-mail: paul.moon@uitsolutions.com

## Archard's Law을 적용한 슬라이딩 접촉계의 마모 예측

율도세브 알리벡<sup>1</sup>·박준희<sup>1</sup>·김인서<sup>1</sup>·이원호<sup>1</sup>·김낙수<sup>#</sup>·

### Wear Prediction in Sliding Contact Systems Using Archard's Law

Alibek Yuldoshev<sup>1</sup>, Joonhee Park<sup>1</sup>, Inseo Kim<sup>1</sup>, Wonho Lee<sup>1</sup>, Naksoo Kim<sup>#</sup>,

#### Abstract

High-speed presses operating at 400 strokes per minute (spm) experience severe contact wear due to their reciprocating motion. Accurate prediction of component lifetime is essential to maximize uptime and production output. In this study, we combined the finite element method (FEM) with Archard's wear model to predict wear behavior of critical press components. We improved the reliability of the simulation by incorporating experimentally measured component deformations under operating conditions. Based on these validated results, we predicted replacement intervals for up to five key components. This approach provides a foundation for extending tool life, minimizing unplanned downtime, and enhancing overall production efficiency.

**Keywords:** Wear prediction, Archard's law, Sliding contact, Finite element analysis, High-speed press

---

1. 서강대학교 기계공학과, 대학원생

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

# 체계적인 심층 전이학습을 이용한 금속 표면 불량 검출 모델 선정 연구

김형중<sup>1#</sup>· 우종현<sup>2</sup>· 박준혁<sup>2</sup>

## A Study on selecting metal surface defect detection models using systematic deep transfer learning

H. Kim, J. Woo, and J. Park

### Abstract

최근 딥러닝 기술의 발전으로 이미지 인식 및 분류 모델이 다양한 산업 현장에서 성공적으로 활용되고 있다. 특히, 사물인터넷, 비전 센서, 인공지능 기술의 결합은 제조업 공정에서의 품질 관리 혁신을 가능하게 한다. 이러한 흐름 속에서 프레스와 같은 금속 부품 제조 공정에서도 표면 불량을 자동으로 검출하는 시스템의 도입이 요구된다. 본 연구는 체계적인 심층 전이학습(systematic deep transfer learning) 기법을 활용하여 금속 표면 불량을 효율적으로 탐지하는 모델을 제안한다. 전이학습은 이미 학습된 모델을 새로운 도메인이나 산업 분야에 적용해 적은 양의 데이터로도 높은 성능을 도출할 수 있는 효과적인 방법이다. 본 연구는 합성곱신경망(convolutional neural network)을 기반으로 한 VGG, ResNet, MobileNet 등의 사전학습 모델을 기반으로 한 불량 검출(defect detection) 모델을 비교 분석했다. 연구 결과, 제안한 심층 전이학습 방법으로 금속 표면 불량 데이터셋에 대해 사전학습 모델 중 93% 이상의 높은 정확도를 보이는 모델을 선정할 수 있었다. 이렇게 구축된 불량 검출 모델은 대상 데이터셋의 특징(feature)이 잘 학습되어 있어 이상 진단(anomaly detection) 등 보다 높은 수준의 품질 검사 모델의 백본(backbone) 모델로도 활용이 될 수 있다.

**Keywords:** Systematic Deep Transfer Learning, Defect Detection, Metal Surface, Metal forming

---

1. 건국대학교 산업공학과, 조교수

2. 건국대학교 산업공학과, 석사과정

# 건국대학교 산업공학과, 조교수, E-mail: hyungjungkim@konkuk.ac.kr

## 다중 센서를 활용한 전단 공정 모니터링 기술 개발

김경민<sup>1</sup>· 이상오<sup>1</sup>· 송정한<sup>1</sup>· 김용배<sup>1</sup>· 이수현<sup>2</sup>· 노건우<sup>3</sup>· 배기현<sup>1#</sup>

### Development of Monitoring Technology for Shearing Processes Using Multi-Sensor Systems

G. M. Kim, S. O. Lee, J. H. Song, Y. B. Kim, S. H. Kim, G. W. Noh, G. H. Bae

#### Abstract

금속 판재의 전단 공정은 공정 중 발생하는 국부적 손상, 잔류 응력, 변형 불균일성은 최종 제품의 성능과 신뢰성을 저하할 수 있다. 이러한 이유로 전단 공정을 포함한 성형 과정 전반에 서의 성형성 평가와 실시간 모니터링 기술의 중요성이 강조되고 있다.

본 연구에서는 센서 기반 전단 금형 모니터링 시스템을 구축하여 전단 공정에서 하중, 가속도 등의 다중 센서를 사용하여 데이터를 취득하고 분석하였다. 또한 전단 공정의 속도, 클리어런스 등의 주요 공정조건을 조정하여 전단면 품질 및 전단공정 시계열 데이터를 취득하였다. 이를 통해 전단면의 품질 평가와 다중 센서를 통한 전단 공정 평가 가능성을 확인하였다.

**Keywords:** Shearing process, Multi-sensor system, Formability evaluation, Process Monitoring

#### Acknowledgement

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(고품질 판재성형 부품의 대량 고속 생산을 위한 AI기반 모니터링 · 예지보전 · 품질검사가 가능한 0.05 mm/m급 지능형 고속 · 고정밀 프레스 장비 개발, RS-2025-16063279, 산업통상자원부)

---

1. 한국생산기술연구원, 유연생산연구부문

2. (주)심팩, 매니저

3. 고려대학교 기계공학과, 부교수

# 한국생산기술연구원, 유연생산연구부문, 수석연구원, E-mail: baegh@kitech.re.kr

# 볼트형 압전식 하중 센서를 활용한 프레스 상태 모니터링

권오동<sup>1</sup> · Jörg Stahlmann<sup>2</sup> · Matthias Brenneis<sup>2</sup> · 김수영<sup>3</sup> · 이경훈<sup>#</sup>

## Press State Monitoring by using Bolt Type Piezo-Sensor

O. D. Kwon, J. Stahlmann, M. Brenneis, S. Y. Kim, K. Lee

### Abstract

프레스 산업은 라인 가동률과 생산성의 안정적 향상, 초기 불량의 신속한 검출, 설비 및 라인 간 비교 가능성 확보와 같은 목표를 지향하고 있지만, 기존의 최종 품질 검사나 알람 중심 대응만으로는 이러한 이상을 초기에 정량 파악하기 어렵다. 특히, 프레스에서 특정 위치의 하중을 정밀하게 측정하기 위해서는 기존 시스템의 변경을 최소화한 현장형 계측 방식이 요구된다. 본 연구에서는 프레스 구조부에 볼트형 압전식 하중센서를 적용하여 특정 위치의 하중을 정밀 측정하고 분석하는 방법을 제안한다. 기존에는 금형의 마모와 파손, 제품의 결함 진단과 같은 금형 중심적 계측과 분석에 치우쳤다면, 본 연구는 적용 대상을 프레스 본체로 확장하여 프레스의 불균형(편심)과 텔팅 등을 정량화한다. 볼트형 압전식 하중센서는 기존 체결 볼트를 동일 규격으로 대체하는 방식으로 구조 변경이 없으며, 높은 샘플링 포인트와 감도를 보유하여 정확한 하중 지표를 제공한다. 또한, 변위 센서와 동기화를 통해 스트로크별 하중 곡선을 한눈에 파악하게 할 수 있다. 특정 위치의 하중 계측은 고속, 고정밀 프레스의 지능화를 현장에서 실질적으로 구현하는 수단으로서, 금형 보호와 편심 관리 최적화에 유효하다. 아울러 센서 위치 선정 원칙과 동기화 전략, 데이터 수집 및 활용 절차를 정리하고 프레스 메이커-사용자-솔루션사가 함께 단계적으로 확장 가능한 프로세스를 제안한다.

**Keywords:** Bolt type Piezo-Sensor, Localized Force, Realtime monitoring, Piezobolt

---

1. (주)솔루션랩, 과장

2. ConSenses GmbH, Director

3. YG Solutions Co., Ltd., COO

# 교신저자: (주)솔루션랩 대표이사 E-mail: klee@solution-lab.co.kr

# 위상장 응집영역 모델링을 이용한 탄소성 다층 구조의 동적 파괴 해석

진미잠<sup>1</sup> · 이은호<sup>1,2,3#</sup>

## Phase field cohesive zone modeling of dynamic fracture in elasto plastic layered structures

M. C. Chen, E. H. Lee

### Abstract

Fracture in layered elastoplastic structures is often governed by the complex interplay between bulk plasticity and interfacial effects, which remains a major challenge for conventional phase field models (PFM). While PFM provides an efficient framework for simulating crack initiation and propagation in bulk materials, it lacks the ability to accurately capture interfacial fracture and delamination. To overcome this limitation, we develop a phase field cohesive zone model (PF-CZM) within the commercial finite element software Abaqus by implementing user-defined elements (UEL). The proposed PF-CZM incorporates elastoplastic constitutive behavior in the bulk layers and cohesive-type degradation laws at the interfaces, enabling the simulation of both bulk and interfacial fracture under dynamic loading. By means of simple examples we show that the PF-CZM not only reproduces bulk elastoplastic fracture processes, including plastic deformation, crack initiation, and propagation, but also effectively captures interfacial failure phenomena such as delamination and crack deflection. Overall, the proposed elastoplastic PF-CZM provides a robust framework for investigating dynamic fracture mechanisms in layered structures with interfacial effects.

**Keywords:** Phase field-cohesive zone modeling, Dynamic fracture, Crack propagation, Layered structures.

---

1. 성균관대학교 지능형팹테크융합, 대학원생

2. 성균관대학교 기계공학과, 교수

3. 성균관대학교 지능형로봇학과, 교수

# 성균관대학교, 기계공학과, 교수, E-mail: e.h.lee@skku.edu

# 텍스쳐 기반 소성 포텐셜 함수를 이용한 거시적 이방성 예측

박원진<sup>1</sup>· 정영웅<sup>2</sup>· 윤정환<sup>#</sup>

## Prediction of Macroscopic Anisotropy Using a Texture-Based Plastic Potential Function

Wonjin Park, Youngung Jeong, Jeong Whan Yoon

### Abstract

기존 항복 함수 기반 모델은 소재 이방성을 반영할 수 있으나, 이를 위해서는 많은 실험과 다수의 계수 피팅이 필요하다는 한계가 있다. 본 연구에서는 실제 소재의 텍스쳐를 직접 고려하는 새로운 소성 포텐셜 모델을 제안한다. 제안된 모델은 Polycrystal 접근법의 하나인, Visco-plastic self-consistent(VPSC) 모델을 이용해 점 데이터를 생성하고, 이를 3차 폴리노미얼로 보간하여 C1 연속성을 유지하는 소성 포텐셜 면을 구성하였다. 또한 Non-associated flow rule을 적용하여 거시적 이방성을 예측하였다. 마지막으로, 제안된 모델의 실제 적용 가능성과 예측 성능을 검증하기 위해 대표적인 판재 성형 공정인 컵 드로잉 해석에 적용하여 그 유효성을 확인하였다.

**Keywords:** Sheet metal, Anisotropy, Non-associated flow rule, Visco-plastic self-consistent model, Texture

---

1. 한국과학기술원 기계공학과, 박사과정

2. 창원대학교 신소재공학부, 교수

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

## 다결정 탄점소성 유한 요소 해석 모델을 활용한 초고장력강판의 굽힘 후 스프링백 거동 모사

전보혜<sup>1</sup>· 강주홍<sup>1</sup>· 정영웅<sup>2#</sup>

### Modeling Springback of Advanced-High-Strength Steel Sheets with a Crystal Elasto-Visco-Plasticity Finite Element Method

Bohye Jeon, Juhong Kang, Youngung Jeong

#### Abstract

초고강도강(AHSS)은 자동차 차체의 경량화와 안정성 확보를 위해 널리 사용되지만, 높은 강도로 인해 성형성이 제한되고 스프링백이 크게 발생하여 정밀한 공정 제어가 어렵다. 이러한 문제를 정성, 정량적으로 모사하기 위해 본 연구에서는 결정 소성 유한 요소 해석 기반의  $\triangle$  EVPSC 모델을 중심으로 한 해석 프레임워크를 구축하였다. 폐라이트와 마르텐사이트로 이루어진 DP980과 완전 마르텐사이트 조직을 가지는 MART1500Y를 대상으로, 시편의 여러 두께 위치에서 EBSD 실험을 수행하여 초기 집합조직을 확보하였다. 유한 요소 해석의 각 적분점에 여러 이산 방위(discrete orientation)가 활용되었고, 일축 인장, 압축, 인장-압축-인장, 별지 시험 등 다양한 기계 시험 결과를 활용하여 Voce 경화 모델 파라미터를 체계적으로 보정하였다. 이후 U자형 굽힘과 C-rail 채널 굽힘 성형 실험을 유한 요소 해석으로 구현하였고, 모델이 예측한 성형 후 스프링백 거동을 실험 결과와 비교하였다. 인장-압축 비대칭성이 두드러진 MART1500Y의 경우, 수정된 Non-Schmid 효과를 도입하였으며, 그 영향을 살펴보았다.

**Keywords:** Crystal plasticity finite element method (CPFEM); Stress increment base Elasto-Visco-Plastic Self-Consistent model ( $\triangle$ EVPSC); Advanced-high-strength-steel (AHSS); Springback; U-draw bending; C-rail channel die compression

---

1. 창원대학교 소재융합시스템공학과

2. 창원대학교 신소재공학부

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

# Coupled kinetics–diffusion–damage model for hydrogen-induced fracture in elastic and plastic regimes

Geonjin Shin<sup>1</sup>, Jinheung Park<sup>2</sup>, Myoung-Gyu Lee<sup>#</sup>

## Abstract

This work presents a generalized finite element framework for hydrogen-induced fracture, formulated in a thermodynamically consistent manner and implemented in ABAQUS through a user-defined element (UEL). Unlike conventional approaches based on Oriani-type equilibrium, the present model adopts McNabb–Foster kinetics, thereby treating the hydrogen concentration at trap sites and in the lattice (NILS) as independent state variables. These are fully coupled with mechanical deformation, gradient-enhanced damage mechanics, and hydrogen diffusion, leading to a multi-physics formulation that rigorously captures the interplay between kinetics and fracture processes. A key feature of the proposed formulation is the use of distinct yield functions for plasticity and damage, which allows fracture to be described across both elastic and plastic regimes without restricting crack initiation to the onset of plastic flow. This acknowledges the experimentally observed possibility of hydrogen-induced microcracking at relatively low stresses. Furthermore, surface kinetics are incorporated to account for hydrogen exchange at boundaries, which becomes essential in reproducing realistic charging and desorption conditions. The constitutive equations are systematically derived from fundamental thermodynamic principles, ensuring consistency in the coupling between displacement, damage, and chemical potential as primary degrees of freedom. A gradient-enhanced damage formulation is employed to alleviate mesh sensitivity and to stabilize the coupled numerical scheme. Verification against benchmark simulations of hydrogen diffusion near a stressed crack tip confirms the model’s predictive capability. Overall, the proposed model provides a unified and thermodynamically consistent platform for simulating hydrogen-induced fracture by integrating deformation, diffusion, damage, and kinetics across elastic and plastic regimes, thereby extending the applicability of hydrogen-embrittlement simulations beyond existing equilibrium-based approaches.

**Keywords:** Hydrogen embrittlement, Multi-physics modeling, Continuum damage mechanics, Finite element modeling

---

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생
2. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 조교수

# 서울대학교 재료공학부, 교수, E-mail: myounglee@snu.ac.kr

# 딥 러닝을 이용한 공정 의존적 탄소성 인공지능 구성방정식의 개발, part2

문희범<sup>1</sup>· 이경훈<sup>2, #</sup>

## Development of Artificial Intelligence Process Dependent Elasto-Plastic Constitutive Equation Model Using Deep Learning, part2

H. B. Moon, G. P. Kang, K. Lee

### Abstract

복잡한 비선형 재료모델(탄소성, 다공성 재질, 결정소성학 연계 멀티스케일 모델)을 사용하는 유한요소해석(FEA)은 해를 찾기 위한 반복 계산(Iteration)으로 인해 낮은 수렴성과 긴 해석 시간이라는 고질적인 문제를 안고 있다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하여 복잡한 모델의 해석 시간을 단축하는 것을 목적으로 수행되었다.

본 연구는 선행 연구로 진행된 ‘딥 러닝을 이용한 공정의존적 탄소성 인공지능 구성방정식의 개발’의 후속 연구로, 선행 연구에서 개발된 탄소성 재료의 탄성 범위만을 다루었던 인공지능 구성방정식에서 발전하여, 탄성 및 소성 모든 영역으로 범위를 확장하여 진행되었다.

본 연구는 인공지능 탄소성 구성방정식 개발을 목표로, 탄소성 유한요소해석으로부터 확보한 데이터를 바탕으로 기존 구성방정식을 대체할 AI 모델을 학습시키고 이를 유한요소해석에 적용하는 방안을 제안하였다. 또한, ‘공정 의존적(Process-dependent)’ 적용 범위 확장 전략을 도입하여, 기존 인공지능 구성방정식 연구의 한계였던 방대한 학습 데이터 문제를 극복하는 해결책을 제안하였다.

**Keywords:** Finite Element Method, Artificial Intelligence, Deep Learning, Constitutive Equation

---

1. 솔루션랩, 과장
2. 솔루션랩, 대표이사

# 솔루션랩, 대표이사, E-mail :klee@solution-lab.co.kr

## 크롬강 적층제조재의 이방성 거동에 대한 결정소성 기반 연구

유제현<sup>1</sup>· 이호영<sup>2</sup>· 이명규<sup>#</sup>

### Anisotropic behavior of additively manufactured chromic steel investigated through crystal plasticity

J. H. You<sup>1</sup>, H. Y. Lee<sup>2</sup>, M. G. Lee<sup>#</sup>

#### Abstract

Additively manufactured metals show complex anisotropy due to many factors such as microstructure or manufacturing technology. In this study, the anisotropic behavior of additively manufactured chromic steel is investigated using crystal plasticity model. The model parameters are calibrated through experiment results such as nanoindentation and tensile tests. Also, from the microstructure examined from the manufactured part, representative volume elements (RVEs) with complex microstructure are built and various virtual experiments are conducted for calibration of the yield function parameters. This study presents a methodology to facilitate the analysis of additively manufactured components with complex microstructures and to bridge microstructural approaches with macroscopic property predictions.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Crystal Plasticity, Representative Volume Element

---

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

2. 현대자동차 MLV사업부 해석팀

# 서울대학교 재료공학부, 정교수, mail: myounglee@snu.ac.kr

# GNB를 고려한 금속 판재 하중 반전 예측용 GND 기반 역응력 모델

심규장<sup>1</sup> · 유제현<sup>1</sup> · 최성환<sup>2</sup> · 김영재<sup>3</sup> · 이충안<sup>3</sup> · 김현기<sup>3</sup> · 노동환<sup>3</sup> · 이명규<sup>#</sup>

## A GND-Based Back-Stress Model for Reverse Loading in Metal Sheets Considering GNB Effects

Gyu-Jang Sim, Jehyun You, SeongHwan Choi, Youngjae Kim, Chung An  
Lee, Hyunki Kim, Donghwan Noh, Myoung-Gyu Lee

### Abstract

판재 성형에서 스프링백과 성형성을 정확히 예측하려면 인장 후 압축과 같은 복잡한 하중 경로 변화에서의 하중 반전 거동을 이해해야 한다. 그러나 초박막 판재의 경우 압축 좌굴 등 압축 불안정성 때문에 이러한 거동을 실험적으로 규명하기가 어렵다. 본 연구는 기하학적 필수 전위(Geometrically Necessary Dislocation, GND)와 기하학적 필수 경계(Geometrically Necessary Boundary, GNB)에 기반한 물리적 근거의 역응력(back stress) 모델을 결정소성 유한요소법(CPFEM)에 도입하였다. 제안한 모델은 하나의 결정립 크기의 존적 역응력 매개변수를 통해 홀-페치(Hall-Petch) 효과와 바우싱거(Bauschinger) 효과를 함께 포착하며, 서로 다른 결정립 크기를 갖는 시편의 인장 데이터만으로도 하중 반전을 예측할 수 있게 한다. 매개변수 보정은 as-received 상태와 소둔(annealed) 상태의 두 미세조직에서 얻은 인장 응력-변형률 곡선을 최적화하는 방식으로 수행하였다. 인장-압축 데이터를 사용하지 않고도, 제안한 모델은 저탄소강(두께 0.64 mm)의 하중 반전 거동과, 개발한 이론을 업스케일된 이방성 경화 모델에 접목했을 때 초박막 SUS316(두께 0.083 mm)의 인장-굽힘 응답을 정확히 예측하였다. 식별가능성(identifiability) 분석을 통해 제안 모델의 매개변수가 두 인장 시험 데이터로부터 유일하게 결정됨을 확인하였다. 본 연구의 물리적으로 해석 가능한 프레임워크는 실험적 한계를 극복하면서도 얇은 금속 판재의 하중 반전 거동을 효율적이고 견고하게 예측할 수 있는 방법을 제공한다.

**Keywords:** CPFEM, GND, Dislocation Wall, Bauschinger Effect, Reverse Loading Behavior, Thin Metal Sheets

---

1. 서울대학교, 대학원생
2. 한국재료연구원, 책임연구원
3. 현대자동차, 책임연구원

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

# 고속충돌 시 침투탄두 용접부의 변형 및 손상 분석

이주원<sup>1</sup> · 임현용<sup>1</sup> · 장택진<sup>1</sup> · 박주성<sup>2</sup> · 윤태건<sup>3</sup> · 고원기<sup>4</sup> · 윤정환<sup>#</sup>

## Deformation and Damage of Penetrator Weld Joints under High-Speed Impact

J. Lee, H. Lim, T. J. Jang, J. S. Park, T. G. Yun, W. K. Ko, J. W. Yoon

### Abstract

침투탄두는 표적에 접촉하는 순간 높은 변형률 속도와 충격에 노출된다. 탄두를 조립하기 위한 용접부는 모재와 상이한 기계적 물성을 나타내므로 극한 상황에서 취약부로 작용할 수 있다. 따라서 고속충돌 시 용접부의 변형과 손상의 정도를 사전에 검토할 필요가 있다. 그러나 이를 실제 실험으로 확인하기는 어려우므로 유한요소법을 기반으로 관통해석을 수행하였다. 충돌 조건에서 탄두의 기계적 물성을 획득하기 위해 모재 및 용접부에서 시편을 추출하여 동적 경화 시험 및 동적 파단 시험을 수행하였다. 콘크리트의 파단 특성은 충돌 시 침투탄두에 가해지는 응력과 변형 이력에 영향을 미치므로, 실험 결과를 기반으로 만들어진 관통식을 참고하여 가속도 이력과 관통 깊이를 검증하였다. 탄두는 표적에 대해 수직 또는 경사 충돌이 가능하므로 두 가지 경우에 대해 관통해석을 수행하였으며 모재와 용접부의 변형을 비교하여 접합부의 요구 성능을 파악하였다.

**Keywords:** Penetration analysis, Multi-pass weld joint, High-strain rate material property, Finite element analysis

---

1. 한국과학기술원, 기계공학과, 박사과정
2. (주)풍산 방산기술연구원, 수석연구원
3. (주)풍산 방산기술연구원, 책임연구원
4. (주)풍산 방산기술연구원, 선임연구원

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

# 코일 스프링 템퍼링 공정의 DNN 기반 다목적 최적화

김민기<sup>1</sup>· 허지원<sup>2</sup>· 차승훈<sup>3</sup>· 임철현<sup>4</sup>· 신정규<sup>5</sup>· 고대철<sup>#</sup>

## DNN-Based Multi-Objective Optimization of Tempering Process for Coil Springs

M. G. Kim, J. W. Heo, S. H Cha, C. H. Lim, J. G. Shin, D. C. Ko

### Abstract

The demand for lightweight vehicles has expanded the use of high strength irregular coil springs. These springs are manufactured by cold coiling and subsequent tempering, which is essential for residual stress relief and shape stabilization. However, stress relaxation during tempering often causes dimensional deviations of diameter and pitch, resulting in a trade-off between minimizing residual stress and dimensional accuracy. This study proposes a multi-objective optimization framework combining finite element(FE) simulation and deep neural networks (DNN) to resolve this issue. FE simulations were used to generate a dataset of spring behaviors under varying process conditions such as heating temperature, holding time, and cooling rate. DNN model was then trained on this data to efficiently predict residual stress and dimensional deviation. Using this predictive model, multi-objective optimization was performed to find the best balance between the two conflicting goals. The results confirm that the proposed framework effectively optimizes tempering conditions, achieving a balance between residual stress and dimensional stability. This study demonstrates the feasibility of combining FEA with DNN-based multi-objective optimization for tempering process and highlights its potential application to the manufacturing of high-precision coil springs.

**Keywords:** Coil spring, Cold coiling, Tempering, Finite element simulation, Deep neural network, Multi-objective optimization

### Acknowledgement

We would like to acknowledge the financial support from Technology Innovation Program (No. 20026321) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE).

---

1. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 박사과정
2. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 석사과정
3. 경북테크노파크, 책임연구원
4. (주)에이텍, 이사
5. (주)와이에이치오토, 이사

# 교신저자: 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 교수, E-mail: dcko@pusan.ac.kr

# 소성 메커니즘 기반 DSC 전력반도체용 금속 확산접합 모델 개발

전형주<sup>1</sup>· 신건진<sup>1</sup>· 이명규<sup>#</sup>

## Plasticity-based diffusion bonding model for DSC power devices

H. Jeon, G. Shin, M.G. Lee

### Abstract

전력반도체의 전력밀도 증가로 패키징 단계에서 열 관리 문제가 심화되고 있으며, 이를 해결하기 위해 양면 냉각(double-sided cooling, DSC) 구조가 주목받고 있다. DSC 구조 구현을 위해서는 기존 솔더링 대비 높은 열·전기적 전도성과 고온 안정성을 확보할 수 있는 금속 확산접합(Cu-Cu, Cu-Ag, Cu-Au 등)이 핵심 기술로 요구된다. 본 연구에서는 이러한 금속 확산접합 공정을 대상으로, 전위 크리프와 확산 크리프 등 소성 메커니즘을 반영한 물리 기반 유한요소 모델을 개발하였다. 본딩 압력, 온도, 접합 시간을 주요 변수로 설정하고, 접촉면적, 결합 면적 분율 및 계면 잔류응력을 평가지표로 분석하였다. 해석 결과, 온도 상승은 접합 면적 분율 증가에 가장 큰 영향을 주었으며, 압력은 초기 접촉면적 확보에 기여하여 계면 응력 완화를 촉진하는 경향을 확인하였으며, 이를 통해 안정적인 접합을 확보할 수 있는 공정 창을 도출하였다. 제안된 모델은 단순 경험식이 아닌 물리 기반 접근을 통해 계면 접합 메커니즘을 이해하고, DSC 전력반도체 패키징 공정 최적화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Metal diffusion bonding, Plastic deformation, Creep mechanism, Power semiconductor packaging, Finite element analysis

### Acknowledgement

This study has been supported by Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) Key-Tech project (EH250008).

---

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

# 서울대학교 재료공학부, 교수, E-mail: myounglee@snu.ac.kr

## 10. 특별세션 / 일반 구두 발표

고강도 소재 적용 전기자동차 샤시 및  
배터리 케이스 제조를 위한 집합 장비와  
스마트 접합라인 개발 및 제품화 실증

(주)화신)

소재 형상교정 및 전단기술 심포지엄

(POSCO)

자율제조  
적층제조 및 유연공정

(제 7 발표회장)

## 배터리 팩 케이스의 용접 순서 최적화를 위한 유한요소 해석

구인환<sup>1</sup> · 전종호<sup>1</sup> · 서오석<sup>2</sup> · 조정호<sup>#</sup>

### Finite Element Analysis for Welding Sequence Optimization of Battery Pack Cases

I. H. Koo, J. H. Jeon, O. S. Seo, J. H. Cho

#### Abstract

자동차 산업에서 유한요소 해석적 접근은 실험에 소요되는 시간과 비용을 효과적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 특히 전기자동차에서는 배터리가 단순한 에너지 저장 장치를 넘어 차체 구조의 일부로 활용될 수 있기 때문에, 배터리 팩 케이스의 열-기계적 거동을 분석하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 배터리 팩 케이스를 대상으로 용접 공정에서 발생하는 열변형을 평가하기 위해 골닥(Goldak) 열원 모델을 적용한 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 알루미늄 판재를 이용한 용접 실험을 병행하였으며, 열팽창계수를 보정하여 열원 해석 모델을 최적화하였다. 또한 구속 조건은 실제 지그 모델링 데이터를 활용하여 공정 조건과 동일하게 설정하였다. 다양한 용접 순서를 모사하여 해석을 수행한 결과, 부품 단위 해석에서는 순서에 따른 변형 차이가 확인되었으나, 배터리 팩 케이스 조립 단위 해석에서는 짧은 용접 구간의 반복적인 영향으로 변형의 차이가 매우 작게 나타났다. 본 연구는 실험을 통해 보정된 열원 모델을 기반으로 배터리 팩 케이스의 용접 순서 최적화를 위한 신뢰성 있는 해석 기법을 제시하며, 향후 전기자동차 제조 공정의 품질 관리에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

**Keywords:** Finite Element Analysis, Battery Pack Case, Welding Sequence, Thermal Deformation

#### Acknowledgement

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (780 MPa급 이상 초고강도 소재 적용 전기자동차 샤프 및 300 MPa급 이상 알루미늄 배터리케이스 용접을 위한 요소 공정해석기술 개발 및 제품화 실증, 20022438, 산업통상자원부)

1. 충북대학교 기계공학과, 대학원생

2. (주)화신 기술연구소 선행연구팀

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

# 철강 가공센터 형상교정 및 슬리팅 기술 개발과 적용 사례

박기철<sup>1#</sup>· 오경석<sup>1</sup>· 구진모<sup>1</sup>

## Development and Application of Leveling and Slitting Technology for Steel Coil Processing Center

K. C. Park, K. S. Oho, J. M. Koo

### Abstract

열연 및 냉연 코일은 대부분 코일센터(가공센터)에서 교정하여 평탄한 Sheet 재를 만들거나 전폭 코일을 작은 폭으로 슬리팅 가공한 코일로 부품 가공사로 제공된다. 그런데, 가공센터에서 활용하는 형상교정 설비인 롤러레밸러 (roller leveler) 나 폭 절단 설비인 슬리터 (Slitter)를 최적으로 활용하는 경우 모재 코일 품질 이상으로 우수한 품질의 제품이 만들어 지지만 이들 설비의 기능을 충분히 활용하지 못한 경우, 모재 코일 품질은 우수하더라도, 부품 가공사에서 사용할 수 없는 코일센터에서 가공한 품질이 될 수 있다. 따라서 코일센터의 주요 설비인 roller leveler 와 slitter 는 충분한 기술적 이해를 바탕으로 설비가 운전 및 관리되어야 한다. 그러나 우리나라의 현실은 ‘80년대 또는 그 이전에 해외에서 도입한 기술에서 크게 나아지지 않은 수준으로 설비 제조사에서 만들어지고 있고 코일센터에서는 현장의 작업자 경험에 크게 의존해서 운전하고 있어 보인다. 해외에서는 60년대와 70년대에 집중적으로 이 분야 기술 연구 결과가 보고되었고 이후에도 계속 보고가 있지만 우리나라에서는 코일센터 관련 기술 연구가 진행된 사례가 거의 없었다. 이런 상황에서 철강사에서 만들어진 코일의 가공 중 품질 저하를 막고 더 우수한 제품을 만들기 위한 연구를 수행하였다. Roller leveler 의 구조를 파악하고 그 기능을 충분히 활용할 수 있는 교정 기술을 연구한 내용과 이 결과를 활용하여 코일센터의 roller leveler 에서 만곡, camber, wave 교정 및 가공센터 기술지원 사례를 소개한다. 그리고 시험용 slitter 를 도입하여 전단가공에서 중요한 요인인 clearance, lap, stabilizer 등이 hoop 의 절단면 품질과 형상이 미치는 영향을 연구하고 이 결과를 이용해서 slitting 후 hoop 형상 불량 및 전단면 불량에 대한 해결방안 도출하여 가공센터에 기술 지원한 사례를 소개한다.

**Keywords:** Steel Coil Processing Center, Roller Leveler, Slitter, Leveling, Slitting, Shape Correction, Slitted Surface Quality

---

1. POSCO 기술연구원 철강솔루션연구소 성형연구그룹

# POSCO 철강솔루션연구소, E-mail: parkkc@posco.com

# 국내 고강도 철강재 전단기술(Shearing 및 Slitting) 동향

최도현<sup>1</sup>

## Trends in high-strength steel shearing and slitting technology

D. H. Choi<sup>1</sup>

### Abstract

산업적 요구에 따른 철강소재의 고강도화 및 환경규제에 대한 정책변화 등의 이유로 고강도의 철강 생산이 필수이므로 고강도 철강 절단용 나이프 또한 필요한 상황이다. 이에 철강용 나이프의 사용 현황 및 기술개발 현황, 전단 메커니즘과 절단 시 클리어런스 설정, 나이프 소재 선택 시 고려해야 할 주요 물성, 나이프 파손 이유 및 방지책에 대하여 설명하고자 한다.

**Keywords:** 철강 전단기술, 철강용 나이프, 클리어런스, 나이프 파손

---

1. 대원인물 주식회사

## GigaSteel의 평탄도 제어 기술 및 적용 사례

최대곤<sup>#</sup>

### GigaSteel Flatness Control Technology and Its Applications

D. G. Choi

#### Abstract

GigaSteel is an advanced steel material that simultaneously achieves high strength and lightweight properties, making it highly sought after in various fields such as automobiles and industrial structures. To ensure the quality of GigaSteel, excellent flatness control technology is essential. Flatness refers to a state in which the surface of the steel sheet is flat without any bends or irregularities, and it directly affects the processability of the product and its performance in final applications.

This abstract introduces the main technologies for flatness control of GigaSteel and actual application cases. Flatness control of GigaSteel is mainly carried out in the rolling process, with a focus on flatness control during cold leveling. Due to the characteristics of high-strength materials, there are limitations with conventional leveling equipment and control methods, and leveling equipment specifically for GigaSteel, as well as flatness measurement and control using this equipment, are being introduced. These technologies enable the optimal flatness condition to be maintained by monitoring various variables in real time, such as the temperature of the steel sheet and the flatness before and after leveling. A representative application case is hot-rolled wear-resistant steel, which is widely used for commercial vehicles and heavy equipment, and it has been supplied to domestic automakers and received positive evaluations in actual vehicle tests. It is expected that its use in various application fields will become even more active in the future.

**Keywords:** GigaSteel, Flatness, Leveling, Wear-Resistant Steel

# 1.5GPa급 마르텐사이트강 평탄도 제어를 통한 롤포밍 차체 부품의 산포 저감 연구

박민호<sup>1</sup>· 유성호<sup>1</sup>· 권효성<sup>2</sup>· 유정현<sup>2</sup>· 이민혁<sup>2</sup>· 김근호<sup>#</sup>

## Control of Dimensional Scatter in 1.5GPa Martensitic UHSS through Roll Forming Pretreatment

M. H. Park, S. H. Yu, H. S. Kwon, J. H. Yu, M. H. Lee, G. H. Kim

### Abstract

차체의 내충격성 향상과 경량화에 대한 산업적 요구가 증가함에 따라, 고강도와 경량화를 동시에 실현할 수 있는 소재인 초고장력강(UHSS)의 적용이 확대되고 있다. 특히 MS(Martensitic) 1.5GPa급 강재는 사이드 실과 같은 주요 안전 부품에 널리 사용되고 있으나, 원소재의 불균일한 평탄도로 인해 성형 시 제품 형상의 산포가 발생하고, 이는 치수 정밀도 저하 및 품질 일관성 확보에 어려움을 초래한다. 이를 개선하기 위해 철강 제조사에서는 압연 공정 제어, 냉각 조건 최적화 및 레벨러 장비 도입 등의 다양한 기술적 시도가 이루어지고 있으나, 초고강 소재의 특성상 개선 효과는 제한적이며 설비 투자에 따른 비용 부담이 크다는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 롤 포밍 공정 내에서 성형 전 판재에 교차 굽힘(Repeated Bending)을 적용하는 평탄화 전처리 공정을 제안하였다. 유한요소해석(FEA)을 통해 최적의 평탄화 롤 금형을 설계하고, 시험을 통해 평탄화 효과를 검증하였다. 해당 평탄화 전처리 공정을 실제 사이드 실 부품의 양산공정에 적용한 결과, 제품의 치수 산포가 유의미하게 감소하고 정밀도가 향상됨을 확인하였다. 본 연구는 초고장력강의 평탄도 개선을 위한 실용적이고 효율적인 공정 대안을 제시하며, 롤 포밍 성형 부품의 품질 안정성 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

**Keywords:** Roll Forming, UHSS, Dimensional Scatter, Tool Design, FEA

---

1. (주)아산, 책임 연구원

2. (주)아산, 연구원

#. (주)아산, R&D 팀, 이사, E-mail: kgh7355@secoasan.com

# 판재 레벨링에서 유효곡률반경의 결정 방법에 대한 연구

오경석<sup>#</sup>· 구진모<sup>1</sup>· 박기철<sup>1</sup>

## A study on the method for determining the effective radius of curvature in sheet leveling

K. S. Oh, J. M. Koo, K. C. Park

### Abstract

강판을 부품으로 제작하는 공정에서 코일 상태의 원소재를 2차원의 평판으로 만들기 위해 레벨링 작업을 실시한다. 판재의 레벨링 작업은 장력을 인가하고 반복적인 굽힘 변형을 부가하는 텐션 레벨링과 장력 없이 반복적인 굽힘 변형을 부가하는 롤러 레벨링, 그리고 두 방법을 동시에 적용하는 복합 레벨링으로 구분된다. 이때 굽힘 변형에 의한 연신량을 결정하는 주요 인자 중 하나로 롤을 지나가면서 소재가 경험하는 유효곡률반경이 있다. 판재의 재질, 작업롤 직경, 작업롤 간격, 장력으로 결정되는 유효곡률반경을 도출하기 위해 실험장치를 설계하고, 자동차용 강판 4종에 대하여 평가하였다. 유효곡률반경의 필요조건이 반영된 새로운 모델을 역학적 및 경험적 수학식으로 두 가지를 제안하고, 실험결과를 바탕으로 모델 상수를 최적화 하였다. 각 강종에 대하여 최적화된 유효곡률반경 모델을 실험으로 얻어진 연신량과 두께변화를 근거로 검증하였다. 역학적으로 제안된 모델의 경우 실험으로 얻어진 연신량과 두께변화의 예측 정확도가 참고문헌 대비 우수하다고 확인되었으며, 경험적으로 제안된 모델의 경우 실험 결과에 대한의 예측 정확도가 가장 우수하였다.

**Keywords:** Sheet metal, Tension leveling, Roller leveling, Flatness, Effective radius of curvature

---

1. 포스코 기술연구원 철강솔루션연구소 성형연구그룹 연구원

# 포스코 기술연구원 철강솔루션연구소 성형연구그룹 연구원, E-mail: oks2012@posco.com

# 헤어핀 코일 직선화 공정의 실시간 최적화를 위한 디지털 트윈 프레임워크

김지훈<sup>1</sup>· 한선우<sup>1</sup>· 이민섭<sup>4</sup>· 이은호<sup># 1,2,3</sup>

## Digital Twin Framework for Real-time Optimization of Flat Wire Straightening Process for Hairpin Coil Production

Jihun Kim, Sunwoo Han, Minsub Lee, Eun-Ho Lee

### Abstract

맞춤형 전기차(EV)에 대한 수요가 지속적으로 증가함에 따라, 헤어핀 모터 권선과 같은 핵심 추진 부품의 제조 공정 유연성을 향상시키는 것이 점점 더 중요해지고 있다. 기존의 롤러 교정(straightening) 방식은 고정된 장비 구성을 기반으로 하기 때문에, 와이어 형상 및 소재 특성의 변화를 수용하는 데 한계가 있으며, 이는 비효율성과 생산 비용 증가로 이어진다. 본 연구에서는 실시간 센싱, 유한요소법(FEM) 기반 공정 시뮬레이션, 그리고 인공신경망(ANN) 기반 공정 모델링을 통합한 유연한 교정 방법을 제시한다. 레이저 마이크로미터와 와이어 센서를 이용하여 와이어 두께 및 소성 변형률을 실시간으로 계측하였으며, 이를 바탕으로 공정 최적화를 위한 디지털 트윈 기술을 개발하였다. 제안된 디지털트윈 프레임워크는 와이어 곡률과 소성 변형률을 동시에 최소화하는 것을 목표로 하여, 스프링백 현상을 억제하고 전기 저항을 감소시킴으로써 최종 제품의 기계적 정밀도와 전기적 성능을 보장한다. 연구 결과, 본 방법론은 헤어핀 권선 제조 공정의 적응성과 효율성을 크게 향상시켰으며, 유연한 EV 모터 생산을 위한 제조방안을 제시한다.

**Keywords:** Hairpin Coil, Wire Straightening Process, Real-time Optimization, Finite Element Method, Surrogate Model, Artificial Neural Network, Digital Twin

### Acknowledgement

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20013794)

---

1. 성균관대학교 기계공학과, 대학원생
2. 성균관대학교 지능형팹테크융합전공, 교수
3. 성균관대학교 지능로봇학과, 교수
4. 현대모비스 진단기술개발팀, 책임매니저

# 성균관대학교 기계공학과, 교수, E-mail: e.h.lee@skku.edu

## 가변 곡률 자동차 부품의 스프링백 저감을 위한 스마트 금형 제어기술 개발

구진모<sup>1</sup>· 이재욱<sup>2</sup>· 김태효<sup>#</sup>

### Development of Smart Die Control Technology for Springback Reduction in Automotive Parts with Variable Curvature

J. M. Koo, J. W. Lee, T. H. Kim

#### Abstract

This study presents the development of springback control technology for automotive parts with variable curvature. In components with non-uniform curvature, significant dimensional deviations occur due to springback, and conventional compensation methods such as bead addition or repeated die modifications increase design and manufacturing costs. To address this, a tilting grooved CAM punch structure controlled by dual-axis servomotors was introduced, enabling three-dimensional shape control. Through simulations and experiments, the springback variation was reduced by over 80%. The control logic was also validated for consistency under variations in material properties and between coils. In particular, the use of laser sensors and measurement systems enabled precise evaluation of springback and experimental verification of the effectiveness of the control mechanism. This technology is expected to reduce die modification time, enhance productivity, and facilitate the broader application of high-strength steels.

**Keywords:** Springback, Variable Curvature, Automotive Parts, Smart Die, Servo Motor Control, High-Strength Steel.

---

1. 포스코 철강솔루션연구소, 수석연구원

2. 포스코 철강솔루션연구소, 수석연구원

# 포스코 철강솔루션연구소, 수석연구원, taehyokim@posco.com

# 품질산포 대응을 위한 시트레일 스프링백 자동보정 금형 개발

김태효<sup>1,#</sup>· 구진모<sup>2</sup>· 이재욱<sup>3</sup>

## Development of an automatic springback compensation die for seat rail quality variation

T.H. Kim, J. M. Koo, J. W. Lee

### Abstract

The seat rail is a structural component that connects the passenger seat to the vehicle floor. Increasing safety regulations and weight reduction requirements necessitate high rigidity and dimensional accuracy. Traditionally, steels with 780 MPa were widely used; however, recent trends have seen the aggressive adoption of ultra-high-strength steels, such as 980 MPa and 1180 MPa grades.

Application of ultra-high-strength steel is limited by material property variation. Complex manufacturing processes and elastic deformation of dies and presses make it difficult to maintain consistent product quality, hindering the broader use of GIGA Steel.

In this study, we developed specialized dies capable of online springback measurement and automatic compensation for dimensional deviations during seat rail production. Dimensional deviations are detected in real time using touch sensors embedded within the die, and corrections are applied via a uniquely designed cam punch mechanism. Validation on an actual mass production line demonstrated that dimensional accuracy can be reliably maintained within specified tolerances.

**Keywords:** Seat rail, Springback, Ultra high strength steel, Automatic compensation, property variation

---

1. 포스코 기술연구원, 수석연구원, taehyo@posco.com

2. 포스코 기술연구원, 수석연구원

3. 포스코 기술연구원, 수석연구원

## 레이저 기반 적층제조를 활용한 Ni기 초내열합금/세라믹 경 사기능소재 제조

유현용<sup>1</sup>, 유진영<sup>2</sup>, 김태현<sup>3</sup>, 이진수<sup>3</sup>, 안성열<sup>4</sup>, 김형섭<sup>5</sup>, 이태경<sup>6</sup>, 김세윤<sup>7</sup>, 김정기<sup>8,#</sup>

### Fabrication of Ni-based Superalloy/Ceramic Functionally Graded Materials Using Laser-Based Additive Manufacturing

H.Y. Yu, J. Yu, T.-H. Kim, J.-S. Lee, S.Y. Ahn, H.S. Kim, T. Lee, S.-Y. Kim, J.G. Kim

#### Abstract

가스터빈의 성능 향상을 위해서는 터빈입구 온도의 향상이 필수적임에도 불구하고, 소재개발 및 냉각유로 설계에 기반한 냉각 전략은 한계에 도달하였다. 이에 금속 모재로의 열전달을 최소화하기 위해 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC) 적용이 필수적으로 요구되고 있다. TBC 적용에 의해 기존 대비 우수한 단열성능을 확보해 터빈 온도의 추가적인 향상이 가능하였지만, 금속 모재와 세라믹 코팅재 사이의 열물성 차이로 인한 박리현상으로 인한 신뢰성 문제가 대두되었다. 따라서, 상기 문제점을 해결하기 위해서는 Bond Coat 추가와 같은 다양한 전략을 구상하였으며, 이 중 경사기능재료(Functionally Graded Material; FGM)는 금속 모재와 세라믹 코팅재의 분율을 점진적으로 변화시켜 열물성 차이를 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 기존의 용사 공정은 FGM 구현 중 조성 변화를 정밀하게 제어하는데 한계가 있으므로 신공정의 개발이 필요한 실정이며, 레이저 기반 적층제조는 상기 문제를 대체할 수 있는 전략으로 각광받고 있다. 상기 이슈에 대응하여 본 연구에서는 레이저 기반 적층제조를 활용해 니켈기 초내열합금과 세라믹을 동시에 활용한 경사기능재 제조전략을 제시하고 그에 따른 기본 물성평가 결과에 대해 논하고자 한다.

**Keywords:** Additive manufacturing, Functionally Graded Materials, Ni-based Superalloy, Ceramic

---

1. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 석사과정
2. 부산대학교 기계공학부, 박사과정
3. 경남대학교 메카트로닉스공학과, 석사과정
4. 포항공과대학교 친환경소재대학원, 박사과정
5. 포항공과대학교 친환경소재대학원, 교수
6. 부산대학교 기계공학부, 교수
7. 경남대학교 메카트로닉스공학과, 부교수
8. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 부교수

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

## 격자 구조에 따른 제올라이트 코팅 및 이산화탄소 흡착 특성 평가

이광규<sup>1</sup>· 이성준<sup>1</sup>· 안동규<sup>#</sup>

### Evaluation of Zeolite Coating and CO<sub>2</sub> Adsorption Properties in Lattice Geometries

K. K. Lee, S. J. Lee, D. G. Ahn

#### Abstract

대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 기후 변화의 주요 원인으로 효과적인 이산화탄소 포집 기술 개발의 중요성이 부각되고 있다. 본 연구에서는 격자 구조 형상에 따른 활성탄 코팅량과 이산화탄소 흡착 특성을 평가하였다. 우선 12가지 격자 구조 형상의 표면적을 계산하였으며, 그 중 표면적이 가장 큰 두 가지 형상을 선정하였다. 비교 기준으로 단순 입방 구조를 추가하여 총 세 가지 형상을 연구 대상으로 설정하였다. 시편은 FDM 방식의 3D 프린터를 활용하여 제작하였으며, 제작된 시편에 제올라이트 코팅을 진행하였다. 정밀 전자 저울을 이용하여 제작된 시편의 무게, 코팅 후 무게, 이산화탄소 흡착 실험 후 무게를 측정하였다. 실험 결과, 이산화탄소 흡착 성능에 중요한 요인은 코팅량임을 확인하였으며, 구조 형상에 따라 코팅량이 유의하게 달라짐을 확인하였다. 최종적으로, 세 가지 구조 중 이산화탄소 흡착 성능이 가장 우수한 격자 구조를 도출하였다.

**Keywords:** Lattice Structure, Zeolite, Carbon dioxide, Adsorption Performance

#### Acknowledgement

This work supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea government (MSIT) (No.RS-2023-00219369 and No.RS-2025-00562459), Republic of Korea.

---

1. 조선대학교 기계공학과, 연구원

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

# TPMS 단위체의 설계에 따른 도파관의 전자기적 특성 분석

범종찬<sup>1</sup> · 안동규<sup>#</sup>

## Investigation of the Effects of Design of Unit Cell for TPMS on Electromagnetic Characteristics of Waveguide

J. C. Beom, D. G. Ahn

### Abstract

삼중 주기적 최소 곡면 (Triply Periodic Minimal Surface : TPMS) 은 내부에 주기적으로 반복되는 곡면 구조를 가지고 있다. 이러한 특성으로 인해 전하가 TPMS 내부로 급전될 경우 내부에서 다중 반사 (Multi-reflection) 현상을 야기시킬 수 있다. 하지만 TPMS 구조가 포함된 도파관 (Waveguide) 내외부의 전자기적 특성을 분석하는 연구는 아직 진행되지 않았다. 따라서 이 연구에서는 TPMS 단위체를 기반으로 설계한 도파관의 전자기적 특성을 분석하고자 한다. 상용 소프트웨어인 nTopology 및 ANSYS SpaceClaim 을 통해 네트워크와 솔리드 시트 기반 TPMS 단위체를 가진 도파관을 설계하였다. 또한, ANSYS HFSS (High Frequency Structure Simulator) 소프트웨어를 통해 전기장, 자기장 및 S-파라미터를 분석하였다. 이 결과를 통해 매우 높은 주파수 (Frequency) 대역에서도 대부분의 TPMS 단위체에서 매우 높은 반사 (Reflection) 현상이 유도되는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 TPMS 구조를 전자기파 간섭 (Electromagnetic Interference : EMI) 차폐 필터에 적용할 경우 높은 차폐 성능을 나타낸다는 것을 시사한다.

**Keywords:** Triply Periodic Minimal Surface, Waveguide, Electromagnetic Characteristics

### Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2023-00219369 and No. RS-2025-00562459)

---

1. 조선대학교 기계공학과, 대학원생

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

# TPMS 구조 기반 전자파 간섭 차폐 필터의 주파수 변화 에 따른 전기 전도도 및 차폐 효율 변화 고찰

한승현<sup>1</sup>· 범종찬<sup>1</sup>· 이성준<sup>2</sup>· 안동규<sup>#</sup>· 김창래<sup>3</sup>

## A Study of the Effects of Frequency on Electrical Conductivity and Shielding Effectiveness of Electromagnetic Interference Filters based on TPMS Structure

S. H. Han, J. C. Beom, S. J. Lee, D. G. Ahn, C. L. Kim

### Abstract

본 연구는 전자파 간섭 (EMI) 차폐 성능 향상을 위한 새로운 구조적 설계 전략으로서 TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) 기반 필터를 제작하고, 전기적 특성과 차폐 효율 간의 상관성을 규명하는 데 목적이 있다. TPMS 구조는 Diamond, Primitive, Gyroid 세 가지 유형을 선택하여 FDM 기반 3D 프린팅을 통해 제작하였다. 시편의 전기적 특성은 LCR 측정기를 이용하여 부동한 교류 주파수 조건에서 저항 값을 측정하였다. 이후 동축 전송선 (Coaxial Transmission Line) 시험법을 활용하여 30 MHz - 1.5 GHz 주파수 대역에 걸친 전자파 차폐 효율을 실험적으로 평가하였다. 측정된 저항 값과 차폐 효율 데이터를 상호 비교함으로써, 전기 전도도의 변화가 전자파 차폐 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구는 TPMS 구조의 기하학적 특성이 주파수 의존적 전도도 및 EMI 차폐 효율에 미치는 상관성을 실험적·정량적으로 규명하였으며, 향후 구조 기반 EMI 차폐 필터 설계에 기초 자료를 제공한다.

**Keywords:** Electrical Conductivity, Electromagnetic Interference Shielding, Triply Periodic Minimal Surface

### Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2023-00219369, No. RS-2025-00562459)

---

1. 조선대학교 기계공학과, 대학원생
2. 조선대학교 기계공학과, 학술연구교수
3. 조선대학교 기계공학과, 교수

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

## 11. 특별세션

21th ICIM Technical Forum  
(KAIST / Deakin University)

재료성형 공정의 유한요소해석  
발자취 및 최신연구 동향

(서울과학기술대학교)

(제 5 발표회장)

# 전기차 배터리 Cap-Can 레이저 용접부의 국부 기계적 거동 특성 평가

조동혁<sup>1</sup> · 이주원<sup>1</sup> · Junjie Ma<sup>2</sup> · Hassan Ghassemi-Armaki<sup>2</sup> ·

Masoud M. Pour<sup>2</sup> · Blair E. Carlson<sup>2</sup> · 윤정환<sup>1,3,#</sup>

## Characterization of Local Mechanical Behavior in EV Battery Cap-Can Laser Welds

Donghyuk Cho<sup>1</sup> · Juwon Lee<sup>1</sup> · Junjie Ma<sup>2</sup> · Hassan Ghassemi-Armaki<sup>2</sup> ·

Masoud M. Pour<sup>2</sup> · Blair E. Carlson<sup>2</sup> · Jeong Whan Yoon<sup>1,3,#</sup>

### Abstract

Laser welding of the cap-to-can joint in electric vehicle (EV) batteries is a critical process that governs structural integrity and safety, yet the welds often exhibit complex geometries, microstructural variations, and process-induced defects such as cracks and lack of fusion. In this study, the local mechanical behavior of cap-can laser welds was systematically investigated through classification of weld types, microstructural characterization, and micro-scale tensile testing combined with Digital Image Correlation (DIC). Welded samples were divided into three categories: sound welds, lack-of-fusion welds, and cracked welds. The results revealed that weld strength is strongly defect-driven, with sound welds showing the highest load capacity, while lack-of-fusion and cracked samples exhibited significantly reduced strengths with altered fracture mechanisms. Comparative evaluation with industrial samples demonstrated that can thickness and weld penetration influence both defect density and strength distribution. The findings highlight the critical relationship between microstructure, defects, and local fracture mechanisms, providing valuable insights for defect-tolerant design and the development of finite element models to predict the local fracture behavior of EV battery welds.

**Keywords:** Laser welding, EV battery, Local mechanical behavior, Defect-driven fracture, Micro-tensile testing

---

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. General Motors Global R&D

3. Deakin University

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

## 탭-버스바 이종 레이저 용접부 분석과 모델링

이주원<sup>1</sup> · 조동혁<sup>1</sup> · Hassan Ghassemi-Armaki<sup>2</sup> · Masoud M. Pour<sup>2</sup> · Blair E. Carlson<sup>2</sup> · 윤정환<sup>#</sup>

### Advanced Characterization and Modeling of Dissimilar Laser Welds for Tabs to Busbar

J. Lee, D. Cho, H. Ghassemi-Armaki, M. M. Pour, B. E. Carlson, J. W. Yoon

#### Abstract

Laser welding is a joining technique that employs a laser beam as a concentrated heat source to locally melt base materials and form a metallurgical bond. With its high precision, ease of automation, and low heat input, this process minimizes the heat-affected zone and is particularly advantageous for the fabrication of multiple tab–busbar joints in battery packs. Nevertheless, these joints frequently involve dissimilar metals, such as aluminum and iron. During the melting and solidification of such dissimilar combinations, various intermetallic compound (IMC) phases are generated depending on the alloy composition and cooling conditions. Because of their inherent brittleness, these IMCs significantly compromise the mechanical integrity of the joint. In this study, the formation of IMC phases under different welding parameters was systematically examined, and their influence on joint strength was evaluated.

**Keywords:** Keyhole laser welding, Dissimilar weld joint, Intermetallic compounds, Imperfections

---

1. 한국과학기술원, 기계공학과, 박사과정

2. General Motors Research and Development Center

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

# 재료 물성 변화를 고려하기 위한 DIC 잡음 자동 보정 기법

임현용<sup>1</sup>, 윤정환<sup>1,2#</sup>

## Automated Noise Correlation Method for DIC Data to Consider Material Property Variations

H. Lim, J.W. Yoon

### Abstract

Although Digital Image Correlation (DIC) is widely used for full-field strain measurement, its quantitative application has been limited by inherent data noise. To address this challenge, this study develops a new automated signal processing framework that integrates Continuous Wavelet Transform (CWT) and Smoothing Regression Splines (SRS). This two-step approach systematically isolates and removes the two primary sources of error in DIC measurements: systematic fluctuations and random noise. Notably, the reliability of the process is secured by an automated signal evaluation criterion, enabling large datasets to be processed consistently and reproducibly with minimal user intervention. Demonstrating its broad applicability, the framework was successfully tested on diverse cases including high-strength steel, aluminum, and specimens in welded, shear, and plane-strain configurations. It proved highly effective in separating the underlying material property data from noise and fluctuations across all conditions. As a result, The framework provides the high-fidelity, quantitative strain data essential for the precise calibration and validation of advanced constitutive models, directly improving the predictive accuracy of material behavior simulations.

**Keywords:** Digital Image Correlation, Continuous wavelet transformation, Smoothing Regression Splines, Automation, Material parameter identification. Noise and fluctuations.

---

1. 한국과학기술원 기계공학과.

2. School of Engineering, Deakin University.

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

# Distortion Minimization of Roller Offset Formed Aluminum Sheet through Bayesian Optimization algorithm

**D. H. Han<sup>1</sup>, Lu Huang<sup>2</sup>, Thomas B. Stoughton<sup>3</sup>, T. G. Ahn<sup>4</sup>, H. S. Choi<sup>5</sup>, J. W. Yoon<sup>#</sup>**

## Abstract

A roller offset forming machine is an automated system capable of interchanging various machining tools to incrementally shape metal sheets, making it essential for flexible, small-scale vehicle production. This machine utilizes a roller offset forming process, where two rollers progressively fabricate metal sheet offsets, enabling the creation of diverse features without modifying the equipment. However, this method can introduce sheet distortion and unintended geometric deviations, particularly in aluminum sheets. This study employs finite element analysis to investigate the relationship between sheet distortion, manufacturing process variables, and roller geometry. A Bayesian optimization algorithm is applied to identify and validate optimal process parameters for minimizing twisting. Following process optimization, the bead shape of the rollers is parameterized, and the same algorithm is used to further reduce the distortion, achieving a final distortion degree value below 1.5 mm.

**Keywords:** finite element model, distortion, anisotropy, roller offset forming, Bayesian optimization

---

1. KAIST, Mechanical Engineering, PhD. Student =

2. General Motors, Global R&D

3. General Motors, Global R&D

4. KAIST, Mechanical Engineering, PhD. Student

5. KIMS

# Corresponding Author: 1. KAIST, Mechanical Engineering Professor. E-mail:j-yoon@kaist.ac.kr

# 비대칭 알루미늄-폴리머 적층형 복합재 필름의 층간 박리 거동 모사

사공철<sup>1</sup> · 장택진<sup>2</sup> · 안태균<sup>1</sup> · 윤정환<sup>#</sup>

## Modeling Interlayer Delamination Behavior in Asymmetric Aluminum-Polymer Laminate Composite Film

C. Sagong, T. J. Jang, T. Ahn, J. W. Yoon

### Abstract

효율 높은 리튬 이온 배터리 제조를 위해, 산업계에서는 배터리 셀의 성형 깊이를 증대하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 이를 위해, 성형성이 뛰어난 소재를 이용한 파우치형 배터리 개발에 매진하는 업체들이 늘어나고 있다. 파우치형 배터리에 사용되는 재료는 비대칭 알루미늄-폴리머 적층형 복합재로, 복잡한 구조로 인해 일반적인 배터리 셀의 소재인 금속과는 다른 거동을 보인다. 해당 소재는 폴리프로필렌-알루미늄-나일론-PET의 4개의 층으로 이루어져 있으며, 실제 배터리 셀 성형 시 층간 박리가 발생하는 경우도 존재한다. 그러나 이 같은 박리 현상이 성형 중 관찰되지 않는 경우도 확인되어, 실공정에서 이를 방지하기 위한 조건을 구축하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 이를 위한 시뮬레이션에서 사용할 수 있는 응집영역모델(Cohesive Zone Model)을 구축하였다. 층간 박리 거동에 대한 Lap Shear Test 및 Peel Test를 진행하였고, 최적화를 통해 응집영역모델의 계수들을 결정하였다.

**Keywords:** Al-Polymer Laminate Composite, Delamination, Cohesive Zone Model, Lap Shear Test, Peel Test

---

1. 한국과학기술원 기계공학과, 대학원생

2. SK온

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

# 이방성 소성모델과 사면체 요소를 이용한 판재성형의 유한요소해석

정완진<sup>1#</sup> · 정석환<sup>2</sup> · 전상윤<sup>2</sup> · 전만수<sup>3</sup>

## Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming using Anisotropic Plasticity Models and Tetrahedral Elements

W. J. Chung<sup>1#</sup>, S. H. Chung<sup>2</sup>, S. Y. Joun<sup>2</sup> and M. S. Joun<sup>3</sup>

### Abstract

In many sheet metal forming processes, especially those involving thick plates, complex geometries, or significant bending, the stress distribution along the thickness can be non-negligible. Shell elements treat the thickness as an additional parameter and often assume a simple distribution of strain along the thickness, which may not accurately capture local thickness effects or contact phenomena. Solid elements can improve accuracy in areas of large bending or steep strain gradients because they more accurately capture the stress evolution across the entire sheet metal thickness. Hexahedral solid elements have been primarily studied in sheet metal forming analysis because they are superior to tetrahedral elements in terms of accuracy and computational efficiency. On the other hand, tetrahedral solid elements have excellent flexibility in creating meshes of complex geometries, making them particularly advantageous for analyzing sheet metal forming processes in areas where complex geometries or automatic remeshing are required. In this study, an elasto-plastic finite element method for anisotropic sheet metal is formulated using tetrahedral solid elements. A mixed method is applied to relieve volume locking. Hill's 1948 model is implemented in 3D form considering anisotropy. The anisotropy axis in the thickness direction is accurately tracked when considering the deformation of the anisotropy axis. To verify the accuracy of the implementation, the deep drawing of a cylindrical cup is analyzed. The cup height distribution and punch stroke vs. force curve are compared with those in previous studies using shell and hexahedral elements.

**Keywords:** Finite Element Analysis, Anisotropic Plasticity Model, Tetrahedral Element

---

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 교수

2. MFRC

3. 경상국립대학교, 기계공학부, 교수

# 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 교수, wjchung@seoultech.ac.kr

## 고분자 가공에서 CAE의 응용

성승민<sup>1</sup>· 정영현<sup>1</sup>· 이현동<sup>1</sup>· 최재웅<sup>2</sup>· 류민영<sup>2,\*#</sup>

### Applications of CAE to Polymer Processing

S. M. Sung, Y. H. Jeoung, H. D. Lee, J. W. Choi, M.-Y. Lyu

#### Abstract

Computer-Aided Engineering (CAE) has increasingly established itself as a critical methodology across a wide spectrum of engineering disciplines. Its rapid growth has been facilitated by advances in applied mathematics, numerical analysis, and the remarkable improvement in computational capabilities, which collectively enable more precise simulations and data-driven decision-making in industrial practice. Among various materials, polymers occupy a particularly significant position in modern manufacturing due to their excellent processability and adaptability to diverse forming methods. Consequently, the integration of CAE into polymer processing has become indispensable, not only for determining optimal processing conditions but also for providing essential design data for dies and molds, as well as for diagnosing defects and developing systematic countermeasures.

This review aims to examine the current state and practical implications of CAE in polymer product manufacturing. Special attention is given to its applications across major forming processes such as injection molding, blow molding, extrusion, compression molding, and coating, with emphasis on both methodological developments and industrial case studies. By synthesizing these examples, the review underscores the effectiveness of CAE as a tool for improving process efficiency, enhancing product quality, and reducing development costs, while also highlighting its potential directions for future research and technological innovation in polymer engineering.

**Keywords:** Polymer Processing, CAE, Process Optimization, Mold Design, Trouble Shooting

---

1. 서울과학기술대학교 대학원 기계정보공학과  
2. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과  
# 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 교수  
E-mail :mylyu@seoultech.ac.kr

# 이미지 기반 유한요소해석 대체 AI 모델 개발

노현도<sup>1</sup>· 문승현<sup>1</sup>· 배유빈<sup>1</sup>· 이창환<sup>#</sup>

## Development of the Image-Based Surrogate Modeling for Finite Element Analysis in Sheet-Metal Forming

H. D. Noh, S. H. Mun, Y. B. Bae, <sup>#</sup>C. W. Lee

### Abstract

유한요소해석(FEA)은 금속 성형 공정 해석에서 높은 정확도를 제공하지만, 계산 시간이 길고 반복적인 설계·검증 과정에서 효율성이 떨어지는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 이미지 예측 기반 딥러닝 모델(PIX2PIX)을 적용하여 재료의 성형 거동을 예측하는 대체 모델을 개발하였다. 이를 위해 ABAQUS-PYTHON-MATLAB 연동 파이프라인을 구축하여 알루미늄 판재 HAT 형상 성형 공정에 대한 900개의 시뮬레이션 데이터를 자동 생성하였으며, 각 모델의 금형 형상과 성형 후 변위(U1/U2/U3), 소성 변형률(PEEQ)을 2D HEIGHT-MAP 이미지로 변환하여 학습 데이터셋을 구성하였다. 학습된 PIX2PIX 모델은 입력된 금형 형상 이미지로부터 성형 후 형상 및 소성 변형률 분포를 수 초 내에 예측할 수 있었으며, 정량 평가 결과 MAE 약 0.002, RMSE 약 0.003, SSIM 약 0.998의 우수한 성능을 나타냈다. 또한 모델 출력 이미지에서 형상 좌표를 추출하여 기하학적 특성 (길이, 높이, 곡률 반경 등)를 측정하고, DIFFERENTIAL EVOLUTION(DE) 최적화 알고리즘과 연계함으로써 스프링백을 고려한 목표 형상에 따른 최적 금형 설계를 진행하였다.

**Keywords:** 금속 성형, FEM, 머신러닝, 유한요소해석 대체모델, 이미지 기반 학습, Pix2Pix

### 후기

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단 (NRF)의 지원 (과제번호: RS-2023-00249455)을 받아 수행되었습니다.

---

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

# 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 기계정보프로그램 부교수, cwlee@seoultech.ac.kr

# 다상 Q&P 강의 응력 상태 의존 마르텐사이트 상변태와 소성 거동 예측을 위한 결정소성 모델링 연구

박진홍<sup>1</sup>· 이명규<sup>#</sup>

## Crystal Plasticity Modeling of Stress State-Dependent Martensitic Transformation in Multiphase Q&P Steels

J. Park, M.-G. Lee

### Abstract

Quenching & Partitioning(Q&P) 강은 3세대 고강도강으로, 잔류 오스테나이트(retained austenite, RA)의 변형유기 마르텐사이트 변태(deformation-induced martensitic transformation, DIMT) 효과를 통해 우수한 강도와 연성을 동시에 확보할 수 있다. 하지만, DIMT 거동은 응력 상태와 미세조직 특성에 의존하여 기존의 단순화된 경험식 기반 모델은 이러한 복잡한 상호작용을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 DIMT와 변태유기소성(Transformation-induced plasticity, TRIP) 효과를 통합한 새로운 결정소성(crystal plasticity, CP) 모델을 개발하였다. 또한 EBSD, XRD, TEM 등 미세조직 분석을 통해 Q&P 강의 실제 미세조직 특성을 반영한 다상 대표체적요소(representative volume element, RVE)를 생성하였다. 개발된 모델과 RVE를 활용하여 단축 인장/압축, 평면 변형 인장, 등이축 인장 등 다양한 응력 상태에 대해서 전산모사를 수행하고, 마르텐사이트 상변태 거동과 기계적 거동을 분석하였다. 이를 통해, 응력 상태에 따라 Q&P강의 상변태 속도와 RA 안정성이 다른 것을 확인했으며, 더 나아가 Q&P 강의 고유 특성인 비대칭 항복 곡면을 예측할 수 있었다. 또한 미세조직적 요인이 DIMT 속도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여, Q&P 강의 복합적 소성 거동과 미세조직-기계적 성질 간의 상관관계를 확인하였다.

**Keywords:** Quenching and Partitioning Steel, Deformation-Induced Martensitic Transformation, Transformation-Induced Plasticity, Crystal Plasticity

---

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 조교수

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

# 소성가공 시뮬레이션에서 유동특성과 마찰에 관한 고찰

전만수<sup>#</sup>

## Flow behavior and friction in metal forming simulation

M. S. Joun

### Abstract

Friction at the material-die interface, along with the flow behaviors of materials, has a significant impact on plastic deformation during metal forming. Extensive practical research on the friction has thus been conducted, and industrial development has been remarkable. However, despite its significant impact on the metal forming simulations, the importance of research in this area has been underestimated, and related studies have been relatively limited. About half a century ago, Wilson [1] emphasized the inadequacy of a constant friction coefficient and the constant shear friction law, along with the phenomenon of lubrication regime changes occurring during plastic deformation in metal forming, yet most researchers still use a constant friction coefficient and friction constants. As a result, despite the innovative academic and industrial contributions of many researchers, friction phenomena in metal forming remain in an incomplete state of confusion. For example, many researchers have related the friction coefficient to the yield criterion, and they have believed that the friction coefficient cannot exceed 0.577. It has also been believed that the sticking condition and the unity friction factor are the same, but in natural phenomena, displacement and traction cannot be prescribed simultaneously. A few studies either start from this misunderstanding or acknowledge this point in their content. In this study, researches on friction phenomena during metal forming were reviewed and synthesized. The main review topics include friction phenomena, friction modeling and friction laws, friction-related issues, lubricants, and tribometers, with their application spaces limited to metal forming.

**Keywords:** Metal forming(금속 성형), Tribological features(마찰학적 특징), Friction model(마찰 모델), Lubrication regime change(윤활 체계 변화)

### 사사

이 연구는 MOTIE 가 지원하는 202140000520 의사업과 RS-2024-00398425 의 결과물입니다.

### 참고문헌

[1] Wilson, W.R.D. Friction and lubrication in bulk metal-forming processes. *J. Appl. Metalwork.* 1978, 1, 7-19. <https://doi.org/10.1007/BF02833955>.

---

<sup>#</sup> 경상국립대학교 기계항공공학부 교수

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

## 유한요소해석 기반 적층제조 특화 설계 적용 사례

박 근<sup>#</sup>

### Applications of Design for Additive Manufacturing (DfAM) Based on Finite Element Analysis

Keun Park

#### Abstract

The rapid development of additive manufacturing (AM) has expanded the application area of AM from conventional prototyping to the direct fabrication of functional parts. The AM processes provide exceptional design flexibility, enabling four types of complexities: geometric, hierarchical, functional, and material. Consequently, design for additive manufacturing (DfAM) has emerged as an effective strategy to overcome traditional design limitations, with the aim of enhancing part functionality and reducing weight. In this work, we introduce several DfAM applications for the development of functional components, with a particular focus on those supported by finite element analyses (FEAs). First, topology optimization was applied to design lightweight components for adaptive sports equipment, demonstrating significant performance improvements. Second, microstructural designs based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) were investigated not only for structural applications but also for thermofluidic devices, such as airless tire spokes and compact heat exchangers. Finally, we discuss advances in DfAM methodologies through the integration of machine learning techniques, which enable the development of mechanical metamaterials. These include optimal designs for kirigami-based auxetic metamaterials and compliant mechanisms derived from digitized cell structures.

**Keywords:** Design for additive manufacturing, Finite element analysis, Topology optimization, triply connected periodical surface (TPMS), Machine learning.

#### 후기

본 연구는 과학기술정보통신부(한국연구재단)의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2024-00333936, RS-2025-00512549).

---

# 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 교수,  
E-mail: kpark@seoultech.ac.kr

# 비선형 변형률 경로에서의 변형률속도 의존 왜곡경화 모델 및 U-드로 벤딩 해석

최현성<sup>1</sup>· 윤정환<sup>#</sup>

## A strain rate dependent distortional hardening model and its application to high speed U-draw

H.Chi, J. W. Yoon

### Abstract

본 연구에서는 변형률속도 의존 왜곡경화(distortional hardening) 모델을 새롭게 제안하였다. 제안된 모델은 선형 및 비선형 변형 경로 변화에서 나타나는 변형률속도 의존 재료 거동을 설명할 수 있도록 단순화된 변형률속도 비의존 왜곡경화 모델(Choi and Yoon, 2023)을 기반으로 정식화되었다. 제안된 모델은 임의의 항복함수와 결합할 수 있으며, 등방 및 이방 항복의 변형률속도 의존 거동을 기술할 수 있다.

선형 변형 경로의 경우, 단조 하중 조건에서 증가하는 흐름응력의 수렴 속도와 변형률속도에 따른 항복 응답을 각각 나타내는 두 상태 변수를 통해 등방 경화 거동을 설명할 수 있다. 비선형 변형 경로에서는 로그 함수 형태의 변형률속도 항을 기준 모델의 진화식에 도입함으로써, Bauschinger 효과, 항복면 수축, 영구 연화 및 비선형 천이 거동을 모사할 수 있도록 하였다. 모델 검증을 위해 TRIP980 과 TWIP980 강재에 대해 변형률속도 의존 인장-압축 실험(Joo et al., 2019)을 수행하였으며, 추가적으로 원시 시편과 예변형 시편을 이용한 고속 U-드로 벤딩 시험을 진행하였다. 스프링백 예측에서는 변형률속도 비의존 등방 경화 모델, 변형률속도 의존 등방-이동경화 모델, 그리고 본 연구에서 제안된 왜곡경화 모델을 비교하였다. 그 결과, 주요 변형 경로 변화가 정·역하중 전환 형태로 나타나는 원시 시편에서는 모든 모델이 유사한 정확도를 보였으나, 이선형 및 삼선형 변형 경로 변화가 발생하는 예변형 시편에서는 제안된 모델이 가장 우수한 예측 성능을 나타냄을 확인하였다.

**Keywords:** Strain rate, Distortional hardening, Nonlinear strain paths, High speed U-draw bending, Springback

---

1. 한국재료연구원, 항공우주재료실증센터, 선임연구원

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

# FEM 해석과 실험 데이터의 결합을 통한 전기자동차 부품 실시간 자율제조 공정 개발

이은호<sup>1#</sup>

## Autonomous Manufacturing Processes for Electric Vehicle Components through the Integration of FEM and experimental data

E. H. Lee<sup>#</sup>

### Abstract

본 연구는 전기자동차의 헤어핀모터생산과 자체생산공정에 있어서 유한요소시뮬레이션과 실험데이터를 결합하여 학습한 뒤 이를 통해 실시간 센싱데이터로 공정을 판단하고 flexible한 하드웨어를 통해 실시간 제어를 하여 자율제조를 하는 공정개발을 소개한다. 실험데이터는 매우 구체적인 정보를 담고 있지만 outlier 등의 데이터 때문에 over fitting의 문제가 존재하기에 governing laws를 따르는 FEM해석은 이를 보호해 줄 수 있다. 이들을 적절히 통합하여 학습하고, flexible한 제어 하드웨어를 이용하면 공정설계와 관리에 있어서 cost를 99%이상 절감할 수 있다. 이 방식을 실제 공정에 적용한 연구를 소개한다.

**Keywords:** Autonomous manufacturing, Finite Element Analysis, Experimental data, Electrical Vehicle

---

1. 성균관대학교 기계공학부, 부교수

# 성균관대학교, 기계공학부, 부교수, E-mail:e.h.lee@skku.edu

## 적층 제조 공정의 유한요소해석

안동규<sup>1#</sup>, 이광규<sup>2</sup>

### Finite Element Analysis of Additive Manufacturing Process

D. G. Ahn, K. K. Lee

#### Abstract

최근 전세계적으로 적층 제조 (Additive Manufacturing: AM) 공정에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 적층 제조 공정은 재료를 제거하는 전통적인 가공 방식과 달리 재료를 한 층씩 쌓아올려서 제품을 제작하는 공정이다. 적층 제조 공정은 가공 공정으로는 제작이 어려운 복잡한 형상, 내부 형상 및 언더컷(Undercut) 등을 쉽게 제작할 수 있는 장점이 있어, 최근 연구계와 산업계에서 매우 폭넓게 활용되고 있다. 적층 제조 공정들 중에서 상당수는 재료의 용융·냉각·고화 또는 경화를 기본 공정 원리로 이용한다. 이로 인하여 적층 제조 공정으로 제작된 제품의 정밀도는 온도 및 상변화 등에 따른 잔류應力과 변형 및 결함 발생에 크게 영향을 받는다. 이 발표에서 적층 제조 공정의 온도 이력과 잔류應力 발생 특성을 분석하기 위한 유한 요소 해석 기법을 소개하고자 한다. 특히 급속 가열과 급속 냉각의 사이클이 반복되는 금속 적층 제조 공정에 대한 비정상·비선형 3차원 유한요소해석 기법을 중심으로 설명하고자 한다. 이 기법을 실제 공정 분석과 제품 정밀도 평가에 적용하여, 공정 최적화 및 제품 설계 최적화에 적용한 예를 소개하고자 한다. 아울러, 이 유한 요소 해석 기법의 장단점을 고찰하여 중대형 제품 제작용 적층 제조 공정에 적용 가능한 대체적 적층 제조 공정용 유한 요소 해석 기법의 방향성에 대해서 토론하고자 한다.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Finite Element Analysis, Modeling, Thermal History, Residual Stress

---

1. 조선대학교 기계공학과, 교수

2. 조선대학교 멀티스케일 구조기반 초고효율 CO<sub>2</sub> 흡착필터 개발 기초연구실 센터, 박사후연구원

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

## 12. 포스터 발표 A

A01 ~ A41

( B 동 2 층 로비 )

## B-Spline 및 Gaussian Process를 이용한 Inconel 718 고온 유동 응력 예측

이나경<sup>1,2</sup>· 안지섭<sup>1,2</sup>· 조아라<sup>1,2</sup>· 이상곤<sup>1</sup>· 이성민<sup>3</sup>· 정명식<sup>1</sup>· 황선광<sup>1, #</sup>

### High-Temperature Flow Stress Prediction of Inconel 718 via B-Spline and Gaussian Process Regression

N. K. Lee, J. S. An, A. R. Jo, S. K. Lee, S. M. Lee, M. S. Jeong, S. K. Hwang

#### Abstract

금속재료의 유한요소해석을 위해서는 정확한 고온 물성 확보가 필수적이다. 일반적으로 열간 성형 실험(Gleeble)이나 열역학 기반 소프트웨어(JMatPro)를 사용하지만, 높은 실험 비용과 계산 물성의 정확도 문제가 존재한다. 가우시안 프로세스(Gaussian process, GP) 회귀는 높은 예측 정확도와 불확실성 정량화가 가능하여 대안이 될 수 있으나, 대규모 데이터에서 공분산 행렬 계산으로 인한 과도한 계산 비용이 한계로 작용한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고 GP 모델의 장점을 효과적으로 활용하기 위해, 유동 응력 곡선 전체를 저차원 벡터로 변환한 후 예측하는 함수 데이터 기반 접근법을 제안하였다. B-Spline 기저 함수를 활용하여 각 실험 조건의 응력-변형률 곡선을 소수의 형상 계수로 표현하였으며, 각종 최소자승법을 적용하여 곡선의 주요 특징이 계수에 효과적으로 반영되도록 하였다. 이를 바탕으로 GP 모델을 구축하여 온도 및 변형률 속도와 같은 공정 조건으로부터 형상 계수를 예측하도록 하였다. 제안된 방법의 성능 검증을 위해 Inconel 718의 고온 압축 실험 데이터에 대해 Leave-One-Rate-Out 교차검증을 수행하여 내삽 성능을 평가하였다. 제안 방법은 기존 점 단위 GP 예측과 동등한 정확도 및 상용 프로그램 대비 우수한 성능을 보이며, 학습 시간을 수 초 이내로 단축하여 계산 효율성을 확보하였다. 따라서 제안된 방법은 금속 성형 공정의 유한요소해석 및 공정 최적화에 필요한 고온 물성을 경제적이고 신속하게 예측할 수 있는 실용적 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Inconel 718, Flow stress prediction, Gaussian process regression, B-Spline basis function

1. 한국생산기술연구원 대구뿌리기술지원센터

2. 부산대학교 기계공학부

3. 구미전자정보기술원 디지털융합본부

# 교신 저자: 한국생산기술연구원, 수석연구원, E-mail: skhwang@kitech.re.kr

# 전조 텁 수명 관리를 위한 기계학습 기반 성형 토크 특성 분석

이신명<sup>1,2</sup>, 정건우<sup>1,3</sup>, 정선호<sup>1</sup>, 유지민<sup>1,4</sup>, 이경환<sup>1,4</sup>, 양준일<sup>5</sup>, 전필중<sup>5</sup>, 이종섭<sup>#</sup>

## Machine Learning-based Analysis of Forming Torque Characteristics for Thread Tapping Tool Life Management

S.M. Lee, G.W. Jung, S.H. Jung, J.M. Yoo, G.H. Lee, J.I. Yang, P.J. Jeon, J.S. Lee

### Abstract

전조 텁핑(Thread Tapping)은 절삭 방식과 달리 소재의 소성변형을 이용하여 너트의 나사산을 성형하는 공정이다. 이는 절삭공정에 비해 너트의 강도를 향상시킬 수 있으며 칩이 발생되지 않아, 생산성 및 소재 수율을 높일 수 있다. 그러나 성형이 반복됨에 따라 성형부하에 의한 텁의 마모가 진행되며, 이러한 텁의 마모는 나사산 성형 품질의 저하를 야기한다. 따라서 나사산 성형품질을 확보하기 위해 텁의 한계 타수(수명) 관리가 중요하다. 일반적으로 전조 텁의 수명은 작업자의 경험에 의존하여 관리되고 있어, 텁의 실제 상태를 정확히 반영하지 못하는 문제가 발생하고 있다. 이로 인해 텁의 조기 교체나 과도한 사용으로 인한 제품 품질 저하, 생산 비용 증가 등의 문제가 야기된다. 본 연구에서는 너트의 성형 과정에서 발생하는 토크 데이터를 활용한 기계학습 기반 텁 수명 진단 모델을 개발하였다. 너트 성형 시 모터의 회전 토크를 실시간으로 수집하고, 이러한 양산 데이터를 기계학습 알고리즘에 학습시켜 현재 텁의 수명 상태를 진단할 수 있는 모델을 구축하였다. 이 연구를 통해 텁의 수명을 최대한 활용할 수 있게 되었으며, 개별 텁의 수명 편차에도 효과적으로 대응할 수 있었다. 결과적으로 불필요한 교체를 방지하고 최적의 교체 시점을 결정함으로써 생산 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Thread Tapping, Machine Learning, Forming Torque, Tool Life

1. 한국생산기술연구원, 지능화뿌리기술연구소, 유연생산연구부문

2. 서울대학교, 재료공학부

3. 성균관대학교, 지능형로봇학과

4. 인하대학교, 기계공학부

5. 프론톤텍, 품질관리부

# 한국생산기술연구원, 지능화뿌리기술연구소, 유연생산연구부문,

수석연구원, Email: jongsup@kitech.re.kr

# 금속 적층제조 기술을 적용한 사출금형 코어의 경량화 및 냉각 성능 향상에 관한 연구

송승현<sup>1</sup>· 송진영<sup>2</sup>· 황선광<sup>3</sup>· 정경환<sup>4</sup>· 박상민<sup>5</sup>· 차경제<sup>#</sup>

## A study on the Weight Reduction and Cooling Performance Improvement of Injection Mold Core Using Metal Additive Manufacturing

S. H. Song, J. Y. Song, S. K. Hwang, K. H. Jung, S. M. Park, K. J. Cha

### Abstract

사출성형 공정에서 생산성 향상을 위해 사이클 타임을 단축하는 것은 매우 중요하며, 전체 공정의 약 80%를 차지하는 냉각 시간의 단축이 핵심 과제이다. 본 연구에서는 스마트키 커버 제작용 사출금형 코어에 금속 적층제조 기술을 적용하여 금형의 경량화 및 냉각 효율 향상을 확인하고자 하였다. 3D CAD 를 이용하여 기존 금형 코어를 모델링하고, 위상 최적화(Topology Optimization, TO) 및 격자 구조(Lattice Structure)를 설계하였다. 적층 공정 및 냉각해석 바탕으로 적층 공정 및 냉각 효율에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 격자 구조를 적용한 경량 금형이 기존 금형 대비 냉각 성능이 우수한 것을 확인하였다. 설계된 경량 금형 모델을 기반으로 IN718 소재를 사용하여 금속 3D 프린터로 금형 코어를 제작하고, 열처리 및 연삭 등 후가공을 거쳐 금형을 완성하였다. 제작이 완료된 금형과 폴리스티렌(PS) 수지로 사출성형 테스트를 진행하여 성공적으로 스마트키 커버 시제품을 확보할 수 있었다. 본 연구를 통해 금속 적층제조 기술이 기존의 절삭 가공 방식으로는 구현하기 어려운 복잡한 내부 구조의 금형 제작을 가능하게 하여 금형의 경량화와 냉각 효율을 향상시켜 생산성을 크게 높일 수 있는 효과적인 방안임을 확인하였다.

**Keywords:** Injection Molding, Metal Additive Manufacturing, Lightweight Mold, Lattice Structure, Cooling Simulation

---

1. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹 학연협동과정생
2. 부산대학교 기계공학부, 박사과정
3. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 수석연구원
4. 한국생산기술연구원 기능성소재부품그룹, 수석연구원
5. 부산대학교 기계공학부, 교수

# 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 수석연구원, E-mail: kjcha@kitech.re.kr

## 고온 환경에서 진공 챔버 벽 처짐 변형 예측

윤준섭<sup>1</sup> · 김민기<sup>#</sup>

### Prediction of Wall Deflection of Vacuum Chambers at High Temperature

J. Yun, M. Kim

#### Abstract

Vacuum chambers are widely employed in various high temperature industrial processes, such as heat treatment, coating, and material testing, where a controlled low pressure environment is essential. These chambers are designed to maintain structural stability under extreme thermal and pressure gradients. However, at a high temperature, the mechanical properties of structural materials deteriorate significantly, resulting in reduced strength and stiffness. This degradation, combined with the pressure difference between the inner and outer environments, can lead to excessive deflection or even plastic deformation of the chamber walls, thereby threatening structural integrity. To address this issue, finite element simulations were conducted by applying temperature-dependent material properties to SUS304 and SS440 under operating conditions of 1500 °C and  $10^{-7}$  bar inside the chamber, and 25 °C and 1 bar outside. A range of wall thicknesses was analyzed to evaluate the stress distribution and deflection behavior. The results provide insight into how wall thickness governs chamber stability and offer fundamental guidelines for predicting deflection and ensuring reliable operation of vacuum chambers in extreme environments.

**Keywords:** Finite element method, Vacuum chamber, Temperature, Material property, Wall thickness, Deflection

#### Abstract

This study was supported by the funding grants from the Incheon Metropolitan city (No. KITECH IZ-25-0017) and the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) (No. KITECH UR-25-0013).

---

1. 한국생산기술연구원, 유연생산연구부문, 학생연구원

# 한국생산기술연구원, 유연생산연구부문, 선임연구원, E-mail: mkim@kitech.re.kr

# 와이어 와운드 두께에 따른 고압 압력 용기의 파단 안전 성능 연구

이예찬<sup>1</sup> · 지민기<sup>2</sup> · 김민기<sup>3</sup> · 임성식<sup>#</sup>

## Study on The Fracture Safety Performance of High Pressure Vessels with Varying Wire Wound Thickness

Y. Lee, M. Ji, M. Kim, S. Lim

### Abstract

냉간 등방압 프레스는 고압 공정에서 높은 압력 하중이 반복적으로 작용하므로, 용기의 구조적 안정성을 확보하지 못할 경우 치명적인 파손과 안전사고가 발생할 우려가 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 실린더에 와이어를 인장 상태로 감아 사전 응력을 부여하는 와이어-와운드 압력 용기 구조가 주목받고 있다. 이 방식은 내부 압력이 작용할 때 실린더에 발생하는 원주응력을 효과적으로 감소시켜, 전체 구조의 파단 안전 성능을 향상시키는 장점이 있다. 하지만 압력 용기의 두께 증가와 같은 단순한 치수 증가가 반드시 안전 성능의 선형적 향상으로 이어지지는 않으며, 일정 수준 이상에서는 압력 용기의 비용과 성능에 대한 효율성이 저하될 수 있다.

본 연구에서는 와이어-와운드 압력 용기의 설계 변수를 와이어 층의 두께로 설정하였으며, 등가 실린더 모델을 구성하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 얻은 응력 분포와 재료의 극한 강도의 비를 통해 안전율을 계산하였고, 안전율을 비교하여 압력 용기의 파단 안전 성능을 평가하였다. 해석 결과에서는 실린더 내경이 일정한 조건에서 와이어 층의 두께가 증가할수록 실린더의 안전율이 증가한 반면, 와이어 층에 분포되는 인장 응력이 증가로 인해 와이어 층의 안전율은 감소하였다. 압력 용기의 안전 성능 개선을 위해 실린더의 최대 압축 응력 증가, 와이어 층의 최대 인장 응력 감소라는 두 가지 목적 함수를 설정하여 최적화 설계를 수행하였다. 상기 결과는 초고압 압력 용기 설계의 최적화 지침을 제시함으로써, 압력 용기의 안전성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords:** Cold Isostatic Press, Wire-Wound, Pressure Vessel, Finite Element Analysis, Safety Performance

1. 한국생산기술연구원 유연생산연구부문, 학연협동과정생

2. 한국생산기술연구원 유연생산연구부문, 포스트닥터

3. 한국생산기술연구원 유연생산연구부문, 선임연구원

# 한국생산기술연구원 유연생산연구부문, 수석연구원, E-mail: sslim@kitech.re.kr

# 결정 소성과 변형 유도 마르텐사이트 변태 모델을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 저온 변형 거동 해석

최석현<sup>1</sup> · 이혁재<sup>1</sup> · 홍성태<sup>2</sup> · 이명규<sup>3</sup> · 한홍남<sup>#</sup>

## Abstract

준안정 오스테나이트계 스테인리스강을  $-100^{\circ}\text{C}$ 에서 저온 인장하였을 시 상온과 달리 마르텐사이트 변태가 수반되면서 재료가 강화되는 현상을 관측하였다.

본 연구에서는 SUS304에 대하여 저온에서 변형에 의해 오스테나이트 모상으로부터 마르텐사이트 상변태가 발생할 때의 결정 방위 변화 및 기계적 거동을 모사하기 위해, “결정 소성”과 “변형 유도 마르텐사이트 변태(MIMT)”를 융합한 해석 기법을 구축하였다. MIMT 모델은 2가지 핵심 가정을 기반으로 한다. 첫째, 오스테나이트 내에서 형성되는 shear band의 교차점에서 마르텐사이트의 핵생성이 발생한다 둘째, 마르滕사이트 각 variant의 내부 응력 및 변태 변형률에 의한 상호작용 에너지로부터 핵 생성 확률이 결정된다.

위 이론을 통해 모상 오스테나이트와 생성 마르滕사이트 간 격자 정합성을 유지하면서 마르滕사이트의 결정 방위를 계산할 수 있으며, 소성 변형 간 발생하는 slip에 의해 회전하는 방위 또한 계산할 수 있다. 또한, Micro scale의 결정 거동을 Macro scale의 해석에 반영하기 위해, 유한 요소의 각 Integration point에 다결정 방위를 할당하는 mean field 방식을 사용하였다. 수치해석은 ABAQUS/Explicit solver를 사용하여 계산을 수행하였다. 제안한 모델을 적용하여 일축 인장 시험과 전단 시험에 대해 각각 시뮬레이션을 진행하였으며, 변형 전후 각 결정의 방위, 마르滕사이트 분율, 응력 등의 계산 결과를 인장 곡선, EBSD 데이터와 비교하여 모델의 정확성 검증을 수행하였다.

**Keywords:** Austenitic Stainless Steel, TRIP, MIMT, Crystal Plasticity, Low-temperature Mechanical Behavior, Finite Element Analysis

---

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

2. 울산대학교 기계공학부, 정교수

3. 서울대학교 재료공학부, 정교수

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

# 이방성을 고려한 내열합금 후판재 롤밴딩 공정 해석

박광수<sup>1</sup>· 신흥철<sup>1</sup>· 최창혁<sup>2</sup>· 김성욱<sup>1#</sup>

## Analysis of Roll Bending Process for Heat-Resistant Alloy Thick Plates Considering Anisotropy

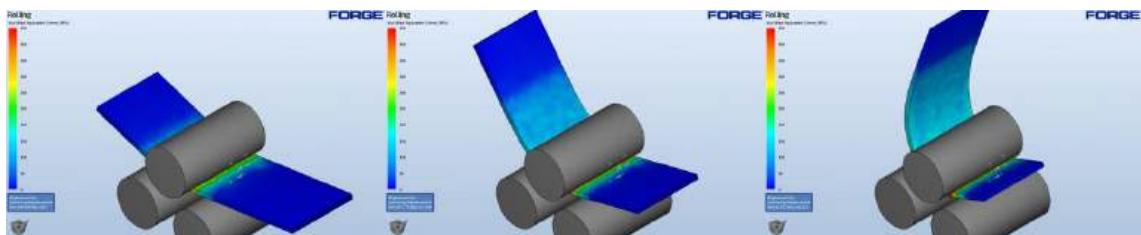
K.S. Park, H. C. Shin, C.H. Choi, S.W. Kim

### Abstract

This study aims to determine optimal roll bending process parameters for heat-resistant alloy thick plates by employing finite element analysis (FEA) that accounts for material anisotropy. The simulation evaluates strain distribution at the neutral axis, springback behavior, and curvature distribution to establish suitable manufacturing conditions. Process variables from existing manufacturing cases are identified, their ranges defined, and multiple simulation cases analyzed to select the optimal parameters. These parameters are validated through actual manufacturing tests, and the results are compared with simulations to refine boundary conditions and material property inputs for improved prediction accuracy.

Additionally, previous studies revealed a curvature defect at both ends of cylindrical products, caused by a longer circumferential length at the plate edges compared to the center. This defect required a large one-sided machining allowance of 100 mm in the width direction, resulting in significant material loss. To address this, further simulations are conducted to investigate the root cause of the defect.

**Keywords:** CP-Ti, Roll Bending, Finite Element Analysis, Anisotropy, Springback, Curvature Defect, Process Optimization



< Roll bending process with 3D half model >

---

1. 포항산업과학연구원
2. Forge Master Korea

# 전기자동차 배터리 팩 사이드멤버 단면 형상 토폴로지 최적화

안민영<sup>1</sup>· 김대용<sup>2, #</sup>

## Topology Optimization of Cross-Sectional Geometry for EV Battery Pack Side Members

M. Y. An, D. Kim

### Abstract

전기자동차 배터리 팩 케이스의 사이드 멤버는 배터리를 외부 충격에 보호하고 케이스의 강성을 보강하는 기능을 한다. 배터리 팩 케이스 경량화의 일환으로 배터리 팩 케이스 부품에 다양한 알루미늄 합금이 적용되고 있으며 최근 사이드 멤버에 구조 안정성을 확보하기 위하여 고강도 알루미늄 압출재를 적용하기 위한 연구가 추진 중이다. 본 연구에서는 7천계 알루미늄을 적용한 사이드 멤버에 대해 중량을 감소시키면서 강성과 강도를 확보할 수 있는 최적 단면 형상 안을 도출하였다. 위상 최적화를 통하여 사이드 멤버에 가하자는 압축과 비틀림 하중에 대한 강성과 강도를 확보할 수 있는 단면 형상을 계산하였으며 압축과 비틀림 하중의 비율에 따른 다양한 단면 형상을 생성하였다. 위상 최적화로 생성된 단면 형상의 리브(rib)를 일정한 두께로 단순화한 후 리브 두께에 대한 파라미터 최적화를 수행하였다. 유한요소해석을 통하여 반응표면법의 메타 모델을 구축하고 MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm)를 적용하였으며 상반된 특성의 목적함수를 만족시키기 위해 파레토 최적해를 통하여 최적 설계안을 도출하였다. 최적 단면 형상 안을 갖는 사이드 멤버에 대해 압축과 비틀림 하중에 대하여 유한요소해석을 수행하여 강성과 강도가 향상됨을 확인하였다. 이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00420231, 열계면용방폭/방열 세라믹 캡필러 소재개발사업).

**Keywords:** EV Battery Pack, Side Member, Cross-Sectional Geometry, Structure Optimization, Topology Optimization

---

1. 전남대학교 미래모빌리티학과, 학석사연계과정

2. 전남대학교 미래모빌리티학과, 교수

#Corresponding Author: Department of Future Mobility, Chonnam National University, E-mail: daeyong.kim@jnu.ac.kr

## 두 탄점소성 다결정 소성 모델을 이용한 DP980 강 C-rail 성형 후 스프링백 예측 비교

강주홍<sup>1</sup>·전보혜<sup>1</sup>·정영웅<sup>2,\*</sup>

### Springback Prediction of DP980 Steel Based on Two Different Elasto-Visco-Plastic Self-Consistent Polycrystal Models

Juhong Kang, Bohye Jeon, Youngung Jeong

#### Abstract

DP강(Dual-Phase steel)은 차체 경량화와 연비 개선을 위해 널리 사용되고 있으며, 대표적인 초고강도강(Advanced High Strength Steel, AHSS) 소재이다. 그러나 성형 후 발생하는 스프링백(springback)은 치수 정밀도 확보를 저해하는 주요 문제로, 이를 정밀하게 예측할 수 있는 구조모델의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 기존에 검증된 증분응력(incremental stress) 기반  $\Delta$ EVPSC(Elasto-Viscoplastic Self-Consistent) 모델과 비증분응력(non-incremental stress) 기반  $\sigma$ EVPSC 모델을 각각 적용하여 두 모델의 스프링백 예측 성능을 비교 평가하였다. 일축 인장, 인장-압축, 언로딩-리로딩(unloading-reloading) 시험을 수행하여 Voce 경화 모델 파라미터를 보정하였으며, 이후 C-rail 채널 굽힘 성형 실험을 유한요소해석하고 스프링백 현상을 예측하였다. 두 모델의 특성에 의한 예측 정확도의 차이를 실험과 비교하여 분석하였다.

**Keywords:** DP980; Elasto-Visco-Plasticity; Springback; Crystal plasticity finite element method (CPFEM), Advanced High Strength Steel (AHSS)

---

1. 창원대학교 소재융합시스템공학과

2. 창원대학교 신소재공학부

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

## MMC 파단 모델을 이용한 고강도 알루미늄 합금 판재 (7075-T6, 6061-T6)의 파단 특성 분석

오은채<sup>1</sup>· 박진현<sup>2</sup>· 이진우<sup>#</sup>

### Comparative Analysis of Fracture Behavior in Aluminum Alloy Sheets 7075-T6 and 6061-T6 Using the MMC Model

E. Oh, J. Park, J. Lee

#### Abstract

본 연구에서는 고강도 알루미늄 합금 7075-T6 와 6061-T6 판재의 파단 거동을 실험 및 유한요소해석을 통해 비교·분석하였다. 단축 인장, 평면 변형률 인장, 면내 전단 시험을 준정적 조건에서 수행하였으며, 파단 개시 시점의 국부 변형률장은 디지털 이미지 상관법(DIC)을 활용하여 계측하였다. 실험·해석 결과를 기반으로 수정 Mohr-Coulomb(MMC) 파단 모델의 파라미터를 최소자승법으로 보정하였으며, 파단이 예상되는 영역에는  $0.1 \times 0.1$  mm 의 세밀한 격자를 배치하여 정밀도를 확보하였다. 분석 결과, 7075-T6 판재는 높은 강도를 가지는 반면 낮은 연성으로 인해 상대적으로 조기 파단이 발생하였으며, 6061-T6 판재는 더 큰 변형을 수용하면서 점진적인 파단 거동을 보였다. MMC 기반 파단 모델은 두 소재의 이러한 상이한 파단 특성을 정량적으로 잘 예측하였으며, 고강도 알루미늄 합금 판재 성형 공정의 파단 거동 해석에 실질적인 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

**Keywords:** Aluminum alloys, Digital image correlation, Finite element analysis

#### 사사

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 울산광역시의 재원으로 울산RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 사업의 결과입니다 (2025-RISE-001).

---

1. 울산대학교 기계공학부, 학부생

# 울산대학교, 기계공학부, 조교수, E-mail: jinwoolee@ulsan.ac.kr

# 디퍼렌셜 케이스 성형 공정에서의 판단조 공법 적용성 검토

박준일<sup>1,2</sup>· 전용준<sup>1</sup>· 이현택<sup>2</sup>· 신영철<sup>#</sup>· 김동언<sup>#</sup>

## Applicability of Plate Forging Process in Differential Case Forming

J. I. Park, Y. J. Jeon, H. T. Lee, Y. C. Shin, D. E. Kim

### Abstract

디퍼렌셜 케이스는 내부에 베벨 기어와 피니언 샤프트가 조립되어야 하며, 경량화와 원활한 윤활을 위해 측면 홀과 윤활 채널 등이 요구되어 복잡한 형상을 갖는다. 주조 공법은 이러한 복잡한 형상을 한 번에 성형할 수 있는 장점이 있으며, 현재의 기술 수준과 제조 원가를 고려할 때 가장 적합한 방식으로 평가되어 디퍼렌셜 케이스 제조에 널리 사용되고 있다. 그러나 주조 부품은 내부에 기공, 수축공, 불균일한 결정 조직 등이 발생하기 쉬워, 기계적 강도와 인성이 저하되고 반복 하중에 취약해 피로 파손 위험이 큰 단점이 있다. 최근 전기차의 확산과 차량 고성능화로 인해 내구성과 신뢰성 확보가 그 어느 때보다 중요해졌으며, 제조 원가 측면에서도 수용 가능한 새로운 고신뢰성 제조 공법이 요구되고 있다. 본 논문에서는 이러한 요구를 충족하기 위한 대안으로서 판단조 공법의 적용 가능성을 검토하였다. 우선 단순 형상의 디퍼렌셜 케이스를 설계하고, 판단조 성형 해석을 통해 원소재 형태별 성형 가능성을 분석하였다. 이후 선정된 원소재 형태를 기반으로 최적의 원소재 치수와 성형 조건을 도출하고, 파단 없이 성형 가능한 다단 판단조 공정을 설계하였다. 그 결과 디퍼렌셜 케이스의 내구 신뢰성과 양산성 향상을 위한 대안으로 판단조 공법이 충분히 활용 가능함을 확인하였다.

**Keywords:** Differential case, Plate forging, Pipe forming, Forming process, CAE

---

1. 한국생산기술연구원 지역산업혁신부문(성장동력)

2. 인하대학교 기계공학과

# 한국생산기술연구원, 유연생산연구부문, 수석연구원, E-mail: ycshin@kitech.re.kr

# 한국생산기술연구원, 지역산업혁신부문(성장동력), 수석연구원, E-mail: kdu0517@kitech.re.kr

## 광통신용 다채널 커넥터 사출성형에서 코어핀 변형 해석에 관한 연구

김명호<sup>1</sup>· 서영호<sup>1</sup>

### A Study on Core Pin Deformation Analysis in Injection Molding of Multi-Channel Connectors for Optical Communication

M. H. Kim, Y. H. Seo

#### Abstract

본 연구에서는 미래 광네트워크의 핵심 부품인 고속·대용량 다채널 커넥터의 성형 정밀도를 확보하기 위해 코어핀 변형 해석을 수행하였다. 다채널 커넥터는 Ø125  $\mu\text{m}$ 의 정밀 미세홀과 12 채널 250  $\mu\text{m}$ 의 미세피치를 가지며, 삽입손실을 최소화하기 위해 광섬유의 위치 정렬 정확도가 필수적이다. 그러나 사출 과정에서 발생하는 성형압에 따른 코어핀 굴절 및 조립 공차는 제품 정밀도 저하의 주요 요인으로 작용한다. 이에 따라 본 연구에서는 금형온도, 용융온도, 사출시간, 보압시간, 냉각시간 등 5가지 주요 인자를 변수로 설정하고, 3수준 실험계획법을 적용하여 코어핀의 변형 패턴을 분석하였다. 해석에는 MoldFlow를 활용하였으며, PPS(40% Glass Fiber 함유) 소재를 적용하였다. 분석 결과, 보압시간이 코어핀 변형에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 그 다음은 금형온도, 사출시간, 용융온도 순으로 나타났다. 냉각시간의 영향은 미미한것으로 나타났다. 본 연구는 사출성형 시 코어핀 변형에 영향을 미치는 주요 인자를 해석하여 최적 공정조건을 도출하였다. 향후 실제 금형 제작 및 실험을 통해 해석 결과를 검증하여 연구의 신뢰성을 확보할 예정이다.

**Keywords:** Multi-channel connector, Core pin deformation, Injection molding, Optical communication, Flow analysis

#### 후기

이 연구는 산업통상자원부 신산업 대응 차세대 공통·핵심 뿌리기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음(총괄연구개발 과제번호: 24536097)

---

1. 한국생산기술연구원

# 한국생산기술연구원, 수석연구원, mhtoyou@kitech.re.kr

# 클래드 소재 차체 부품의 전산해석을 통한 성능 평가 연구

오보라미<sup>1</sup>#, 배기만<sup>2</sup>

## Computational Analysis-Based Performance Evaluation of Clad Material Car Body Parts

B. R. M. Oh, K. M. Bae

### Abstract

The automotive industry faces two major challenges: electrification and passenger safety. Reducing vehicle weight is essential to meet carbon emission regulations, but structural reliability cannot be compromised. Although lightweight materials such as aluminum offer benefits, they also present issues including higher cost, limited formability, and joining difficulties.

In this study, car body parts using lightweight multi-layer clad materials were evaluated through computer simulations. Replacing conventional steel with multi-layer materials resulted in weight reduction but deteriorated mechanical properties. To address this trade-off, shape optimization was applied to component geometries. Performance verification through static and dynamic stiffness analyses, including bending and torsional modes, confirmed that optimized designs achieved both weight reduction and sufficient structural performance. These results demonstrate the potential of lightweight multi-layer clad materials combined with shape optimization for next-generation automotive applications.

**Keywords:** Lightweight, Clad Materials, Eco-Friendly Vehicles, Computer Aided Engineering(CAE)

### 후기

이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

(RS-2024-00433194)

1. (주)일지테크 선행개발팀, 책임연구원

2. (주)일지테크 선행개발팀, 팀장

# (주)일지테크 선행개발팀, 책임연구원, E-mail: borami@iljitech.co.kr

## 구상흑연주철의 기계적 특성 확보를 위한 미세조직 안정화 와 냉각속도 최적화 연구

홍지우<sup>1</sup>· 하진수<sup>1</sup>· 최창영<sup>1</sup>· 장진석<sup>1</sup>· 송혜진<sup>1</sup>· 정유현<sup>1</sup>· 조용재<sup>#</sup>

### Microstructural Stabilization and Cooling Rate Optimization in Ductile Cast Iron for Improving Mechanical Properties

J. W. Hong, J. S. Ha, C. Y. Choi, J. S. Jang, H. J. Song, Y. H. Jung, Y. J. Cho

#### Abstract

구상흑연주철(Ductile Cast Iron, DCI)은 우수한 주조성, 진동 흡수능력, 기계가공성을 바탕으로 자동차, 에너지, 중공업 등 다양한 산업 부품에 적용되고 있으며, 특히 고하중 및 고신뢰성이 요구되는 구조용 소재로서 활용 가치가 높아지고 있다. 그러나 높은 인성과 강도를 동시에 확보하기 위해서는 흑연의 구상화율과 기지조직의 안정적인 제어가 필수적이다. 특히 응고 과정에서의 냉각속도는 흑연 핵 형성 및 성장, 오스테나이트 안정성, 그리고 기지조직 분율에 직접적인 영향을 미쳐 기계적 특성을 좌우하는 핵심 인자로 평가된다.

냉각속도 효과를 검증하기 위해 두께가 0.5, 1, 2인치인 Y-block 시편을 주조하여 인장시험편을 제작하였다. 이후 광학현미경 및 SEM을 활용해 흑연의 구상화율, 입수 및 크기를 정량화하였으며, 인장 및 경도 시험을 수행하여 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 정량적으로 고찰하였다.

본 연구는 구상흑연주철의 기계적 특성 확보를 위한 미세조직 안정화 메커니즘과 최적 냉각 조건을 제시함으로써, 향후 고성능 주철 소재 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Ductile Cast Iron (DCI), Microstructural Stabilization, Cooling Rate Optimization, Mechanical Properties, Graphite Morphology

---

1. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹

# 교신저자 : 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 수석연구원 E-mail: easycast@kitech.re.kr

# 냉간단조용 다상조직강의 템퍼링 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화

좌리노<sup>1</sup> · 김상현<sup>1</sup> · 안민호<sup>1</sup> · 이영선<sup>1</sup> · 우영윤<sup>1, #</sup>

## Effect of Tempering on the Microstructure and Mechanical Properties of Multiphase Steel for Cold Forging

L. N. Jwa<sup>1</sup>, S. H. Kim<sup>1</sup>, M. H. An<sup>1</sup>, Y. S. Lee<sup>1</sup>, Y. Y. Woo<sup>1, #</sup>

### Abstract

냉간단조 공정은 높은 정밀도와 빠른 생산 속도로 인해 자동차 제조 분야에서 널리 활용되고 있다. 그러나 최근 지구온난화의 심화로 CO<sub>2</sub> 저감에 대한 관심이 급증하고, 관련 규제가 강화됨에 따라 냉간단조 공정에서 후열처리를 생략하여 CO<sub>2</sub> 배출을 줄일 수 있는 비조질강에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 냉간 비조질강은 높은 강도에도 불구하고 연신율이 제한적이고 성형성이 부족하여, 냉간단조 과정에서 균열 발생이나 가공 안정성 저하와 같은 문제가 발생할 수 있다.

이에 본 연구에서는 냉간단조용 비조질강의 중 하나인 다상조직강에 대해 균열 억제와 성형 안정성 확보를 위해, 2단 열처리 후 다양한 온도 조건에서 템퍼링을 실시하였다. 이후 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)을 통해 미세조직을 관찰하였으며, 비커스 경도시험과 인장시험을 통해 기계적 특성을 비교 분석하였다. 다상조직강은 템퍼링 후 일부 강도 저하를 수반하더라도 가공성과 성형 안정성 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

**Keywords:** Cold forging, Tempering, Microstructure, Mechanical properties

---

1. 한국재료연구원

# 한국재료연구원, 선임연구원 Email: yywoo@kims.re.kr

## Al-Mg-Si계 A6082 합금의 열간단조 후 T6 열처리 시 용체화 온도에 따른 미세조직과 경도 특성평가

오재영<sup>1</sup>, 이종석<sup>1</sup>, 장광순<sup>1</sup>, 김새한<sup>1</sup>, 이선호<sup>1#</sup>,

### Effect of Solutionizing Temperature on Microstructure and Hardness of Hot-Forged Al-Mg-Si A6082 Alloy

J. Y. Oh<sup>1</sup>, J. S. Lee<sup>1</sup>, K. S. Jang<sup>1</sup>, S. H. Kim<sup>1</sup>, S. H. Lee<sup>1#</sup>

#### Abstract

본 연구는 Al-Mg-Si계 A6082 합금의 T6 열처리 공정 단축을 위해 다양한 용체화 조건이 미세조직 및 경도 특성에 미치는 영향을 평가하였다. Solidus line 범위 550–570°C에서 수 시간 용체화 처리 후 Mg<sub>2</sub>Si 석출 온도 범위 180–200°C에서 인공시효를 수행하였으며, 비커스 경도 시험과 광학·전자현미경, EDS(Energy dispersive X-ray spectroscopy), XRD(X-ray diffraction) 분석을 통해 열처리 조건에 따른 미세조직 변화를 관찰하였다. 그 결과, 560°C 용체화 조건에서 균질한 원소 분포와 함께 가장 높은 경도 특성을 확보할 수 있었다. 용해된 Mg<sub>2</sub>Si가  $\beta''$ 상으로 석출되며 기계적 강도 향상에 주요한 기여를 한 것으로 사료된다. 반면 570°C 조건에서는 부분 용융과 Si, Fe등의 편석으로 인해 석출물 결핍영역(Precipitate free zone)이 확대되고, 이는 경도 감소를 초래하였다. 본 연구는 미세조직적 관점에서 열처리 시간 단축과 기계적 특성 간의 상관관계를 제시하여, 산업적 열처리 공정 최적화에 기여할 수 있는 기반을 구축하고자 하였다.

**Keywords:** Aluminum forging, Heat treatment, Micro structure, Al-Mg-Si, Hardness

#### Acknowledgements

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (제도부경도 600Hv, 경량화율 10% 이상 이종소재 치형 휠베어링 개발, 2410002393, RS-2024-00430258, 산업통상자원부)

---

1. 일진글로벌 선행재료연구팀, ohjaeyoung@iljin.com

#. 일진글로벌 선행재료연구팀, lsh0429@iljin.com

## 롤 포밍 공정을 이용한 자동차 차체 부품 개발

이철환<sup>1</sup>, 강용기<sup>1</sup>, 임재은<sup>1</sup>, 심우정<sup>2</sup>, 김동규<sup>1#</sup>

### Development of car body collision reinforcement using roll forming process

C. H. Lee, Y. K. Kang J. E. Lim, W. J. Sim, D. K. Kim

#### Abstract

Roll forming is a representative plastic working process in which a series of roll dies are arranged in multiple stages to gradually shape the material. This method minimizes forming loads, thereby reducing surface defects, ensuring dimensional accuracy, and enabling continuous production of infinitely long products. It is particularly advantageous for processing high-strength materials with low elongation. In this study, roll forming process analysis was conducted to design roll dies for a closed-section automotive body component. Furthermore, by applying improved roll dies for the R-shaped forming region, an automotive body part using stainless steel sheets was successfully developed.

**Keywords:** Roll forming, R-shaped forming, Stainless steel

#### 후기

본 연구는 우수기업연구소육성사업(20018008)으로 수행된 연구결과입니다.

---

1. 주디케이솔루션

2. 주재한산업

# 교신 저자: 주디케이솔루션, dksolution1@naver.com

## 전기자동차 모터용 접지부품의 판재성형 기반 형상 및 성형 공정 설계

전용준<sup>#</sup>

### Design of Shape and Forming Process for Sheet-Metal Grounding Components in Electric Vehicle Motors

Y. J. Jeon

#### Abstract

전기자동차(Electric Vehicle, EV) 구동 모터의 신뢰성과 성능을 확보하기 위해 접지부품(grounding component)은 전기적 안정성과 기계적 내구성을 동시에 만족해야 한다. 그러나 기존 다이캐스팅을 통한 제조 방식은 경량화와 대량생산성에서 한계가 있어 판재성형(sheet metal forming) 기반의 신뢰성 높은 제조 기술 개발이 요구된다. 본 연구에서는 전기적 전도성과 성형성이 우수한 Al5051 소재를 선정하였으며, 접지부품의 형상 및 성형 공정을 체계적으로 설계하였다. 접지소재 체결 플레이트에는 탄소섬유 고정을 위한 후크 형상을 적용하였고, 외부 케이스에는 드로잉(drawing) 성형을 기반으로 후크부 압축 시 발생할 수 있는 탄소섬유 파손을 방지하기 위해 엠보싱(embossing) 구조를 도입하였다. 유한요소해석(Computer-Aided Engineering, CAE)을 통해 드로잉 공정 변수로 소재 유입부 반경 2 mm, 가압력 3 MPa를 최적화하였으며, 두께 감소율이 최대 17% 이내임을 확인하였다. 본 연구는 EV 모터용 접지부품의 경량화, 대량생산성, 그리고 성능 신뢰성을 동시에 충족할 수 있는 효율적인 설계·제조 지침을 제시하며, EV 구동 모터 시스템의 내구성과 생산 효율성 향상에 기여할 수 있음을 보여준다.

**Keywords:** Electric Vehicle, Shaft Grounding Ring, Sheet Metal Forming, Shape Design, Forming Process, Finite Element Analysis

---

<sup>#</sup> 한국생산기술연구원, 지역산업혁신부문(성장동력), 연구원,  
E-mail: yjjeon@kitech.re.kr

# 배터리 모듈 엔드플레이트의 고유진동수 향상을 위한 토포그래피 최적화

박정빈<sup>1</sup>· 김대용<sup>#</sup>

## Enhancement of Natural Frequencies in Battery Module End Plate through Topography Optimization

J. B. Park, D. Kim

### Abstract

파우치 셀로 구성된 전기차 배터리 모듈에서 모듈 양단에 장착된 엔드플레이트는 적층된 파우치 셀, 단열 패드, 절연 커버 등의 구성 부품들을 고정하고 모듈의 강성을 보강하는 기능을 한다. 본 연구에서는 토포그래피 최적화 기법을 활용하여 엔드플레이트의 강성 향상을 위한 다양한 비드 형상을 도출하였다. 2.0mm 두께의 SPFC590 강판을 적용한 평판 엔드플레이트에 대해 모드 해석을 통하여 1~10차 공진모드에서의 고유진동수 계산한 후, 토포그래피 최적화를 통하여 각 공진모드에서 고유진동수를 증가시키는 10개의 비드 형상을 생성하였다. 대상 공진모드와 고유진동수를 토포그래피 최적화의 목적함수로 설정하였으며 모듈의 레이아웃을 고려하여 비드의 높이는 최대 1.6mm로 제한하였고 엔드플레이트 구속조건을 고려하여 4분면 대칭 조건을 부여하였다. 생성된 10개의 비드 형상은 각 공진모드에서의 변형과 유사한 형상으로 계산되었으며, 평판 엔드플레이트 대비하여 고유진동수가 증가하였다. 각 공진모드에서 고유진동수가 향상된 10개의 비드 형상은 대상 공진모드에서 고유진동수의 뿐만 아니라 이외의 공진모드에서도 고유진동수가 향상되었다. 대상 공진모드와 이외의 공진모드에서 고유진동수 향상 정도를 히트맵으로 시각화하여 전체 공진모드에서 고유진동수의 향상에 효과적인 비드 형상을 선정하였다. 이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2024-00420231, 열계면용방폭/방열세라믹 캡필러소재개발사업)

**Keywords:** Battery Module End Plate, Modal Analysis, Topography Optimization, Stiffness, Natural Frequencies

---

1. 전남대학교 미래모빌리티융합학과, 석사과정

2. 전남대학교 미래모빌리티학과, 교수

# Corresponding Author: Department of Future Mobility, Chonnam National University, E-mail: daeyoung.kim@jnu.ac.kr

## 초고강도강 적용 EV 배터리 케이스 멤버의 스프링백 보정 해석

박현수<sup>1</sup>· 박 순<sup>2</sup>· 나용근<sup>3</sup>· 김대용<sup>4, #</sup>

### Springback Compensation Analysis of an EV Battery Case Member with Ultra High Strength Steel

H. S. Park, S. Park, Y. -G. Na, D. Kim

#### Abstract

전기자동차(electric vehicle, EV) 배터리 케이스 멤버는 차체에 배터리를 고정하고 외부 충돌에 배터리를 보호하는 구조 부품으로 충돌에서 안전성을 확보하면서도 경량화를 달성하기 위해 최근 초고강도강(ultra high strength steel, UHSS)의 적용을 고려하고 있다. “ㄷ”자 형상의 단면을 갖는 멤버 특성상 초고강도강을 적용할 경우 성형 과정에서 스프링백(springback)이 과다 발생하게 되므로 스프링백을 분석하고 이를 저감 할 수 있는 보정 기술이 필요하다. 본 연구에서는 인장강도 980 MPa급 초고강도강을 적용한 EV 배터리 케이스 멤버를 대상으로 강판의 두께에 따른 스프링백 거동을 분석하고 각각에 대하여 스프링백을 저감 할 수 있는 금형면 형상 보정 안을 도출하였다. 성형해석 전문 상용 유한요소해석 프로그램인 AutoForm을 활용하였으며, 스프링백 거동 분석과 금형면 형상 보정에 각각 Explorer 모듈과 Compensator 모듈을 적용하였다. 두께별 스프링백 거동을 분석한 결과 강판의 두께가 작아질수록 스프링고(springgo) 양이 증가하였으며 상부 평판부에서 컬(curl)의 크기가 증가하였다. 각 조건에 대해 금형면 형상 보정 안을 도출하고 성형해석을 수행한 결과 스프링백이 효과적으로 억제되어 목표한 형상의 단면이 구현되는 것을 확인하였다. 이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업단지공단의 지원을 받아 수행된 연구임. (GBGM2502, 산업집적지경쟁력강화사업)

**Keywords:** Springback, Compensation Analysis, Ultra High Strength Steel, EV Battery Case Member

1. 전남대학교 미래모빌리티융합학과, 석사과정

2. (주)은혜기업, 책임연구원

3. (주)은혜기업, 대표

4. 전남대학교 미래모빌리티학과, 교수

#Corresponding Author: Department of Future Mobility, Chonnam National University, E-mail: daeyong.kim@jnu.ac.kr

# 차세대 모빌리티용 초고강도강 성형 신뢰성 검증 및 설계 표준화 기술 개발

권수빈<sup>1</sup> · 배수민<sup>1</sup> · 김경민<sup>1</sup> · 김상훈<sup>2</sup> · 최현준<sup>2</sup> · 공호영<sup>3</sup> · 유재현<sup>#</sup>

## Reliability Verification and Design Standardization of UHSS Molding for Next-Generation Mobility

S. B. Kwon<sup>1</sup>, S. M. Bae<sup>1</sup>, K. M. Kim<sup>1</sup>, S. H. KIM<sup>2</sup>, H. J. Choi<sup>2</sup>, H. Y. Kong<sup>3</sup>, J. H. Yu<sup>#</sup>

### Abstract

The primary objective of this study is to establish a CAE–experiment integrated control framework to address the critical challenges in forming ultra-high strength steels (UHSS) with tensile strengths above 1 GPa. Although UHSS offers superior strength-to-weight advantages for next-generation mobility, its complex deformation behavior—such as limited formability, springback, and fracture sensitivity—has not been sufficiently captured by conventional forming simulations, leading to notable discrepancies with actual processes. To overcome these limitations, we propose an advanced analysis methodology that incorporates specimen-based experimental evaluation with finite element modeling. By systematically correlating experimental results with CAE predictions, a verification system will be developed to improve both accuracy and reliability. This integration is expected to reduce trial-and-error in die design, ensure weight reduction and dimensional stability of automotive and steel components, and accelerate the industrial adoption of high-strength lightweight materials. Ultimately, the research will contribute to establishing standardized approaches for design reliability in UHSS forming and enhancing technological competitiveness in the mobility sector.

**Keywords:** Ultra-High Strength Steel, Formability and Springback Analysis, CAE–Experiment Correlation, Design Reliability Standardization,

---

1. 대구대학교 기계자동차공학부

2. (주) 화신 기술연구소 책임연구원

3. 현대기아 기술연구소 책임연구원

# 대구대학교 기계자동차공학부, 교수, E-mail: jhyu@daegu.ac.kr

# 롤포밍 공정에서의 굽힘거동 예측방법 정확도 평가

차명환<sup>#</sup>

## Estimation of accuracy of prediction methods for bending behavior in roll forming

M. H. Cha

### Abstract

This study investigates the accuracy of various prediction methods for the bending behavior of DP980 steel in roll forming processes. The primary focus is on determining the minimum bending radius, which is critical for assessing the formability of ultra-high strength steels (UHSS) in roll forming. The study compares different test and simulation methods, including V-bending, 3-point bending, and roll forming, using both experimental and numerical approaches.

Flow curves for DP980 were obtained and extrapolated using tensile test data, with curve fitting performed via the Swift equation. Tensile test simulations were conducted and verified against experimental results, optimizing the load curve by combining different fitting curves. Fracture values were calculated using Ayada and Rice & Tracey equations.

Simulations of V-bending, 3-point bending, and roll forming were performed for various punch radii. The minimum bending radius for DP980 was found to be R1.5 mm or more in V-bending, R1.5 mm in 3-point bending, and R1.0 mm in roll forming. The results indicate that V-bending and 3-point bending simulations predict fracture more conservatively than roll forming, which is consistent with real test results showing fewer cracks in roll forming.

**Keywords:** Bending behavior, Roll Forming, V-Bending, 3-Point Bending

# 고강도 자동차 판재 부품용 3D 프린팅 플라스틱 금형 제조 검토 연구

유기혁<sup>1</sup>· 박진상<sup>1</sup>· 박건우<sup>1</sup>· 장인혁<sup>1</sup>· 도상현<sup>2</sup>· 서종덕<sup>2</sup>· 유재현<sup>3</sup>· 김세호<sup>#</sup>

## A Study on the 3D-printed Plastic Die for the Sheet-Metal Automotive Parts with High Strength

K. H. Ryu, J. S. Park, K. W. Park, I. H. Chang, S. H. Do, J. D. Seo, J. H. Yu, S. H. Kim

### Abstract

기존 스텀 금형으로 제작되는 인장강도 440MPa, 590MPa급 고강도 판재 부품의 시작제품을 3D 프린팅 플라스틱 금형으로 제작하기 위한 가능성을 검토하였다. 성형을 위한 대상 부품은 전기자동차용 브래킷으로 성형공정해석을 실시하여 파단 및 주름 발생 가능성 및 스프링백 양을 정량적으로 검토하였다. 인장강도 440MPa급 소재는 형상오차 범위의 스프링백이 예측되었으며, 인장강도 590MPa급 소재는 금형보정이 필요한 수준의 스프링백 예측값을 얻었다. 성형해석의 결과를 바탕으로 플라스틱 금형의 안전성을 검토하기 위하여 금형구조해석을 실시하였으며, 금형의 변형량과 응력분포가 시작품을 제작하기에 충분한 수준임을 보였다.

**Keywords:** 3D Printing, Plastic Die, Stamping Analysis, Tool Structure Analysis

### 후기

본 결과물은 교육부, 경상북도, 영천시의 재원으로 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-스마트 모빌리티 K-U시티 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

---

1. 대구대학교 기계자동차공학부, 학부생

2. (주)신영 기술연구소

3. 대구대학교 기계자동차공학부, 교수

# 대구대학교 기계자동차공학부, 교수, E-mail: mvksh@daegu.ac.kr

# 고분자전해질 수소연료전지분리판용 티타늄의 성형성 평가

정양진<sup>1#</sup>

## Formability of Pure Titanium for PEMFC bipolar plate

Y. Chung<sup>1#</sup>

### Abstract

This study presents the results of die fabrication and formability evaluation for pure titanium used in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) bipolar plates, resulting in the development of a comprehensive formability map. A comparison between imported and domestic pure titanium materials confirmed similar textures, supporting the localization of pure titanium in PEMFC application. For three types of domestic materials, dies were fabricated and evaluated to develop formability maps that enable fuel cell bipolar plate designers to readily consider formability in component design. Channel depth and pitch were selected as key parameters for predicting formability in fuel cell bipolar plates, and forming limits were illustrated on a two-dimensional plane to clearly represent the formability of the three types of pure titanium. Additionally, prediction of channel thickness reduction rates by finite element method (FEM) through appropriate modeling of the hardening behavior of pure titanium were well correlated with experimental thickness distribution of formed parts.

**Keywords:** Titanium, Fuel cell, Bipolar plate, Formability, EBSD, FEM

---

1. 포스코 기술연구원, 수석연구원

# 포스코 기술연구원, 수석연구원, E-mail: y2heart@posco.com

## 초고장력강의 응력경로 변경 효과를 고려한 스프링백 성형 공정 연구

김기정<sup>#</sup>, 진병극<sup>1</sup>, 박영철<sup>1</sup>, 김지영<sup>1</sup>, 임기학<sup>1</sup>, 전진화<sup>1</sup>

### A Numerical Simulation study of new sheet metal forming process for Springback reduction by changing the stress path for Ultra High Strength Steel

K. J. Kim, B. K. Jin, Y. C. Park, J. Y. Kim, G. H. Lim, J. H. Jeon

#### Abstract

This study proposes reducing the springback of Ultra High Strength steel (UHSS) sheets in the Double Bending Forming process (DBF). It consists of three steps: (1) Binding of a sheet between an inner corner setting punch and upper die, (2) Forming under an upper die and press RAM, (3) Over-bending under a constant lower holder. A great advantage of this technology over other HAT Forming processes, such as draw bending and PAD forming, is that perfect hat-shaped are easily obtained for any type of UHSS just by determining One controllable process parameter. An accurate finite element simulation allows us to determine these process parameters prior to the experiment. The validation for this process was shown by performing the hat-shaped DBF simulations.

**Keywords:** Ultra High Strength Steel, HAT shape, Finite Element Method, Springback

---

1. 현대제철 응용기술실 자동차응용기술팀

2. 현대제철 제품개발센터

# 교신저자: 현대제철 연구개발본부 자동차응용기술팀 E-mail: kijungkim@hyundai-steel.com

# Mg 합금의 기계적 성질 향상을 위한 보강재 첨가 마찰교반가공 연구

고경민<sup>1</sup>· 양경선<sup>2</sup>· 최시훈<sup>1</sup>

## Microstructure evolution and mechanical properties of reinforced magnesium alloys by FSP

G. M. Ko, G. S. Yang, S. H. Choi

### Abstract

마그네슘 합금은 낮은 밀도와 우수한 비강도 특성으로 인해 항공, 자동차, 방산 등 경량 구조재 산업에서 주목받고 있다. 그러나 기존 마그네슘 합금은 기계적 성질에서 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 SiC 보강재를 첨가한 FSP를 적용하였다.

시편은 직사각형 판재 형태로 준비하였으며, 보강재는 SiC 분말을 사용하였다. 보강재는 홈 충진 (Groove) 방식을 통해 합금 표면에 도포하였으며, FSP는 회전 속도, 이송 속도, 침투 깊이를 변수로 설정하여 수행하였다. 가공된 시편의 미세조직은 OM, SEM, EBSD로 분석하였고, 기계적 성질은 경도 시험과 인장시험을 통해 평가하였다. 또한 공정 중 보강재의 분산 거동과 계면 결합 특성을 조사하였으며, 이를 기반으로 마그네슘 합금의 표면경화와 기계적 성능 향상 메커니즘을 고찰하였다. 본 연구 결과는 마그네슘 합금의 기계적 성질 개선을 위한 FSP 기반 표면개질 공정의 활용 가능성을 제시한다.

**Keywords:** Magnesium alloy, FSP, Particle reinforcement, Microstructure, Metal matrix composite

---

1. 국립순천대학교 첨단부품소재공학과  
2. (주)매시브랩

# 스틸-플라스틱 하이브리드 구조를 적용한 배터리팩 사이드 프레임 개발 및 성능 평가

정창규<sup>1,#</sup>· 위상권<sup>1</sup>· 박재현<sup>1</sup>· 윤석현<sup>2</sup>

## Development and Performance Evaluation of Steel-Plastic Hybrid Battery Pack Side Frame

C.K. Jung, S.K. Wee, J.H. Park, S.H. Yoon

### Abstract

스틸-플라스틱 조합의 배터리팩 사이드프레임 개발을 통해 경량화와 성능 향상을 동시에 달성하고자 하였다. 기존 알루미늄 및 스틸 프레임 대비 구조적 취약점 개선, 공정 단순화, 양산성 확보를 목표로 하였으며, 스틸(980DP, 0.8t)과 플라스틱(PA66-GF50, 2.5t) 사출 하이브리드 구조를 적용하였다. 측면 충돌 성능 해석 결과, 정적 압축 반력은 알루미늄 대비 약 30% 향상된 317kN을 기록하였고, 동적 충돌 침입량은 3% 저감된 34.8mm로 나타났다. 중량은 알루미늄 대비 1% 증가 수준으로 최소화하였다. 프로토타입 제작을 통해 스틸부의 성형성, 플라스틱부의 사출성 및 결합력 등 양산성을 평가하였다. 사출 공정에서는 두께 증대와 제품 두께 균일화가 품질 확보에 중요한 요소임을 확인하였고, 스틸부 성형은 롤포밍 및 폼성형 등 다양한 공정 적용 가능성을 검토하였다. 실제 제작 및 성능 검증 결과, 스틸-플라스틱 사출 사이드프레임이 기존 알루미늄재 대비 동등 이상의 성능과 제조 효율성을 달성할 수 있음을 확인하였다.

**Keywords:** Steel-Plastic Hybrid, Battery Pack Side Frame, Lightweight, Structural Performance, Injection Molding

---

1. 포스코 성형연구그룹, 수석연구원

2. 프라코 중앙기술연구소, 연구원

# 포스코 성형연구그룹, 수석연구원, E-mail: ckjung@posco.com

## 구리 버스바 스프링백 평가 및 프로그레시브 금형 설계 최적화

정건우<sup>1,2</sup>· 정선호<sup>1</sup>· 이신명<sup>1,3</sup>· 유지민<sup>1,4</sup>· 이경환<sup>1,4</sup>· 박진수<sup>4,5</sup>· 이종섭<sup>#</sup>

### Evaluation of Springback in Copper Busbar and Progressive Die Design Optimization

G. W. Jung, S. H. Jung, S. M. Lee, J. M. Yoo, G. H. Lee, J. S. Park, J. S. Lee

#### Abstract

전력 변환 모듈에서 부스바(Busbar)의 성형 정밀도는 단순 치수 허용차를 넘어 조립 공차, 접촉저항 및 전류 전달에 직결되어 시스템 신뢰성과 수율을 좌우하므로 복잡 형상 구현을 위해 프로그레시브 금형을 적용한 벤딩 성형에서 높은 정밀도가 요구된다. 본 연구는 구리 부스바의 벤딩 공정에서 스프링백을 정량화하였으며 DIC 기반 인장 기계적 특성 분석을 위해 하중 방향에 따른 이방성 시험을 수행하였다. 또한 상용 유한요소 소프트웨어인 AutoForm을 이용해 벤딩 조건별 성형 해석을 수행하고 실험 결과와 교차 검증함으로써 신뢰성을 확보하였으며 이를 바탕으로 스프링백 최소화를 위한 최적화된 프로그레시브 금형 설계안을 제안한다.

**Keywords:** Busbar, V-Bending, Springback, Progressive Die

---

1. 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소, 유연생산연구부문

2. 성균관대학교, 지능형로봇학과

3. 서울대학교, 재료공학부

4. 인하대학교, 기계공학부

5. 경우정밀

# 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소, 유연생산연구부문,

수석연구원, E-mail: jongsup@kitech.re.kr

# RFSSW을 적용한 6000계 알루미늄의 이종 소재 접합에 따른 Lab-shear 강도 및 파괴거동 비교

백정웅<sup>1</sup>· 이인규<sup>2</sup>· 정성화<sup>1</sup>· 이성윤<sup>2#</sup>

## RFSSW of Dissimilar 6000-Series Aluminum Lap-Shear Strength and Failure Behavior Comparison

J. W. Baek, I. K. Lee, J. H. Jeong, S. Y. Lee

### Abstract

자동차 차체 및 배터리 시스템에서는 내구성 확보를 위해 RFSSW(Refill Friction Stir Spot Welding)을 이용한 이종 소재 접합이 적용되고 있다. 특히 배터리 팩에서의 알루미늄 이종소재 접합 기술의 중요성이 높아지고 있으며 접합 공정 중 소재의 위치(상·하부)에 따라 내부 소재 유동 양상이 달라지며 접합 형상 및 파괴강도가 유의미하게 달라질 수 있다. 본 연구는 6000 계 알루미늄 합금인 AA6061-T6, AA6063-T6, AA6082-T6 의 이종 소재 접합을 대상으로 소재의 위치조합에 따른 영향을 분석하고자 한다. RFSSW 를 이용하여 AA6061-T6, AA6063-T6, AA6082-T6 박판의 이종 용접을 통해 상하판의 조합을 다르게 하여 총 6 가지의 시편을 제작하고 제작한 시편을 이용해 Lap-shear 시험을 진행하여 각각의 강도 및 변위를 분석하였다. 그 결과, 상판 AA6063-T6/하판 AA6082-T6 조합이 가장 높은 전단강도(9.2kN)와 큰 파괴변위(1.55mm)를 보였으며, 상판 AA6082-T6/하판 AA6063-T6로 역전하면 성능이 유의하게 저하됨을 확인하였다(7.2kN). 이는 상판의 높은 연성이 리필 단계에서 유동 안정화 및 접합면적 증가에 기여하고, 하판의 상대적 고강도가 하중 지지체로 작동하는 연성-강도 시너지로 판단된다. 향후 연구로는 U-shape 시편으로 수직하중 성능을 추가 검증할 예정이다.

**Keywords:** RFSSW, Aluminum alloy, Dissimilar weld, Lap shear performance

### Acknowledgement

이 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행됨 연구임.  
(과제번호:P00023730)

---

1. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 연구원
2. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 수석연구원

# 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 수석연구원 E-mail: yunskills@kitech.re.kr

# 초고강도 저합금강 용접부의 1 GPa 인장 강도와 우수한 고주기 피로 특성

강민재<sup>1</sup>· 백민석<sup>1,2</sup>· 김영균<sup>1,3</sup>· 이기안<sup>1,#</sup>

## 1 GPa tensile strength with extraordinary high-cycle fatigue resistance in the welded ultra-high strength low alloy steel

Minjae Kang<sup>1</sup>, Min-Seok Baek<sup>1,2</sup>, Young-Kyun Kim<sup>1,3</sup>, Kee-Ahn Lee<sup>1,#</sup>

### Abstract

본 연구에서는 초고강도 저합금강(Ultra high strength low alloy steel, UHSLA) 용접부의 기계적 성능 향상에 있어 필러 금속의 Ni 함량이 미치는 영향을 고찰하였다. 2 GPa 등급의 UHSLA 모재를 대상으로, Ni 함량이 각각 2 wt.%와 3.5 wt.%인 필러 금속을 적용하여 가스 금속 아크 용접(Gas metal arc welding, GMAW)을 수행하였다. 용접부는 침상 페라이트(Acicular ferrite, AF)와 MC계 탄화물로 구성된 미세한 베이나이트 조직을 나타냈으며, Ni 함량이 증가함에 따라 미세화 정도가 더욱 뚜렷해졌다. 특히, 3.5 wt.% Ni 필러 금속을 사용한 시편은 항복강도 997 MPa, 인장강도 1047 MPa를 기록하여 약 1 GPa급의 우수한 강도를 확보하였다. 또한 해당 시편은 피로 한도 740 MPa를 나타내어, 기존 소성 가공된 고강도 저합금강(High strength low alloy steel, HSLA)과 유사한 수준의 탁월한 고주기 피로 저항성을 보였다. 주목할 점은, 본 연구에서의 용접강은 일반적인 용접강과 달리 열영향부(Heat-affected zone, HAZ) 결함이 아닌 용접부 내부에서 피로 균열이 개시되는 독특한 거동을 나타냈다는 것이다. 이는 용접부의 미세조직 특성에 의해 지배되는 피로 파괴 거동임을 시사한다. 미세조직 분석 결과, 미세화된 베이나이트 조직과 AF, 그리고 균일하게 분포된 MC계 탄화물이 전위 이동을 효과적으로 억제하고 피로 균열 전파를 저연시킴이 확인되었다. 이러한 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 용접 초고강도 저합금강의 우수한 기계적 성능을 가능하게 한 인장 및 피로 변형 메커니즘을 논의하였다.

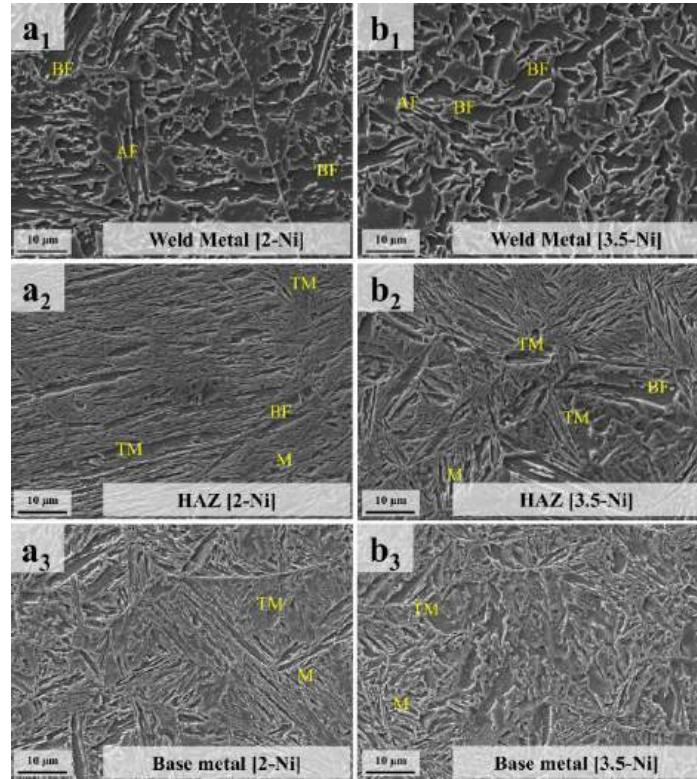
**Keywords:** Ultra high strength low alloy steel, Welded steel, Tensile, High-cycle fatigue, Deformation behavior

1. 인하대학교 신소재공학과, 대학원생, 교수

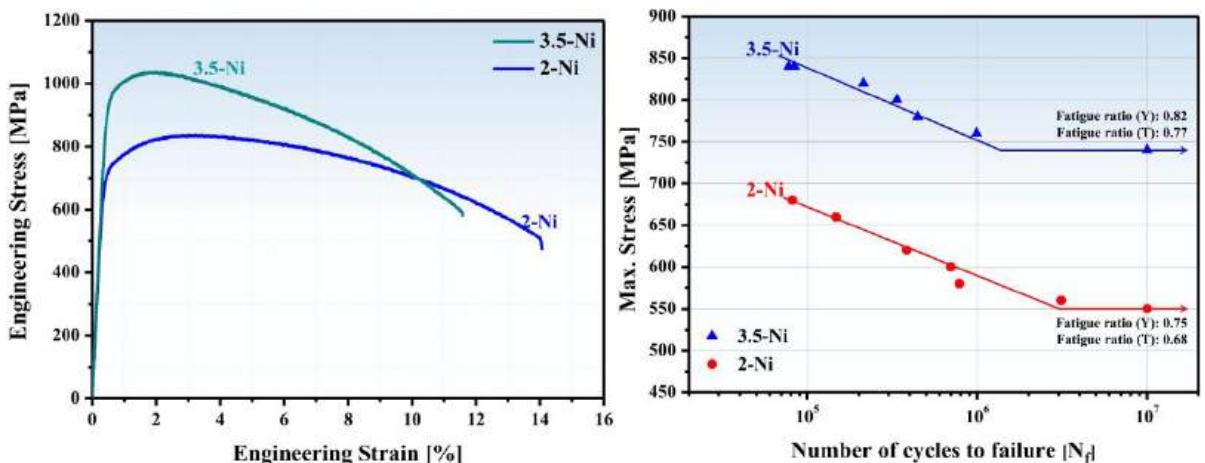
2. (주)현대제철, 책임연구원

3. 한국재료연구원(KIMS), 선임연구원

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



**Fig. 1** Scanning electron microscope images ((a) 2-Ni and (b) 3.5-Ni) of the initial microstructures from (a<sub>1</sub>-b<sub>1</sub>) weld metal regions, (a<sub>2</sub>-b<sub>2</sub>) heat-affected zones and (a<sub>3</sub>-b<sub>3</sub>) base metal regions.



**Fig. 2** Comparison of tensile properties and high-cycle fatigue properties (S-N curves) of direct quenched ultra high strength steel weldments (weldments 2-Ni & 3.5-Ni).

# AI 학습과 형상분석 기반 스크랩 분류를 통한 고품질 알루미늄 재생 소재 생산 기술

김찰일<sup>1</sup>· 강 현<sup>2#</sup>

## High-Quality Aluminum Recycling through AI-Based Scrap Classification and Shape Analysis

C. I. Kim<sup>1</sup>, H. Kang<sup>2#</sup>

### Abstract

본 연구는 산업계의 탄소중립 전환 가속화와 자원순환 촉진에 대응하기 위해 알루미늄 스크랩을 효율적으로 분류 및 활용할 수 있는 고품질 재생 소재 생산 기술을 확보하고자 한다. 이를 위해 컨베이어에서 촬영된 영상과 이미지를 활용하여 AI 학습(YOLO 등) 기반 자동 분류 시스템을 구축하였으며, 형상분석 기법을 병행하여 분류 정확도를 향상시켰다. 학습 데이터베이스는 실제 산업에서 사용되는 합금 조성별 스크랩(1xxx, 5xxx, 6xxx 등)을 반영하여 형상을 통한 라벨링을 통해 기초 데이터를 구성하였다. AI 모델은 이 데이터셋을 통해 다양한 형상의 스크랩을 빠르고 정확하게 인식 및 분류할 수 있도록 학습되었으며, 그 결과 기존 인력을 동원한 수동 분류 방식에 비해 속도와 효율성이 크게 향상될 수 있다. 나아가, 분류 정확도를 기반으로 실제 현장 적용을 고려한 컨베이어 설비의 재설계 방안을 제시하여, 자동화 공정과의 연계 가능성을 확보하였다.

본 연구는 알루미늄 스크랩 분류의 자동화 및 고도화를 통해 고품질 재생 소재 확보뿐 아니라, 산업 현장의 설비 효율화 및 생산성 향상에도 기여를 목표로 한다.

**Keywords:** AI-based Scrap classification, Aluminum recycling, Automated sorting, Image analysis

1. 한국생산기술연구원, 주문형생산연구부문, 수석연구원

2. 한국생산기술연구원, 주문형생산연구부문, 박사후과정

# 한국생산기술연구원, 주문형생산연구부문, 수석연구원

E-mail: heonkang@kitech.re.kr

## 결정 방위의 편차와 영향

정의찬<sup>1</sup>· 정영웅<sup>2,#</sup>

### Effect of Crystallographic Misorientation on the Anisotropic Deformation Behavior of Single Crystal

Euichan Jeong, Youngung Jeong

#### Abstract

단결정 부품은 설계 시 요구되는 최적 방위가 존재하나 실제 공정에서는 해당 방위로부터의 미세한 편차가 발생하여 성능 저하를 유발하는 경우가 있다. 본 연구는 탄점소성 다결정 결정 소성 모델(elasto-visco-plastic self-consistent model)을 이용하여 최적 방위로부터 각각  $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $12^\circ$ 의 편차(bias) 각이 단결정 소재의 이방성 변형 거동에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석하였다. 독립형(stand-alone) 시뮬레이션을 수행하여 응력-변형률 곡선, R-value, 집합조직 발달 등 기계적 물성치와 이방성 거동을 예측했으며, 유한요소 해석용 결정 소성 수치해석 결과와 비교하여 해석 기법의 신뢰성을 검증했다. 본 연구는 실험적 한계를 보완하는 효율적인 방법을 제시하며, 이를 통해 단결정 부품의 성능을 예측하고, 정밀한 공정 허용 오차 기준을 설정하는데 기여할 수 있다.

**Keywords:** Crystal Orientation, Texture evolution, Elasto-visco-plastic self-consistent model(탄점소성 다 결정 결정소성 모델),

---

1. 창원대학교 소재융합시스템공학과

2. 창원대학교 신소재공학부

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

# 레이저 용접된 DP 강의 상분율 예측을 위한 계층적 군집화 기법의 적용

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

## The Application of Hierarchical Clustering Method for Phase Fraction Prediction in Laser-Welded DP Steel

M. J. Cheon<sup>1</sup>, Soumyabrata Basak<sup>2</sup>, S. T. Hong<sup>2</sup>, Y. J. Oh<sup>1</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

# 조립 공정 불량 진단을 위한 신경망 학습에서의 하이퍼파라미터 영향 분석

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

## Analysis of Hyperparameter Effects on Neural Network-Based Defect Diagnosis in Assembly Processes

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

### Abstract

Accurate defect detection in bolting operations plays a key role in ensuring reliability in autonomous manufacturing systems. This work investigates how hyperparameter choices influence both the performance and training stability of artificial neural network(ANN) based models designed for defect diagnosis in automated bolting processes. A baseline ANN model was constructed, and systematic experiments were conducted to examine the effects of different activation functions, weight initialization methods, and optimizers. Due to the lack of an operational production line, all experimental data were collected manually under controlled laboratory conditions. Model effectiveness was assessed using the F1-score, while variations in training stability were quantified with a Non-monotonic Variation metric. Results indicate that while performance was largely consistent across hyperparameter settings, training stability was highly sensitive to the choice of optimizer. The study confirmed that optimizing hyperparameters is essential to achieve stable performance in neural network-based defect diagnosis systems.

**Keywords:** AI-based defect detection, Synthetic torque data, Bolting process, Artificial Neural Network, Hyperparameter Optimization

### 후기

본 연구는 산업통상자원부의 “로봇산업핵심기술개발사업(과제번호 RS-2024-00507686)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 전북특별자치도와 익산시의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 IZ250073). 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

---

1. 한국생산기술연구원, 수석연구원

2. 한국생산기술연구원, 자체인턴

3. 한국생산기술연구원, 수석연구원

# Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology,

E-mail : pjwoo@kitech.re.kr

## 연속와인딩 적용 PAI 코팅 각형 와이어의 마찰·마모 특성 평가

이동규<sup>1,2</sup>· 김명현<sup>3</sup>· 조유진<sup>1,2</sup>· 안지섭<sup>1,2</sup>· 황선광<sup>1</sup>· 정명식<sup>1,2</sup>

### Friction and Wear Evaluation of PAI-Coated Rectangular Wires Fabricated by Continuous Winding

D. K. Lee, M. H. Kim, Y. J. Jo, J. S. An, S. K. Hwang, M. S. Jeong

#### Abstract

전기차 시장의 확산에 따라 구동 모터 권선 공정에서의 연속와인딩 기술의 중요성이 점차 부각되고 있다. 그러나 연속와인딩 공정 중 와이어 성형 및 삽입 과정에서 권선 와이어가 편치, 금형, 고정자, 가이드핀 등과 접촉하면서 찍힘, 박리, 긁힘 등이 발생한다. 이러한 손상은 절연 성능 저하를 유발하여 모터 신뢰성을 저하시키므로, 연속와인딩 공정에서의 마찰·마모 특성에 대한 체계적인 분석이 요구된다. 본 연구에서는 연속와인딩 적용 PAI(Polyamide-Imide) 코팅 각형 와이어의 마찰·마모 특성을 정량적으로 분석하였다. 먼저 와이어 성형 전 PAI 코팅층 및 구리 모재를 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 관찰하여 단면 구조를 파악하였다. 이후 UMT(Universal Mechanical Tester) 장비를 활용한 스크래치 테스트를 수행하였으며, 상대재로는 가이드핀과 물성이 유사한 SUJ2 소재를 사용하였다. 직선 왕복 운동 마모 테스트는 속도 10 Hz, 스트로크 5 mm, 시간 60 분 조건에서 하중을 점진적으로 증가시켜 코팅층 박리가 발생하는 면 압을 도출하였다. 일정 면압 3.25 GPa 조건에서 ECR(Electrical Contact Resistance) 센서를 활용하여 코팅층 박리 시점을 확인하였고, 3 차원 이미지 분석을 통해 마모 깊이를 측정하였다. 다양한 PAI 코팅 와이어를 비교 평가한 결과, 박리 시점은 코팅 두께에 따라 상당한 차이를 보였으며, 이는 PAI 코팅 두께가 마모 저항성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석된다. 본 연구는 연속와인딩 공정에서 코팅 와이어의 최적화 및 공정 신뢰성 향상을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Continuous Winding, Friction, Wear, Scratch Test, Electrical Contact Resistance

#### Acknowledgements

이 연구는 2025년 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) – (No.RS-2024-00445670)과 한국생산기술연구원의 기본사업 – (JC-25-0022)의 연구비 지원에 의한 연구임

---

1. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹 대구뿌리기술지원센터
2. 부산대학교 기계공학부
3. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹 하이테크베어링기술센터

# 교신저자: 한국생산기술연구원, 수석연구원, E-mail: msjeong@kitech.re.kr

# 다양한 윤활 조건에서 베어링의 진동 및 음향방출 특성 분석

서승일<sup>1</sup>· 서재원<sup>1</sup>· 이대겸<sup>1</sup>· 이창환<sup>#,1</sup>

## Analysis on the Vibration and Acoustic Emission Characteristics of Bearings under Various Lubrication Conditions

S. I. Seo, J. W. Seo, D. G. Lee, C. H. Lee

### Abstract

베어링은 회전체의 위치 고정, 하중 지지 및 마찰 저감을 위해 플랜트 설비, 운송 시스템, 모빌리티 산업 등 다양한 기계 시스템 전반에 사용된다. 동력 전달의 핵심 부품인 베어링은 결함 발생 시 심각한 문제를 야기하며, 특히 모터의 경우 베어링 파손이 가장 잦은 고장의 원인으로 지적된다. 그러나 베어링 고장은 대체로 손상이 발생한 이후에 관측 가능하여 조기 진단이 어렵다. 또한 베어링 수명은 이론식을 통해 예측할 수 있으나, 이는 이상적인 구동 환경에 국한된다. 그중에서도 윤활 불량은 다양한 고장 모드를 유발하는 주요 원인으로 알려져 있다. 이에 따라 설비 건전성을 평가하기 위한 모니터링 시스템의 도입이 요구되고 있으며, 윤활 불량의 조기 검출을 위한 파라미터와 건전성 지표를 마련할 필요가 있다.

본 연구에서는 대표적인 윤활 불량 요인을 모사하기 위하여 다양한 윤활 조건에서 베어링의 진동 및 음향방출 특성을 측정·분석하였다. 윤활 조건은 (1) 일반 윤활, (2) 가공 후 잔여 연마 제를 재현한  $Al_2O_3$  입자, (3) 구동 중 발생하는 베어링강 마모 입자를 재현한  $Fe_2O_3$  입자로 설정하였다. 각 입자의 크기와 중량비(wt%)를 변수로 시험을 수행하고, 그 결과를 비교·분석하여 윤활 불량의 조기 탐지를 위한 유효 파라미터를 도출하였다.

**Keywords:** Bearing, Lubrication Deficiency, Vibration, Acoustic Emission, Early Fault Detection

### 후기

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단 (NRF)의 지원 (과제번호: RS-2023-00249455)을 받아 수행되었습니다.

---

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

# 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 기계정보프로그램 부교수, cwlee@seoultech.ac.kr

## 피부 생체전자용 자가접착 액체금속 채널 패치: 팁구도로 유도되는 밀착 결합과 누설 억제

김진서<sup>1</sup>· 송현석<sup>1</sup>· 김재일<sup>1</sup>· 박성진<sup>1</sup>· 장혜진<sup>1</sup>· 정훈의<sup>#</sup>

### Tip-Guided Self-Adhesive Liquid Metal Channel Patch for Conformal Coupling and Leakage Control in Skin Bioelectronics

J. S. Kim, H.S. Song, J. I. Kim, S. J. Park, H. J. Jang, H. E. Jeong

#### Abstract

Skin-interfacing electrodes are crucial for wearable bioelectronics, but conventional gel and dry types often face dehydration, limited conformity to skin, irritation, and motion-induced delamination, all of which hinder long-term use. Here, we introduce a self-attachable liquid metal channel (S-LMC) patch that integrates open-bottom Galinstan microchannels with a re-entrant micropillar array to strengthen skin adhesion and suppress leakage. A centrally aligned via-hole provides direct out-of-plane signal transfer, removing bulky leads and enabling compact integration. The patch delivers strong, reusable adhesion to skin ( $>60$  kPa), low contact impedance ( $7.35$   $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$  at 10 Hz), and minimal irritation. Compared with commercial Ag/AgCl gel electrodes, it shows  $>5\times$  lower impedance, more than  $2\times$  higher ECG signal fidelity under motion (20.23 dB vs. 9.03 dB), and  $>2.4\times$  higher long-term adhesion after 7 days. Its re-entrant microarchitecture also improves Galinstan confinement, yielding  $>2\times$  higher critical pressure against leakage. Together, these attributes enable motion-robust biosignal monitoring and scalable system integration, positioning the S-LMC patch as a promising platform for next-generation skin-conformal bioelectronic interfaces.

**Keywords:** Health monitoring, Liquid metal electrode, Skin electrode, Via-hole interconnects, Wearable electronics.

---

1. 울산과학기술원 기계공학부, 대학원생

# 울산과학기술원, 기계공학과, 교수, E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr

# 전하 및 접착력의 프로그램 가능한 향상을 위한 메타물질-접착제 통합 트라이보일렉트릭 나노발전기

이상우<sup>1</sup>· 이희진<sup>1</sup>· 강동관<sup>1</sup>· 강정화<sup>1</sup>· 정훈의<sup>#</sup>

## Metamaterial-Adhesive Integrated Triboelectric Nanogenerators for Programmable Charge and Adhesion Enhancement

S. -W. Lee, H. J. Lee, J. Kang, H. E. Jeong

### Abstract

Triboelectric nanogenerators (TENGs) convert interfacial separation into electrical energy, yet realizing programmable and enhanced outputs through controlled separation dynamics remains a significant challenge. We report a metamaterial adhesive-integrated TENG (MetaAdh-TENG) that incorporates nonlinear cut patterns within an adhesive film embedded with silver nanowire (AgNW) electrodes. This design enables spatial programmability and simultaneous enhancement of triboelectric charge generation and adhesion. Compared with planar counterparts, the MetaAdh-TENG delivers a 12.8-fold increase in peak voltage (7.3 V) and a 34.8-fold improvement in peel adhesion ( $202.3 \text{ N m}^{-1}$ ), achieved by accelerating local crack velocity via crack trapping and reverse propagation. By tailoring the cut geometry, charge output, adhesion strength, and their directional characteristics can be independently and locally tuned, providing versatile control within a single device. These capabilities demonstrate the potential of MetaAdh-TENGs for multifunctional applications, including battery-free smart adhesives for fall detection and door-opening alarms, as well as roll-to-roll systems for continuous energy harvesting.

**Keywords:** Interfacial Crack, Kirigami, Mechanical Metamaterials, Smart Adhesive, TENG

### Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2021R1A2C3006297, RS-2025-02223634).

---

1. 울산과학기술원, 기계공학과, 대학원생

# 울산과학기술원, 기계공학과, 교수, E-mail: hoonejeong@ununi.ac.kr

## 핵반응 제어봉 노즐 소재 및 단조성형 특성 연구

김영득<sup>1, #</sup>· 이민복<sup>2</sup>· 마영화<sup>1</sup>

### A Study of Control Bar Nozzle Material and Forging Properties for Nuclear Reaction

Y. D. Kim · M. B. Lee · Y. H. Ma

#### Abstract

In order to control the nuclear fuel chain reaction of a nuclear power plant, smooth transfer of control rods is required, and CEDM nozzles are used for this purpose. Ni-base Inconel 690 is used for exposure to high heat and radiation due to nuclear fission. This material requires a special melting process. In addition, as hot difficult forming material, there is a difficulty in manufacturing that must satisfy strict conditions. In this study, Ingots were produced by deriving special melting conditions, and basic process conditions were derived through basic property tests. In particular, void compression and internal strain characteristics were investigated through hot forging process simulations for each of 2-Die, RFM, and 4-Die forging methods, and heat treatment conditions were derived through variable tests. Through this, the proper forging temperature range is 180 degrees on average, and 4-Die has the best forging effect, and it is 26% better than RFM on average. The total required forging ratio is about 6S or more

**Keywords:** Inconel 690, CEDM Nozzle, Reactor Vessel, 2-Die Forging, RFM, FDFD, Forging Ratio,

#### I. 서론

원자로 노심내의 핵분열 수를 조절하기 위해 봉소-카바이드로 된 제어봉이 노심내로 이동 할 수 있도록 원자로 상부헤드에는 중공형의 CEDM(Control Element Drive Mechanism) 노즐이 여러 개 사용된다. 노내 극한 환경하에 적합 소재로는 Inconel 690 이 사용 되어 지고 있다[1-3]. 이는 고도의 기술이 필요한 특수 정련 제조공정으로 제조한다. 본 소재는 열간 단조성형이 어려운 난성형 소재로 신속한 작업이 되어야 한다. 이를 위해 RFM 고속단조 설비가 사용되고 있으나 초고가 비용으로 인해 구축이 매우 어려운 단점을 가진다. 이에 대한 대체 방안으로 4 방향 단조장치(FDFD)가 알려 져 있다. 본 연구에서는, 아래 그림 1의 상측에 조립되어 있는 제어봉 노즐에 대해 건전한 품질의 제품 제조가 매우 어려운 소재 및 제조기술 연구를 통해 요구하는 Spec. 요건을 만족하는 실제품 제작을 확보 하고자 한다

---

1. 두산에너빌리티 기술혁신연구원 소재기술개발팀 수석연구원

2. 두산에너빌리티, 주단BU 이민복 수석

# 두산에너빌리티 소재기술개발팀 수석연구원, youngdeak.kim@doosan.com

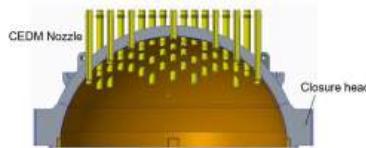


Fig. 1 Cross section and mounted drawing of CEDM nozzle on the head for reactor vessel

## II. 제조 및 결과 검토



Fig. 2 Ingot making of VIM and ESR

그림 2는 최종 ESR Ingot 제작 장면과 제품을 보여 준다. 표면상태에서 주름이 없는 양호한 4톤급 ESR 정련 강괴를 확보 하였다

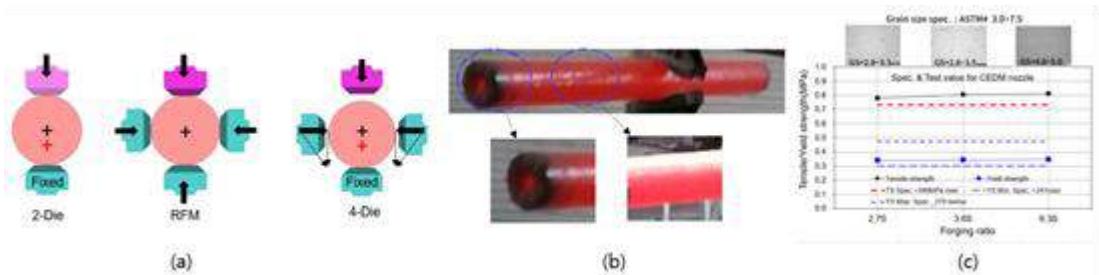


Fig. 3 Schematic concept diagram of four-die forging, forging products and quality results

그림 3은 단조프레스 설비의 방식에 따른 램의 이동경로 개념도와 이를 통해 실제 제작한 단조제품을 보여 준다. 본 연구에서는 RFM 단조방식을 적용하였고 이를 통해 얻어진 제품은 건전한 품질확보를 이루었으며 이에 필요한 단조비는 최소 6S 이상으로 도출 되었다.

## III. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결과는, Titanium 및 Aluminum 성분 특성을 고려한 Inconel 690 특수정련 (VIM+ESR) 소재를 확보하였다. 또한, Processing map 연구를 통해  $\epsilon' = 0.01 \sim 0.75$ 에 온도  $1100 \sim 1180^{\circ}\text{C}$ 를 도출하였다. 단조 프레스 방식에 따른 단조효과 특성 분석결과 단조비에 따른 재료 물성값 변화는 항복강도의 경우 변화가 거의 없고 인장강도는 다소 증가한다. 노즐 제품이 요구하는 물성 및 결정립 Spec.을 만족하는 최소 단조비는 6S 이상으로 최종 요구 Spec. 조건을 모두 만족하는 제품 개발에 성공하였다.

## Reference

- [1]EPRI, Proceedings: Alloy 690 workshop, 1989, NP-6750-SD PJT S408-1
- [2]Z.H. Zhong, Y.F. Gu, Y. Yuan, Z. Shi, Materials Letters, 109 (2013) 38-41
- [3]D. Rojas, J. Garcia, O. Prat, G. Sauthoff, A.R. Kaysser-Pyzalla, Mater. Sci. Eng, A528 (2011) 5164-5176

## 13. 특별세션

항공엔진 ENSIP 기반 Critical Parts  
설계-제조-인증 기술 개발  
(한화에어로스페이스(주))

(제 1 발표회장)

# 터보샤프트엔진 Critical Parts 임펠러/디스크 개발 기술 및 현황

권혁준<sup>1</sup>· 오승철<sup>2</sup>· 김지윤<sup>3</sup>· 손인수<sup>#</sup>

## Development Technology and Current Status of Critical Parts Impeller/Disc for Turboshaft Engine

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

### Abstract

임펠러와 디스크는 항공엔진의 성능과 안전을 좌우하는 대표적 Critical Parts로 고온·고응력 환경에서 장기간 운용되기 위해 높은 신뢰성이 요구된다. 이를 충족하기 위해, 용해, Conversion, 단조 및 열처리 등 다양한 제조공정 기술이 적용되며, 각 단계에서 미세조직 제어, 결함 최소화, 기계적 특성 확보를 위한 제조공정 관리가 요구된다. 또한, 부품이 설계에서 요구하는 특성을 만족하는지 입증하기 위해, 화학적, 금속조직학적, 기계적 특성 평가와 더불어 내·외부 결함 여부를 확인하는 비파괴검사가 수행된다.

본 발표에서는 임펠러 및 디스크의 주요 제조 공정별 기술 요소를 정리하고, 국내 개발 현황을 소개하고자 한다.

**Keywords:** Turboshaft Engine, Critical Parts, Impeller, Disc, Manufacturing Process

---

1. 한화에어로스페이스 한국연구소, 책임연구원

2. 한화에어로스페이스 한국연구소, 선임연구원

3. 한화에어로스페이스 한국연구소, 연구원

# 한화에어로스페이스 한국연구소, 수석연구원, E-mail: insu.son@hanwha.com

# 터보팬 엔진 Critical Parts 블리스크/디스크 개발 기술 및 현황

김종식<sup>1</sup>· 주경준<sup>1</sup>· 권용혁<sup>1</sup>· 권혁준<sup>2</sup>· 이기영<sup>#</sup>

## Development Technology and Current Status of Blisk and Disk in Turbofan Engine Critical Parts

J. S. Kim, G. J. Ju, Y. H. Kwon, H. J. Kwon, 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. As critical structural components, turbofan rotor disks and blisks operate under extreme thermal and rotational loading conditions, thereby necessitating exceptional material reliability. Accordingly, defect-free, high-purity ingot materials are employed to fabricate billets with precisely controlled grain size. To endow the material with superior mechanical properties, Critical Parts are subsequently produced through a near-net-shape forging process.

In this study, the current status of research and development on the localization of critical rotating components of turbofan engines, specifically blisks and disks, is introduced

**Keywords:** Inconel 718, Superalloy, Turbofan Engine, Critical Parts, NNS Forging

### Acknowledgement

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

---

1. (주)케이피씨엠

2. 한화에어로스페이스

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

## Critical Parts 베어링 소재 개발 기술 및 현황

김지윤<sup>1</sup>· 권혁준<sup>2</sup>· 권용혁<sup>3</sup>· 손인수<sup>#</sup>

### Critical Parts Bearing Material Development Technology and Current Status

J. Y. Kim, H. J. Kwon, Y. H. Kwon, I. S. Son

#### Abstract

베어링은 고온·고하중·고속 조건에서 장시간 안정적으로 운용되어야 하며 이를 위해 고강도 및 내마모 특성을 갖춘 베어링 소재 개발이 필수적이다. 특히 최근 높은 추력을 얻기 위해 항공 엔진의 운용 온도가 높아짐에 따라 베어링 소재의 제작 기술 또한 고도화되고 있다. 이러한 요구사항을 충족하기 위해 고청정 용해, 단조 공정, 및 열처리 등 다양한 공정기술이 개발 및 적용되고 있다. 본 발표에는 국산화 개발된 베어링 소재 M50의 주요 성능 요구사항 및 공정기술, 그리고 국내 개발 현황을 소개하고자 한다.

**Keywords:** Aircraft Engine, Bearing Material, M50 Steel

---

1. 한화에어로스페이스 한국연구소, 연구원
2. 한화에어로스페이스 한국연구소, 책임연구원
3. KPCM, 차장

# 한화에어로스페이스 한국연구소, 수석연구원, E-mail: insu.son@hanwha.com

## Inconel 718의 $\delta$ 석출 열처리가 미세조직 변화 및 고온 가공성에 미치는 영향

안지섭<sup>1,2</sup>·여승현<sup>1,2</sup>·김종식<sup>3</sup>·권혁준<sup>4</sup>·주경준<sup>3</sup>·조민지<sup>5</sup>·황선광<sup>1, #</sup>

### Effect of $\delta$ precipitation heat treatment on microstructure and high-temperature workability of Inconel 718

J. S. An, S. H. Yeo, J. S. Kim, H. J. Kwon, K. J. Joo, M. J. Jo, S. K. Hwang

#### Abstract

Inconel 718은 고온 및 극한 환경에 대한 우수한 내성으로 인해 항공우주 및 가스터빈 분야에 널리 적용되고 있다.  $\delta$ 상의 석출을 위한 열처리를 포함하는 delta process(DP)는 Inconel 718의 미세조직 특성에 영향을 미친다. 본 연구는 DP가 Inconel 718의 미세조직과 고온 가공성에 미치는 영향을 분석하였다. 초기 미세조직을 제어하기 위해 균질화 처리와 균질화 후 DP를 적용한 두가지 열처리 조건을 비교하였다. 900-1150 °C 온도 범위에서 변형률 속도 0.01-10 s<sup>-1</sup>, 진변형률 1.0 조건으로 고온 압축시험을 수행하였으며, 가공성을 평가하기 위해 Arrhenius 기반 구성방정식 모델을 도출하고 변형공정 지도를 작성하였다. EBSD를 통해 미세조직 변화와 가공성, 기계적 성질간의 관계를 분석하였으며 1150 °C에서 균질화된 시편에서만 입계를 따른 NbC 석출로 인한 표면 균열이 관찰되었다. 일반적으로  $\delta$ 상과 NbC는 Nb 소모에 대해 경쟁적 석출 거동을 보이며, DP는  $\delta$ 상을 우선적으로 석출시켜 NbC 형성을 효과적으로 억제하고, 입계 약화와 균열 개시를 방지한다고 알려져 있다. 또한  $\delta$ 상은 동적 재결정의 우선 핵생성 위치로 작용하여 열간 변형 중 결정립 미세화를 촉진한다. DP가 적용된 시편들은 동일한 변형 조건에서 향상된 미세조직적 안정성 및 균열이 방지된 개선된 열간 가공성을 보였다. 본 연구를 통해 DP는 균열 발생을 촉진하는 NbC 석출 억제와 재결정 핵생성을 통한 동적 재결정 촉진으로 열간 성형성을 향상시킬 수 있는 공정임을 확인하였다.

**Keywords:** delta process, dynamic recrystallization, deformation process map, hot workability.

1. 한국생산기술연구원 대구뿌리기술지원센터

2. 부산대학교 기계공학부

3. KPCM

4. 한화에어로스페이스

5. 한국가스안전공사

# 교신저자: 한국생산기술연구원, 수석연구원, E-mail: skhwang@kitech.re.kr

## 14. 일반 구두 발표

공정계산역학

재료거동 및 특성화

( 제 2 발표회장 )

# 직교이방성재료의 단순전단변형에서 유효변형률 정의

안강환<sup>1#</sup>· 김홍기<sup>1</sup>

## Effective strain in simple shear deformation of orthotropic materials

K. Ahn, H. Kim

### Abstract

본 연구에서는 강소성체 가정 하에 직교이방성재료의 단순전단변형에서 유효변형률을 수식적으로 정의하였다. 제안된 정의는 세 개의 Lankford 값과 이차 비등방 항복함수 (Hill1948 항복함수)에 기반한다. 단순전단변형에서 발생하는 재료 회전을 고려하여 재료좌표계 기준으로 유효변형률 적분이 수행되었다. 이를 위해 단순전단변형 하에서 재료좌표계 기준으로 표현된 rate of deformation tensor 가 이용되었다. 동일한 유효변형률 정의가 소성일 등가원리에 의해서도 얻어짐을 확인하였다. 도출된 결과를 바탕으로 네 가지 직교이방성재료의 단순전단변형 하에서 유효변형률을 계산하였다. 압연 판재의 경우, 계산된 유효변형률은 등방성 가정 결과와 큰 차이가 없었으나, 평면이방성이 큰 알루미늄 압출재의 경우 유의한 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 평면이방성이 큰 소재의 경우, 단순전단변형 하에서 정확한 유효변형률 평가를 위해서는 재료 이방성에 대한 고려가 필수적임을 의미한다.

**Keywords:** Simple shear, Effective strain, Anisotropy, Plastic deformation

---

1. 포스코기술연구원, 수석연구원

# E-mail: akhwan21@posco.com

# 몬테카를로 기반 SHPB 재료 파라미터의 확률적 모델링

김연복<sup>1</sup>· 김 정<sup>#</sup>

## Monte Carlo-Based Probabilistic Modeling of SHPB Material Parameters

Y. B. Kim, J. Kim

### Abstract

Precise evaluation of dynamic material response at elevated strain rates remains a demanding task, primarily due to uncertainties inherent in mechanical testing, especially for metallic alloys. Conventional approaches to parameter identification frequently fail to incorporate the stochastic variability present in high-rate test data. In this work, a probabilistic methodology is proposed to obtain reliable constitutive parameters from high strain rate experiments by explicitly addressing measurement uncertainty. Dynamic compression experiments were carried out on commercially pure Titanium Grade 1 using a Split Hopkinson Pressure Bar at three distinct loading pressures (0.5, 1.0, and 1.5 bar). Stress-strain relations were obtained and utilized to determine representative material constants. Assuming normal distribution characteristics, 30,000 synthetic datasets were generated through Monte Carlo simulations. Subsequently, a Differential Evolution algorithm was applied to estimate the constitutive parameters of the S-K (Shin-Kim) model across all datasets. The resulting probabilistic parameter space was examined using kernel density estimation to identify statistically significant regions. The framework successfully captured the combined influence of strain rate effects and experimental scatter on the stress-strain behavior. Optimized parameter sets showed close agreement with experimental curves, particularly demonstrating strong corrective capability under the low-pressure condition (0.5 bar), where uncertainty was most pronounced. This study establishes a statistically informed approach for dynamic material modeling, thereby improving the robustness of parameter identification even in the presence of imperfect experimental conditions.

**Keywords:** SHPB(Split-Hopkinson Pressure Bar), Titanium Grade 1, Monte Carlo simulation, Differential Evolution algorithm(DE), S-K(Shin-Kim) model, Kernel density estimation(KDE)

---

1. 부산대학교 항공우주공학과, 대학원생

# 부산대학교 항공우주공학과, 교수 E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

# 등가 소성일 의존 진화형 매개변수를 이용한 순 타이타늄 판재의 성형한계선도 예측

정의찬<sup>1</sup> · 김민수<sup>1</sup> · 김진재<sup>2,#</sup>

## Prediction of forming limit curve for CP-Ti sheet using equivalent plastic work-dependent evolving parameters

U. C. Jeong, M. S. Kim, J. J. Kim

### Abstract

최근 수소 연료전지용 분리판 소재로 각광받는 순 타이타늄(Commercial Pure-Titanium, CP-Ti) 판재는 가벼운 무게, 높은 강도, 그리고 우수한 성형성으로 다양한 산업에서 주목받고 있다. 그러나, CP-Ti의 경우에는 조밀육방격자(Hexagonal Close Packed, HCP) 구조로 인한 소성변형시 강한 이방성 거동이 소성가공에 문제가 되고 있다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 소성 이론 및 구성모델이 개발되어왔다. 최근에는, 항복함수에 등가 소성 일 기반 진화형 매개변수를 도입하여 CP-Ti 판재의 강한 이방성 거동을 모델링하여 이방성 예측 정확도를 높였다. 그러나 이러한 진보된 구성 모델이 금속재료의 성형 한계를 나타내는 성형한계선도(Forming Limit Curve, FLC) 예측을 이론적으로 분석한 연구는 부족하다. 본 연구에서는 Hora의 수정된 최대 힘 기준(Modified Maximum Force Criterion, MMFC)을 이용해 FLC를 예측하고, 이를 반구형 편치 인장 시험으로 측정한 실험 결과와 비교하였다. FLC 예측을 위한 경화모델에는 Swift, Voce, LSV를, 항복함수에는 등가 소성 일 의존 Hill(1948) 항복함수를 적용하였다. 그 결과 LSV 경화모델이 평면변형 경로에서의 파단점인  $FLC_0$ 를 가장 정확히 예측하였으며, 특정 소성 일량 이후에는 Hill(1948) 항복함수의 매개변수가 접근하여 FLC 곡선에 미치는 영향이 제한적임을 확인하였다. 또한 재료 상수의 변화가 항복 곡면의 회전을 야기시켜 FLC 예측 결과에 영향이 미치는 것을 확인하였다.

**Keywords:** Pure titanium sheet, Forming limit curve, Modified maximum force criterion

본 결과물은 2025년도 경상북도 지역혁신중심 대학지원체계 (RISE)-(Megaversity 연합대학)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

1. 영남대학교 미래자동차공학과, 학부과정

2. 영남대학교 미래자동차공학과, 교수

# 교신저자: 영남대학교 미래자동차공학과 교수

E-mail: Jinjae.Kim@yu.ac.kr

## 알루미늄 압출재 기계가공 유한요소해석을 위한 구성방정식 예측 정확도 평가.

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

### Evalution of Constitutive Equation Accuracy for Finite Element Analysis of Machining in Extruded Aluminum

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 파로 저항성, 높은 내열성 및 뛰어난 기계가공성을 바탕으로 항공기 부품 제작에 널리 사용되고 있다. 특히 압출재는 복잡한 형상의 제품을 효율적으로 제조할 수 있으며, 치수 정밀도가 우수하여 항공산업에서 중요한 소재로 활용된다. 항공기 구조 부품인 wing rib, stringer, frame 등은 압출 공정 후 기계가공을 통해 최종 형상으로 제작되는데, 이 과정에서 발생하는 가공변형과 잔류응력을 부품의 치수 정밀도와 파로 성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 이를 최소화하기 위한 최적 가공 조건 도출이 필수적이며, 이를 위해서는 가공변형과 잔류응력의 정확한 예측이 요구된다. 직접적인 실험은 비용과 시간이 과다하게 소요되고 절삭 공정의 특성상 매우 짧은 시간 내에 변형이 발생하므로, 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)이 효과적인 대안으로 활용되고 있다. 그러나 기계가공 시 순간적으로 발생하는 고온, 고변형률 속도, 소재 이방성, 하중 경로에 따른 파단 거동 등을 고려하지 않으면 해석의 신뢰성이 저하될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석에 적용 가능한 기준의 여러 구성방정식에 대해 위 인자들을 충분히 반영할 수 있는지 평가하고, 실험 결과와 비교하여 예측 정확도를 검증한다. 이를 통해 향후 항공기 부품 가공 해석에 적합한 구성방정식의 적용 가능성을 검토하고, 필요 시 새로운 구성모델 개발의 필요성을 확인하고자 한다.

**Keywords:** Carbon Fiber, Cutting Force , Carbon Fiber , Cutting Force

---

1. 한국대학교 기계공학부, 대학원생

2. 한국자동차 연구개발본부, 부장

3. 소속 부서, 직위

# 교신저자의 소속, 부서, 직위, E-mail:

# 차량용 6000계 알루미늄 압출재의 인장 및 굽힘 특성과 압괴 지표 간의 상관관계 분석

백민광<sup>1</sup> · 원정윤<sup>1</sup> · 신건진<sup>1</sup> · 이상준<sup>2</sup> · 강문구<sup>2</sup> · 이명규<sup>1, #</sup>

## Relationship Between Tensile/Bending Properties and Crush Performance Indicators of Automotive 6000-Series Aluminum Extrusions

M. Baek, J. Y. Won, G. Shin, S. J. Lee, M. G. Kang, M. -G. Lee

### Abstract

In this study, crush performance of two aluminum extrusions under four different extrusion conditions and three different heat-treatment conditions are investigated. Tensile tests were performed to obtain yield strength (YS), and V-bending tests were performed to obtain bending angle (BA). Crush tests were then performed to obtain different crush performance indicators. First indicator is crush grade (CG), which indicates apparent degree of deformation. Second indicator is mean crush force (MCF) between two primary peaks which gives load-bearing capacity under early stage of tests. Furthermore, relationships between YS, BA, and crush performance indicators are quantitatively investigated using Pearson's correlation coefficient. Results show that YS-MCF and BA-CG relationships are strongly correlated, implying that crush performance could be predicted cost-effectively from tensile and bending tests.

**Keywords:** Aluminum extrusions, V-bending, Bending Angle, Crush Grade, Mean Crush Force

---

1. 서울대학교 재료공학부

2. 현대자동차 남양연구소, 책임연구원

# Corresponding Author: Department of Materials Science and Engineering & RIAM, Seoul National University, E-mail: myounglee@snu.ac.kr

## 환경응력균열 시험에서 오일에 의한 ABS 고분자의 기계적 물성 저하 및 파괴 거동

이동윤<sup>1</sup> · 전성봉<sup>2</sup> · 박수일<sup>2</sup> · 김지훈<sup>#</sup>

### Oil-induced Degradation and Failure of ABS Polymer in Environmental Stress Cracking Tests

D. Y. Lee<sup>1</sup>, S. B. Jeon<sup>2</sup>, S. I. Park<sup>2</sup>, J. H. Kim<sup>#</sup>

#### Abstract

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) is a widely used thermoplastic polymer with good strength, toughness, and processability. Due to these characteristics, ABS is extensively employed in household appliances, automotive components, and consumer electronics. Under service conditions, polymers are often exposed to mechanical stress and chemicals that can induce environmental stress cracking (ESC). ESC is generally known to arise from the combined action of stress and chemical exposure, leading to premature failure in thermoplastics. In this study, the ESC behavior of ABS was investigated under variations of temperature, applied stress, and exposure to oil. A series of ESC tests was conducted, and subsequent analyses were performed to examine mechanical property degradation and failure criteria. The results demonstrate the influence of temperature and stress on degradation of mechanical properties and establish the failure conditions for ABS under oil-induced environmental stress cracking.

**Keywords:** Acrylonitrile butadiene styrene, Environmental stress cracking, Mechanical property degradation

---

1. 부산대학교 기계공학부, 석사과정
2. LG전자, 책임연구원

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

## 15. 일반 구두 발표

단조

( 제 3 발표회장 )

# 열간 단조 공정에서 파단 모델을 고려한 예비성형체 설계 신뢰성 확보

김부민<sup>1</sup>· 박준희<sup>2</sup>· 김홍래<sup>3</sup>· 김낙수<sup>2#</sup>

## Ensuring the Reliability of Preform Design in Hot Forging Processes by Considering a Fracture Model

B. Kim, J. Park, H. Kim, N. Kim

### Abstract

열간 단조 공정에서의 파단 예측은 기존 유한요소해석으로는 실제 단조품의 파단 위치와 형상을 충분히 재현하지 못하는 한계가 있다. 그러나 단조품의 파단은 성형체의 건전성과 최종 품질에 직접적인 영향을 미치며, 이를 고려한 예비성형체 설계가 필수적이다. 본 연구는 열간 단조 공정에서 발생하는 손상 누적 과정을 고려하여 해석의 신뢰성을 높이고자 하였다. 이를 위해 DEFORM Ver.14.2의 사용자 서브루틴(User-subroutine)을 이용해 파단 모델을 구현하고, 손상 누적 영역에서 유동응력이 점진적으로 저하되도록 수정하였다. 계수 산정에는 인장 및 압축 시험에서 얻은 하중-변위 곡선을 이용하였다. 제안된 모델의 해석 결과는 실제 단조품의 파단 위치와 기하학적 유사성을 기반으로 검증하였다. 또한 플래쉬 파단을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 예비성형체를 비교하였다. 따라서 본 연구는 열간 단조 공정에서의 손상 기반 파단 모델 적용을 통해 예비성형체 설계 방법론의 신뢰성 확보에 기여한다.

**Keywords:** Forging process, Fracture model, Preform design, Finite Element Method (FEM), User-defined subroutine.

---

1. 영남대학교 미래자동차공학과

2. 서강대학교 기계공학과

3. 일진 글로벌

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

# 링 압축시험 해석을 통한 마찰법칙의 평가

허윤<sup>1</sup>· 박민철<sup>2</sup>· 전병윤<sup>3</sup>· 전만수<sup>1, #</sup>

## Evaluation of friction law by prediction of ring compression test

Y. Heo<sup>1</sup>, M. C. Park<sup>2</sup>, B. Y. Jun<sup>3</sup>, M. S. Joun<sup>1, #</sup>

### Abstract

The constant shear friction law is commonly used in metal forming simulations for its simplicity, but it tends to overestimate friction at low die pressures. This study uses finite element analysis combined with the ring compression test to evaluate friction law limitations. Finite element predictions show that a reduced strain hardening forces the friction effect. The new findings underscore the need for advanced friction models reflecting material and process variables to enhance predictive metal forming simulations.

**Keywords:** Ring compression test(링 압축시험), Friction law(마찰 법칙), FE analysis(유한요소해석)

### 1. 서론

소성 가공에서 마찰은 공정 효율과 품질에 큰 영향을 미친다. 기존 일정 전단 마찰 법칙은 단순하지만 실제 접촉면의 복합적인 접착과 미끄러짐 현상을 충분히 설명하지 못한다. 본 연구는 링 압축 시험을 활용해 마찰 법칙의 한계를 분석하고 개선 방향을 제시한다.

### 2. 본론

Fig.1은 링 압축 시험에서 유한요소 해석을 통해 접촉면의 전단응력과 압력 비율 변화를 나타낸다. 분석 결과, 마찰 계수가 높아질수록 슬라이딩 영역에서 이 비율이 명목상의 마찰계수에 대응하는 구간은 좁아지고, 접착 영역은 확대됨을 보였다. 이는 접착 영역이 복합적인 경계 조건으로 작용하여 기존 마찰 법칙만으로는 정확한 해석이 어렵다는 점을 시사한다.

### 3. 결론

본 연구는 전통적 마찰 법칙의 한계를 링 압축 시험과 해석을 통해 규명하였으며, 복합 경계

조건을 포함하는 새로운 마찰 모델이 소성 가공 시뮬레이션의 정확성과 효율을 높이는 데 필요함을 강조한다.

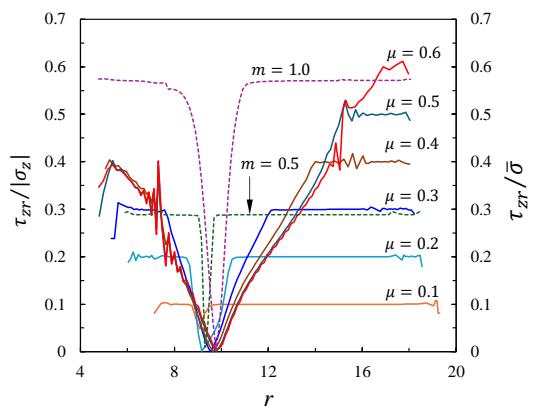


Fig.1 Analysis results for the overlay welded die

### 사사

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

1. 경상대학교 기계공학부

2. (주)AMF

3. 진 엔지니어링

# 교신저자: 경상국립대학교 기계항공공학부

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

# 판재인장시험 결과로부터 유동곡선 및 임계손상도의 획득 및 활용

이현민<sup>1</sup>· 전상윤<sup>2</sup>· S.Paisingkorn<sup>3</sup>· P.Jongpradist<sup>3</sup>· 전만수<sup>1, #</sup>

## Acquisition and application of flow curve and critical damage from sheet tensile test

H. M. Lee<sup>1</sup>, S. Y. Joun<sup>2</sup>, S. Paisingkorn<sup>3</sup>, P. Jongpradist<sup>3</sup>, M. S. Joun<sup>1, #</sup>

### Abstract

In this study, the flow curve and critical damage value of SS400 steel sheets are determined from tensile test results. A representative stress-strain curve was established from five specimens, and flow behavior was characterized separately for pre- and post-necking regions. The pre-necking curve was derived from true stress-strain data, while the post-necking curve applied a Hollomon model with parameters from the Considère condition. To improve accuracy, a damage softening function was introduced based on the Cockcroft-Latham damage distribution.

**Keywords:** Critical damage(임계 손상도), Flow behavior(유동 특성), Sheet metal(판재), Tensile test(인장 시험)

### 1. 서론

재료의 유동 특성을 파악하는 것은 구조 부품의 파괴 및 파손을 예측하는데 필수적이다. 본 연구에서는 SS400 강 시편에 대한 판재인장시험 결과를 바탕으로 재료의 유동곡선 및 임계 손상도를 획득하고자 한다.

### 2. 본론

5개의 판재 시편에 대해 인장시험을 수행하고 일관된 연신율 기준으로 대표적인 응력-변형률 곡선을 선정하였다. 유동 곡선은 네킹 전, 후로 구분하여 네킹 전은 진응력-변형률 방정식, 네킹 후는 Hollomon 방정식을 사용하여 구했으며 Cockcroft-Latham 데미지 이론을 적용하여 손상연화 함수를 도입하여 정확도를 향상시켰다.

### 3. 결론

Fig. 1은 판재인장시험과 인장시험해석 결과이다. 손상 연화 함수를 도입함으로써, 네킹 후 영역에서 예측 결과가 실험 데이터와 더욱 일치했다.

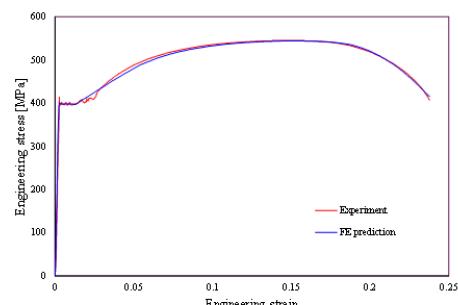


Fig.1 Comparison of tensile test results

### 사사

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

1. 경상대학교 기계공학부  
2. (주)MFRC, 책임연구원  
3. King Mongkut's University of Technology Thonburi  
# 교신저자: 경상국립대학교 기계항공공학부  
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

# 육성용접된 열간단조금형을 사용한 단조공정의 해석 기술

김남윤<sup>1</sup>· 최영길<sup>2</sup>· 장성민<sup>3</sup>· 전만수<sup>1, #</sup>

## Prediction technology for forging process using hot forging dies with overlay welding

N. Y. Kim<sup>1</sup>, Y. G. Choi<sup>2</sup>, S. M. Jang<sup>3</sup>, M. S. Joun<sup>1, #</sup>

### Abstract

Die wear is a critical issue directly impacting productivity in hot forging. While overlay welding has gained attention as a technology to remanufacture worn dies and extend their life, there is a lack of engineering analysis technology to understand the effect of the changed material properties on the overall forging process. This study aims to analyze the forging process using an overlay welded hot forging die through the Finite Element Method (FEM). The analysis results quantitatively support the life-extending effect of overlay welding on the die in the future.

**Keywords:** Hot forging(열간 단조), Overlay welding(육성용접), Life extension(수명 연장)

### 1. 서론

열간단조 금형은 고온/고압 환경으로 인해 마모가 심하며, 이를 육성용접으로 재제조하는 기술이 경제적 대안으로 주목받고 있다. 그러나 육성용접으로 인해 금형 모재와 용접부 간의 비균질성이 발생하며 이는 해석 정확도를 저해하는 주요 요인이다. 본 연구는 이러한 비균질성을 반영한 해석 기술로 재생금형의 마모, 변형 등을 정량적으로 예측하고자 한다.

### 2. 본론

Fig.1은 분할 금형의 단조 공정 해석의 결과이며 유효응력을 보여준다. 육성용접에 자주 사용되는 stellite21를 사용하였다. 해석 시 육성용접부의 탄성계수( $E$ )를 250 GPa, 기존 금형 모재의  $E$ 를 210GPa로 설정하여 2배의 강성차이를 보여준다.

### 3. 결론

재료의 비균질성을 반영하여, 유효 응력 분포를 예측한다. 결과적으로 이는 육성용접된 금형의 수명 연장 효과를 극대화하고 단조 공정의 효율성 및 품질을 향상시키는데 기여한다.

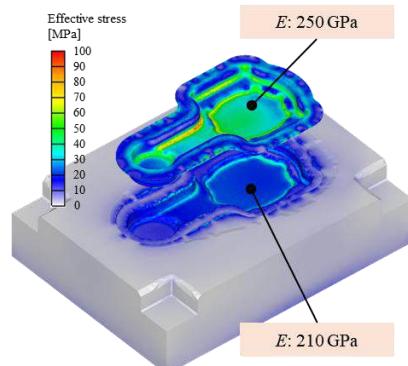


Fig.1 Analysis results for the overlay welded die

### 사사

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

1. 경상대학교 기계공학부

2. 삼우정공, 대표이사

3. (주)MFRC, 책임연구원

# 교신저자: 경상국립대학교 기계항공공학부

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

# 혼합 손상도 모델과 손상계수의 결정

홍보승<sup>1</sup> · 이현민<sup>1</sup> · 홍석무<sup>2</sup> · 전만수<sup>#</sup>

## Determination of mixed damage model and damage coefficient

B. S. Hong, H. M. LEE, S. M. Hong, M. S. Joun

### Abstract

The tensile test and bolt heading processes have precise fracture positions and strokes, which are all visible. With these two reference processes for the same material, an unknown damage constant can be calculated along with the critical damage. A blended damage model is proposed with its damage constant identification scheme.

**Keywords:** Damage constant(손상도 상수), Tensile test(인장시험), Bolt heading(볼트 헤딩)

### 1. 서론

인장시험 및 볼트 헤딩 공정은 정확한 파단위치와 스트로크를 가지며, 이는 모두 뚜렷하다. 동일한 재료에 대한 이 두 가지 기준 공정을 사용하면 미지의 손상상수를 계산할 수 있다.

### 2. 본론

두 기준 공정 모두 파단지점이 명확하게 확인되기 때문에 두 공정 모두 파단 지점에서의 손상상수 값의 변화를 추적하였다. 그림 1에 나타난 것처럼 인장시험과 볼트 성형 공정에서의 두 손상곡선의 교차점에서 손상상수 값을 결정하였다.

### 3. 결론

이렇게 간단하고 실용적인 접근 방식과 기준 공정을 통해 기준 손상 모델 상수 값의 일반화 또는 개선이 가능하다. 이러한 방식을 통해 두 공정에 대해 동일한 기준으로 연성 파괴를 정확하게 예측할 수 있다.

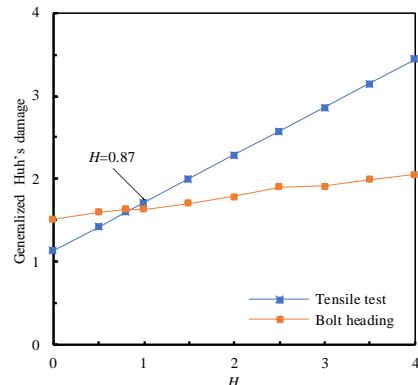


그림 1. 볼트 성형 공정과 인장시험의 파단지점에서의 상수 값 추적

### 사사

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

### 참고문헌

[1] M.S. Joun, J.G. Eom, M.C. Lee, 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.* V 40(7), 2008, PP. 586–593.

1. 경상국립대학교

2. 공주대학교

# 경상국립대학교 기계항공공학부 교수

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

## 윤활레짐변화에 관한 실험적 및 수치적 고찰

박민철<sup>1</sup>· 허윤<sup>2</sup>· 김동환<sup>3</sup>· 김응주<sup>4</sup>· 전만수<sup>#</sup>

### Experimental and numerical investigation on lubrication regime changes

M. C. Park, Y. Heo, D. H. Kim, E. J. Kim, M. S. Joun

#### Abstract

In this study, the effect of lubrication regime change in the cold forging process is experimentally and numerically investigated. A tribologically-special forward and backward extrusion experiment was conducted to reveal the tribological features. The experiments were compared with finite element predictions.

**Keywords:** Lubrication regime change, Cold forging, Finite Element Analysis

#### 1. 서론

Joun 등[1]의 연구에 따르면, 금속 성형 과정에서 발생하는 윤활레짐변화를 강조한다. 본 연구에서는 특별한 전후방압출 실험을 수행하여 윤활레짐변화를 실험적 및 수치적으로 분석한다.

#### 2. 본론

Fig. 1은 전후방압출 실험과 유한요소해석 결과이다. 실험 결과의  $H_1$ ,  $H_2$ 를 만족시키기 위하여 다양한 마찰상수(0.00-0.90)에 대하여 해석하였으나, 실험 결과에 부합하는 해석결과를 얻지 못하였다. 분석결과, 공정 중 윤활레짐변화로 하단부는 마찰이 증가되는 것으로 확인하였다. 외부의 상부 측면과 하부 측면의 마찰을 달리하여 유한요소해석을 수행한 결과 실험 결과와 유사한 조건을 확보할 수 있었다.

#### 3. 결론

단조 공정에서 윤활레짐변화는 공정의 진행에 따라 변화하는 마찰의 특성을 나타내는 극단적

인 현상으로 정밀 소성가공 시뮬레이션에서 마찰의 중요성을 강조한다.

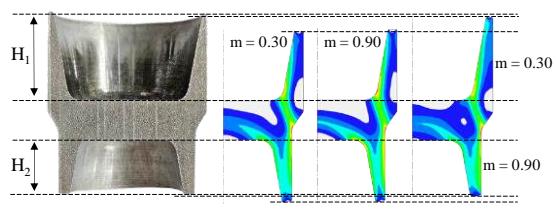


Fig. 1 Comparison of experimental and FEA results

#### 사사

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

#### 참고문헌

[1] M. S. Joun, Y. Heo, N. H. Kim, N. Y. Kim, On Lubrication Regime Changes during Forward Extrusion, Forging, and Drawing, Lubricants, 2024, 10, 352

1. 경상국립대학교 기계공학과(학연)

2. 경상국립대학교 기계항공공학부

3. 창신대학교 항공정비기계학과

4. 한국생산기술연구원

# 교신저자 : 경상국립대학교 기계항공공학부,

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

## 16. 특별세션

1.2GPa 급 동합금 박판 소재 및  
초소형 표면 실장용 커넥터 제조기술 개발  
(주)풍산)

(제 4 발표회장)

# 인장강도 1.2GPa급 동합금 및 박판 압연재 제조기술 개발

김준형<sup>1</sup>· 최영철<sup>1</sup>· 박승훈<sup>1</sup>

## Development of manufacturing technology for copper alloy and thin rolled strip with a tensile strength of 1.2GPa

Jun. Hyung. Kim<sup>1</sup>, Seung. Hoon. Park<sup>1</sup>, Young. Chul. Choi<sup>1</sup>,

### Abstract

4차 산업혁명 시대가 도래함에 따라 그 핵심이 되는 인공지능 (AI), 빅데이터 (Big Data), 사물인터넷 (IoT), 스마트 에너지 (Smart Energy), 로봇과 클라우드 (Cloud) 등 정보통신 기술이 기존 산업과 융합되어 기술적 혁신뿐만 아니라 사회 경제적인 면에서도 비약적 발전을 이루고 있다. 이러한 산업에 적용되는 통신기기, 가전제품, 자동차, 항공기 등 우리 생활 주변에서 사용되는 기기에는 그 특성에 맞도록 많은 부품이 사용되고 있으며 이에 따라 첨단 기술의 핵심이 되는 소재 특성이 더욱 중요시되고 특히 소재 부품의 소형화는 중요한 흐름으로 자리잡고 있다. 상기 전기 전자 제품의 고기능화 및 부품의 소형화에 따라 부품을 구성하는 필수 핵심소재는 우수한 강도 및 고탄성, 굽힘가공성, 내응력이완특성, 스프링 특성과 함께 진동, 열, 충격 등 가혹한 환경에 잘 견딜 수 있는 기가급 고기능성 동합금이 요구되고 있다. 고강도, 고전기전도도 등 합금의 개발에는 주로 석출 경화가 사용되고 있으며 주요 석출 경화형 동합금에는 강도와 전기전도도 균형이 우수한 Cu-Ni-Si계 합금과, 내마모성이 우수한 Cu-Ni-Sn 합금 그리고 고강도와 함께 높은 내응력완화 특성을 지닌 Cu-Be 합금등이 있다. 그러나 Cu-Ni-Si계 합금은 기가급 강도를 확보하기에는 한계가 있고, Cu-Ni-Sn 합금은 굽힘가공성이 매우 좋지 않아 초소형 부품에 적용이 불가능하다. Cu-Be 합금은 첨가원소인 Be가 용해/주조 및 가공시에 발생되는 분진이 인체에 매우 유해하므로 향후 지속적 사용이 규제될 것으로 예상되며, 제조비용이 매우 비싸다는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 제일원리계산을 통한 합금설계 및 가공열처리 등 제조공정 최적화를 통한 Cu-Ti계 합금 개발 및 이를 산업부품에 적용하는 기술을 개발하고자 한다.

**Keywords:** High strength copper alloy, Precipitation hardened copper alloy, Cu-Ti alloy, Copper alloy foil

---

1. (주)풍산

#Corresponding author: 최영철, (주)풍산, 소재기술연구원, 수석연구원, E-mail:ycchoi@poongsan.co.kr

# Cu-Ti 합금 석출 거동에 관한 제일원리 기반 연구

최은애<sup>1#</sup> · 한승전<sup>2</sup>

## First-principles study of Precipitation in Cu-Ti Alloys

E.-A Choi, S. Z. Han

### Abstract

Cu-Ti alloys are precipitation-hardened materials with tensile strengths of about 1 GPa, making them promising candidates to replace toxic Cu-Be alloys. During aging, supersaturated Cu-Ti undergoes spinodal decomposition to form metastable  $\alpha$ -Cu<sub>4</sub>Ti, which later transforms into the stable  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti phase. However, the sluggish spinodal process requires long aging times and hinders the control of fine, uniform precipitates. To clarify how additive elements influence  $\alpha$ -Cu<sub>4</sub>Ti precipitation, we performed density functional theory (DFT) calculations of cohesive energy ( $E_{coh}$ ) and interfacial energy ( $E_{int}$ ). Various alloying elements were substituted at Cu and Ti sites of  $\alpha$ -Cu<sub>4</sub>Ti. Results show that P, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Mo at Cu sites, and Li, Sc, Mn, Y, Zr, and Hf at Ti sites, increased  $E_{coh}$ , improving precipitate stability. No elements effectively reduced interfacial strain at all main Cu// $\alpha$ -Cu<sub>4</sub>Ti interfaces, but P and Cr stabilized the Cu(001)// $\alpha$ -Cu<sub>4</sub>Ti(001) interface. From combined  $E_{coh}$  and  $E_{int}$ , precipitation activation energy ( $E_a$ ) and critical length ( $L_c$ ) were derived. Despite increased  $E_{int}$ , P and Cr significantly enhanced  $E_{coh}$ , reducing  $E_a$  by 21% and 37% and decreasing  $L_c$  by 11% and 26%, respectively. This indicates that P and Cr promote faster precipitation and smaller, more uniform precipitates. In contrast, Mn, Co, and Ni increased  $E_a$  but decreased  $L_c$ , suggesting they may refine precipitate size. These findings reveal atomic-scale mechanisms of additive effects and provide guidelines for designing high-performance Cu-Ti alloys.

**Keywords:** Cu-Ti alloy, density functional theory, precipitation, cohesive energy, interfacial energy

---

1. 한국재료연구원, 극한재료연구소, 책임연구원

2. 한국재료연구원, 극한재료연구소, 책임연구원

# E-mail: eunae.choi@kims.re.kr

## 고강도 Cu-Ti 2원계 동합금 잉곳 및 압연재의 미세조직 특성

박우진<sup>#</sup> · 오윤석 · 강희수

### Microstructural Characteristics of high strength Cu-Ti binary ingots and sheets

#### Abstract

최근들어 정보통신이나 자동차의 전장부품에 사용되는 핵심 동합금의 고강도화가 요구되고 있으며, 대표적인 고강도 동합금인 베릴륨동의 대체 합금으로 Cu-Ti 합금에 대한 관심이 고조되고 있다. Cu-Ti 합금은 Ti 함유에 따라 기지조직의 Spinodal decomposition이나 Ti 함유 미세석출 현상으로 고강도화가 가능한 합금으로 알려져 있다. 하지만 대기분위기에 민감한 고용점 Ti 원소를 첨가하여야 하므로 용해/주조 단계부터 상이한 거동을 보일 뿐 아니라, 공정단계별 경도가 높기 때문에 압연크랙 등 압연결함을 쉽게 유발시킬 수 있다. 이러한 문제는 Cu-Ti 잉곳 제조와 밀접하게 연관되어 있으므로, 본 연구에서는 Cu-Ti 2원계 VIM 잉곳 및 압연재에 대한 미세조직 분석을 통한 적정 공정루트 선정에 필요한 핵심 참고자료를 제시하고자 한다.

## 투과전자현미경법을 이용한 합금원소 첨가에 따른 Cu-Ti 합금의 미세구조 특성에 관한 연구

임성환<sup>1)</sup>, 이정구<sup>2)</sup>, 김준형<sup>3)</sup>, 최영철<sup>3)</sup>, 박철민<sup>3)</sup>

### Microstructural study of alloy elements added Cu-Ti alloys using transmission electron microscopy

S. H. Lim<sup>1)</sup>, J. G. Lee<sup>2)</sup>, Y. C. Choi<sup>3)</sup>, J. H. Kim<sup>3)</sup>, and C. M. Park<sup>3)</sup>

#### Abstract

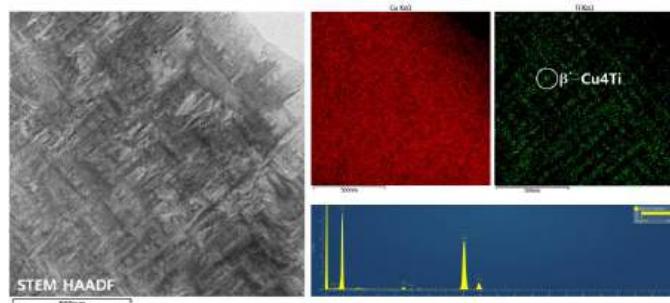
커넥터용 동합금의 고강도 고전도 특성을 만족하기 위해 다양한 동합금이 개발되었지만, 대부분이 석출 강화와 가공 경화에 의한 강화 기구라는 한계가 있다. 더욱 혁신적인 특성 향상을 위해서는 새로운 강화 기구를 제안하여야 하며, 이는 합금 설계와 특수 가공 열처리를 통해서만이 달성될 수 있다. 공정조건에 따라 새로운 미세구조 특성이 구현되면 커넥터등에 필요로 하는 물성 향상을 줄 수 있다. 최근에 알려진 기존 동합금의 새로운 강화 기구는 나노 쌍정(twin)이라는 면결함을 역으로 이용하여 강도와 전도성을 동시에 향상시킨 혁신적인 방법이다. 쌍정 바운더리는 구조 상 낮은 계면에너지를 가지고 있어 전위 이동을 방해하여 소성 변형되기 어렵다. 또한 전자 산란이 적어 전기전도성 측면에서도 상당한 이점이 있다. 그럼에도 불구하고, 미세구조 특성의 구현 방법에 있어 공정 등이 실험실 구현 차원의 특성이 강하고, 대량 생산하여 산업에 적용시키기에는 한계가 있다. 따라서 전기전도도의 손상을 최소화하면서 실제 적용 가능한 강화 기구가 필요한 상황이다.

**Keywords:** Cu alloys, Microstructure, TEM

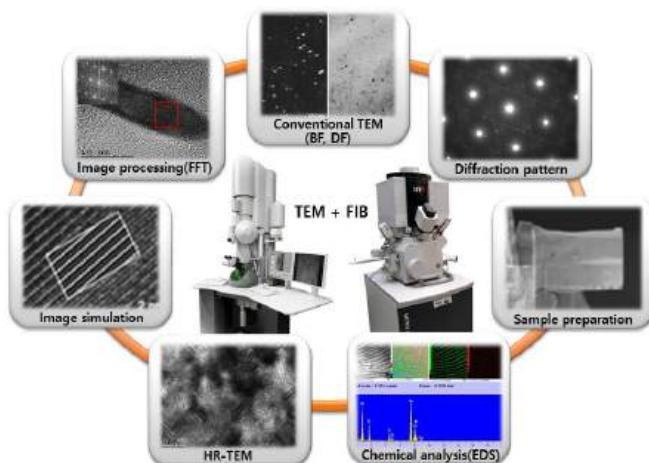
---

1. 강원대학교
2. 울산대학교
3. (주)풍산

# 교신저자 : 강원대학교, 재료공학과, 교수  
E-mail:shlim@kangwon.ac.kr



< Cu-Ti 합금의 미세 석출물 이미지 >



<투과전자현미경법 및 이온집속빔법을 이용한 재료의 미세구조 특성 연구>

합금 원소 첨가 및 열처리 조건에 따른 Cu-Ti 합금이 주어진 독특한 사용 환경에서 보여주는, 새로운 상(Phase) 혹은 석출물을 포함하는 결함 형성(Defect Formation) 등과 같은 미세구조 특성은 주로 나노미터(nm) 범위에서 원자의 확산과 함께 진행된다. 이를 직접적으로 관찰하고 분석하기 위해서는 nm 범위에서 미세구조 및 화학 조성 규명에 특화된 투과전자현미경법 (Transmission Electron Microscopy, TEM)을 이용한 연구가 필수이며, 정확한 특정 위치에서 TEM 관찰 시편을 제작하기 위한 이온집속빔법(Focused Ion Beam, FIB) 또한 동시에 요구된다. 본 연구를 통해 커넥터용 고강도 동합금의 특성 향상 기구를 규명하고, TEM 및 FIB, Image Simulation, EELS등을 이용한 Cu 합금의 미세구조 특성 분석법을 확립하고 물성 향상에 관련된 미세구조 특성을 이해하고자 한다.

## Cu-Ti-(X) 합금 박판의 기계적 물성 평가

최재훈<sup>1</sup>, 김연서<sup>2</sup>, 정동습<sup>2</sup>, 이소영<sup>2</sup>, 송수민<sup>2</sup>, 박승훈<sup>3</sup>, 이정구<sup>#</sup>

### Mechanical Properties of Cu-Ti-(X) Alloy Sheets

J. H. Choi, Y. S. Kim, D. S. Jeong, S. Y. Lee, S. M. Song, S. H. Park, J. G. Lee

#### Abstract

동합금은 자동차, 전기·전자 소재부품에 사용되는 필수 핵심 소재이며 최근 소재부품의 소형화 요구가 심화됨에 따라 기가급 고강도 동합금의 요구가 증가하고 있다. 현재 대표적인 기가급 동합금으로 Cu-Be 합금이 사용되고 있으나, Cu-Be 합금의 경우 제조 시 인체에 유해한 Be 흡을 발생시키는 이유로 환경 규제가 지속적으로 강화되고 있어 대체 합금의 개발이 시급한 실정이다. 대체 합금으로는 Cu-Ti 계 합금이 주목을 받고 있으며, Cu-Ti 계 합금은 석출경화형 합금으로써 첨가원소와 석출 열처리 조건에 따라 달라지는 석출물의 형성이 합금의 물성에 큰 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 Cu-Ti 합금에 미량의 합금원소(X)를 첨가하여 Cu-Ti-(X) 합금 박판을 제조하였으며 첨가원소(X)와 석출 열처리에 따른 합금 박판의 물성 변화를 평가하였다. Cu-Ti-(X) 합금 박판에 대하여 석출 열처리 시간을 달리하여 석출경화에 의한 경도, 강도 및 전기전도도의 변화를 평가하였다. 또한 석출 거동 변화에 따른 미세조직을 전자현미경을 이용하여 관찰하고 X-ray 회절을 이용하여 석출물 형성 거동을 분석하였다. 이와 더불어 제조한 Cu-Ti-(X) 합금 박판의 굽힘가공성을 평가하여 미세조직과 굽힘가공성 간의 상관관계를 분석하였다.

\* 본 연구는 산업통상자원부(한국산업기술기획평가원)의 소재부품기술개발사업(과제번호 : RS-2024-00433560)의 지원으로 이루어졌다.

**Keywords:** Cu-Ti Alloy, Hardness, Strength, Electrical Conductivity, Bending Workability

1. 울산대학교 첨단소재공학과, 대학원생

2. 울산대학교 첨단소재공학부, 학부생

3. ㈜풍산 기술연구원, 연구원

# 울산대학교 신소재반도체융합학부, 교수, E-mail: jglee88@ulsan.ac.kr

## Ni 첨가에 따른 Cu-3%Ti 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가

김용근<sup>#</sup> · 이민숙 · 나혜성

### Abstract

Cu 합금은 높은 강도와 전기전도도가 요구되는 전기·전자 부품을 비롯한 다양한 산업 분야에서 널리 사용된다. 기존의 Cu-Be 합금은 우수한 기계적·물리적 특성을 보유하지만, Be의 인체 독성으로 인해 대체 합금 개발이 필요하다. Cu-Ti 합금은 높은 강도를 제공하나, Ti의 고용에 따른 전자 산란 증가로 전기전도도가 저하되는 한계가 있다. 본 연구에서는 Ni 첨가를 통해 Ti의 고용량을 줄이고 금속간화합물의 형성을 유도함으로써 전기전도도 향상을 도모하였다. Ni 첨가 Cu-3Ti 합금을 제작하고, 시효 처리 과정에서의 미세조직적 거동을 분석하였으며, 이와 연계된 기계적 특성 변화를 평가하였다.

## Cu-Ti 합금의 화학적 특성 분석 및 가공열처리 요소 기술 개발

최광수 · 양현석 · 정항철 · 공만식<sup>#</sup>

### Chemical Characterization and Development of Processing and Heat Treatment Technologies of Cu-Ti Alloy

K. Choi, H. Yang, H. Jung, M. Kong<sup>#</sup>

#### Abstract

본 연구에서는 전자기용 커텍터 부품 소재로 적용되는 고강도 석출 강화형 Cu-Ti 합금 잉곳의 화학적 특성 평가 및 열처리 요소 기술을 고찰하였다. 해당 합금은 진공 유도 용해 및 주조 공정을 통해 4톤급 잉곳으로 제조되었으며, 용해 및 단조 공정을 통해 슬라브로 가공하였다. 주조 잉곳과 단조 슬라브 단계에서 화학 조성 분석을 실시하여 재료의 건전성을 평가하였다. 가공열처리 요소기술로는 열간 단조 공정 조건을 도출하기 위해 글리블 시험을 수행하고, 이를 기반으로 프로세싱 맵을 작성하였다. 또한, Cu-Ti 합금에 대해 균질화, 열간 가공, 용체화 및 시효 열처리 조건에 따른 랙 스케일의 미세조직 특성과 시효 석출 경화 거동을 평가하였다. 본 연구는 Cu-Ti 합금의 상변태 및 고온 변형 거동에 대한 매커니즘을 이해하고 산업 현장에서 적용하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords:** Cu-Ti alloy, Age hardening, precipitation hardening, Gleeble test

---

1. 고등기술연구원, 신소재공정센터 재료공정연구그룹, 선임연구원

2. 고등기술연구원, 신소재공정센터 재료공정연구그룹, 책임연구원

3. 고등기술연구원, 신소재공정센터 재료공정연구그룹, 책임연구원

# 공만식, 신소재공정센터 재료공정연구그룹, 수석연구원, E-mail: mskong@iae.re.kr

## CFD 해석을 통한 Cu-Ti 합금 진공 주조 공정에서의 열 · 응고 거동 평가

강정석<sup>#</sup>

### Abstract

Cu-Ti 계 합금은 우수한 기계적 특성과 내식성으로 인해 다양한 고부가가치 산업에 활용되고 있으나, 고용점과 반응성이 강한 특성으로 인해 안정적인 주조 공정 확보가 쉽지 않다. 본 연구에서는 진공 주조 공정의 핵심 단계인 턴디쉬와 몰드를 대상으로 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하여 합금의 온도 분포 및 응고 거동을 체계적으로 분석하였다. 먼저 턴디쉬 구간에서는 용탕이 주형으로 이송되는 과정에서 발생하는 열손실을 정량적으로 평가하였으며, 유동 패턴과 열전달 특성에 따른 온도 저하가 최종 잉곳 품질에 미치는 영향을 검토하였다. 이어서 몰드 구간에서는 주입된 합금의 응고 해석을 통하여 응고 속도, 중심부와 외곽부의 온도 구배, 그리고 잉곳 내부의 미응고 영역 분포를 도출하였다. 본 연구 결과는 Cu-Ti 합금 진공 주조 공정의 주요 열 · 유동 현상을 정량적으로 파악할 수 있는 기초 자료를 제공하며, 향후 주조 조건 최적화 및 잉곳 품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Cu-Ti 합금, 진공 주조, CFD

---

<sup>#</sup> 메탈젠텍(주)

## Cu-Ti 합금 판재의 굽힘 성형성 분석

이창환<sup>1, 2, #</sup>·이승현<sup>1, 2</sup>·박민욱<sup>2</sup>·윤정식<sup>2</sup>·최인규<sup>2</sup>·노현도<sup>1</sup>·배유빈<sup>1</sup>·문승현<sup>1</sup>·성낙훈<sup>3</sup>·최재일<sup>3</sup>

### Bendability analysis of Cu-Ti alloy sheets

C. W. Lee, S. H. Lee, M. W. Park, J. S. Yoon, I. G. Choi, H. D. Noh, Y. B. Bae, S. H. Moon, N. H. Seong,  
J. I. Choi

#### Abstract

Cu-Ti 합금 판재는 석출 경화에 의해 우수한 강도와 열적 안정성을 확보할 수 있어 전기·전자 부품 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 Cu-Ti 합금의 굽힘 성형성을 평가하기 위하여 V-굽힘과 U-굽힘 실험을 수행하였다. V-굽힘은 90° 편치와 다이를 사용하고, 편치 반경을 0, 0.2, 0.4, 0.6 mm로 변화시켜 실험을 진행하였다. U-굽힘은 평판형 편치와 다이를 적용하였으며, 일정한 간격을 확보하기 위해 스페이서 블록을 삽입하여 재료를 U자 형상으로 굽힘하였다. 이 과정에서 굽힘 반경은 스페이서 두께의 1/2에 해당하였다. 실험 결과, V-굽힘에서는 0.1 mm 두께 소재의 경우 마찰 영향으로 목표 형상 가공이 어려워 R=0 조건에서도 파손이 발생하지 않았다. 반면, U-굽힘에서는 스페이서 블록 두께 변화에 따라 변형 거동이 달라졌으며, 이를 통해 Cu-Ti 합금 판재의 굽힘 성형 한계를 예측할 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 실험을 통해 Cu-Ti 합금 판재의 굽힘 성형 한계를 예측할 수 있었으며, 해당 결과를 활용하여 커넥터 부품의 설계에 적용하고자 한다.

**Keywords:** Cu-Ti alloy sheet, Bending, Bendability

#### Acknowledgement

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원 (KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구과제 (RS-2024-00433566) 입니다.

---

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

2. 서울과학기술대학교 기계정보공학과

3. 협진커넥터

# 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 부교수, cwlee@seoultech.ac.kr

## 17. 수상 기념 강연 / 일반 구두 발표

제 6 회 요석학술상 수상 기념 강연

압연

( 제 5 발표회장 )

# Generation of Microstructural Digital Twins and Their Applications to Materials Properties

JaeHyung Cho<sup>#</sup>, Mohanraj Murugesan, Jang Hyo-sun, and Lee Geon-young

## Abstract

Various microstructural features of grain orientations, grain size and others strongly affect the mechanical properties and performance of polycrystalline materials. Digital microstructures, or microstructural digital twins can be constructed, based on two- or three-dimensional microstructural data, they can be applied to predict microstructural evolution and material properties. In particular, two-dimensional microstructures can be effectively obtained using EBSD, and their various features can be collected for machine learning-based predictions. Exploring data analysis (EDA) provide informative features of microstructural data. Three-dimensional microstructures also can be characterized using FIB/EBSD (focused ion beam/electron backscatter diffraction) sequences or DCT (diffraction contrast tomography) methods. In addition, virtual microstructure builders, such as DREAM.3D (based on Voronoi tessellation), can also be used to generate microstructures. The acquisition of original microstructural data, feature extraction, and their application to predicting mechanical properties and microstructural evolution will be discussed.

**Keywords:** Microstructure informatics, Digital twins, EBSD, Texture, Machine learning

---

<sup>#</sup> Department of materials materials processing, Korea Institute of materials Science, E-mail: jhcho@kims.re.kr

# 응력 기반 파단 모델을 이용한 압연 공정에서의 에지 크랙 예측 및 메커니즘 규명

조대천<sup>1</sup> · 임현용<sup>1</sup> · 윤정환<sup>#</sup>

## Prediction and Mechanism Identification of Edge Cracks in Rolling Processes Using a Stress-Based Fracture Model

D. C. Cho, H. Y. Lim, J. W. Yoon

### Abstract

압연은 회전하는 롤 사이로 소재를 통과시켜 두께를 감소시키는 대표적인 소성가공 공정으로, 철강 및 비철 금속 산업을 비롯한 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 그러나 압연 과정에서 판재 가장자리에 발생하는 에지 크랙은 제품의 품질 저하와 생산성 감소를 유발하는 심각한 문제로 지적되고 있다. 따라서 에지 크랙의 발생을 정밀하게 예측하고, 그 메커니즘을 규명하는 것은 공정 최적화 및 불량률 저감을 위해 매우 중요한 과제이다.

본 연구에서는 응력 기반 파단 모델을 도입하여 압연 공정 중 발생하는 에지 크랙을 예측하고, 그 발생 원리를 규명하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 본 소재의 거동을 반영한 항복함수, 가공경화 모델 및 변형률 속도를 반영한 응력 기반 파단 모델을 수립하였다. 이후 수립된 재료 방정식을 3 차원 유한요소해석에 적용하여 실제 조건을 모사하였다. 해석 결과, 파단 모델은 압연 공정에서의 에지 크랙 발생 위치와 양상을 정량적으로 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 소재 중심부와 가장자리의 변형률 차이가 크랙 발생의 주요 원인임을 규명하였으며, 이를 통해 에지 크랙의 발생 메커니즘을 명확히 설명할 수 있었다.

이러한 결과는 압연 과정에서 에지 크랙이 발생하는 근본적 원리를 이해하는 데 기여하며, 향후 주요 공정 변수에 따른 정량적 영향 분석을 수행함으로써 실제 산업 현장에서 적용 가능한 압연 공정 설계 최적화 가이드라인으로 발전될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Edge crack, Rolling, Finite element analysis, Fracture mechanism, Plasticity

---

1. 한국과학기술원 기계공학과, 대학원생

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

## 냉간 연속 압연 시 워크 룰 수직 변위 변동연구

이주성<sup>1</sup>· 이석의<sup>1</sup>· 전진표<sup>1</sup>· 이영석 <sup>#</sup>

### Study on the vertical displacement of work rolls during cold continuous rolling

J. S. Lee, S. E. Lee, J. P. Jeon, Y. S. Lee

#### Abstract

냉간 압연 공정은 제품의 정밀한 두께와 우수한 표면 품질을 결정하는 핵심 공정이다. 특히, 여러 스템드를 연속으로 통과하며 압연이 이루어지는 냉간 연속 압연공정은 단일 스템드 압연에 비해 각 스템드 간의 상호작용으로 인해 공정 변수가 복잡하게 얹혀 있어 제어가 매우 까다롭다. 이러한 복잡성은 워크 룰의 미세한 거동, 특히 수직 변위에 영향을 미쳐 최종 제품의 품질 불량으로 이어질 수 있다.

본 연구에서는 냉간 연속 압연 공정의 안정성 향상을 목표로, 공정 중 발생하는 워크 룰의 수직 변위 변동 특성을 분석하였다. 단일 압연과 달리 연속 압연 공정에서는 선행 스템드의 압연 조건 변화가 후행 스템드에 직접적인 영향을 미치는 스템드 간 상호작용이 발생한다. 본 연구는 이러한 상호작용이 워크 룰의 수직 변위에 미치는 영향을 규명하는 데 초점을 맞추었다.

이를 위해, 냉간 연속 압연 공정의 동적 특성을 모사하는 이론적 모델을 구축하고 수치 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 개발된 모델을 이용하여 특정 스템드에서 발생하는 장력이나 마찰 등의 변화가 인접 스템드 및 전체 시스템의 워크를 수직 변위에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다.

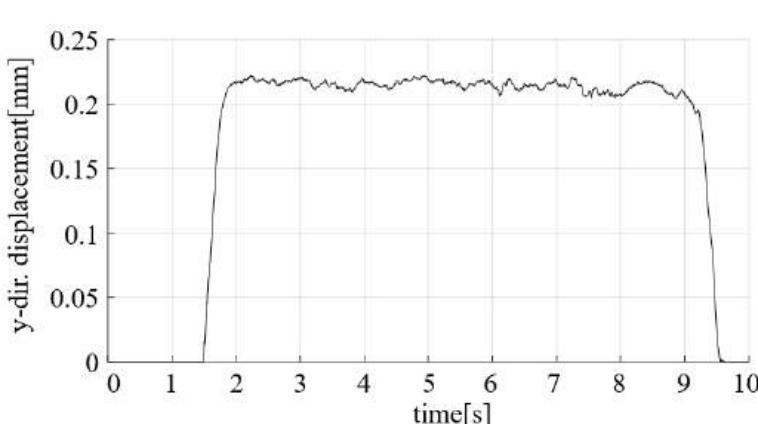
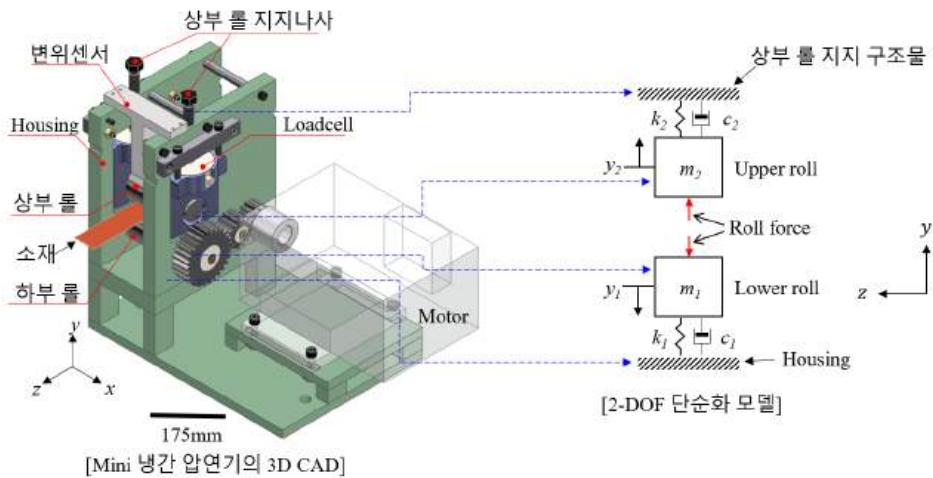
본 연구에서 제시된 모델과 분석 결과는 공정 안정성을 저해하는 진동 현상을 사전에 예측하고, 안정적인 조업 조건을 설계하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 나아가 이는 최종 제품의 품질 편차를 줄이고 생산성을 향상시키는 제어 시스템 개발에 기여할 것으로 기대된다.

**Keywords:** Tandem Cold Rolling, Work Roll Vertical Displacement, Inter-stand Interaction, Numerical Analysis, Dynamic Modeling, Process Stability

---

1. 중앙대학교 기계공학부, 대학원생

# 중앙대학교 기계공학부, 교수, E-mail: ysl@cau.ac.kr



상단 이미지는 냉간 압연기를 2자유도 질량-감쇠-탄성모델로 단순화하는 이미지이다.

좌측 이미지는 실제 미니 냉간 연기의 이미지이다.

하단 이미지는 압연 진행 시 상부 를의 수직 변위 데이터이다.

# 선재압연라인 디지털 전환(DX)을 위한 하이브리드 데이터 기반 분석 (Hybrid Data-driven Analysis) 플랫폼 개발

김규태<sup>1</sup>·이영석<sup>#</sup>

## Development of a Hybrid Data-driven Analysis (HDA) Platform for Digital Transformation (DX) of Wire Rod Rolling Lines

K. T. Kim, Y. Lee

### Abstract

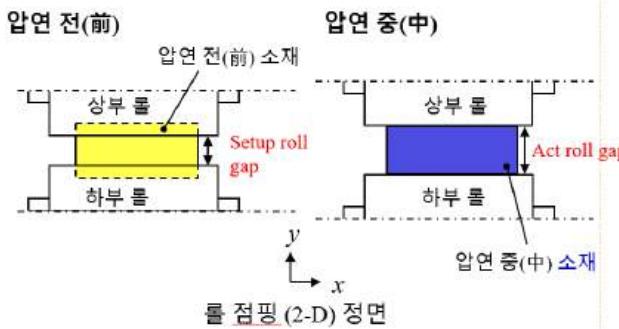
최근 철강산업에서는 디지털 전환(Digital Transformation, DX)을 통해 공정 효율성과 품질 경쟁력을 확보하려는 노력이 활발히 진행되고 있다. 그러나 20~30개 스탠드(stand)가 연속으로 배치된 선재압연공정은 고온·고속 조건에서의 계측 한계로 인해 핵심 공정 데이터의 실시간 확보가 어렵고, 이로 인해 과학적 근거보다는 조업자의 경험에 의존해 온 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 직접 측정 데이터, 간접 측정 데이터, 물리 기반 해석 모델, 그리고 조업자의 경험 데이터를 융합하는 하이브리드 데이터기반 분석(Hybrid Data-driven Analysis, HDA) 플랫폼을 개발하였다. 제안된 플랫폼은 압연 모터 전류 및 회전수와 같은 부분 측정 가능 데이터를 활용하여 롤 압하력 및 질량 유출량(mass flow) 변화를 추정하고, 해석 모델과 연계하여 각 패스에서 소재 단면 형상 변화를 실시간으로 보정할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서는 공형 압연 해석과 압연하중 기반 롤 캡 예측 알고리즘을 결합하여, 각 패스에서 소재의 폭퍼짐과 단면 형상, 질량 유출량을 실시간으로 계산할 수 있는 방법을 제시한다. 현장 데이터와 유한요소(FE) 해석을 통해 알고리즘의 신뢰성을 검증하였으며, Python 기반 프로그램을 개발하여 기존 MATLAB 프로그램 대비 범용성과 확장성을 확보하였다. 특히 제안된 프로그램은 기존 FE(Finite Element) 해석 (4패스 기준 약 60시간 소요) 대비 10초 이내에 핵심 공정 데이터를 산출할 수 있어, 현장 적용성이 매우 높을 것으로 기대된다.

이를 통해 데이터 부족 및 측정 불가의 근본적 한계를 극복하고, 선재압연공정의 실시간 조업 분석 능력을 확보함으로써 고온·고속 압연 적용하여 정밀도를 향상시킬 수 있다. 본 연구의 성과는 선재압연라인의 디지털 전환을 가속화할 수 있는 기반 기술로서, 향후 ‘Dark Factory’ 구현을 위한 핵심 인프라로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

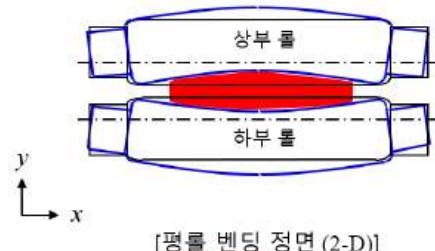
**Keywords:** Rod and Bar rolling, Data-driven Analysis, Time dependent mass flow, Production automation

## Reference

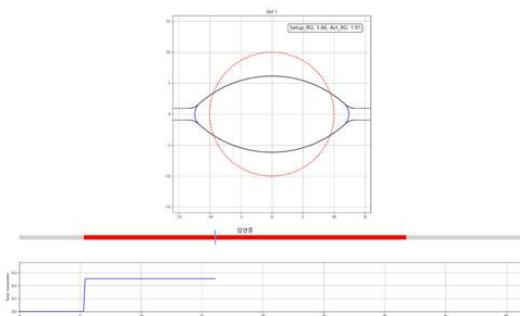
- (1) Lee, Y. (2004). 책 인용
- (2) 남규한, 이동윤, & 이영석. (2024). 연속압연 공정에서 소재의 mass flow 실시간 진단을 위한 통적 소재 폭퍼짐 예측. 한국소성가공학회 학술대회 논문집, 127-127.
- (3) 이동윤. (2023). 연속 공형압연에서 표면흠 예측 모델(Surface Defect Index model)개발 및 Fast Prediction 플랫폼 구축. 중앙대학교 석사학위 논문.



<Fig. 1 압연 이전 공형 롤의 상/하 변위(움직임)>



<Fig. 2 압연 도중 공형 상/하 롤의 밴딩>



<Fig. 3 실제 롤 갭 변화에 따른 소재 단면형상 변화>



<Fig. 4 HDA 플랫폼 8pass 공정 parameter 결과>

1. 중앙대학교 기계공학부, 대학원생

# 중앙대학교, 기계공학부, 교수, E-mail: ysl@cau.ac.kr

# 압연설비 국산화를 위한 소형 냉간압연기의 통합 설계, 제작 및 시험

전진표<sup>1</sup>· 이석의<sup>1</sup>· 이영석<sup>#</sup>

## Integrated Design, Fabrication, and Testing of a Small-Scale Cold Rolling Mill for the Domestic Development of Rolling Equipment

J. P. Jeon, S. E. Lee and Y. S. Lee

### Abstract

압연설비를 설계할 때 구조설계와 생산에 필요한 계측·제어 설비(hardware+software)설계가 분리되어 진행된다. 이러한 분리는 두 분야 전문가 사이의 의견 차이나 설비 설계·운용 철학의 차이로 이어질 수 있으며, 결과적으로 압연설비 설계 및 제작기술의 발전을 저해하는 요인이 된다. 본 연구는 이러한 현실에 주목하여, 기계 설계와 계측·제어 설계를 통합적으로 수행한 소형 냉간압연기 설계 및 제작 사례를 발표한다. 현재 국내 주요 철강기업들이 도입하는 외산 압연설비는 고가의 도입 비용에도 불구하고, 설비와 함께 제공되는 설계도면이 제한적이어서 국산 압연설비 설계 역량 확보에 제약이 있다. 해외 철강설비 메이커는 설비 유지보수에 필요한 최소한의 도면만 제공한다.

본 연구에서는 구리(copper) 판재(두께 2mm)를 압연할 수 있는 소형 2-pass 냉간압연기 제작을 위해 기본설계부터 상세설계까지 직접 수행하였다. 또한 압연기 구동 및 제어에 필요한 인버터, 모터, 센서를 포함한 계측·제어 시스템을 자체적으로 설계·구현하였다. 상세 설계도면을 기반으로 부품 가공을 의뢰하고, 이를 조립하여 압연기를 제작하였다. 제작된 설비는 다양한 조건에서의 압연실험에 활용되었으며, 그 과정에서 압연의 정밀도와 안정성을 확보할 수 있었다.

실험 결과, 압하력, 소재 두께, 변위 등 주요 공정변수를 안정적으로 계측할 수 있었으며, 초기 설계 목표대로 압연 성능을 발휘함을 확인하였다. 이를 통해 압연기 구조 설계와 계측·제어 시스템 설계를 통합적으로 수행할 수 있는 역량을 입증하였다. 따라서 본 연구는 향후 압연 설비 기술의 국산화에 기초를 마련할 뿐만 아니라, 연구결과는 압연 중 항상 발생하는 tension & loop control 시스템을 설계하고 구현하는 데 중요한 기반기술이 될 것으로 기대된다.

**Keywords:** Small-scale rolling mill, Detail design, Motor control design, Instrumentation

---

1. 중앙대학교 기계공학부, 대학원생

# 교신저자: 중앙대학교 기계공학부, 교수, E-mail: ysl@cau.ac.kr

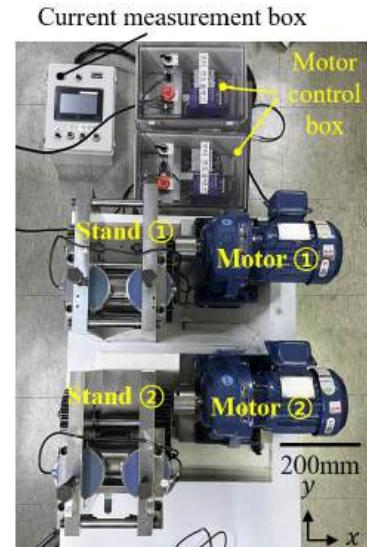
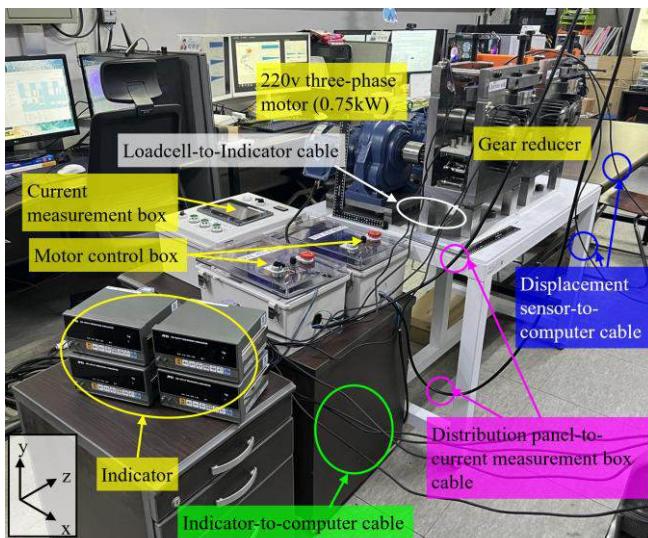


Fig. 1 Photograph of the small-scale rolling mill designed and fabricated in this study

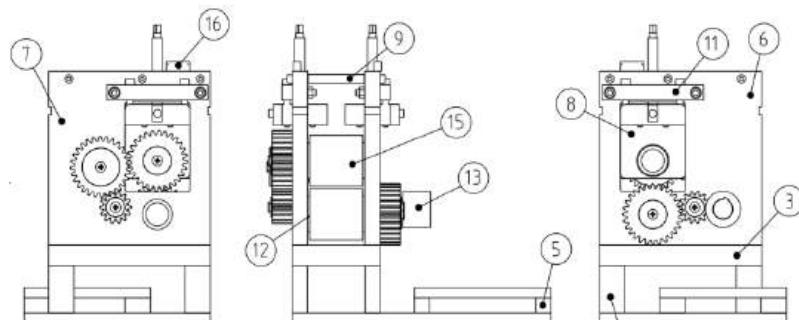
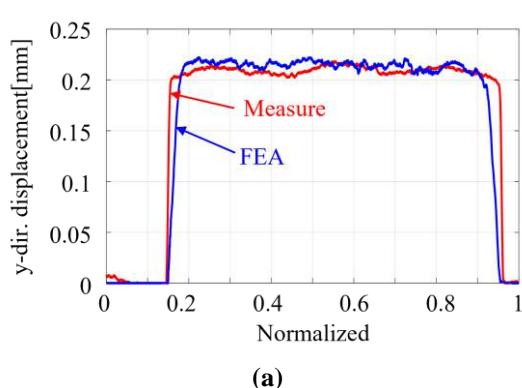
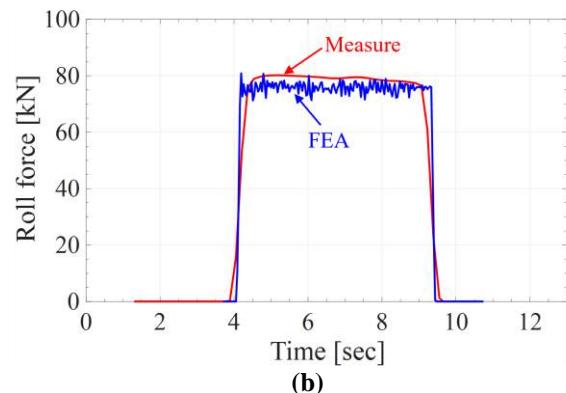


Fig. 2 Two-dimensional CAD of the small-scale cold rolling mill designed in this study



(a)



(b)

Fig. 3 Comparison of measurements and FE analysis (a) Vertical displacement (b) Roll force

### Reference

- [1] Wusatowski, Zygmunt. Fundamentals of rolling. Elsevier, 2013.
- [2] Mott, Robert L. Machine elements in mechanical design. Pearson Educación, 2004.

# 페라이트계 스테인리스강 슬라브의 오프코너 크랙 진화와 표면결함 전이 메커니즘

이계만<sup>1,#</sup>· 이상진<sup>1</sup>

## Evolution of Off-Corner Cracks and Surface Defect Transition Mechanism in Ferritic Stainless Steel Slabs

K. M. Lee<sup>1,#</sup>, S. J. Lee<sup>1</sup>

### Abstract

연속주조 공정으로 생산되는 페라이트계 스테인리스강 슬라브에서는 다양한 형태의 크랙이 발생할 수 있다. 슬라브의 단변부 벌장(narrow face bulging) 및 종방향 표면 함몰(longitudinal surface depression)에 기인한 오프코너 표층하 크랙(off-corner subsurface crack)은 제조공정 전반에 걸쳐 잔류하여 최종 냉연코일의 표면결함으로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 오프코너 표층하 크랙이 열간 및 냉간압연 공정에서 공정변수(가열로 내 온도, 조압연 조건 등)에 따라 어떻게 변화하는지 각 공정 단계별로 체계적으로 분석하였다. 그 결과, 페라이트계 스테인리스강 슬라브의 오프코너 표층하 크랙이 냉연코일의 표면결함으로 발전하는 매커니즘을 규명하였고, 이를 방지하기 위한 공정 제어 조건을 도출하였다.

**Keywords:** ferritic stainless steel, off-corner subsurface crack

---

1. POSCO

# POSCO 기술연구원, 수석연구원, kmanlee@posco.com

## 18. 특별세션

전기차용 휠 베어링 소재 부품 기술개발  
(주)일진글로벌)

(제 6 발표회장)

# 인공지능과 열역학 계산을 활용한 베어링 강종 설계 최적화 방법론

김영광<sup>1,#</sup>· 이민호<sup>2</sup>

## Abstract

본 연구는 고토크 구동 조건의 전기차 베어링에 적합한 신규 탄소강 설계를 위해 Gaussian Process 기반 능동학습(active learning)을 적용한 합금 성분 최적화 방법을 제안한다. 해당 강은 기본적으로 폐라이트-펄라이트 기지조직을 가지며, 표면 열처리 시 마르텐사이트 변태를 통해 표면 경화가 관찰된 탄소강이다. 전기차의 출력 및 하중 증가로 베어링 소재의 피로 수명과 내마모 특성 향상이 요구됨에 따라, 본 연구는 결정립 미세화와 탄화물 분율·분포 제어를 동시 달성하는 합금 설계 전략을 수립하였다. 이를 위해 Gaussian Process를 이용한 능동학습으로 조성-조직-특성 간 상관을 학습·탐색하고, 대규모 열역학/상평형 계산(CALPHAD)을 병행하여 탐색의 신뢰성과 효율을 높였다. 본 발표에서는 (i) 능동학습 기반 조성 후보 생성 및 실험/시뮬레이션 피드백 (ii) CALPHAD 계산 과정 (iii) 베어링 강종 개선 방향과 현재 최적화 진행 상황을 제시한다.

**Keywords:** Alloy design, Active learning, High-throughput calculation, Bayesian optimization, Bearing steels.

## 후기 (Acknowledgments)

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임.  
(2410002133, RS-2024-00430280)

---

1,#. 베추얼랩, 기업부설연구소, 이사, ykkim11@simulation.re.kr

2. 베추얼랩, 경영, 대표이사

## DSC 분석을 통한 Al-Mg-Si계 합금 UCA 소재의 T6 열처리 조건에 따른 열-강도 특성평가

이종석<sup>1</sup>, 장광순<sup>1</sup>, 오재영<sup>1</sup>, 김새한<sup>1</sup>, 이선호<sup>1#</sup>

### DSC-Based Evaluation of Thermal and Strength Properties of Al-Mg-Si UCA Alloy under T6 Heat Treatment

J. S. Lee<sup>1</sup>, K. S. Jang<sup>1</sup>, J. Y. Oh<sup>1</sup>, S. H. Kim<sup>1</sup>, S. H. Lee<sup>1#</sup>,

#### Abstract

Al-Mg-Si계 A6082 합금은 경량화와 스크랩 재활용 측면에서 친환경적이며 우수한 기계적 특성을 갖추어 모빌리티 부품 소재로 각광받고 있다. A6082 합금의 강도 향상은 주로  $\beta''$  상 석출에 의해 달성되며, 이를 위해 T6 열처리가 필수적이나 공정 시간이 길다는 한계가 있다. 본 연구에서는 열처리 시간을 단축하기 위해 용체화 온도와 시간을 최적화하고자 하였다. 550-570°C에서 수 시간 용체화 처리 후 180-200°C에서 수 시간 인공시효를 수행하였으며, 인장시험과 DSC 분석을 통해 열처리 조건과 기계적 성능 간의 상관관계를 규명하였다. 그 결과, 560°C 용체화 조건에서 항복강도 381.4 MPa, 인장강도 404.5 MPa로 가장 우수한 기계적 특성을 확보하였다. DSC 분석에서는 용체화 온도와 시간이 증가할수록  $\beta''$  상의 석출 온도가 상승하고 시효 시간이 단축되었으며, 이는 고용도 증가에 따른 석출 반응 활성화와 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 반면, 570°C 조건에서는 부분 용융과 편석으로 인해 기계적 특성이 저하되었다. 본 연구는 열처리 공정 최적화를 통해 고강도·고효율 제조공정의 산업적 적용 가능성을 제시하고자 하였다.

**Keywords:** Aluminum forging, Heat treatment, Thermal analysis, Differential scanning calorimetry, Strength

#### Acknowledgements

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(제도부경도 600Hv, 경량화율 10% 이상 이종소재 치형 휠베어링 개발, 2410002393, RS-2024-00430258, 산업통상자원부)

---

1. 일진글로벌 선행재료연구팀, 책임연구원, leejongseok1@iljin.com

#. 일진글로벌 선행재료연구팀, 책임연구원, lsh0429@iljin.com

## 베어링 강의 고주파 열처리에 의한 결정립 미세화와 기계적 성능 향상

홍성준<sup>1,2</sup>· 신우철<sup>1</sup>· 송수민<sup>1</sup>· 김태범<sup>3</sup>· 이동근<sup>4</sup>· 조균택<sup>#</sup>

### Grain Refinement and Mechanical Properties Improvement through High-Frequency Heating of Bearing Steel

S. J. Hong, W. C. Shin, S. M. Song, T. B. Kim, D. G. Lee, K. T. Cho

#### Abstract

휠 베어링은 볼이 직접 맞닿는 부위로 고하중과 반복 구름 접촉 환경에 지속적으로 노출되기 때문에 내구성 향상을 위해 결정립 미세화와 국부 가열을 특징으로 하는 고주파 열처리가 적용된다. 본 연구에서는 가열 전력과 시간을 달리하여 오스테나이트 결정립 크기를 제어하고, 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하고자 하였다.

열처리 후 경화부에서는 마르텐사이트, 비경화부에서는 페라이트-필라이트 조직이 관찰되었다. 조건 별 경화부 측정 결과, 경도 차이는 미미하였으나, 가열 전력 및 시간이 증가함에 따라 유효 경화 깊이가 증가하는 것으로 관찰되었다. 오스테나이트 결정립 크기의 경우 전력이 증가함에 따라 큰 변화가 보이지 않았으나, 시간이 증가함에 따라 결정립의 뚜렷한 미세화가 관찰되었다. 이러한 결정립 성장 억제는 미세 석출물에 의한 피닝 효과에 기인한 것으로 예상되며, 열처리 조건의 최적화만으로도 결정립 크기 제어와 기계적 특성 향상이 증가함을 보여주었다. 회전급힘피로(RBF)시험 결과, 시편의 결정립이 미세할수록, 또한 유효 경화 깊이가 충분할수록 피로강도가 뚜렷하게 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 고주파 열처리 조건 별 미세조직-기계적 특성 간의 상관관계 데이터베이스(DB)를 구축하였으며, 향후 코일-시편 간 거리, 냉각 조건 등 다양한 공정 변수까지 확장하여 보다 정밀한 결정립 제어 기술을 확립할 계획이다.

**Keywords:** Bearing Steel, High-Frequency Heating, Microstructure, Prior Austenite Grain Size(P.A.G.S), Mechanical Properties

### 후기 (Acknowledgments)

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (치형 베어링용 0.7 tCO<sub>2</sub>eq/ton 이하 및 900MPa 이상 고청정·고강도 소재 개발, 2410009670, 00430280, 산업통상자원부)

---

1. 한국생산기술연구원, 연구원
2. 국립순천대학교, 대학원생
3. 한국생산기술연구원 주문형생산연구부문, 수석연구원
4. 국립순천대학교, 교수

# 한국생산기술연구원 목적기반모델리티그룹, 수석연구원, E-mail: joecho@kitech.re.kr

## 치형 휠베어링 개발을 위한 표면 경화용 유도가열 시뮬레이션 기술 개발

문인용<sup>1</sup>· 정경환<sup>1</sup>· 김건희<sup>1</sup>· 이승표<sup>2</sup>· 송영환<sup>#</sup>

### Development of Induction Heating Simulation Technology for Surface Hardening in Gear-Tooth Wheel Bearings

I. Y. Moon, K. -H. Jung, G. -H. Kim, S. Lee, YH. Song

#### Abstract

To improve the efficiency and durability of EV drive systems, ensuring sufficient surface hardness and enhancing fatigue life of the bearing raceway are essential. For this purpose, induction heating, which enables localized and precise heating, has been widely adopted. However, when the geometry of the heat-treated component changes, it is necessary to redefine the optimal induction heating conditions, including coil geometry, distance between coil and workpiece etc. Such tasks have generally relied on repetitive, experience-based work by operators, posing limitations in process optimization. To address this issue, this study developed a simulation-based approach to analyze the physical behavior of induction heating processes and proposed a methodology to derive optimal heating conditions in advance. The commercial software SIMHEAT (TRANSVALOR) was employed to perform three-dimensional finite element electromagnetic-thermal coupled analyses, enabling the calculation of flux distribution, induced current density, and temperature distribution during induction heating. Simulations were carried out under various coil geometries and electrical conditions. The resulting surface temperature distributions of the raceway were analyzed to assess their impact on heating uniformity. The proposed simulation-based analysis framework can serve as an effective tool for determining optimal induction heating conditions prior to actual process application. Furthermore, it is expected to contribute to the advancement of heat treatment process design and quality control technologies for precision EV components.

**Keywords:** Induction heating, Simulation, FEM, Bearing, surface hardening

---

1. 한국생산기술연구원, 수석연구원

2. 일진글로벌 기술연구소, 이사

# 한국생산기술연구원, 기능성소재부품그룹, 수석연구원, E-mail: yhsong0105@kitech.re.kr

# 자동차 구조용 이종 소재 전기 보조 압력 점접합 연구

추수현<sup>1</sup>· 판반콩<sup>1</sup>· 이창주<sup>2</sup>· 남기석<sup>3</sup>· 홍성태<sup>#</sup>

## Electrically Assisted Pressure Joining of dissimilar materials for automotive structures in Spot Configuration

S. H. Choo, V. C. Phan, J. W. Do, C. J. Lee, K. S. Nam, and S. T. Hong

### Abstract

Spot joining of dissimilar materials, SGACUD steel (0.7 mm thickness) and 6451 aluminum alloy (2 mm thickness), is achieved in solid-state by electrically assisted pressure joining (EAPJ). During joining, continuous compressive plastic deformation is applied simultaneously with the discontinuous application of electric current. For the discontinuous application of electric current, the main current is initially applied to reach the joining temperature (below the melting points of materials) during a few seconds. Subsequently, shorter current pulses are periodically applied to maintain the elevated temperature until the completion of the compressive deformation. Through the compressive deformation and effects (thermal and athermal) of electric current, the two dissimilar sheets are successfully joined in solid-state by diffusion. Tensile lap shear tests confirm the satisfactory structural integrity of the joint, characterized by a nugget pull-out failure. Microstructural analysis reveals that the joining at the steel/aluminum interface occurred via Al-Fe-Zn interdiffusion, while no macro-defects are observed. The experimental results confirm the feasibility of EAPJ to fabricate a sound solid-state joint of the given dissimilar material combination in spot configuration.

**Keywords:** Electrically Assisted Pressure Joining, Spot Joining, solid-state, SGACUD steel, AA6451

### Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (Development of a tooth-type wheel bearing with a raceway hardness of 600Hv and a weight reduction ratio of over 10%, RS-2024-00430258) funded by the Ministry of Trade, Industry, & Energy (MOTIE, Korea).

---

1. 울산대학교 기계공학부, 대학원생
2. 현대자동차 제조SI기술개발3팀, 매니저
3. 현대자동차 차체재료개발팀, 연구원

# 울산대학교, 기계공학부, 교수, sthong@ulsan.ac.kr

## 전기차용 휠베어링 허브 성형공정해석

유경두<sup>1</sup> · 박두현<sup>1</sup> · 안정호<sup>2</sup> · 이인하<sup>3</sup> · 송정한<sup>#</sup>

### Simulation of the Forming Process of an EV Wheel Bearing Hub

G. D. Yu, D. H. Park, J. H An, I. H Lee and J. H. Song

#### Abstract

전기차용 휠베어링 허브는 차량 구동계에서 바퀴와 차체를 연결하며 하중을 지지하고 동력을 전달하는 핵심 부품으로, 전기차의 주행 안정성과 에너지 효율 확보에 중요한 역할을 한다. 특히 전기차는 배터리 무게 증가와 모터 출력 향상으로 인해 기존 내연기관 차량보다 더 큰 하중과 열 조건에 노출되며 이에 따라 허브는 고강도 고정밀의 제조 기술을 필요로 한다. 허브는 가열, 성형, 절삭, 열처리 등 복잡한 단조 및 가공 공정을 거쳐 제작되며, 각 단계에서 발생하는 변형, 잔류응력, 치수 변화는 제품 성능과 수명에 직결된다. 이러한 공정 변동 요소를 정확히 파악하고 제어하기 위해서는 실제 공정을 모사할 수 있는 해석 기법과 신뢰성 있는 소재 물성이 필수적이다.

본 연구에서는 전기차용 휠베어링 허브의 오비탈 포밍 공정을 대상으로 유한요소해석을 수행하여 성형 거동과 공정 적합성을 검토하였다. 해석 모델은 허브와 내륜, 공구로 구성되어 있으며 실제 공정 조건을 반영하기 위해 온도 물성과 이동경화모델을 적용하였다. 또한 해석 결과와 실험 데이터의 비교를 통해 모델의 정합성을 확보하였다. 이를 통해 소재 물성, 공정속도, 경계조건 등 주요 변수들이 성형 하중과 최종 형상에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 제시한 해석 방법론은 전기차용 휠베어링 허브의 제조 공정을 최적화하는데 기여 할 수 있으며, 제품의 신뢰성과 제조 효율성 향상에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

**Keywords:** Wheel Bearings, Orbital Forming Simulation, Finite Element Analysis, ABAQUS

#### 후기(Acknowledgments)

본 논문은 케도부경도 600Hv, 경량화율 10% 이상 이종소재 치형 휠베어링 개발(산업통상자원부, RS-2024-00430258)의 지원으로 수행된 결과임

1. 한국생산기술연구원 지능화 뿌리기술연구소, 연구원

2. 일진글로벌 기술연구소, 책임연구원

3. 일진글로벌 기술연구소, 이사

# 한국생산기술연구원, 지능화 뿌리기술연구소, 수석연구원, E-mail: jhsong@kitech.re.kr

## 복합단조 공정에서의 이종소재(AL-STEEL) 프리폼 형상 최적 설계 및 공정해석 기법

장창순<sup>1#</sup>· 곽호택<sup>2</sup>

### Optimal design of preforming and process analysis techniques for multi-material(AL-STEEL) in composite forging processes

C. S. Jang, H. T. Kwak

#### Abstract

최근 자동차용 부품의 고강도화와 경량화를 위해 알루미늄과 스틸 인서트를 결합한 이종소재 복합단조품이 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 물리적·기계적 특성이 상이한 이종소재 특성 상 복합단조에서는 하중 분포 불균형, 접합부 결함, 성형성 저하 등의 문제가 발생하기 쉽고, 단일 공정으로 성형할 경우 성형 하중 증가 및 충진 불량이 발생하기 쉽다. 따라서 알루미늄 소재에 대한 적절한 프리폼 성형이 필수적이며, 이는 소재 유동 경로를 제어하여 스틸과의 접합성을 확보하고 성형 하중을 감소시켜 단조 설비의 부하를 줄이는 역할을 한다.

본 연구에서는 QForm Direct를 활용하여 이종소재(AL-STEEL) 복합단조품의 알루미늄에 대하여 소재 유동을 고려하여 최적 프리폼 형상 후보를 자동으로 설계하였다. 이후 이종소재 복합단조 공정해석을 통해 성형 시 최대 하중, 미성형 영역, 알루미늄-스틸 간 접촉 영역을 분석하여 성형성 및 접합성을 평가하였다.

그 결과, 이종소재(AL-STEEL) 복합단조품의 프리폼 형상 설계 절차와 함께 성형성과 품질 확보를 위한 해석 기반의 접근 방식을 제시하였다.

**Keywords:** Multi-material, Composite forging, Preforming, Process analysis, FEA

#### Acknowledgement

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(제도부경도 600Hv, 경량화율 10% 이상 이종소재 치형 휠베어링 개발, 2410009671, 00430258, 산업통상자원부)

1. (주)씨에이이테크놀러지 기술자문1팀, 책임연구원

2. (주)씨에이이테크놀러지, 대표이사

# 교신저자의 소속, 부서, 직위, E-mail: (주)씨에이이테크놀러지

기술자문1팀, 책임연구원, csjang@caetech.co.kr

# 이종 소재(AL-STEEL) 결함 검출 정확도 향상을 위한 AI 샘플링 데이터 증강에 관한 연구

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

## Research on AI Sampling Data augmentation to improve the accuracy of AL-Steel defect detection

Jingu Kim, Gwangyu Lee, Hotaek Kwak

### Abstract

이종 소재(AL-STEEL) 단조 공정에서는 공정 조건에 따라 미성형 결함이 발생할 수 있으며, 실제 결함 데이터의 부족과 불균형은 딥러닝 기반 비전 검출 성능을 제한한다. 본 연구는 이러한 한계를 해소하기 위해 AI 기반 샘플링 데이터 증강 파이프라인을 제안한다. 파이프라인은 (1) 공정·형상 제약을 반영한 ROI 기반 결함 발생 영역 정의, (2) 실제 샘플로부터 형태·텍스처 특징을 추출한 결함 표현 라이브러리 구축, (3) ROI 내 경계 일관성 보정(Poisson blending)과 탄성 변형을 이용한 영역 합성으로 미성형 패턴을 생성, (4) 품질 평가 및 종합 품질 점수(Composite Quality Score, CQS) 산출로 구성된다. CQS는 SSIM(구조 일관성), 텍스처 유사도, 대비·가시성 지표(육안 구분성), FID(분포 유사성)를 정규화 후 가중 평균한 지표로 정의하였다. 평가 결과, 1006개 합성 샘플에서 CQS 평균 0.814, SSIM 평균 0.998, FID 8.215를 기록하여 실제 데이터에 대한 구조·분포 유사성이 확인되었다. 본 연구는 (i) 단조 공정 제약을 반영한 현실성 있는 합성 절차, (ii) 정량적 다중 지표에 기반한 품질 보증, (iii) 확장 가능한 자동화 증강 흐름을 제시하여, AL-Steel 미성형 결함 데이터 부족 문제의 실무적 해결 가능성을 보여준다.

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(제도부경도 600Hv, 경량화율 10% 이상 이종소재 치형 훈베어링 개발, 2410009671, 00430258, 산업통상자원부)

**Keywords:** AL-STEEL, defect detection, data augmentation, synthetic data, computer vision

1. (주)씨에이이테크놀러지, 책임연구원

2. (주)씨에이이테크놀러지, 연구원

3. (주)씨에이이테크놀러지, 대표이사

# 교신저자 E-mail: jgkim@caetech.co.kr

# 치형 베어링용 0.7 tCO<sub>2</sub>eq/ton 이하 및 900MPa 이상 고강정 · 고강도 소재 개발

이기원<sup>1</sup>, 최우성<sup>2</sup>, 주승호<sup>3</sup>

## Development of high-purity, high-strength materials for External spline wheel hub with emissions of 0.7 tCO<sub>2</sub>eq/ton or less and pressures of 900 MPa or higher

K. W. Lee, W. S. Choi, S. H. Joo

### Abstract

최근 친환경 및 전동화 차량의 보급 확대에 따라 차체 중량이 증가하고 있으며, 이에 따라 구동계 부품인 휠 허브 베어링에 작용하는 하중이 점차 증가하는 추세이다. 휠 허브 베어링은 고속 회전과 반복 하중에 노출되기 때문에 내면압 강도 및 구름 접촉 피로 특성이 우수해야 하며, 이를 위해 일반적으로 SM55C 계 탄소강이 사용된다.

해당 강종은 열간단조 후 고주파 열처리를 통해 표면을 경화시켜 내마모성을 향상시키고, 베어링 수명을 증가시키는 공정이 적용된다. 그러나 고주파 열처리 시 과도한 승온 온도 및 유지 시간은 오스테나이트 결정립의 비정상 조대화를 유발할 수 있으며, 이는 냉각 후 치수 불균형, 강도 편차, 조직 불균질성 등을 초래하여 베어링 정렬성 및 진원도 저하, 가공량 증가 등의 공업적 문제로 이어진다.

기존에는 결정립 미세화를 위해 바나듐(V) 미량 첨가가 효과적으로 활용되어 왔으나, 최근 전 세계적으로 바나듐이 배터리 소재로 주목받으면서 가격이 급등하고 있으며, 안정적인 공급이 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 바나듐을 대체할 수 있는 원소로 나이오븀(Nb)을 도입하고, Nb의 결정립 미세화 효과 및 고주파 열처리 시 조직 안정성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, Nb의 상대적으로 낮은 강화 효과를 보완하고자 탄소(C), 망간(Mn) 등의 경화능 합금 원소를 조절하여 고강도화를 동시에 달성하고자 하였다.

실험은 다양한 Nb 함량을 갖는 SM55C 계 개발강에 대해 고주파 열처리를 수행하고 경화층 깊이, 경도 분포, 오스테나이트 결정립 크기 및 균질성, 인장강도 등을 정량적으로 분석 예정이며, 그 예상되는 결과로, Nb 첨가는 오스테나이트 결정립 성장 억제에 효과적이었으며, 경화층의 치수 정밀도 및 강도 균일성 향상에 기여함을 확인 예정이다. 또한, 경화 후 실시한 반복 피로 시험 결과에서도 기존 바나듐계 강재와 동등하거나 우수한 피로 수명을 확보할 수 있음을 입증 하려고 한다.

본 연구는 바나듐의 가격 및 공급 리스크에 대응할 수 있는 Nb 기반 미세립 강재 개발의

실현 가능성을 제시함과 동시에, 고주파 열처리 최적화를 통해 고수명 휠 허브 베어링 소재로의 적용 가능성을 확보할 예정이며, 이를 통해 향후 전동화 차량에 대응 가능한 고기능성 베어링 소재 기술 개발의 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Grain Refinement, High Strength, High Cleanliness

---

1. 세아베스틸 제품연구센터, 선임연구원
2. 세아베스틸 제품연구센터, 그룹장
3. 세아베스틸 제품연구센터, 연구원

## 단조 설비 과부하 방지를 위한 적정 스트로크 예측

장보영<sup>1</sup>· 이인하<sup>2</sup>· 안정호<sup>3</sup>

### Predicting the appropriate stroke to prevent overloading of forging equipment

B. Y. Jang, I. H. Lee, J. H. Ahn

#### ABSTRACT

자동차용 휠 베어링은 차량의 무게를 지지하고 회전을 전달해주는 중요한 부품이다. 휠 베어링의 핵심 부품 중 하나인 허브를 제조하기 위해 필요한 기초 기반 기술은 단조 기술이다. 크랭크 프레스의 경우, RAM의 이동거리(스트로크)가 일정하기에 이를 반영하여 제품의 완전 성형이 가능한 금형을 제작한다. 그러나 단조 공정에서 투입 소재의 중량 편차에 따라 제품 결함이 발생할 수 있다. 최대 중량에 맞는 단조 조건에서는 미성형 결함이 발생할 수 있으며, 최소 중량에 맞는 단조 조건에서는 과성형하중이 가해질 수 있다. 실제 조건에서는 미성형 결함 방지를 위하여 초과하중이 발생하는 조건으로 생산하며, 이는 단조 설비 및 부품의 수명에 악영향을 미친다. 이를 방지하기 위하여 발생하는 초과하중의 양을 최소화하는 최적의 단조 조건을 도출하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 소재 투입량 편차에 따른 단조 해석을 수행하였다. 단조 해석에는 상용소프트웨어인 Q-form을 사용하였다. 해석 결과로부터 소재 투입량 범위에 따른 미성형 여부 및 단조 하중을 확인하여 최적의 스트로크 범위를 검토하였다. 그리고 실제 단조 공정에서 발생하는 하중과의 비교를 통해 해석의 신뢰성을 검증하였다.

**Keywords:** Crank Press, Stroke, Forging defects, Prevent overloading,

#### 후기 (Acknowledgments)

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(궤도부경도 600Hv, 경량화율 10% 이상 이종소재 치형 휠베어링 개발, 2410009671, 00430258, 산업통상자원부)

---

1. 일진글로벌 기술연구소 CAE팀, 책임연구원,  
Jangboyoung@ilji.com
2. 일진글로벌 기술연구소 CAE팀, 이사대우
3. 일진글로벌 기술연구소 CAE팀, 책임연구원

## 19. 일반 구두 발표

압출 및 인발

소재응용

( 제 7 발표회장 )

# 냉간 단조용 선재의 윤활피막 품질 평가

주호선<sup>1,#</sup>· 박성수<sup>1</sup>· 이기호<sup>1</sup>

## Evaluation of the Quality of Lubricant Coating for CHQ Wire

H. S. Joo, S. S. Park, K. H. Rhee

### Abstract

냉간 단조용(Cold Heading Quality, CHQ) 선재는 볼트, 너트 등 다양한 파스너 제조에 필수적인 재료로, 제품의 신뢰성과 내구성을 보장하기 위해 표면 품질에 관한 기준이 매우 엄격하게 적용된다. 특히, 선재 표면에 도포되는 인산염 기반의 윤활 피막은 성형 공정에서 금형과의 마찰을 현저히 감소시켜 성형 하중을 낮추고, 소착(adhesion) 현상을 예방하는 중요한 역할을 수행한다. 이러한 이유로 윤활 피막의 품질은 최종 제품의 품질에 직접적인 영향을 미치며, 그 평가 결과에 대한 높은 신뢰성과 객관성이 요구된다.

기존의 평가법은 화학적 용해를 통한 중량 측정이나 바우덴 평가법 등으로 진행되어, 평가 결과의 객관성과 재현성 확보에 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 현장에서 고가의 분석 장비 없이도 적용 가능한 간편한 화학적 평가법을 개발함으로써, 피막 불량 여부를 신속히 가시화하고 인산염 피막의 부착 품질을 예측할 수 있는 기술을 제안한다.

제안된 평가법은 황산 첨가량 및 용액 조건을 최적화하여, 인산염 피막의 반응 특성을 정밀하게 분석하는 데 중점을 두었다. 실험 결과, 황산 농도 조절에 따라 모재의 표면 색상 변화와 Cu 석출 현상이 명확하게 나타났으며, 이는 피막 미부착 부위를 효과적으로 검출하는 데 기여하였다. 또한, 기준의 금속비누 박리 시험 및 염수 부식 시험과 비교하여, 단순한 화학 반응을 이용한 평가는 피막 커버리지와 불량 특성의 상관관계를 보다 명확하게 규명할 수 있음을 확인하였다.

**Keywords:** Cold forging , Phosphate Coating , Reciprocating friction , Chemical evaluation , Defect detection

---

1. 포스코 철강솔루션연구소, 수석연구원

# 포스코 철강솔루션연구소, 수석연구원, E-mail: hsjoo@posco.com

# 딥러닝 모델을 이용한 동복알루미늄 선재의 전기전도도 예측

김현준<sup>1</sup> · 강성훈<sup>1</sup> · 윤준석<sup>1</sup> · 김세종<sup>1</sup> · 오영석<sup>#</sup>

## Deep Learning model for electrical conductivity Prediction in Copper-Clad Aluminum wires

**Hyeon-Jun Kim, Seong-Hoon Kang, Junseok Yoon, Se-Jung Kim, Young-Seok Oh**

### Abstract

In copper-clad aluminum wires (CCAWs), intermetallic compounds (IMCs) are formed at the Cu–Al interface during heat treatment. It is well known that these IMCs critically effect on electrical conductivity. To examine this relationship, CCAWs were heat-treated under five different temperatures and five different holding times. For each heat treatment condition, the cross-sections of CCAW wires were examined using scanning electron microscopy (SEM), and their electrical conductivity was measured using the four-point probe method. The relationship between IMC thickness and conductivity was analyzed. These SEM images were employed as training data for a generative model that takes heat treatment conditions as inputs to generate interfacial IMC images. In addition, the same images, together with the corresponding electrical conductivity values, were used to train a CNN-based prediction model. The conductivity values predicted by the model were highly consistent with the experimentally measured values from the training data.

**Keywords:** Copper-Clad Aluminum Wires (CCAWs), Intermetallic Compounds (IMCs), Electrical Conductivity, Deep Learning, Image Generative Model, CNN-based Prediction

## 유한요소해석을 이용한 Hastelloy C22 무계목관 열간 압출 공정 설계

김상현<sup>1</sup>· 윤은유<sup>1</sup>· 이영선<sup>1</sup>· 우영윤<sup>1, #</sup>

### Design of Hot Extrusion Process for Hastelloy C22 Seamless Tubes Using Finite Element Analysis

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

최근 에너지 수요 산업의 고도화에 따라 극한 환경에서도 내성이 우수한 니켈 합금 소재에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히, 반도체 제조 공정에서 가스관에 적용되는 스테인레스제 소재가 한계에 이르면서 대안으로 Ni-Cr-Mo계 합금(Hastelloy)이 주목받고 있다. 무계목관은 용접 결합이나 열영향부와 같은 구조적 결함이 발생할 수 있는 부분이 없어 제품 신뢰성이 높으며, 열간 압출을 통해 제조가 가능하다. 그러나 Hastelloy 소재는 고온에서 높은 변형 저항과 낮은 열전도로 인해, 대변형을 요구하는 압출 공정에서 소성 유동 특성 저하 문제가 발생하여 제품의 크랙 발생, 형상 불량으로 이어져 이를 보완할 수 있는 공정 설계가 필수적이다. 본 연구에서는 Hastelloy C22 무계목관 열간 압출 공정을 유한요소해석을 통해 모사하였다. 특히 압출 성형 공정에 주요 공정 변수인 금형 각도, 입구 반경, 출구 반경에 따른 공정 하중, 변형률 및 온도 분포, 그리고 제품 손상 가능성을 비교, 분석하였다. 이를 통해 열간 압출 공정의 최적 조건을 도출하여 Hastelloy C22 소재의 열간 압출 성형 안정성 향상 방안을 제시하였다.

**Keywords:** Finite element analysis, Hastelloy C22, Hot extrusion, Seamless tube, Die geometry

---

1. 한국재료연구원

# 교신저자: 한국재료연구원, 선임연구원 Email: yywoo@kims.re.kr

# 동복알루미늄 선재 이미지의 금속간 화합물 분석을 위한 군집화 알고리즘 적용 연구

오민기<sup>1</sup>· 김현준<sup>1</sup>· 윤준석<sup>1</sup>· 오영석<sup>1</sup>· 강성훈<sup>1, #</sup>

## Study of Clustering Algorithms Applied to Intermetallic Compound Analysis in Copper Clad Aluminum Wire Images

Mingi Oh, Hyeon-Jun Kim, Junseok Yoon, Young-Seok Oh, Seong-Hoon Kang

### Abstract

동복알루미늄 (Copper-Clad Aluminum, CCA) 선재는 알루미늄 소재의 환봉을 구리 피복으로 감싼 뒤에 인발 공정을 반복하여 선재 형태로 만든 뒤에 열처리한 것으로 특히 경량화 측면에서 이점이 있는 선재이다. 동복알루미늄 선재 제조 시 열처리에 의해 구리와 알루미늄 사이 계면에는 금속간 화합물이 생성되는데, 해당 화합물은 초기 소재인 구리와 알루미늄과는 기계적, 전기적 특성이 다르기 때문에, 선재 단면 상에서 생성되는 화합물의 종류와, 차지하는 면적은 선재의 전기적, 기계적 품질에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다.

따라서 본 연구에서는 군집화 알고리즘을 이용해 동복알루미늄 선재 단면 이미지로부터 구리, 알루미늄 그리고 금속간 화합물을 구분하고, 단면 이미지에서 각 상의 면적을 측정하는 정량 분석 방법을 제안한다. 분석 대상 데이터로는 주사전자현미경 이미지가 사용되었으며, 해당 이미지에 군집화 알고리즘인 K-Means, GMM (Gaussian Mixture Model), Ward를 이용하여 군집화를 수행했다. 이후 사람이 직접 분할한 영역과, 알고리즘이 분할한 영역이 얼마나 겹치는지를 비교하여 각 알고리즘의 성능을 정량적으로 비교하였다. 본 연구에서 제안되는 군집화 알고리즘 기반의 분석을 통해 동복알루미늄 선재의 물성에 영향을 미치는 금속간 화합물의 종류 및 면적에 관한 분석을 수행할 수 있었다.

**Keywords:** CCA (Copper-Clad Aluminum) wire, Computer vision, Clustering algorithm, Mechanical properties

---

1. 한국재료연구원, 재료공정연구본부

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

## 코발트계 고엔트로피 합금의 변형쌍정 형성 연구

김정한<sup>1</sup>, M. Aghaahmadi<sup>1</sup>, 강주희<sup>2</sup>

### Abstract

The microstructural evolution of a Co-based high-entropy alloy (HEA) was examined using electron microscopies, confirming the prominent presence of stacking faults (SFs) and deformation twins during compression. A novel twinning mechanism involving a local fcc  $\rightarrow$  hcp transformation at the medium deformation stage was discovered, which had not been hitherto reported in HEAs. High-resolution scanning transmission electron microscopy revealed the conversion of a pre-twinned  $\varepsilon$ -martensite-like phase, featuring a local hcp structure, into a stable three-layer twin lamella through the nucleation of new SFs in between pre-existing ones. Additionally, as deformation progressed, the Niewzcias and Saada's pole mechanism of twinning was simultaneously activated, resulting in the formation of nano-twins within the HEA structure at higher deformation stages. The activation of both twinning mechanisms was analyzed by considering the concept of effective stacking fault energy, and stacking fault and twin fault probabilities, calculated through X-ray diffraction analysis at each deformation stage. Finally, the activation energy associated with dislocation-SFs and twin boundary interactions, as well as their respective influences on the strain-hardening behavior of the HEA at each deformation stage, were thoroughly investigated using thermally activated parameters obtained from cyclic stress relaxation experiments.

---

1. 국립한밭대학교 신소재공학과, 대전 34158, 대한민국

2. 웨이브센스, 김해 50969, 대한민국

# 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 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. As-fabricated DED samples revealed columnar grain growth with cellular substructures highlighting Cr/Mo enriched  $\gamma$ -ferrite cell boundaries due to elemental segregation. Deformation mechanisms were temperature-dependent: twinning and screw dislocation slip dominated at RT, while CT deformation was governed by phase interactions and martensitic variant selection, contributing to anisotropy. Furthermore, activation of TWIP and TRIP mechanisms was found to be highly dependent on crystallographic orientation, with [001]-oriented grains exhibiting a higher propensity for deformation.

**Keywords:** 316L SS, Direct energy deposition, Cryogenic deformation, Crystal plasticity, Phase transformation.

---

1. Department of Advanced Components and Materials Engineering, Sunchon National University, Suncheon, ROK.

2. Centre for Innovative Manufacturing Research, Vellore Institute of Technology, Vellore, Tamil Nadu, India

3. Graduate Institute of Ferrous and Eco Materials Technology, Pohang University of Science and Technology, Pohang, ROK

# Corresponding author: Shi-Hoon Choi, Email: shihoon@scnu.ac.kr

## 열처리와 Cu 첨가 조건이 Al-Mg-Si 합금의 기계적, 전기화학적, 석출 거동에 미치는 영향

홍현빈<sup>1</sup> · Raj Narayan Hajra<sup>1</sup> · 신은주<sup>2</sup> · 김정한<sup>1</sup> · 오용준<sup>1</sup> · 김재황<sup>3</sup> · 조훈휘<sup>1, #</sup>

### Mechanical, electrochemical, and precipitation behavior of Al-Mg-Si alloys with heat treatment and Cu addition

H. B. Hong, Raj Narayan Hajra, E. J. Shin, J. H. Kim, Y. J. Oh, 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. 한국생산기술연구원 탄소경량소재그룹

---

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

## 금속기지복합재의 미시역학적 손상 실시간 분석: 음향방출 및 중성자 회절

권종혁<sup>1</sup>· 권대서<sup>1</sup>· 김동규<sup>1#</sup>

### In situ characterization of micromechanical damage in metal matrix composite: acoustic emission and neutron diffraction

J.- H. Kwon, D.- S. Kwon, D.- K. Kim

#### Abstract

This study investigates the micromechanical damage evolution in a B<sub>4</sub>C/AA6061 particle-reinforced composite under tensile loading using in situ characterization methods, including acoustic emission (AE), neutron diffraction (NED), and scanning electron microscopy (SEM). AE waveforms were analyzed using wavelet packet transform and clustering to classify frequency-dependent events associated with matrix plasticity, interfacial decohesion, and particle fracture. Concurrent in situ NED measurements quantified phase-specific lattice strain evolution, providing insight into stress redistribution between the aluminum matrix and B<sub>4</sub>C reinforcement. Complementary in situ SEM observations revealed microstructural processes such as void initiation, interfacial debonding, and brittle particle cleavage. Cross-validation of AE, NED, and SEM results confirmed a consistent sequence of deformation and damage progression, demonstrating that AE cluster activation corresponds to NED-identified lattice strain response and SEM-observed fracture behavior. This multi-modal characterization approach provides a phase- and strain-resolved understanding of damage evolution in particle-reinforced metal matrix composite.

**Keywords:** Metal matrix composite, Micromechanical damage, In situ characterization, Acoustic emission, Neutron diffraction

---

1. 건국대학교 미래모빌리티융합전공

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

## 20. 특별세션

내식성 및 냉각성능이 향상된  
두께 50 $\mu$ m 이하급 열교환기용  
클래드재 국산화 기술개발

(주)한국클래드텍)

(제 8 발표회장)

## 열교환기용 클래드재 국산화 기술개발

김민중<sup>1</sup>· 박철민<sup>1</sup>· 이창민<sup>1</sup>

### Development of domestic production technology for cladding materials for heat exchangers

M. J. Kim, C. M. Park, C. M. Lee

#### Abstract

클래드는 도금을 제외하고, 어떤 금속을 다른 금속에서 전체 면에 걸쳐 피복하고, 또한 그 경계면이 금속 조직적으로 접합되어 있는 것을 클래드 금속이라고 한다. 클래드 금속은 단일(모재) 금속이 갖지 않는 새로운 특성을 부가하여 기능성 재료로써 사용이 많이 되고 있으며, 가공 방법에는 주로 압연, 압출, 폭착 압연 등에 의해 제조되며, 이 중에서 롤에 의한 압연 공법으로 클래딩 하는 것이 생산성이 좋아 가장 널리 알려져 있다.

본 연구에서는 해외 특정 국가 수입에 의존하고 있는 열교환기용 알루미늄 클래드 소재의 국산화를 위하여 AL-Si계(4000계) 및 AL-Mn계(3000계) 알루미늄 클래드 제조 기술에 대해서 설명하고자 한다. 압연 공법으로 생산하는 클래드재에 대해 접합과 접합 후 품질에 영향을 주는 주요 인자는 압하량, 열처리 온도, 원소재 물성, 표면 특성 등이 있으며, 위의 주요 인자를 제어하여 내식성과 냉각 성능이 향상된 열교환기용 알루미늄 클래드재를 제조하고자 한다.

**Keywords:** 클래드 금속, 알루미늄 클래드, 열교환기, 클래드 압연

---

1. (주)한국클래드텍, 기술연구소

# Al 합금 스크랩의 첨가가 열교환기용 소재 특성에 미치는 영향에 대한 연구

김선기<sup>1</sup> · 김경수<sup>1</sup> · 노미란<sup>1</sup> · 조대연<sup>2</sup> · 이상현<sup>2</sup> · 이근효<sup>2</sup> · 구승현<sup>1</sup> · 황종일<sup>#</sup>

## A Study on the Effect of Al alloy Scrap Addition on the Material Properties for Heat Exchangers

S. K. Kim, K. S. Kim, M. R. Noh, D. Y. Cho, S. H. Lee, G. H. Lee, S. H. Koo, J. I. Hwang

### Abstract

현재 세계적으로 CBAM, LCI, LCA등의 탄소 배출 관련 평가 인증 및 저감을 위한 노력이 필수적인 가운데 있으며, 이를 위해 알루미늄 합금 소재의 재활용 방안의 검토 및 재활용 공정 기술의 개발이 요구되고 있음. 특히 자동차용 냉각장치 및 관련 열교환 시스템에 사용되는 열교환기는, Al-Mn 합금 및 Al-Si계 합금 판재를 클래딩한 이후, Zn를 코팅한 열교환기 본체와, 그 외 냉매 파이프, 브라켓 등의 Al 합금 부품들이 복합적으로 결합되어 있어, 재활용 시 주조용 합금 소재 및 탈산제 등 저품위 소재로의 재활용만 가능한 상황임. 특히 클래딩 판재 및 코팅 소재등에 대한 각각의 제거 및 분류가 거의 불가능하다는 문제점이 있으며, 이러한 재활용 소재의 활용 시 용탕 성분 관리와 용탕 정련 공정 및 용탕 관리 이후의 특성 평가 등에 대한 평가 방안 및 평가 기준이 명확히 제시되고 있지 않음에 따라, 스크랩 재활용을 위한 관련 공정 기술의 개발이 필요한 상황임.

본 연구에서는 Al-Mn계 스크랩의 첨가가 열교환기용 소재 특성에 미치는 영향을 검토하고자 하였으며, 스크랩 첨가 비율을 변화하여 용해, 주조한 뒤 각각의 성분분석을 통해 합금 조성 및 특성에 미치는 영향들을 검토하였음. 이후 Al-Mn 스크랩을 40% 이상 첨가하여 열교환기용 소재를 용해, 연속주조 빌렛을 주조한 뒤 빌렛의 특성 평가를 진행하였음.

**Keywords:** Al-Mn Alloy, Aluminum Scrap, Aluminum Recycling, Alloy element,

---

1. (주)나이스엘엠에스 기술연구소

2. 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소

# 교신저자: (주)나이스엘엠에스, 기술연구소, 연구소장(이사), E-mail: jihwang@nicelms.com

# 알루미늄 스크랩 재활용 국내외 산업 및 기술이슈

김명균<sup>1</sup>· 김덕<sup>1</sup>· 하원<sup>1</sup>

## Global Industry Trends & Technology Issues of Aluminum Scrap Recycling

M. G. Kim, D. Kim, W. Ha

### Abstract

알루미늄 생산 중 발생되는 탄소배출량은 22년 기준 세계산업생산 중 발생되는  $\text{CO}_2$ 의 2~3%를 차지할 만큼 대표적인 탄소 다배출산업이다. 탄소중립은 현재 지속성장가능한 환경구현과 동시에 산업계에서 가장 큰 이슘이며, 신모빌리티 핵심요소인 전기자동차는 배터리 중량 증가와 운행 중 발열로 인해 비강도 및 고방열을 동시에 만족하는 알루미늄의 채용은 필수적이다. 즉, 알루미늄은 가볍고 강하며 우수한 전도성으로 신모빌리티용 소재 적용은 지속적으로 증가되고 있음에도 불구하고, 생산 중 탄소배출 이슈로 글로벌 기업은 저탄소 알루미늄을 제조하기 위한 기술개발 및 산업의 전환이 지속적으로 진행 중이다.

아울러 26년 1월 시행예정인 유럽연합 탄소국경조정제도(CBAM)은 대표적인 글로벌 환경관세 장벽으로 인식되는 가운데, 전 세계 알루미늄 산업에 있어 많은 변화가 진행되고 있다. 원광석에서 금속 알루미늄으로 생산되는 과정 중 많은 탄소를 배출하는 알루미나 전기분해, 제련 과정에서 필요한 에너지 전환, 즉, 기존 화력발전에서 수력, 태양열 및 풍력 등 재생에너지로의 전환과 더불어 글로벌 메이저기업은 전기분해 중 필요한 탄소전극봉을 비활성 전극으로 대체하는 기술 등 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나, 가장 현실적 접근으로 탄소배출량을 감소시키는 스크랩 재활용은 국내외 기업의 관심뿐만 아니라 비지니스측면에서 상업화수준에 이루는 등 많은 기술적 진보가 있는 게 사실이다. 본 발표에서는 알루미늄 소재를 전량 수입하는 국내 공급망 구조에서, 국내 알루미늄 기업이 글로벌 환경에 대응하면서 기술적으로 탄소 절감이 가장 효과적인 방안에 대해 논의하고, 특히 국내외 스크랩을 재활용하는 과정 중 기술적이슈 및 산업현황에 대한 내용을 소개하고자 한다. 또한, 알루미늄 스크랩 재활용과정 중 가장 큰 이슈인 정련 후 용탕품질 평가 등에 대한 사례를 소개하면서 현재 RIST에서 진행하고 있는 알루미늄 스크랩 재활용 핵심공정도 상호토론하고자 한다.

**Keywords:** Aluminum, Scrap, Recycling, Carbon Emission, CBAM

---

1. 포항산업과학연구원, 경량소재연구센터, 수석연구원, mgkim73@rist.re.kr

# 클래드용 판재 적용을 위한 스크랩 기반 Al-Mn계 합금의 주조 해석 시뮬레이션 및 특성 최적화

강 현<sup>1#\*</sup>· 김참일<sup>2</sup>

## Simulation and Optimization of Casting Behavior and Properties in Scrap-Based Al-Mn Alloys for Clad Sheet Applications

H. Kang<sup>1#\*</sup>, C. I. Kim<sup>2</sup>

### Abstract

본 연구는 클래드용 판재 적용을 목적으로 스크랩 기반 Al-Mn계 합금의 주조 거동 해석과 특성 최적화를 체계적으로 수행하였다. 조성 변화와 공정 조건을 반영한 열역학적 계산, 응고 모사, 그리고 주조 해석을 통해 스트립 캐스팅 공정에서의 응고 거동, 주조성 및 공정 원도우 최적화를 설계하였다. SEM-BSE 및 EDS 분석 결과, Mn, Fe, Zn 등 합금 원소의 변화에 따른 미세조직 형상, 정출상 분율, 그리고 결정립계 거동 차이를 확인하였으며, 이러한 미세조직 인자는 전기적·기계적 성능 향상과 밀접한 상관관계를 보였다. 압연 및 열처리 조건 최적화 결과, 전기전도도는 40% IACS 이상을 안정적으로 확보하였고, 항복강도는 125 MPa 이상으로 나타나 클래드용 판재 소재로서 요구되는 기계적 성능과 전기적 특성을 동시에 충족하였다. 또한, 3003과 1070 스크랩을 다양한 비율로 조합한 합금 설계와 공정 최적화를 통해 조성 안정성과 열처리 후 특성을 확보하였다.

본 연구는 산업계의 탄소중립 전환 가속화 및 자원순환 촉진에 대한 요구 충족과 경량소재의 대표 금속인 알루미늄 합금에 대한 수요 증가에 알루미늄 스크랩을 활용한 고품질 재생 소재 생산 기술을 확보하고자 한다.

**Keywords:** Aluminum Scrap, Strip casting simulation, aluminum cladding material, Electrical conductivity

---

1. 한국생산기술연구원, 주문형생산연구부문, 수석연구원

2. 한국생산기술연구원, 주문형생산연구부문, 박사후과정

# 한국생산기술연구원, 주문형생산연구부문, 수석연구원

E-mail: heonkang@kitech.re.kr

## 4343/3003/4343 알루미늄 클래드 판재의 브레이징 특성에 미치는 압연접합 공정의 영향

김형욱<sup>1#</sup>, 정대한<sup>2</sup>, 김원경<sup>3</sup>, 어광준<sup>4</sup>

### Effect of roll bonding process on brazing properties of 4343/3003/4343 Al clad sheets

H.W.Kim, D.H.Jeong, W.K.Kim, K.J.Euh.

#### Abstract

전기 구동 차량의 증가에 따라 에너지 효율 향상을 위한 열관리 기술의 중요성이 증대하고 있다. 이에 따라 고성능 및 고효율화를 위한 통합 열관리 기술과 열교환기의 열교환 성능이 매우 중요하다. 알루미늄 클래드 판재는 우수한 열전도도와 높은 비강도로 인하여 부품의 크기를 줄이고 열교환기의 효율을 높이는데 기여하여 자동차용 열교환기 부품의 브레이징용 소재로 널리 활용되고 있다. 한편, 부품 경량화를 위해서는 브레이징용 판재의 두께를 보다 얇게 줄이고 이에 따른 기계적 특성의 저하를 적절히 억제하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 높은 열전도와 우수한 가공성을 위해 고강도소재인 AA3003을 심재로 사용하였으며, 브레이징 접합을 위해 낮은 융점을 가진 AA4343을 피재로 사용하였다. 3층 겹침판재를 상온 또는 200°C 및 300°C로 가열하여 압연접합을 통해 4343/3003/4343 알루미늄 3층 클래드 판재를 제작하였다. 이후 제조된 시편에 대하여 200, 150, 100 $\mu\text{m}$ 로 냉간압연하였다. 이어서 시편을 열처리하고 70  $\mu\text{m}$ 로 추가 압연하고 브레이징 열처리를 진행하였다. 압연접합공정 및 최종 냉간압하량이 다른 판재와 이를 브레이징 열처리한 판재에 대하여 미세조직을 관찰하였으며, 또한, 인장시험을 행하여 기계적 물성의 변화를 관찰하였다. 이를 통해 압연접합공정 및 최종압하량 변화에 따른 알루미늄 클래드의 브레이징처리 후 기계적 특성 변화에 미세조직과의 상관관계를 대해 고찰하였다.

**Keywords:** Aluminum, clad, Roll bonding, Brazing, Microstructure

---

1. 한국재료연구원 경량재료연구본부 책임연구원 E-mail: hwkim@kims.re.kr
2. 한국재료연구원 경량재료연구본부 학생연구원(부산대학교 재료공학부 박사과정)
3. 한국재료연구원 경량재료연구본부 주임기술기원
4. 한국재료연구원 경량재료연구본부 책임연구원

# 응축기용 알루미늄 클래드재의 균질화 및 브레이징 공정 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가

신재혁<sup>1, #</sup>, 최효남<sup>2</sup>, 한범석<sup>3</sup>

## Microstructural and Mechanical Properties of Condenser Aluminum Clad Sheets under Homogenization and Brazing Process Conditions

J. H. Shin, H. N. Choi, B. S. Han

### Abstract

본 연구는 전량 수입에 의존하고 있는 열교환기용 알루미늄 클래드재의 국산화를 목표로, Al-Mn 계 박물재의 균질화 공정 조건 및 응축기용 상용 클래드재의 브레이징 거동을 분석하였다. 먼저, 열처리 온도 설정 및 상해석 시뮬레이션을 통해 박물재 중심부에 발생하는 Mn 편석을 제어할 수 있는 최적 균질화 조건을 도출하였다. 이어서, 압연 · 열처리 공정에 따른 미세조직 변화를 분석하고, 브레이징 공정 전 · 후의 기계적 특성과 내열성을 비교 · 평가하였다. 또한, 브레이징 접합부에서 형성되는 금속간화합물에 대하여 분석하였으며, 접합강도 및 미소경도 측정을 통해 취성 파괴 경향을 예측하였다. 아울러, 상용 조성 기반 클래드재의 내침식(Erosion) 특성을 분석하여 브레이징 환경에서의 내구성을 검증하였다.

본 연구 결과는 응축기용 알루미늄 클래드재의 제조 및 신뢰성 확보에 있어 공정 인자를 제시하며, 향후 스크랩 활용을 포함한 저탄소 · 고기능 클래드재 개발에 활용될 수 있을 것이다.

**Keywords:** Aluminum Clad, Heat Exchanger, Homogenization, Brazing, Microstructure

---

1. 한국자동차연구원 첨단구조소재연구센터, 책임연구원

2. 한국자동차연구원 첨단구조소재연구센터, 연구원

3. 한국자동차연구원 첨단구조소재연구센터, 연구위원

# 한국자동차연구원 첨단구조소재연구센터, 책임연구원, E-mail: jhshin@katech.re.kr

# 국산 클래드 적용 전기차 열관리 시스템 열교환기의 설계변수 영향도 분석 설계

이현석<sup>1</sup> · 배석정<sup>#</sup> · 조병선<sup>2</sup> · 권혁주<sup>3</sup>

## Analysis of the Effects of Design Parameters on Heat Exchangers for EV Thermal Management Systems Using Domestically Produced Cladding

H. S. Lee, S. J. Bae, B. S. Cho, H. J. Kwon

### Abstract

클래드는 이종 소재를 결합하여 각각의 특성을 극대화하면서 브레이징 특성, 가공성, 내식성, 내구성을 확보할 수 있기 때문에 널리 활용된다. 그러나 현재 클래드 소재는 전량 수입에 의존하고 있어, 공급망 안전성 확보 및 전략적 경제 안보 측면에서도 중요하기 때문에 국산화 개발이 활발히 진행되고 있다. 개발 클래드 소재는 차량 열관리를 위한 열교환기에 적용하여 성능을 검증하고자 하며, 본 연구에서는 열교환기 중에서도 공랭식 응축기의 성능 유지 및 향상을 위해 주요 설계변수를 도출하고, 응축기의 냉매 유로를 유한차분법(FDM, Finite Difference Method)으로 수치해석해 나가면서 응축기의 과열 증기, 포화 응축, 과냉 액체의 세 구간에 대한 열전달 계산을 수행하는 응축기 설계 프로그램을 활용하여 응축기의 해석을 진행하였다.

공랭식 응축기는 고온의 기상 냉매를 공기와 열교환하여 냉각함으로써 중온의 액상 냉매로 응축시키는 기능을 하는데, 내부는 냉매가 상변화 과정을 거치게 되는 냉매 튜브, 그리고 냉매 입구 및 출구의 탱크 등으로 구성된다. 응축기의 성능은 코어 길이, 코어 폭, 튜브 수, 전열 펀의 치수와 같은 외형적으로 보이는 형상 변수 외에도 냉매 유로 배분을 결정짓는 패스 수 및 각 패스의 튜브 수와 같이 내부에 격벽을 설치함으로써 달리할 수 있는 변수에도 큰 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 기본적으로 4-패스 모델을 설정하였으며, 성능에 영향을 미치는 설계 변수로는 튜브 수 배치, 튜브 폭, 전열 펀 피치를 고려하였다. 이 중 패스별 튜브 수 배치에 따른 성능 특성을 중점적으로 분석하였다.

튜브 수 배치는 12-12-12-11, 16-12-10-9, 20-12-8-7, 24-12-6-5의 네가지 모델로 구분하여 분석하였으며, 결과는 Fig. 1에 제시하였다. 응축기로 유입된 냉매는 과열 증기 상태로 비체적 (specific volume)이 크며, 열전달 과정 중에 응축이 진행됨에 따라 비체적이 감소하여 과냉 액

1. 한국자동차연구원 통합열관리시스템연구센터, 연구원

# 한국자동차연구원 통합열관리시스템연구센터, 수석연구원, E-mail: sjbae@katech.re.kr

2. 한온시스템(주) Cooling Module HEX 1팀, 팀장

3. (주)원진 기술연구소, 연구소장

체 상태가 될 때에는 비체적이 크게 감소하기 때문에 각 패스의 튜브 수에 따라 압력 손실이 크게 상승하고 열전달 성능이 저하될 수 있다. 튜브 수가 균일하게 배치된 모델 1(12-12-12-11)을 기준으로 첫 번째 패스의 튜브 수가 상대적으로 많은 모델 4(24-12-6-5)로 갈수록 열전달 성능이 감소하는 경향을 보였다. 반면, 모델 2(16-12-10-9)는 모델 1과 비교하여 열전달 성능은 약 0.4% 감소하였으나, 냉매측 압력 손실은 9.4%가 감소하여 가장 효과적인 튜브 배치로 확인되었다. 이는 첫 번째 패스에서는 과열도 25°C의 비체적이 큰 냉매 증기가 유입되므로 많은 튜브 수가 요구되며, 마지막 패스에서는 과냉도 5°C의 비체적이 작은 액상 냉매가 배출되므로 상대적으로 적은 튜브 수로도 충분함을 의미한다. 따라서 공랭식 응축기의 최적 튜브 수 배치는 방열량과 압력 손실을 동시에 고려하여 선정되어야 한다.

본 연구에서는 스크랩이 함유된 클래드를 적용한 열교환기의 성능 저하 가능성을 고려하여, 공랭식 응축기의 성능 개선을 위한 설계변수를 설정하고 자체 개발한 해석 프로그램을 통해 영향도 분석을 수행하였다. 향후 연구에서는 기존 및 개발 클래드를 적용한 열교환기의 성능 비교를 수행하고, 분석 결과를 반영하여 성능 개선 및 최적화 설계를 진행할 예정이다.

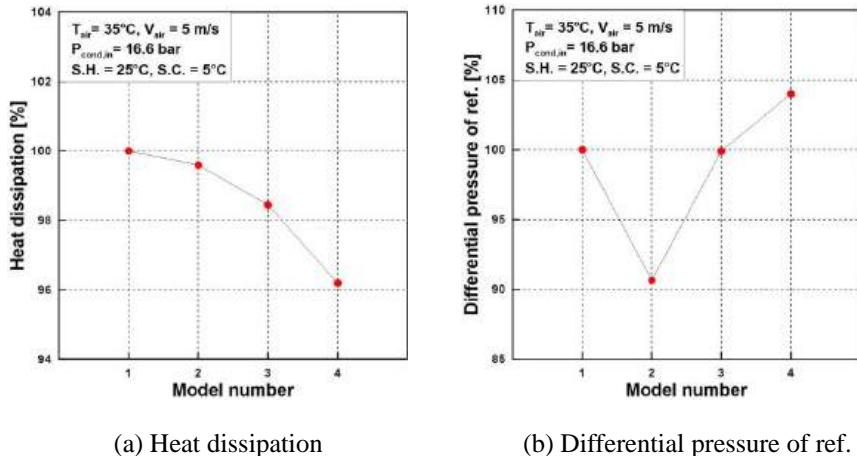


Fig.1 Performance results of the condenser according to tube arrangement

본 논문은 산업통상자원부의 지원으로 수행한 소재부품기술개발사업(내역사업명: 패키지형) 과제(연구개발 과제번호: RS-2024-00467982)의 일환으로 진행되었으며 연구를 지원하여 주신 관계 기관에 감사드립니다.

**Keywords:** Air-Cooled Condenser, Performance Analysis, Heat Dissipation, Pressure Drop, Tube Arrangement

## 21. 포스터 발표 B

B01 ~ B40

( B 동 2 층 로비 )

# 순수 타이타늄 극박판의 인장 및 압축 응력-변형률 거동 측정

김민겸<sup>1</sup> · 김경표<sup>1</sup> · 김현기<sup>2</sup> · 김지훈<sup>#</sup>

## Identification of Tensile and Compressive Stress–Strain Behavior of Ultra-thin Commercially Pure Titanium Sheets

M. G. Kim, K. P. Kim, H. K. Kim, J. H. Kim

### Abstract

극박판은 좌굴과 주름 발생으로 인해 압축 응력-변형률 곡선을 측정하기 어렵다. 본 연구에서는 인장-굽힘 시험 결과를 이용하여 인장 및 압축 응력-변형률 곡선을 측정하였다. 우선 인장 데이터와 사전 변형(0%, 4%, 8%)이 적용된 굽힘 하중-변위 데이터를 이용해 Swift 등방경화 파라미터와 Armstrong-Frederick 이동경화 파라미터를 동시에 식별하여 전반적 비대칭 경화 거동을 모델링하였다. 특히 0% 사전 변형 굽힘시험에서 압축 영역을 구분하고, 이를 이용해 압축 Swift 파라미터를 역적화하였다. 이로써 실험으로 직접 측정하기 어려운 순수 압축 응력-변형률 곡선을 도출하였다. 본 연구에서 측정된 인장-압축 비대칭성과 순수 압축 거동을 반영한 물성 모델을 이용하면 순수 타이타늄 극박판 성형 해석의 신뢰도를 높이는 데 기여할 수 있다.

**Keywords:** 극박판, 압축 물성, 역적화, 인장-압축 비대칭성

---

1. 부산대학교 기계공학부, 대학원생
2. 현대자동차 베추얼재료연구팀, 책임연구원
- #. 부산대학교 기계공학부, 교수

# Inconel 718의 고온 링 압축 시험 및 유한요소 해석을 통한 미세조직과 마찰 특성 비교 분석

여승현<sup>1,2</sup>· 안지섭<sup>1,2</sup>· 허수빈<sup>1,2</sup>· 이나경<sup>1,2</sup>· 조아라<sup>1,2</sup>· 정명식<sup>1</sup>· 황선광<sup>1,2</sup>

## Evaluation of Friction and Microstructure of Inconel 718 through Ring Compression Test and FEM Analysis

S. H. Yeo, J. S. An, S. P. Heo, N. K. Lee, A. R. Jo, M. S. Jeong, S. K. Hwang

### Abstract

Inconel 718은 우수한 고온 강도와 내산화성을 바탕으로 항공우주 및 에너지 산업의 고온 부품 제작에 널리 사용되는 대표적인 석출 강화형 초합금이다. 이러한 합금의 단조 및 압축 성형 공정에서는 마찰 조건이 소재의 유동 거동과 최종 성형 품질에 영향을 미친다. 본 연구에서는 링 압축 시험을 통해 Inconel 718의 고온 변형 시 윤활 조건에 따른 마찰 거동을 평가하고 실험 결과와 유한요소 해석 데이터를 비교하여 전단마찰계수를 도출하였다. Gleeble 3800-GTC 장비를 활용한 고온 압축시험으로부터 추출한 데이터를 해석 모델에 반영하였고, 시험 조건과 동일한 경계조건 하에 축 대칭 링 모델(DEFORM-2D)을 설계하였다. 윤활조건은 윤활제(Ni-based anti-seize compound) 도포 유무 두 가지로 설정 및 비교하였다. 실험 결과 각 내경 변화율의 차이는 원소재 대비 윤활 조건 6.87%, 무윤활 조건 17.81%로 무윤활 조건에서 더욱 큰 마찰 영향을 나타내었고, 하중-스트로크 곡선에서는 윤활 조건의 최대 하중은 109.28 kN으로 121.30 kN의 무윤활 조건에 비해 약 9.91% 낮게 나타나 윤활 조건에 의한 성형 하중 저감을 확인하였다. 또한 내경 부근을 중심으로 미세조직 분석을 수행한 결과, 윤활 조건에서는 내경 표면부와 중심부 사이의 결정립 크기 차이가 상대적으로 작고, 무윤활 조건에서는 내경 부근에서 국부 변형이 집중되어 중심부와의 결정립 크기 편차가 크게 나타났다. 이후 유한요소 해석과의 대조를 통해 전단마찰계수를 도출하였으며, 하중 데이터 및 내경 변화율 관찰로 실험과 해석 간 정합성을 확인하였다. 본 연구는 윤활 조건에 따른 마찰 거동을 실험·유한요소 해석적으로 평가하고, 미세조직 분석을 통해 국부 변형과 재결정 차이를 확인함으로써 Inconel 718 고온 단조 공정의 마찰 및 미세조직 평가 방법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords:** Inconel 718, Ring Compression Test, Lubricant, Friction, Finite Element Method, Microstructure

1. 한국생산기술연구원 대구뿌리기술지원센터

2. 부산대학교 기계공학부

# 교신저자: 한국생산기술연구원, 수석연구원, E-mail: skhwang@kitech.re.kr

## 구동모터 부품의 단조 공정 해석

김동규<sup>1</sup>, 이철환<sup>1</sup>, 임재은<sup>1</sup>, 박은수<sup>2</sup>, 강용기<sup>1#</sup>

### **FEM of the forging process of drive motor components**

**D. K. Kim, C. H. Lee, J. E. Lim, E. S. Park, Y. K. Kang**

#### **Abstract**

Currently, the global automotive parts industry is focusing on developing new materials and components that contribute to vehicle lightweighting for improved energy efficiency and enhanced driving quality. In particular, leading suppliers in the United States and Germany are expanding the application of eco-friendly drive motor shafts from conventional solid types to hollow types. In this study, a preform for manufacturing a drive motor shaft by the flow forming process was produced through hot forging. To evaluate the feasibility of the preform shape and to identify potential regions of stress concentration, hot forging analysis was carried out. Furthermore, using FEM-based hot forging simulations, potential issues in the forming process of the drive motor component were predicted, and process design was performed accordingly.

**Keywords:** Hot forging, Drive motor shaft, FEM

#### **후기**

본 연구는 중견중소기업상생형 혁신도약사업(RS-2025-02310861)으로 수행된 연구결과입니다.

---

1. 주디케이솔루션

2. 경창산업(주)

# 교신저자: 주디케이솔루션, dksolution1@naver.com

# 전기 기계식 브레이크용 일체형 Front Type Combi Drive 제작을 위한 냉간다단포머 성형공정개발 및 시제품 특성분석

김주업<sup>1#</sup> · 박희찬<sup>1</sup> · 강해동<sup>1</sup> · 윤창배<sup>2</sup> · 오상원<sup>2</sup> · 이운학<sup>2</sup> · 박휘동<sup>2</sup>

## Development of a cold multi-stage forming process and characteristic analysis of a prototype for the integrated Front Type Combi Drive for electric mechanical brakes

J.U.Kim, H.C.Pak, H.D.Kang, C.B.Yun, S.W.Oh, U.H.Lee, H.D.Pak

### Abstract

The eco-friendly next-generation electric mechanical brake system is an actuator driven by an electric motor and a brake that brakes using mechanical operating principles. It is an eco-friendly part that improves driver safety and does not generate brake oil waste due to shorter braking distances compared to existing products or methods. The problem with existing production is that the number of processes increases, defects are high during assembly, and manufacturing costs are high because sintered parts and cutting parts are combined and manufactured. To solve this problem, we are considering the production of an all-in-one Front Type Combi Drive using cold multi-stage former technology. It is intended to secure the moldability of the product through process-specific molding analysis, and to secure an improvement process by identifying the problems of the molded product through prototype characteristic evaluation.

**Keywords:** EMB(Electro Mechanical Brake), Combi Drive, Multi Stage Cold Forging, Integrated, Analysis

### Acknowledgement

본 연구는 중소기업기술혁신개발사업(중소기업기술혁신개발(시장대응형), RS-2024-00448392)으로 수행된 연구결과입니다.

---

1. 대구기계부품연구원

2. 에스제이에프(주)

# 교신저자 : 대구기계부품연구원, 선임연구원, E-mail: parkhc@dmi.re.kr

# 치 성형 냉간단조 금형의 마모수명 향상을 위한 금형 소재 마모특성 평가 및 적용

임한비<sup>1,2</sup> · 신준호<sup>2</sup> · 이성윤<sup>3</sup> · 이상곤<sup>3</sup> · 이인규<sup>#</sup>

## Evaluation and Adaptation of Die Material Wear Properties to Improve Wear Life in Cold Forging for Tooth Profile Forming

H. B. Im, J. H. Shin, S. Y. Lee, S. K. Lee, I. K. Lee

### Abstract

최근 환경 관련 문제에 대응하기 위해 변속기의 경량화와 기계적 에너지 손실을 최소화할 수 있는 DCT(Dual Clutch Transmission)의 수요가 증가하고 있다. 그러나 DCT의 동력전달 부품인 기어 제조 공정 중 냉간단조 공정에서 금형의 치형부에 반복적으로 높은 하중이 가해지면서 금형 마모현상이 발생하여 제품의 생산성 저하 및 치수 정밀도 확보가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 마모시험을 통해 기어 소재(SCr420HB)와 냉간단조 금형 소재(STD11) 및 금형 후보 소재 5가지(SKH51, PM60, V4E, CALDIE, YXR3)의 상대적 마모계수를 확보하고, 이를 적용한 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)으로 금형의 정량적 마모수명을 예측하여 비교하였다. 6개 소재의 밀도와 경도를 측정하고 Pin-on-disc 시험을 통해 각각의 마모 체적량을 확보한 후 결과를 Archard 마모모델에 적용하여 마모수명 예측에 필요한 마모계수를 산출하였다. 이를 적용하여 유한요소해석을 실시한 결과 기존 소재인 STD11은 냉간 단조 1공정에서 95,238타, 냉간 단조 2공정에서 56,818타의 수명을 가질 것으로 예측되었다. 5개 후보 소재는 모두 기존 소재보다 높은 마모수명을 가질 것으로 나타났으며 특히, V4E 소재의 경우 냉간 단조 1,2공정에서 마모수명이 각 1,124,857타, 671,141타로 가장 높게 예측되었다.

**Keywords:** Cold Forging Dies, Wear Life Prediction, Finite Element Analysis

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 연구비 지원에 의한 연구임. ('P0024189')

---

1. 경북대학교 기계공학부, 대학원생
2. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 연구원
3. 한국생산기술연구원, 모빌리티부품그룹, 수석연구원

# 한국생산기술연구원, 모빌리티부품그룹, 수석연구원, E-mail: lik1025@kitech.re.kr

## 복합발전용 가스터빈 압축기용 대형 단조부품 개발

허상현<sup>1</sup>· 김남용<sup>1</sup>· 이채훈<sup>1</sup>· 윤선룡<sup>1</sup>· 권하늘<sup>1</sup>· 문지훈<sup>1</sup>· 이진모<sup>#</sup>

### Development of large forged parts for gas turbine compressors for combined cycle power generation

S. H. Heo, N. Y. Kim, C. H. Lee, S. R. Yoon, H. N. Kwon, J. H. Moon, J. M. Lee

#### Abstract

복합발전 효율을 좌우하는 가스터빈 압축기 핵심부품의 대형 단조부품은 고난도 제조기술과 높은 신뢰성이 요구된다. 본 연구는 (주)태웅 주관으로 50톤급 대형 가스터빈 압축기 소재·단조부품 개발과 Near-net shape 적용 준정형 단조부품 개발을 축으로, 국산화와 제조 경쟁력 제고를 목표로 수행하였다. 컨소시엄 기반의 소재-공정-부품 일관제조형 개발 전략을 수립하고, Near-net shape 개념을 단조공정에 적용하여 가공 공정 효율화와 제조원가 절감을 도모하였다. 연구는 ‘사업 개요 수립 → 컨소시엄 역할 분담 및 기술개발 추진 전략 정립 → 단계별 수행 실적 측정 → 사업화 전략 및 계획 수립’의 단계로 체계화하였다. 포스터에서는 과제 수행 실적과 함께 시제품 제작을 통한 공정 고도화 방향, 제조 리드타임 단축과 품질 일관성 제고를 위한 개발 로드맵, 그리고 양산 적용을 겨냥한 사업화 전략을 제시한다. 본 성과는 대형 단조부품의 국산화와 제조 경쟁력 강화를 위한 기술적 기반을 제공한다.

**Keywords:** Gas Turbine Compressor Component, Large Forging Technology, High-Cleanliness, Temper Embrittlement, Heat treatment Technology

본 연구는 「2024 소재부품기술개발사업 패키지형(RS-2024-00488236)」의 지원을 받아 수행하였습니다.

---

1. (주)태웅

# (주)태웅, 기업부설연구소, 연구소장, E-mail: jinmo.lee@taewoong.com

## 냉간성형 비구속 압출 공정에서 금형 패턴 형상 최적화 연구

이운학<sup>1</sup>· 오상원<sup>1</sup>· 박휘동<sup>1</sup>· 김주업<sup>2</sup>· 박희찬<sup>2</sup>· 윤창배<sup>#</sup>

### Optimization of Die Pattern Geometry for Uniform Flow in Unconstrained Cold Extrusion

W. H. Lee, S. W. Oh, W. D. Park, J.U.Kim, H.C.Park, C. B. Yun<sup>#</sup>

#### Abstract

본 연구는 플랜지 직경이 큰 냉간단조용 샤프트를 비구속 상태에서 냉간 압출하여 단면적을 확대하는 방법에 대해 고찰하였다. 비구속 압출 과정에서 소재 유동속도의 차이로 퍼짐량의 불균일이 발생하며, 이를 최소화하기 위해 변형속도가 큰 영역의 마찰을 증가시켜 균일한 퍼짐이 이루어지도록 하는 방법을 제안하였다. 특히, 샤프트의 변형속도가 빠른 측과 접촉하는 금형의 패턴 형상이 소재 유동 거동에 미치는 영향을 분석하여, 균일한 압출 품질 확보를 위한 최적 형상 조건을 도출하고자 하였다.

**Keywords:** Unconstrained extrusion, Cold Forging, multi-stage Cold forging, Plastic forming, Flow velocity, Die friction

---

1. 에스제이에프(주)

2. (재)대구기계부품연구원

# 에스제이에프(주), 기술연구소, 상무, E-mail: cbyun@sjfoma.com

# 한쪽면이 막힌 형태를 가지는 로터 샤프트의 일체화 성형 기술 개발에 관한 연구

박은수<sup>1</sup>#. 이성민<sup>2</sup>. 김동규<sup>3</sup>.

## Research on the development of integrated forming technology for rotor shaft with one closed end

E. S. Park, S. M. Lee, D. K. Kim

### Abstract

EV용 모터의 성능 향상을 위한 연구가 진행됨에 따라, 모터를 구성하고 있는 단위 부품들은 전통적인 기능 이외에 추가적인 기능을 수행하기도 한다. 본 연구의 대상 부품인 EV용 모터의 로터 샤프트는, 모터에서 발생한 운동에너지를 감속기로 전달하는 전통적이고 단순한 역할을 넘어, 냉각 오일을 이동, 비산 시켜, 모터 내부온도에서 발생한 열을 식히는 역할이 추가되었다. 이러한 역할을 수행하기 위해서, 형상기준, 중공형, 중실형으로 단순하게 구별되던 로터 샤프트 부품군에, 한쪽면이 막힌 형태의 로터 샤프트가 등장하게 되었다. 한쪽면이 막힌 형태의 로터 샤프트는, 기계 가공된 분할형 단위 부품을 용접한 용접 타입을 기본 모델로 개발이 진행되었다. 다만, 용접 샤프트는 용접변형 및 용접부 파손 가능성의 단점이 부각되어, 한쪽면이 막힌 형태를 가지는 일체형 로터 샤프트에 대한 필요성이 생겨났고, 이에 대한 연구가 진행중이다. 본 연구에서는, 한쪽면이 막힌 형태를 가지는 로터 샤프트 개발을 위해, 유한요소 해석법을 이용하여, 성형 공정의 성형 조건을 정립하였고, 이를 토대로, 프리폼 제작 및 유동성형을 적용한 성형 테스트를 진행하였다.

**Keywords:** EV Motor, Rotor Shaft, Flow Forming, Preform , FEM

### 후기

이 논문은 2025년도 산업통상자원부의 '중견중소기업상생형 혁신도약사업(상생혁신R&D)', '4세대 기어 일체형 경량화 로터 샤프트 및 Shrink-fit method가 적용된, 전기차 구동모터용 로터 어셈블리 제조기술 개발 및 평가' (과제번호: RS-2025-02310861)의 지원을 받아 연구되었음.

---

1. 경창산업(주), 책임연구원
2. 경북테크노파크, 책임연구원
3. 주식회사 디케이솔루션, 대표이사

# 경창산업(주), 중앙연구소, 책임연구원, E-mail: parkes@kc.co.kr

# 각형 전기차 배터리용 집전체 부품 제조 공정의 유한요소해석

박기근<sup>1</sup> · 이재성<sup>1</sup> · 장성민<sup>2</sup> · 전만수<sup>#</sup>

## Finite Element Analysis of Manufacturing Process for Current Collector in Prismatic Electric Vehicle Batteries

K. G. Park, J. S. Lee, S. M. Jang, M. S. Joun

### Abstract

In this paper, the positive current collector component (A1050-H18) used in prismatic EV batteries was analyzed through an elasto-plastic finite element simulation, and the results were compared with corresponding experimental data. The current collector serves a critical role by efficiently collecting electrons generated within the electrode and transferring them to the external circuit.

**Keywords:** Elasto-Plastic Finite Element Analysis (탄소성 유한요소해석), Current Collector (집전체), Prismatic Electric Vehicle Battery (전기차 각형 배터리)

### 1. 서론

리튬이온 전지는 양극, 음극, 전해질, 분리막, 집전체 및 케이스로 구성된다[1]. 전극의 전기적 전도성을 확보하기 위해 금속 박판 형태의 집전체(Current collector)가 사용되며, 이는 전극에서 발생한 전자를 효과적으로 수집하고 외부 회로로 전달하는 역할을 한다. 일반적으로 양극 집전체(Positive current collector)에는 전기전도성과 가공성이 우수한 알루미늄(Al)이, 음극 집전체(Negative current collector)에는 낮은 전위 영역에서도 안정성을 유지하면서 높은 전기전도성을 제공하는 구리(Cu)가 사용된다.

본 연구에서는 기존 각형 배터리의 캡 플레이트(Cap plate) 프로그래시브 공정 성형 기술 개발[2]을 기반으로, 집전체 소재 중 알루미늄을 사용하는 양극 집전체 부품의 공정 설계를 검증하기 위해 탄소성 유한요소해석을 수행하였다[3].

### 2. 양극 집전체 부품의 공정 시뮬레이션과 실험결과 비교

양극 집전체 부품에는 알루미늄 A1050-H18(두께 2.0 mm)이 사용되었다. 본 연구에서는 250 톤 기계식 프레스용으로 제작된 금형을 모델링하여 전체 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 마찰 조건은 쿨롱 마찰계수  $\mu=0.03$  을 적용하였으며, 요소 수는 최종 약 230,000 개로 제어하였다. 주요 형상부에는 자동 요소망 재생성을 적용하여 요소망을 비교적 조밀하게 생성하였다. 또한 추후 프로그래시브 설계 기준 마련을 위해 스트립(strip) 및 브릿지(bridge) 형상을 포

1. (주)태진다이텍 기술연구소

2. (주)엠에프알씨 기술연구소

# 교신저자: 경상국립대학교 기계공학부, 교수.

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

함한 해석을 진행하였다.

양극 집전체 부품의 공정은 최초 노칭(Notching)과 피어싱(Piercing), 최종 트리밍(Trimming)을 포함하여 총 8 단으로 구성되었다. 각 세부 공정은 다음과 같다.

- 1 단: 외곽부 노칭, 중심부 원형 및 사각형 피어싱, 스트립 기준 홀 피어싱
- 2 단: 외곽부 및 바닥 단차 성형(0.5mm), 하단부 사각 바닥 성형
- 3 단: 전체 외곽부 2 차 성형
- 4 단: 중심부 홀 성형, 하단부 트리밍 및 사각부 피어싱
- 5 단: 중심부 홀 피어싱, 하단 형상부 모서리 성형(C 0.2, C 0.3)
- 6 단: 하단 사각부 1 차 밴딩, 하단부 홀 피어싱 및 스트립 1 차 분리
- 7 단: 하단 사각부 2 차 밴딩
- 8 단: 최종 트리밍 스트립 전체 분리

Fig. 1 은 8 단까지 성형된 형상을 나열하고 최종 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타내었다.

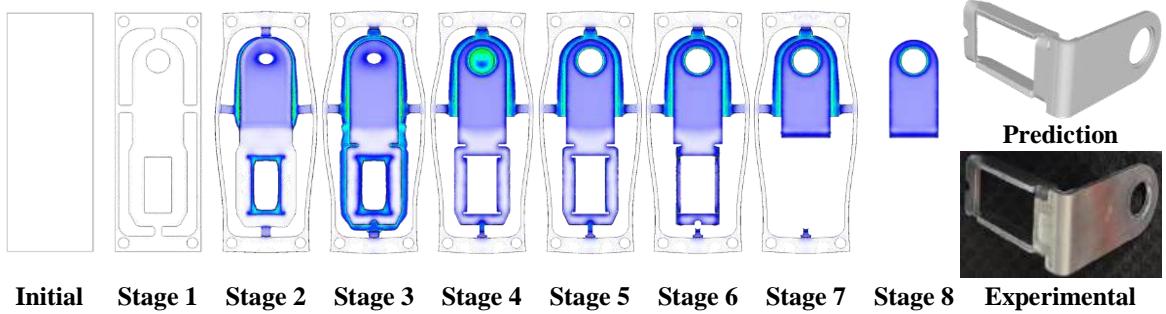


Fig. 1 Prediction of the sheet metal forming process and comparison with experimental results

### 3. 결론

전기차 배터리용 양극 집전체 부품의 성형 과정을 시뮬레이션 하고, 실제 신차 개발을 위한 프로토(Proto) 단계의 부품을 제작하여 성형 해석결과와 형상을 비교하였다. 형상 측면에서 실험 결과와 성형 해석 결과가 일치함을 확인하였다. 이는 향후 2 열(복렬) 프로그레시브 공정 설계의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 후기

이 연구는 중소벤처기업부의 중소기업기술혁신개발사업(수출지향형\_글로벌 강소기업 1,000+ 프로젝트 R&D 연계과제\_RS-2023-00276473)의 지원으로 수행됨.

### 참고문헌

- [1] J. H. Lee, J. Y. Oh, A. R. Joe, C. J. Park, C. S. Kim, 2025, Analysis of patent trends of composite current collector technology for lithium secondary batteries – Focusing on major applicants, J. Kor. Acad. Ind. Coop. Soc. Vol.26, NO.5, pp. 401~410. <http://doi.org/10.5762/KAIS.2025.26.5.401>
- [2] K. G. Park, S. M. Jang, M. S. Joun, 2023, Simulation of the Progressive Process LID Parts for an EV Battery's Prismatic Can, Autumn Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp.136~137.
- [3] W. J. Chung, M. S. Joun, 2014, Elastoplastic finite element method using three-dimensional tetrahedral MINI-element, Autumn Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp. 224~227.

# Reverse 알고리즘 기반 응력-변형률 곡선을 활용한 DP980 압연 해석 및 인공지능 기반 변형거동 예측

서위걸<sup>1</sup> · Khushahal Thool<sup>1</sup> · 최시훈<sup>#</sup>

## Reverse Algorithm-Based Stress–Strain Curve Analysis and AI Prediction of Deformation Behavior in DP980 Rolling

W. G. Seo, K. Thool, S. H. Choi

### Abstract

DP980은 폐라이트와 마르텐사이트로 이루어진 2상 강으로 각 상의 물성을 측정하기에는 쉽지 않다. 본 연구에서는 미세조직 기반한 DP980의 압연 거동 해석을 수행하였다. 각 상을 나노압입 시험으로 최대 하중  $10\mu\text{N}$ 에서 20s 동안 측정하였고, 측정된 결과를 Reverse 알고리즘을 활용하여 응력-변형률 곡선으로 변환하였다. 변환된 상별 응력-변형률 곡선을 압연 공정 해석에 적용하여 DP980의 변형 거동을 예측하는데 사용하였다. 또한, 주사전자현미경 (scanning electron microscopy, SEM)을 통해 확보한 미세조직을 반영하여 유한요소해석에 사용하였으며, 나아가 인공지능을 활용하여 미세조직 이미지를 입력하면 압연 해석 결과가 자동으로 산출되는 프레임워크를 구축하였다. 따라서 본 연구는 나노스케일 특성과 미시적 공정 해석을 예측하고, 미세조직과 물성 간 상관관계를 도출하고자 한다.

**Keywords:** Dual phase steel, AI, Microstructure, Nanoindentation, Reverse algorithm

---

1. 국립순천대학교

## 적층제조 다상조직강의 압연 공정에 따른 미세조직 분화 및 기계적 특성 분포 분석

강민성<sup>1</sup>· 김대현<sup>1</sup>· 한성희<sup>1</sup>· 김보규<sup>1</sup>· 서태현<sup>1</sup>· 신승우<sup>1</sup>· 윤수빈<sup>1</sup>· 장지훈<sup>1</sup>· 이류경<sup>1</sup>  
김재우<sup>2</sup>· 최인석<sup>2</sup>· 조유연<sup>3</sup>· 정효태<sup>3</sup>· 신중호<sup>1, #</sup>

### Abstract

Laser Powder Bed Fusion(L-PBF) 17-4PH의 높은  $\gamma$  분율과 낮은 상안정성은 변형경로에 민감한 변형유기 마르텐사이트 변태(DIMT)를 유발한다. 따라서 열처리 의존도가 높은 기존 성능 조율을 대체 혹은 단축할 수 있는 전단 활용 비대칭 압연 기반 저에너지 후가공이 필요하다. L-PBF의 스캔 속도를 달리하여(laser power 170W, 300~1400 mm/s) 오스테나이트 분율 25% 이상의 17-4PH 스테인리스강을 제조하였으며, 1000 mm/s 시편의 경우 DIMT로 인한 높은 가공경화와 연성이 나타났다. 본 연구에서는 적층제조 다상강에서의 DIMT를 활용한 소성가공 제어 조건 규명을 위해 대칭, 비대칭, 그리고 비대칭 후 대칭 스키드 패스 조건을 비교하였다. 압연 공정 이후 XRD, EBSD, ECCI를 통해 미세조직을 분석하고, 동일 영역에서 나노압입을 수행하여 상(phase)별 경도와 탄성계수를 비교하였다. 비대칭 압연에서 FAST 면과 SLOW 면의 미세조직 차이에 따른 나노기계적 변화를 관찰했으며, 비대칭 압연 후 스키드 패스로 인한 평탄화 효과에 따른 기계적 특성 변화를 확인하였다. 본 연구는 단일 패스 체계에서 압연 공정-미세조직-기계적 특성 간 공간적 상관관계를 정량화하여, 후열처리 의존도를 낮춘 저에너지/저탄소 후가공 설계의 근거를 제공하고자 한다.

**Keywords:** DIMT, L-PBF, 17-4Ph, Rolling, Asymmetric rolling, Nanoindentation, EBSD, ECCI, XRD

---

1. 국립강릉원주대학교
2. 서울대학교
3. 솔루션소재

## 전기차용 경량 CCA 버스바 공정 최적화

진현승<sup>1</sup>· 손세한<sup>1</sup>· 안영준<sup>1</sup>· 흥준표<sup>1</sup>· 박정섭<sup>2</sup>· 강종훈<sup>#</sup>

### Process Optimization of lightweight CCA busbar for electric vehicle

H. S. Jin, S. H. Son, Y. J. An, J. P. Hong, J. S. Park, J. H. Kang

#### Abstract

버스바는 전기차 배터리 셀 간의 연결에서 전력 전송의 효율성과 안정성을 보장하는 역할을 한다. CCA를 활용한 버스바는 동 버스바보다 경량성, 원가 절감, 성형성 및 안정성이 우수하다는 장점이 있다. 본 연구의 목적은 CCA의 다단계 인발 시뮬레이션 데이터를 기반으로 심층 신경망(DNN)을 활용하여 다단계 인발 공정 파라미터를 분석 및 최적화하는 것이다. 인발 시 가장 주요한 공정 변수는 단면감소율과, 금형의 각도이다. 총 4차의 다단 인발을 두공정으로 나누어 단면 감소율 비 (5:5, 4:6, 6:4)로 설정하고, 금형의 각도는 반각 5°, 10°, 15° 성형이 진행되며, 각형 버스바 제조를 위하여 롤링과 각형 인발이 진행된다. CCA busbar의 성형 후 변형량과 손상값은 제조공정의 안정성에 밀접한 영향을 미친다. 본 연구에서는 변형율과 손상값을 최소화하기 위하여 DNN(Deep Neural Network) 기법을 이용하였다. 기존 제조공정과 최적화 공정의 시제품 분석은 추후 진행예정이다.

**Keywords:** Multistage Wire Drawing , Copper Cladded Aluminum Wire, Busbar, DNN, Optimization

---

1. 중원대학교 융합공학과, 대학원생

2. 주) 3A 연구소, 연구소장

3. 소속 부서, 직위

# 중원대학교 무인항공기계학과 교수, E-mail: jhkang@jwu.ac.kr

# 알루미늄 압출 금형 내부 소재 유동 제어를 위한 비드 구조의 영향성 분석

정성화<sup>1</sup>· 이인규<sup>2</sup>· 백정웅<sup>1</sup>· 이성윤<sup>2#</sup>

## Analysis of the Influence of Bead Structures on Material Flow Control in Aluminum Extrusion Dies

S. H. Jeong, I. K. Lee, J. W. Baek, S. Y. Lee

### Abstract

알루미늄 합금 압출품은 경량성과 우수한 기계적 특성을 바탕으로 다양한 산업 분야에서 활용이 확대되고 있으며, 특히 복잡한 단면을 가지는 압출품에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 부품의 정밀 생산을 위해서는 금형 내부 소재 유동의 균일성 확보가 필수적이다.

그러나 실제 압출 공정에서는 금형 내부 유동 불균형으로 인해 단면 두께 불균일, 휨과 같은 치수 정밀도 저하 문제가 빈번히 발생한다. 이를 해결하기 위해 기존에 적용되어 온 소재 유동 제어 방식인 베어링 형상 조절이나 맨드릴 형상 조절만으로는 안정적인 유동 제어에 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 금형 내부에 돌출 구조물인 비드(bead)를 삽입하여 유동을 제어하는 방안을 제안하였다. 비드의 유무에 따른 압출 금형 내 소재 유동을 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 활용하여 분석하였다.

해석 결과, 비드 구조는 금형 내 유속 편차를 감소시키며 단면 속도 분포의 균일성을 향상시키는 것으로 확인되었다. 이를 통해 비드 설계가 압출품 품질 향상에 기여할 수 있는 유효한 유동 제어 수단으로 판단된다. 향후 시압출 실험을 통해 해석 결과의 신뢰도를 확보하고 실제 적용성을 검증함으로써, 압출 금형 설계 기술의 고도화에 기여할 것으로 기대된다.

**Keywords:** Bead Structure, Flow Uniformity, Extrusion Die, Aluminum Extrusion, Numerical Simulation

---

1. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 연구원

2. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 수석연구원

# 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 수석연구원, E-mail: yunskills@kitech.re.kr

# 핫 피어싱 공정을 이용한 액화수소용 고망간강 심리스 배관 제조기술

권진구<sup>1</sup>· 이준표<sup>1</sup>· 홍성모<sup>1#</sup>

## Manufacturing of High-Mn Steel Seamless Pipes using Hot Piercing Process

J. G. Kwon, J. P. Lee, S. M. Hong

### Abstract

탄소중립시대의 핵심 에너지원으로서 액체수소 사용이 증가하면서 극저온의 액체수소를 안정적으로 저장 및 이송이 가능한 선박, 배관, 플랜지, 피팅 등의 인프라 구축은 필수적이다. 초저온 환경은 소재의 극한 기계적 성능과 안정성을 요구하나, 기존 극저온용 소재(STS304, 316L, Ni 계 등)는 원가 부담이 높아 경제적인 대체 소재 개발이 필요하다. 고망간강은 고강도, 고인성, 내마모성, 극저온인성 등을 지니면서도 기존 소재 대비 낮은 원가로 차세대 극저온 소재로 주목받고 있다. 그러나 고망간강은 높은 고온 변형 저항과 가공 경화 특성으로 인해 열간 피어싱 및 냉간 인발 심리스 배관 제조가 어렵고, 라인파이프, 밸브, 플랜지 및 피팅 등 액화수소용 핵심 부품 제조 기술도 국내에서 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 고망간강 환봉 빌렛을 이용하여 온도 및 설비 조건 제어를 통한 열간 피어싱 공정을 최적화하고, 다단 인발 패스 및 윤활 조건 설계를 적용한 냉간 인발 공정으로 목표 규격(2", 1", 1/2")의 심리스 배관과 이를 이용하여 피팅(엘보우, 티, 리듀셔) 부품을 제조하였다. 또한 고망간강 심리스 배관의 치수 정밀도, 표면 상태, 미세조직 및 기계적 특성을 분석하여 액화수소용 심리스 배관으로서의 적용 가능성을 고찰하였다.

**Keywords:** Liquefied Hydrogen, High Manganese Steel, Hot Piercing, Cold Drawing, Seamless Pipe

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업 이종기술융합형(20024186)과제의 지원을 통해 수행되었음.

---

1. (주)세창스틸 중앙연구소

# (주)세창스틸, 중앙연구소, 연구소, E-mail: hsm@scsteel.net

# Zn 합금의 Si 합금 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성

유효상<sup>1, #</sup>· 김용호<sup>1</sup>· 김철우<sup>1</sup>· 조재익<sup>1</sup>· 손현택<sup>1</sup>

## Effect of Si Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Zn Alloys

H. S. Yoo<sup>1, #</sup>, Y. H. Kim<sup>1</sup>, C. W. Kim<sup>1</sup>, J. I. Cho<sup>1</sup>, H. T. Son<sup>1</sup>

### Abstract

최근 탄소 저감 및 자원 효율성에 대한 사회적·산업적 요구가 지속적으로 증가함에 따라, 내구성과 기계적 성능을 동시에 확보할 수 있는 경량 금속 소재에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 Zn 합금은 우수한 내식성과 저비용, 전기적 특성 및 뛰어난 도금성으로 인해 자동차, 건설, 전자 부품 등 다양한 산업 분야에서 활용도가 높다. 최근에는 Zn에 Al과 Mg를 첨가한 Zn-Al-Mg 계 합금이 기존 합금 대비 탁월한 내식성을 나타내며, 박판 강판 도금재 및 구조재 분야에서의 응용 가능성이 활발히 검토되고 있다. 그러나 내식성과 기계적 성능의 균형 확보, 특히 소성가공 공정에서의 변형 거동 제어는 여전히 중요한 과제로 남아 있다. 합금 설계 요소 중 Si 첨가는 미세조직 안정화 및 금속간 화합물 형성을 유도하여 기계적 특성과 내열성을 개선할 수 있는 중요한 변수로 알려져 있다. Si의 첨가량은 상형성, 결정립 미세화, 석출 거동에 영향을 주어 합금의 강도와 연성을 조절할 수 있으나, Zn-Al-Mg 계 합금에 대한 체계적인 연구는 아직 제한적이다. 본 연구에서는 Si 합금 첨가가 Zn-Al-Mg 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 합금을 제조하기 위해 고주파 유도로를 이용하여 중력 주조하였고, 가공된 빌렛은 열간 압출하였다. 제조된 주조재 및 압출재의 미세조직은 주사전자현미경 및 XRD를 이용하여 관찰하였으며, 인장시험을 통한 기계적 특성 평가를 하였다.

**Keywords:** Zn-Al-Mg alloy, Extrusion, Microstructure, Mechanical properties

---

1. 한국생산기술연구원

# 한국생산기술연구원, 목적기반모빌리티그룹, 선임연구원, yoohs@kitech.re.kr

# 유한요소해석 기반 합금강 선재 인발 공정의 표면 거칠기 예측

홍현빈<sup>1</sup> · Raj Narayan Hajra<sup>1</sup> · 유종환<sup>2</sup> · 오민규<sup>2</sup> · 손동민<sup>3</sup> · 김정한<sup>1</sup> · 조훈휘<sup>1, #</sup>

## Finite element based prediction of surface roughness in wire drawing process

H. B. Hong, Raj Narayan Hajra, J. H. Yu, M. K. Oh, D. M. Son, 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

2. 세아특수강

3. 세아창원특수강

---

1. # 국립한밭대학교 신소재공학과, 교수,

E-mail: hhcho@hanbat.ac.kr

# 하나로 핵연료 피복압출 제조공정 변경을 통한 진직도 개선

황재준<sup>1#</sup> · 김종환<sup>2</sup> · 소원재<sup>3</sup> · 김호민<sup>4</sup> · 박찬석<sup>5</sup> · 정용진<sup>6</sup>

## Straightness Improvement of HANARO fuel through Manufacturing process Modification

J.J.Hwang, J.H.Kim, W.J.So, H.M.Kim, C.S.Kim, Y.J.Jeong

### Abstract

한국원자력연구원(KAERI)은 2005년 하나로 핵연료 국산화 이후 하나로의 구동 핵연료 전량을 자체 생산 및 공급하고 있으며, 연간 55다발 생산이 가능한 체계를 갖추고 있다. 하나로 핵연료 생산은 분말 형태에서 여러 공정에 걸쳐 핵연료 심재 형태로 가공 후 피복 압출 공정을 통해 핵연료봉으로 제작된다. 이 과정에서 피복압출 공정으로 제작된 핵연료봉의 진직도에 편차가 관찰되었으며, 이는 이후 기계가공 및 봉단 용접 과정에서 진직도에 따라 제조성과 핵연료봉 품질에 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 봉의 진직도 편차의 발생 원인에 대해 분석하였고, 이를 개선하기 위한 제조공정 변경 방안을 검토하였다. 먼저 진직도 편차 확인을 위해 생산된 핵연료봉 각 8면에서 5cm 간격으로 진직도를 측정하여, 봉별 진직도 편차 및 경향성을 평가했다. 분석 결과 일부 핵연료봉에서 특정 부위의 진직도 편차가 반복적으로 발생함을 확인할 수 있었다. 이를 개선하기 위해 피복압출 공정의 생산 방식을 변경하고, 동일한 측정 방식을 적용하여 재분석하였다.

그 결과 특정 부위에서 진직도 편차가 발생하지 않는 생산 조건을 도출할 수 있었으며, 이러한 조건이 진직도 안정화에 효과적임을 확인하였다.

도출된 최적 생산 방식을 실제 제조 공정에 적용함으로써 특정 부위의 진직도 편차를 효과적으로 개선하였다. 피복압출 공정의 개선은 이후 기계가공 및 봉단 용접 과정에서의 제조성을 높이는데 기여하며, 생산 효율성과 제품 일관성을 향상시킬 수 있다. 나아가 이번 연구를 통해 확보된 진직도 안정화 생산방식은 핵연료봉 전체 품질 향상에 직접적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** HANARO research reactor fuel, Co-extrusion, Straightness , Manufacturing Process modification

---

1. 한국원자력연구원 연구로핵연료부, 선임기술원
2. 한국원자력연구원 연구로핵연료부, 책임기술원
3. 한국원자력연구원 연구로핵연료부, 선임기술원
4. 한국원자력연구원 연구로핵연료부, 선임기술원
5. 한국원자력연구원 연구로핵연료부, 연구기술원
6. 한국원자력연구원 연구로핵연료부, 책임연구원

# 교신저자: 한국원자력연구원, 연구로핵연료부, 선임기술원, hth5338@kaeri.re.kr

# 알루미늄 압출 공법을 적용한 후륜 로어암 설계 최적화 연구

윤석진<sup>#1</sup> · 문가람<sup>1</sup> · 이준민<sup>1</sup> · 이계호<sup>1</sup>

## A Study on the Optimization of Rear Lower Arm Design with Aluminum Extrusion Method

S. J. Yoon, K. R. Moon, J. M. Lee, K. H. Lee

### Abstract

자동차 산업의 지속 가능한 발전과 에너지 효율 향상을 위한 전략으로 차량 경량화가 주목받고 있으며, 이에 따라 알루미늄 소재의 활용이 확대되고 있다. 본 연구는 기존의 열간 단조 공법을 대체할 수 있는 알루미늄 압출 공법을 후륜 로어 암 설계에 적용하여 경량화 및 성능 향상을 도모하고자 하였다.

압출 공법은 연속적인 단면 형상 구현에 유리하며, 복잡한 형상 구현을 위해 절단, 굽힘, 축소 성형 등의 후공정을 설계에 반영하였다. 설계는 총 5단계로 구성되었으며, 스프링 패드의 횡력 보강 구조와 언더커버 체결부 설계까지 포함하였다. 압출 공법을 적용한 설계 결과, 기존 열간단조 공법 대비 중량을 2.89kg에서 2.15kg으로 25.6% 경량화하였으며, 유한요소해석을 통해 대하중 강도 성능이 동등 이상임을 확인하였다.

또한, 실험계획법을 활용하여 7개 설계 인자에 대한 최적화 연구를 수행하였고, 중량과 응력 간의 상호작용을 분석하였다. 주요 인자인 상부 압출 단면 두께, 트리밍 라인, 단면 연결부 라운드는 중량 절감과 응력 저감에 효과적인 것으로 나타났다. 최적화 설계안에서는 중량을 1.77kg까지 줄여 초기 설계 대비 17.7% 추가 경량화를 달성하였다.

본 연구는 알루미늄 압출 공법을 활용한 후륜 로어 암 설계의 기술적 가능성과 경제적 효율성을 입증하였다. 압출 공법은 경량화와 생산 효율성 측면에서 유리하며, 유한요소해석과 실험계획법을 통해 설계 최적화를 수행함으로써 성능 저하 없이 중량을 효과적으로 줄일 수 있었다. 이러한 접근은 향후 친환경 차량 개발 및 고효율 서스펜션 부품 설계에 있어 유용한 설계 전략으로 활용될 수 있을 것이다.

**Keywords:** Rear Lower Arm, Extrusion, Aluminum, Lightweight, Cost Reduction, Optimization

1. 현대모비스 전동화/모듈BU 모듈연구소, 책임연구원

# 현대모비스 전동화/모듈BU 모듈연구소, 책임연구원, E-mail: [sukjin.yoon@mobilis.com](mailto:sukjin.yoon@mobilis.com)

# 마이크로필라 압축시험을 통한 AA6061 합금의 크기효과 및 변형속도 효과 연구

백인섭 · 팽정인 · 이근호 · 강성규

## Abstract

항공-우주 산업 전반에서 경량화와 내구성 향상을 동시에 요구하는 환경 속에서 Al-Mg-Si 계열 석출경화형 합금인 AA6061은 대표적인 구조재료로 자리 잡아왔다. 이러한 응용환경 속에서 변형속도는  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 에서  $10^9 \text{ s}^{-1}$ 에 이르기까지 광범위하게 변화한다. 이 때 변형속도에 해당하는 기계적 물성을 정량화하기 위한 벌크 단위 시험은 장비의 한계로 인해 재현성과 반복성 확보가 어렵고 시편 준비에도 많은 시간이 소요된다. 이에 대한 대안으로 비파괴적인 마이크로 단위 실험이 도입되어 금속재료의 기계적 물성에 미치는 크기효과와 변형 속도 효과를 비파괴적으로 정량화한 결과들이 보고되었으나 순수 금속을 대상으로 했다는 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 상용 합금인 AA6061을 대상으로 마이크로필라 압축시험을 수행하여 크기 효과와 변형 속도 효과를 체계적으로 조사하였다. SEM, EDS, EPMA 분석을 통해  $\text{Mg}_2\text{Si}$  석출물을 확인하였으며 EBSD를 통한 결정 방향 분석과 Schmid factor 계산을 통해 FCC 슬립 시스템의 활성이 가장 활발히 되는  $<001>$  방향 결정립을 선정하였다. 이후 직경  $1\text{--}10 \mu\text{m}$  범위의 필라를 FIB(Focused Ion Beam)로 제작하여 압축시험을 실시하였다. 그 결과 일정 변형속도( $0.002 \text{ s}^{-1}$ ) 조건에서 직경이 줄어들수록 항복강도와 CRSS가 상승하는 전형적인 크기 효과가 관찰되었다. 이는 석출물 간격 보다 작은 필라 크기가 전위 거동을 지배하기 때문으로 해석된다. 더불어 동일 직경( $2 \mu\text{m}$ ) 시편의 변형속도를 변화시킨 시험에서는 변형속도가 증가할수록 항복강도와 CRSS가 뚜렷하게 증가하는 변형속도 의존성을 확인하였다. 이러한 결과는 상용 알루미늄 합금의 미세 스케일에서의 기계적 거동을 구체적으로 보여주며, 극한 환경에서의 재료 설계 및 신뢰성 확보를 위한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

# Inconel 718 소재의 열간단조 공정 중 변형률에 따른 동적 재결정 거동 특성에 관한 연구

허수빈<sup>1,2</sup>· 안지섭<sup>1,2</sup>· 여승현<sup>1,2</sup>· 이나경<sup>1,2</sup>· 권혁준<sup>3</sup>· 김종식<sup>4</sup>· 황선광<sup>1, #</sup>

## A Study on Dynamic Recrystallization Behavior Characteristics as a Function of Strain during Hot Forging of Inconel 718

S. P. Heo, J. S. An, S. H. Yeo, N. K. Lee, H. J. Kwon, J. S. Kim, S. K. Hwang

### Abstract

Inconel 718은 니켈 기반 초내열합금으로서 고온·고압 환경에서도 우수한 기계적 특성을 유지하여 발전소 및 항공우주 분야의 부품 소재로 활용되고 있다. 해당 부품들은 주로 열간단조 공정을 통해 제조되나, 열간단조 공정 중 형상 특성에 따라 위치별 변형량이 상이하기 때문에 불균일한 미세조직이 발생하게 된다. 본 연구에서는 Inconel 718 소재의 열간단조 공정 중 결정립 크기의 편차를 저감하기 위한 재결정 거동 제어를 위한 임계변형률을 제안하고자 한다. 고온 변형 과정에서 Inconel 718은 동적회복(dynamic recovery, DRV)과 동적재결정(dynamic recrystallization, DRX) 거동을 나타내며, 이는 변형률, 온도, 변형률 속도 등에 영향을 받는다. 따라서 변형률에 따른 재결정 및 변형 거동을 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 Inconel 718 빌렛을 압축 시편으로 제작한 후, 1000°C, 0.1s<sup>-1</sup> 조건에서 변형률(0.3-1.0)을 달리하여 압축 시험(Gleeble3800-GTC)을 실시하였다. 변형된 시편은 절단 후 EBSD 분석을 통해 IPF, KAM, GOS 맵을 작성하였으며, 이를 바탕으로 DRV 및 DRX 여부를 판별하였다. 또한 DRV 와 DRX에 따른 집합조직 특성을 평가하여 소재의 변형에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과, 변형률이 증가함에 따라 DRV에서 DRX로의 전환이 뚜렷하게 관찰되었으며, 불연속 DRX와 연속 DRX의 분포 양상 및 변형률에 따른 재결정 분율 비교도 가능하였다. 이러한 결과를 통해 Inconel 718 소재의 열간단조 공정 중 결정립 크기의 편차를 저감하기 위한 임계변형률을 제시할 수 있었으며, 이를 통한 재결정 거동 제어로 Inconel 718 소재의 항공우주산업 분야의 열간단조 공정 등에 널리 사용될 수 있을 것이다.

**Keywords:** Inconel 718, Microstructure, Dynamic recovery, Dynamic recrystallization

1. 한국생산기술연구원 대구뿌리기술지원센터

2. 부산대학교 기계공학부

3. 한화에어로스페이스

4. KPCM

# 교신저자: 한국생산기술연구원, 수석연구원, E-mail: skhwang@kitech.re.kr

# 고온압축시험 시 배럴링과 소성변형열을 고려한 와스팔로이 합금의 유동응력선도 평가

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

## Evaluating Flow Stress Curve of Waspaloy Alloy considering 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

유동응력은 소재의 강도, 연신율 등을 평가할 수 있는 기본적인 소재 물성 특성이다. 유동응력 선도는 물성 특성 평가뿐만 아니라 유한요소해석을 위한 중요한 소재의 입력 데이터이다. 일반적으로 유동응력 선도는 인장시험, 압축시험, 또는 비틀림시험을 통해 평가된다.

압축시험은 금형과 소재 사이의 마찰, 그리고 압축속도가 빠르고 압축량이 많은 경우의 소성변형 발열이 유동응력 선도에 영향을 미치게 된다. 따라서, 압축시험 시 정확한 유동응력 선도 확보를 위해서는 마찰과 소성변형 발열 영향을 고려해야한다. 특히, 와스팔로이 합금의 경우 열간성형 시 성형가능 온도 범위가 협소하기 때문에 유동응력 선도 평가 시 마찰과 소성변형 발열 영향을 고려하는 것이 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 항공기 엔진 핵심부품용으로 사용되는 와스팔로이 합금에 대한 고온 압축시험을 수행한 후, 마찰과 소성변형 발열을 고려한 유동응력 선도를 도출하였다.

**Keywords:** Flow Stress Curve, Compression Test, Friction, Plastic Deformation Heat, Waspaloy Alloy

### Acknowledgement

본 연구는 “터보샤프트엔진 가스발생기 터빈 핵심부품소재 장수명화 개발 기술(KRIT-22-055-03)”의 용역사업인 “Waspaloy 합금 디스크 단조품 성형공정해석 및 공정설계(No. IR230012)”에 의한 연구임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

---

1. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 학생연구원
2. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, 수석연구원
3. 한화에어로스페이스 한국연구소, 책임연구원
4. 한화에어로스페이스 한국연구소, 연구원

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

## 연속와인딩 모터 각형와이어 성형공정의 유한요소해석 및 분석 기법개발

조유진<sup>1,2</sup>· 안지섭<sup>1,2</sup>· 이동규<sup>1,2</sup>· 황선광<sup>1</sup>· 정명식<sup>1, #</sup>

### FEA and Development of Analytical Techniques for Forming Processes of Rectangular Wire in Continuous Winding Motors

Y. J. Jo, J. S. An, D. K. Lee, S. K. Hwang, M. S. Jeong

#### Abstract

EV 구동모터는 동력 시스템에서 핵심 부품으로 성능과 품질이 전기자동차의 전반적인 효율에 큰 영향을 미친다. 연속와인딩 공정에 사용되는 구리 와이어는 절연 코팅이 되어 있는 이종 소재로 성형 과정에서 절연층 손상이나 와이어 파단이 발생할 위험이 있다. 따라서 안정적인 성형 조건을 확보할 수 있는 기준이 필요하다. 본 연구에서는 각형 와이어의 이종소재의 특성을 파악하기 위해 주사 전자 현미경(SEM)을 활용하여 와이어의 절연층 분석과 경도를 측정하였다. 본연구에서는 특히 모재가 파단되기 이전 코팅층의 균열(crack)과 파단(fracture) 발생 시점을 파악하기 위해 인장 시험을 수행하고 디지털 영상 상관법(Digital Image Correlation, DIC)을 활용하여 연신율 변화에 따른 파단 메커니즘을 분석하였다. 또한 와이어의 성형 한계값 도출을 위해 손상 매개변수를 결정하고, 데미지 모델 기반 유한요소 해석을 통해 성형성을 평가하였다. 편치의 곡률 반경을 변경하며 데미지 값을 기준으로 응력 집중 양상을 비교한 결과 곡률 반경이 커질수록 응력 집중이 완화되고 성형부에 작용하는 최대 응력과 데미지가 감소하는 것을 확인하였다. 또한 와이어 벤딩 위치에 따른 와이어 변형 거동 및 응력 분포를 분석하였다. 해석 결과를 바탕으로 금형 편치의 곡률 반경값과 와이어 벤딩 위치에 따른 성형 한계에 대한 조건을 확인하였으며 연속 와인딩 와이어의 성형 공정 설계 기준을 제시하고자 하였다.

**Keyword:** Continuous Winding, Stator Winding, Insulation Damage

#### Acknowledgements

이 연구는 2025년 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)-(No.RS-2024-00445670)과 한국생산기술연구원의 기관주요사업 - (JC-25-0022)의 연구비 지원에 의한 연구임

1. 한국생산기술연구원, 모빌리티부품그룹

2. 부산대학교 기계공학부

# 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, E-mail: msjeong@kitech.re.kr

# 플로우 포밍 공정에 따른 SCM440H의 기계적 특성 연구

이성민<sup>1#</sup>, 오현준<sup>2</sup>, 박은수<sup>3</sup>

## A Study on the Mechanical Properties of SCM440H according to Flow Forming Process

S. M. Lee, H. J. Oh, E. S. Park

### Abstract

최근 친환경 자동차의 확대에 따라 핵심 부품인 구동 모터에 대한 기술개발도 꾸준히 이루어지고 있고 관련 부품에 대한 기술 개발도 활발히 진행되고 있다. 그 중 본 연구에서는 구동 모터 회전체 부품인 로터샤프트에 대한 제조 기술을 개발하고자 한다. 기존 구동 모터의 로터 샤프트의 경우 Radial Forging, 건드릴을 이용한 기계가공 또는 기계가공 후 용접을 통해 중공 타입으로 제작이 이루어지고 있다. 이러한 방법들은 제품의 중량 과다, 비틀림 토크에 의한 구조 강성 취약 및 내경 동심 정밀도 저하로 인한 고속 회전 밸런스 문제 발생 등 다양한 문제가 발생되고 있다. 이러한 문제들을 극복하고자 본 연구에서는 구동 모터 회전체 부품인 로터샤프트 부품에 대해 점진유동성형공법인 플로우 포밍(Flow Forming)을 적용하여 경량화, NVH 향상 및 구조 강성이 증가된 중공형 로터샤프트의 제조 기술을 개발하고자 한다. 이러한 플로우 포밍은 회전하는 금속 소재에 축 방향 및 반경 방향의 압력을 가해 소성 변형을 유도하여 목표 형상 및 치수를 정밀하게 구현하는 가공법으로, 특히 중공 샤프트와 같은 축 대칭의 복잡한 형상의 제조 및 제품의 내구성을 향상시키는데 효과적인 공법이다. 본 논문에서는 중공 샤프트의 플로우 포밍 적용 대상 소재인 SCM440H의 기계적 물성 평가 진행을 통해 기본 물성을 평가하고, 이를 대상으로 플로우 포밍 조건별 성형에 의한 소재의 가공경화 정도, 단류선(Metal Flow) 변화 등을 분석하였다.

### 후기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원(KIAT)의 “중견중소기업상생형 혁신도약사업(R&D, RS-2025-02310861)의 연구비 지원을 받아 수행된 연구결과임.(4세대 기어 일체형 경량화 로터 샤프트 및 Shrink-fit method가 적용된, 전기차 구동모터용 로터 어셈블리 제조기술 개발 및 평가)

**Keywords:** Flow Forming, Hollow Shaft, Electric Vehicle, Driving Motor, Metal Forming, SCM440H



< Hollow shaft manufacturing process using flow forming >

---

1. (재)경북테크노파크 미래모빌리티육성본부, 책임연구원
2. (재)경북테크노파크 미래모빌리티육성본부, 연구원
3. 경창산업(주) 중앙연구소, 책임연구원

# (재)경북테크노파크, 미래모빌리티육성본부, 책임연구원, E-mail: smlee@gbtp.or.kr

# DED 공정을 이용한 Cu-H13 접합에서 중간층 적용에 따른 계면 및 열전달 특성 분석

박현태<sup>1,2</sup> · 남이정<sup>1</sup> · 심도식<sup>#</sup>

## Analysis of Interfacial and Thermal Properties in Cu–H13 bonding with Buffer Layers Using Directed Energy Deposition

H. T. Park, I. J. Nam, D. S. Shim

### Abstract

구리(Cu)는 열전도율이 우수하고, H13 공구강은 높은 고온 강도와 내열 피로 저항성을 가진다. 따라서 두 소재를 접합할 경우 열관리 성능과 구조적 안정성을 동시에 향상시킬 수 있다. 이러한 요구에 따라 적층제조(Additive Manufacturing, AM)를 이용한 이종 소재 접합 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히, 직접에너지적층(Directed Energy Deposition, DED)은 서로 다른 재료의 적층이 가능하여 표면 강화 및 이종금속(Bimetallic)구조 제작에 활용된다. 그러나 Cu 와 H13 은 열팽창 계수 및 물성 차이가 크기 때문에 계면 균열, 기공, 박리와 같은 접합 결함이 발생하기 쉽다. 또한 Cu 는 높은 열전도율과 낮은 레이저 흡수율로 인해 DED 공정 중 용융 풀이 불안정하게 형성되는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 Cu-H13 접합에서 나타나는 계면 결함 문제를 해결하기 위하여 중간층(buffer layer) 도입과 예열 공정을 적용하였으며, 3 점 굽힘 시험과 파단면 분석을 통한 접합 특성 평가와 열전도도 측정을 통한 열전달 성능을 비교하였다. 중간층 소재로는 열팽창 계수 차이를 완화할 수 있는 P21 과 내식성이 우수한 STS316 을 적용하였고, 30 분간 300 °C로 모재를 예열을 하였다.

3 점 굽힘 시험 결과, 중간층이 없는 Non-buffer 시편은 취성 파괴가 지배적이었던 반면, P21-buffer 시편에서는 2 단계 파단 거동과 연성 파괴가 관찰되어 계면 결합력이 향상된 것으로 나타났다. 파단면 분석에서도 Non-buffer 시편은 계면 균열과 입계 파괴가 주요 양상이었으나, P21-buffer 시편은 dimple 형성을 동반한 연성 파괴가 관찰되었다. 열전도도 측정 결과, P21-buffer 시편이 가장 높은 값을 보였으며, Non-buffer 시편이 그 다음으로 나타났다. 이는 P21 베피층이 Cu-H13 간 열전도 특성 차이에 의해 계면 결합을 완화하여 보다 안정적인 금속 결합을 형성하였기 때문이다. 반면, Non-buffer 시편은 내부 결함으로 인해 열전도 경로가 방해되면서 열전도도가 낮게 나타났다. 또한 Non-buffer 시편은 열전도도 측정값의 표준편차가 크게 나타나 내부 품질 변동이 심한 것으로 확인되었으며, 이는 계면 접합 불량에 의한 것으로 판단된다. 한편, STS-buffer 시편은 가장 낮은 열전도도를 보였는데, 이는 오스테나이트계

스테인리스강의 낮은 열전도 특성에 따른 결과로 해석된다.

따라서 Cu-H13 접합부에 중간층을 도입하는 것은 계면 결합 혹은 접합에 효과적임을 확인하였다. 그러나 열전달 성능은 중간층 소재에 따라 달라지므로 목적에 맞는 소재 선택이 중요하다. 본 연구는 중간층 도입이 이종소재 접합 품질 및 성능 향상을 위한 해결책 중 하나가 될 수 있음을 보여준다.

**Keywords:** Directed Energy Deposition, Bimetallic, Buffer Layer, Cu, H13

---

1. 국립한국해양대학교 해양융합신소재공학과, 대학원생

2. 국립한국해양대학교 해양신재생에너지공학과

# 국립한국해양대학교 해양융합신소재공학과, 교수, think@kmou.ac.kr

# 수지 광중합 공정으로 제조된 금속-폴리머 복합재의 접합부 내 금속 격자 형상의 영향

고민성<sup>1,2</sup>· 오창민<sup>1</sup>· #심도식<sup>1,2</sup>

## Effects of Metal Lattice Geometries in Joints on Metal-polymer Composites Fabricated by Vat photopolymerization

M. S. ko, C. M. Oh, D. S. Shim

### Abstract

수지 광중합(Vat photopolymerization, VPP) 공정은 높은 정밀도와 빠른 적층 속도로 적용 분야를 넓혀 가고 있다. 금속-폴리머 복합재를 제작하기 위해, 본 저자의 선행 연구에서는 VPP 공정 중 광을 장시간 조사하는 과경화(Over-curing)로 음각 가공된 금속 내부를 폴리머로 완전히 층진하였다. 하지만 접합 계면에서의 결합력이 낮다는 문제점이 있었다. 본 연구에서는 금속의 체적 비율을 줄이고, 금속 표면에 양각으로 적층된 격자 구조의 형상이 결합에 미치는 영향을 분석하였다. 기둥 구조와 격자구조를 각각 4 종, 총 8 가지 형상 조건으로 선정하였으며 모든 형상은 유사한 체적을 갖도록 설계하였다. 인장시험 결과, 원기둥, 역원뿔대, 폰(체스 기물), 체심 입방 구조에서 높은 결합력을 보였다. 다른 형상들과 달리, 원기둥 구조는 형상 자체만으로는 맞물림 효과가 없지만, 분말 소결 방식으로 제작된 금속 구조물의 거친 표면 내부에 폴리머가 침투하여 미세한 맞물림 결합이 형성되어 높은 결합력을 보였다. 단순 입방, 면심 입방 구조는 중간 수준의 결합력을, 원뿔대, 피라미드 구조는 낮은 결합력을 보였다. 원뿔대 구조는 맞물림 각도가 둔각이기 때문에 인장상황에서 맞물림 효과가 없다. 피라미드 구조는 체심 입방 구조와 유사하지만, 금속 양각부와 폴리머가 맞물리는 유효 결합 영역은 광 입사면으로부터 상대적으로 더 깊은 위치에 형성된다. 선행 연구에 따르면, 과경화 시 광 입사면 부근에서 경도가 높고 깊이가 깊어질수록 경도는 점차 감소한다. 이러한 경도 구배로 인해 피라미드 구조에서는 맞물림 결합력이 낮게 나타난다. 모든 시편은 폴리머 영역에서 파단 되었으며, 원기둥과 원뿔대 구조에서는 경화된 폴리머가 금속 양각 구조와 완전히 분리되는 뽑힘 현상이 관찰되었다. 이때 파단된 금속 표면 내에 폴리머가 잔류한 점은 미세 맞물림 결합을 뒷받침한다. 나머지 시편들은 금속-폴리머 계면을 따라 파단 되었다.

**Keywords:** Vat photopolymerization, Metal-polymer composites, Over-curing, Lattice structure, Tensile test

---

1. 한국해양대학교 신소재융합공학과
2. 한국해양대학교 해양신재생에너지융합공학전공

# Corresponding Author / E-mail: think@kmou.ac.kr, TEL: +82-51-410-4354, FAX: +82-51-410-4354

# 매개변수 모델링 기반의 베지어 스플라인 경사기능 허니컴 구조

남궁길<sup>1</sup>· 김재준<sup>2</sup>· 하태광<sup>#</sup>

## Bezier Spline-Based Parametric Modeling for Functionally Graded Honeycomb Structures

G. Namgung, J. Kim, T. Ha

### Abstract

허니컴(Honeycomb) 구조는 무게 대비 높은 강도를 지니는 특성으로 인하여 건축, 항공, 자동차 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 이상적인 허니컴 구조는 동일한 크기의 직선형 태의 벽으로 이루어진 정육각형 셀로 이루어지지만, 실제 제조 공정에서는 열적 변형, 장비의 정밀도 등의 다양한 공정변수들에 의하여 직선형태보다 곡선형태의 벽을 가진 허니컴 구조가 제작될 수 있다. 직선형태의 셀 벽을 갖는 허니컴 구조와 곡선형태의 셀 벽을 갖는 허니컴 구조는 구조적으로 유사할 수는 있으나 기계적 거동은 기하학적 특성으로 동일하지 않다. 또한, 허니컴 구조의 길이방향으로 셀 모양이나 형태가 변화하게 되면 해당 구조 또한 기계적 거동 및 특성이 변화한다. 따라서, 본 연구에서는 곡선형 허니컴 셀 벽을 가지며 길이방향으로 셀 구조가 변화하는 경사기능 구조(Functionally Graded Structure, FGS)를 분석하기 위하여 매개 변수 기반의 베지어 스플라인(Bezier Spline)을 적용하였다. 매개변수를 바탕으로 한 다양한 경사기능 허니컴 구조들을 Ansys를 사용하여 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)을 수행한 후 해당 구조들의 기계적 거동과 특성들을 비교 및 분석하였다. 또한, 매개변수 모델링 기반의 베지어 스플라인을 적용하여 다양한 형태의 경사기능 허니컴 구조 특성을 예측 가능함이 확인되었다.

**Keywords:** Honeycomb, Bezier Spline, Functionally Graded Structure, FEA

---

1. 조선대학교 기계공학과

# 교신저자: 조선대학교 기계공학과, 조교수, hataekwang@chosun.ac.kr

## 나노인덴테이션을 이용한 Co-WC 코팅층의 경도 및 내마모 특성 연구

이은세<sup>1</sup>· 김학윤<sup>2</sup>· 최시훈 <sup>#</sup>

### Hardness and Wear Properties of Co-WC Coatings Evaluated by Nanoindentation

E. S. Lee, S. H. Choi

#### Abstract

최근 레이저 클래딩 공정은 Directed Energy Deposition을 통해 국부적인 열원 제어가 가능하여 모재의 손상을 최소화하면서도 고경도 및 내마모성이 우수한 표면층을 형성할 수 있어 고부가 가치 산업용 부품의 표면 개질 기술로 주목받고 있다. 이 과정에서 사용되는 Co-WC 분말은 산화 및 부식 환경에 대한 높은 저항성을 지니며, 고온에서도 안정적인 기계적 특성을 유지한다.

특히 WC 파티클의 균일한 분포와 각 입자의 특성 유지 여부는 최종 코팅층의 내마모성 확보에 핵심적인 요소로 작용한다. 본 연구에서는 ball-on-disc 방식의 마모시험을 통해 내마모 특성을 평가하였으며, 나노인덴테이션(nanoindentation)을 활용하여 경도 분포를 분석하였다. 또한 SEM 관찰을 통해 조직과 WC 파티클의 분포 특성을 연구하였다. 이를 종합적으로 고찰함으로써 Co-WC 기반 DED 코팅층의 기계적·미세조직적 특성과 성능 간의 상관성을 연구하였다.

**Keywords:** WC Particles, Co-based, Directed Energy Deposition, Hardness, Nanoindentation

---

1. 국립순천대학교 첨단부품소재공학과 대학원생

2. (주)미르테크

#. 국립순천대학교 첨단신소재공학과, 교수, E-mail: si-hoon@scnu.ac.kr

# Wire-Based Laser Additive Manufacturing 공정으로 제조한 Ti-6Al-4V 합금의 수소 취성 파괴 저항성

박정현<sup>1</sup> · 송노건<sup>1</sup> · 김대중<sup>2</sup> · 서진유<sup>3</sup> · 이기안<sup>1, #</sup>

## Hydrogen Embrittlement Fracture Resistance of Ti-6Al-4V Fabricated by Wire-Laser Additive Manufacturing

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

### Abstract

Direct energy deposition (DED) 적층제조 방식은 대형 부품의 제조 뿐만 아니라 국부적으로 손상된 영역의 repair가 가능하며, powder 또는 wire feedstock을 사용한다. 특히 wire-based DED 방식은 powder-based DED 방식에 비해 높은 적층 속도와 낮은 feedstock 비용 등의 장점들을 가지고 있다. Wire-based AM은 사용되는 energy source에 따라 크게 arc 방식과 laser방식으로 구분될 수 있으며, laser를 사용하는 Wire-laser additive manufacturing (WLAM)은 arc에 비해 정밀한 열 입력 제어가 가능하여 우수한 형상 정밀도와 표면 품질을 구현할 수 있다. Ti-6Al-4V는 대표적인 티타늄 합금으로, 우수한 비강도와 기계적 특성을 가진다. 최근 항공우주 및 해양 플랜트 산업에서 다품종·대형 부품 수요가 증가함에 따라, 복잡한 형상의 대형 부품을 효율적으로 제조할 수 있는 WLAM 공정이 주목받고 있다. 그러나 이러한 산업분야에서는 수소 환경에서의 장시간 노출로 인해 수소 취성 현상이 발생할 수 있으며 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 WLAM 공정으로 제조한 소재의 수소 취성에 미치는 미세조직 영향을 조사하였으며, 동일하게 수소 장입 후의 Wrought 소재와 비교하였다. WLAM 소재는 수소 장입 후  $\alpha/\beta$  phase interface에 전위가 집적되고 nano size의 void들이 형성되었으며, Wrought 시편에서는  $\beta$  phase내부에 조대한 void와 crack들이 관찰되었다. H-Charging 후 WLAM과 Wrought의 인장 강도와 연신율은 각각 1196.70 MPa, 5.75%와 1143.81 MPa, 10.79%를 나타내었으며, Wrought 소재에서 더 큰 연신율 감소를 나타내었다. 즉 WAAM 소재의 우수한 내 수소 취성 특성을 제시할 수 있었다. 상기 결과들을 바탕으로 WLAM과 Wrought Ti-6Al-4V에서 수소 장입 후의 미세조직 변화가 기계적 특성과 변형 및 파괴거동에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

**Keywords:** Wire Laser Additive Manufacturing, Ti-6Al-4V, Microstructure, Hydrogen Embrittlement

---

1. 인하대학교 신소재공학과, 박사 후 연구원, 대학원생, 교수

2. (주)에이엠솔루션즈, 대표이사

3. 한국과학기술연구원, 책임연구원

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

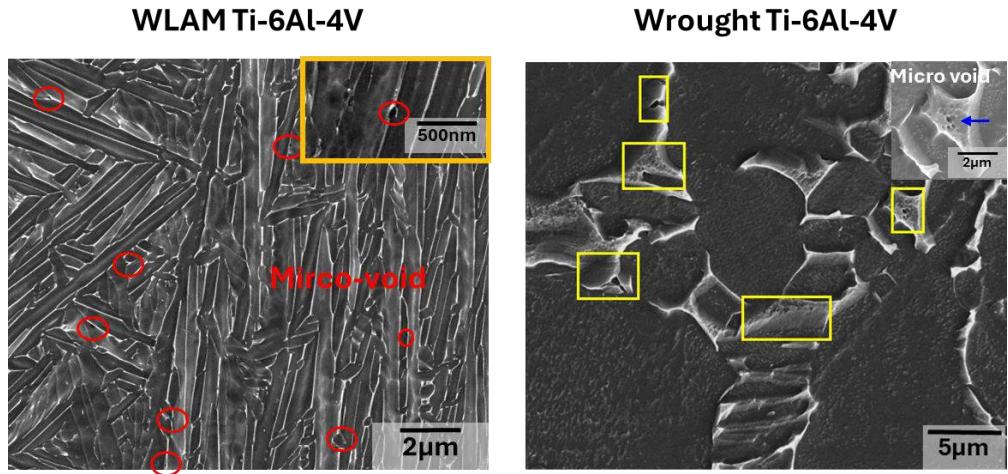


Fig. 1. Microstructure SEM analysis results of WLAM and Wrought Ti-6Al-4V after hydrogen charging

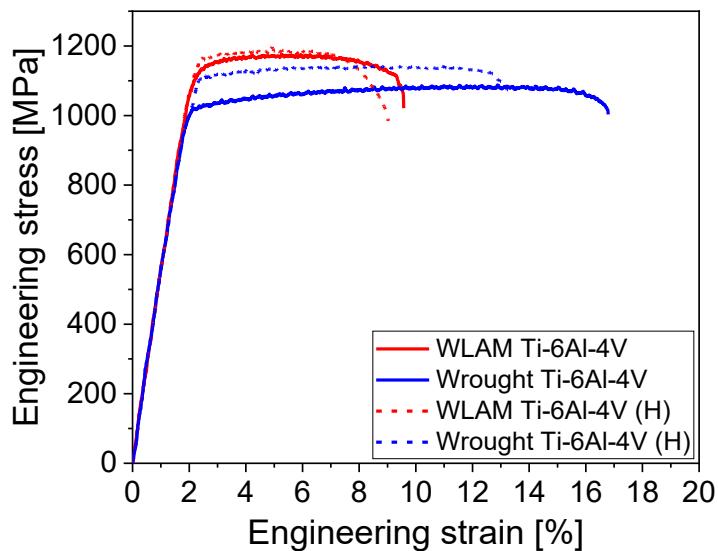


Fig. 2. Stress-strain curves of WLAM and Wrought Ti-6Al-4V specimens with and without hydrogen charging

## 직접용융증착된 IN718 합금의 후열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화

권시은<sup>1</sup>·김정기<sup>#2</sup>

### Tailoring microstructure and mechanical properties of directed energy deposited Inconel 718 alloy by post-heat treatment

S. E. Kwon, J. G. Kim

#### Abstract

가스터빈의 열효율 상승을 위해서는 터빈 연소부 작동 온도의 상승이 필수적이며, 이를 위해 고온 환경에서 장시간 안정적으로 운용 가능한 초내열합금 부품의 수요가 증가하고 있다. 그러나, 장기간 운전 중 반복적인 열응력, 마모 및 피로 하중에 따른 손상은 불가피하며, 이를 효과적으로 복원할 수 있는 기술 개발은 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 이에 복잡한 형상의 정밀 보수에 적합한 적층제조 공정이 주목받고 있으며, 그 중 높은 자유도와 효율을 갖춘 직접용융증착법(Directed energy deposition, DED)이 대표적인 기술로 활용되고 있다. 본 연구에서는 가스터빈용 초내열합금으로 많이 활용되는 Inconel 718 합금을 이용해 후열처리에 따른 기계적 특성 변화를 분석하였다. 최적의 공정 조건을 확인하기 위해 반응표면분석법(Response surface methodology, RSM)을 적용하여 치수 정확도, 상대밀도, 경도의 조합을 만족하는 적층제조 변수를 확인하였다. 이후  $\gamma$ ”을 포함한 강화상의 제어와 미세조직 안정화를 위해 Direct aging(DA) 및 Solution treatment 후 Direct aging(STA)을 진행한 열처리를 적용하고, 초기 시편(As-built, AB)과 비교하였다. 본 연구 결과는 최적의 DED 공정 조건과 열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화의 정량적 상관관계를 제시함으로써, DED 기반 Inconel 718 합금의 정밀 유지보수 및 공정 설계에 대한 방향성을 제공한다.

**Keywords:** Inconel 718, Directed energy deposition, Response surface methodology, Heat treatment

---

1. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 석사과정

2. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 부교수

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

## 직접 용융증착으로 제조된 CuNiAl 저합금강의 직접 시효에 따른 기계적 특성 변화

주수빈<sup>1</sup> · 노건우<sup>1</sup> · 정종현<sup>1</sup> · 류경희<sup>3</sup> · 김형섭<sup>4</sup> · 김정기<sup>1,2</sup>

### Direct aging effect on the mechanical properties of directed energy deposition CuNiAl-containing low alloy steel

Soo Bin Joo, Gun Woo No, Jonghyun Jeong, Gyeong Hee Ryu, Hyoung Seop Kim, Jung Gi Kim

#### Abstract

마레이징강은 시효처리 후 다양한 석출물을 형성하여 우수한 강도-연성을 가지는 소재로 항공, 방산, 자동차 등 다양한 산업 분야에 활용되고 있다. 하지만, 최근 배터리 시장의 성장으로 주요 구성원소인 Ni 수요가 급증함에 따른 원자재 가격의 상승이 일어났다. 따라서, Ni 함량을 저감하는 방법 중 하나로 Cu 기반 석출 경화형 철강재로 개발이 많은 관심을 받고 있다. 기존 연구에서 Cu, Ni, Al을 첨가한 합금의 경우, Cu-rich core와 B2-NiAl ordered shell을 가진 co-precipitation이 형성되어 마레이징강과 유사한 석출 경화를 유도하였다. 그러나, 동종 소재를 활용한 적층제조를 할 경우, Fe와 Cu의 녹는점 차이로 인해 적층 중 액화균열이 형성되는 문제가 발생하였다. 따라서, 본 연구에서는 Cu, Ni, Al의 총 합금 원소 함량을 5 wt% 미만으로 제한한 CuNiAl 저합금강을 설계하였으며, 직접 시효 중 기계적 특성 변화에 대해 분석하였다. 시효 처리 이후 경도는 최대 256 Hv, 인장강도는 최대 700 MPa까지 증가하였으며, 이는 열처리동안 co-precipitation이 형성된 결과로 사료된다. 하지만, 12시간 이상의 장시간 시효 시, 결정립 성장과 함께 Cu-rich phase가 BCC → 9R 구조로 전이되며 경도와 인장강도 모두 감소하는 경향을 확인 할 수 있었다. 또한, 열처리 시간이 증가할수록 이차상 분율의 증가로 인해 고용체 내에서의 격자 왜곡이 완화되고, 가공경화 지수 감소로 항복점연신민감도가 감소해 불연속 항복거동이 억제되는 것을 확인하였다. 상기 결과들을 통해 적층제조된 CuNiAl 저합금강이 high-Ni 마레이징강을 대체할 수 있는 가능성을 검증하였다.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Maraging steel, Mechanical properties, Heat Treatment

---

1. 경상국립대학교 나노융합공학부, 대학원생
2. 경상국립대학교 금속재료공학과, 교수
3. 경상국립대학교 세라믹공학과, 부교수
4. 포항공과대학교 신소재공학과, 교수

# 경상국립대학교, 금속재료공학과, 부교수, E-mail: junggi91@gnu.ac.kr

## 전자기장 해석 기반 고주파 유도가열 코일의 적층 제작 연구

김우성<sup>1</sup>· 이승엽<sup>1</sup>· 김다혜<sup>1</sup>· 흥명표<sup>1</sup>· 성지현<sup>1</sup>· 연시모<sup>2</sup>· 박종규<sup>3</sup>· 김건우<sup>#</sup>

### Research on the Additive Manufacturing of High-Frequency Induction Heating Coils Based on Electromagnetic Field Analysis

W. S. Kim, S. Y. Lee, D. H. Kim, M. P. Hong, J. H. Sung, S. M. Yeon, J. K. Park, K. W. Kim

#### Abstract

자동차 산업의 환경 규제 강화와 경량화 요구에 따라 핫스탬핑, TWB/TRB와 같은 고기능성 소재의 적용이 확대되고 있다. 그러나 이러한 소재 기반 부품의 특정 부위에는 충돌 에너지 흡수 성능과 내마모성 향상을 위한 국부 열처리 공정이 필요하며, 이에 따라 고주파 유도가열 열처리 기술이 각광받고 있다. 유도가열 열처리 기술은 고주파 유도가열을 통해 부품의 일부 영역을 신속하게 가열·냉각함으로써 높은 강도와 내구성을 부여하는 기술로, 단순한 장비 구성과 짧은 공정 시간이라는 장점이 있다. 그러나 코일 형상에 따른 열처리 성능의 편차와 수작업 중심의 제조 방식은 복잡한 형상의 차량 부품에 적용하는 데 제약으로 작용하고 있다.

본 연구에서는 고주파 유도가열 시 발생하는 전자기·열 상호작용을 다중물리해석을 통해 분석하고, 주요 설계 인자를 도출하였다. 최적 설계된 코일은 L-PBF 기반 금속적층으로 제조하였다. 최종적으로 해석 결과와 실험 데이터를 비교 분석함으로써, 적층제조 기반 유도가열 코일의 열처리 성능과 산업적 적용 가능성을 검증하였다.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Copper Alloy, Induction Heating, Electromagnetic Field Analysis, Laser Powder Bed Fusion

이 연구는 2025년도 산업통산자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (1.5GPa급 초 고강도강 대상 고강도 용접 와이어 및 초고강도 샤프 부품 개발, RS-2024-00425266)

---

1. 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹
2. 한국생산기술연구원 주문형생산연구부문
3. 주식회사 화신 기술연구소

# 한국생산기술연구원 모빌리티부품그룹, E-mail: kwkim@kitech.re.kr

# 금형 캐비티 압력 프로파일을 활용한 인공신경망 기반 사출품 품질 예측에 관한 연구

노수연<sup>1</sup>· 김지우<sup>2</sup>· 김종수<sup>3</sup>· 김종선<sup>#</sup>

## ANN-Based Quality Prediction of Injection-Molded Products Using Mold Cavity Pressure Profiles

S. Y. Ro, J. W. Kim, J. S. Kim, J. S. Kim

### Abstract

사출성형은 고분자를 가열 및 용융하여 원하는 형상으로 제조하는 공정으로, 높은 형상 자유도, 빠른 생산 속도, 단순한 공정 특성 덕분에 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 그러나 성형품의 품질은 형상, 수지 종류, 가공 환경에 편차가 발생하기 때문에, 실 현장에서는 여전히 작업자의 경험에 의존하여 최적 조건을 도출하고 있는 실정이다. 이에 공정 파라미터를 기반으로 한 품질 예측 인공신경망 개발이 활발히 진행되고 있으나, 수지별 성형 조건을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 본 연구에서는 사출 공정 중 캐비티 내부 압력 프로파일을 주요 입력 인자로 활용하여 사출품의 질량, 치수, VP pressure과 같은 품질 특성치를 예측하는 인공신경망 기반 모델을 구축하였다. 개별 특성치를 예측하는 MISO 모델과 다중 특성을 동시에 예측하는 MIMO 모델을 비교 분석하였으며, 그 결과 MISO 모델은 RMSE 평가지표에서 질량 0.07, VP pressure 43.678로 더 높은 정확도를 나타냈고, MIMO 모델 또한 질량 0.264, VP pressure 48.314, 치수 0.030으로 산업 현장에서 요구되는 다중 품질 지표 동시 예측에 활용이 가능한 성능을 확보하였다. 이에 본 연구는 사출 성형 공정에서 캐비티 압력 프로파일을 활용한 품질 예측 접근법의 가능성을 제시하였으며, 향후 타이어 가류공정 등 확장된 산업에서 공정 최적화와 비용 절감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Artificial neural network, Cavity pressure, Injection molding, Optimization, Polymer

### Acknowledgement

이 논문은 2025년도 산업통상자원부의 ‘타이어 제조공정에서 AI 기반 생산계획 수립 및 예측 유지보수 자율시스템 개발’, ‘사출성형품의 품질 고도화를 위한 실시간 사출성형 품질예측 솔루션 개발’의 지원을 받아 연구되었음(RS-2025-25455051, RS-2022-00140364).

---

1. 한국생산기술연구원 디지털생산부문, 자체인턴
2. 고려대학교 기계공학과, 한국생산기술연구원 디지털생산부문, 석박통합과정생
3. 한국생산기술연구원, 디지털생산부문, 수석연구원

# 한국생산기술연구원, 디지털생산부문, 수석연구원, E-mail: libra74@kitech.re.kr

# 사출성형공정 모니터링을 위한 엣지 디바이스 개발에 관한 연구

김지우<sup>1</sup>· 윤길상<sup>2</sup>· 김종선<sup>3</sup>· 김종수<sup>#</sup>

## Development of an Edge Device for Process Monitoring in Injection Molding

J. W. Kim, G. S. Yoon, J. S. Kim, J. S. Kim

### Abstract

사출성형은 짧은 생산 시간과 대량 생산에 유리한 특성으로 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있으나, 복잡한 형상 및 고정밀 제품의 수요 증가로 인해 공정 변수 관리의 중요성이 커지고 있다. 기존에는 금형 내부에 센서를 설치하여 용융 수지의 압력이나 온도를 측정하는 방식이 연구되어 왔으나, 센서의 내구성, 설치 구조의 복잡성, 고비용 등의 문제로 일반 산업 현장 적용에는 한계가 있었다. 이에 산업 현장에서는 샷 카운터를 이용한 금형 개폐 신호의 저비용 측정이 이루어지고 있으나, 확보되는 정보가 제한적이라는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 금형 표면에 부착 가능한 엣지 디바이스를 제작하고, 가속도 센서와 온도 센서를 탑재하여 공정 모니터링에 활용하였다. 공정단계 전환 시 발생하는 진동 신호를 측정하고 시간 간격을 분석하여 공정 상태를 모니터링 하였으며, 동시에 금형 표면 온도 변화를 기록하여 기존 샷 카운터 방식의 한계를 보완하였다. 그 결과 기존 대비 설치 편의성과 저비용의 장점을 유지함과 동시에 사출시간 1.17%, 보압시간 0.82%, 사이클 타임 0.38%, 냉각 시간 1.99% 오차의 정확하고 정밀한 공정 사이클 탐지를 구현하였다. 본 연구에서 개발된 센서 기반 엣지 디바이스는 사출성형 이외에도 타이어 가류공정 현장 등 실시간 모니터링과 품질 관리 효율성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Edge device, Injection molding, Monitoring, Temperature, Vibration

### Acknowledgement

이 논문은 2025년도 산업통상자원부의 ‘반도체/디스플레이 부품 제조 생산성 향상을 위한 자율 운영 제조 시스템 기술 개발’, ‘사출성형품의 품질 고도화를 위한 실시간 사출성형 품질 예측 솔루션 개발’의 지원을 받아 연구되었음(RS-2024-00507772, RS-2022-00140364).

---

1. 고려대학교 기계공학과, 한국생산기술연구원 디지털생산부문, 석박통합과정생
2. 한국생산기술연구원 디지털생산부문, 수석연구원
3. 한국생산기술연구원 디지털생산부문, 수석연구원

# 한국생산기술연구원 디지털생산부문, 수석연구원, E-mail: jskimgloria@kitech.re.kr

# 주울 히팅을 이용한 아스팔트패드 통전시간별 융착성 평가

배기만<sup>1</sup>#, 오보라미<sup>2</sup>, 백종진<sup>2</sup>, 강상민<sup>3</sup>, 김유민<sup>3</sup>

## Evaluation of Thermal Melting with Current Flow Time of Asphalt Pad by Joule Heating

K. M. Bae, B. R. M. Oh, J. J. Baek, S. M. Kang, Y. M. Kim

### Abstract

Recently, vibration and noise in auto industry became one of the big issue. Asphalt type vibration damping pads are used to reduce noise and vibration of automobile bodies, and asphalt is used for many mass-produced parts due to its simple attachment process and low processing cost. In this study, the self-adhesion of asphalt pads using Joule heating was evaluated. As the material used in the experiment, the asphalt pad was molded into a certain thickness by using SGACC material and rubber used in the vehicle body as a main component and a modified resin and filler. SGACC material is 200mm in length, 200mm in width and 0.7mm in thickness. Asphalt pad is 200mm in length, 100mm in width and 3mm in thickness. The equipment is composed of TR (Transformer) DC254kVA, and TC (Time controller) consists of 20,000A. Current at Joule heating was set to 7.0kA, 3/1 Cycle and was evaluated the adhesion of asphalt pads over current flow time.

**Keywords:** Joule Heating, Asphalt Pad, Vibration, Thermal Melting, Current Flow

### 후기

이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

(RS-2024-00433194)

---

1. (주)일지테크 기술연구소 선행개발팀 팀장
2. (주)일지테크 기술연구소 선행개발팀 책임
3. (주)일지테크 기술연구소 선행개발팀 선임

# (주)일지테크 기술연구소 선행개발팀 팀장, E-mail: kmbae@iljitech.co.kr

# AIoT 기반 다중 센서 데이터 분석을 통한 공구 수명 예측 연구

박기웅<sup>1#</sup>· 박근혁<sup>1</sup>· 오동현<sup>1</sup>· 임순현<sup>2</sup>

## A study on tool life prediction through AIoT-based Multi-sensor data analysis

K. W. Park, G. H. Park, D. H. Oh, S. H. Lim

### Abstract

최근 제조업의 설비 의존도가 심화됨에 따라, 설비 가동률은 공정 효율과 생산성 전반을 좌우하는 핵심 지표로 인식되고 있다. 이러한 설비 가동률 확보를 위해서는 공정 안전성과 직결되는 공구 수명 관리가 필수적이다. 기존의 공구 수명 평가는 주로 공구의 여유면 마모(flank wear) 관찰과 공작물의 치수 측정 등 사후 검사 위주로 이루어져 실시간 대응과 무인화 구현에 한계가 있다. 본 연구에서는 다중 센서 데이터를 활용한 AIoT 기반 공구의 수명 평가와 예측 기법을 제안하였다. 머시닝센터에서 수집된 진동 및 음향방출 신호를 스펙트럼 및 스펙트로그램으로 변환하여 전처리 및 특징을 추출하고, 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN) 기반 딥러닝 모델을 활용하여 데이터의 특징을 추출 및 학습하였다. 또한 t-SNE 차원 축소기법으로 정상 및 결함 데이터를 시각화하여 구분되는 것을 검증하였다. 실험 결과 공작물의 상태 변화와 센서 신호의 스펙트럼 분석을 통해 정상 및 결함 상태 간 차이가 명확히 구분되었다. 또한, CNN 기반 알고리즘 및 t-SNE 차원 축소 결과에서도 정상 및 결함 간 데이터가 분류되어 AIoT 기반 예측 진단 가능성을 확보할 수 있었다. 향후 다양한 피삭재와 절삭 조건을 반영한 데이터 확보로 알고리즘 고도화, 통합 관리 플랫폼의 개발 등 여러 제조현장에서 범용으로 활용할 수 있는 후속 연구가 필요하다.

**Keywords:** Tool life prediction, AIoT (Artificial intelligence of things), Multi-sensor data analysis

### Acknowledgment

이 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행되었음(과제번호: 20023566)

1. 한국화학융합시험연구원 미래소재기술본부 금속재료센터

2. 울산대학교 고장예측진단연구실

# 한국화학융합시험연구원 미래소재기술본부 금속재료센터, 책임연구원, E-mail: [impact@ktr.or.kr](mailto:impact@ktr.or.kr)

# 차체부품 산업의 확장형 공급망 적용위한 통합형 AI 최적화 플랫폼 구축

최현범<sup>1</sup>· 이서한<sup>1</sup>· 이정우<sup>1</sup>· 이상현<sup>#</sup>

## Building an Integrated AI Optimization Platform for the Application of Extended Supply Chains in the Automotive Parts Industry

H. B. Choi, S. H. Lee, J. W. Lee, S. H. Lee, D. G. Kim, K. Y. Nam

### Abstract

자동차의 소비시장은 전기자동차(Electric Vehicle) 기반으로 자율주행 기술이 발전하면서, 전통적인 내연기관 모델의 차체부품 제조 기반의 업체들이 체감하는 미래 시장에 대한 불확실성은 점차적으로 커지고 있다. 또한, 완정차 OEM의 다품종 소량생산 체제 전환은 차체부품 제조업체들에게 유기적인 대응 및 신흥국 시장의 제조비용, 생산성 경쟁 우위 유지를 위한 전략수립의 방안으로 인공지능(AI, Artificial Intelligence) 기반의 제조시스템 구축이 대두되고 있다. 하지만, 방대한 제조공정 데이터의 변수에 대한 데이터 수집 및 관리시스템 부족으로 양질의 AI모델 학습 데이터 확보 어려움, 급속한 글로벌 환경변화로 인한 자재비 상승 등 예측 불가능한 시장변수로 인하여 AI 자율제조 플랫폼으로 전환이 더디고 있다.

본 연구는 자동차 부품 제조공정을 AI 기반으로 다차종/다품종 차체부품으로 빈 팩킹 그리퍼 형상인식 시스템 구현을 통한 차체부품 제조 및 각 현장별 맞춤형 AMR 및 다지점 관리 모니터링으로 통합물류 시스템을 최적화를 통한 플랫폼 구축에 대하여 제안하고자 한다.

**Keywords:** Autonomous Manufacturing, Bin Pcking, Machine Vision, Logistics Automation

본 연구는 한국산업기술평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)” 수행된 연구결과 입니다.  
(RS-2024-00453431)

---

1#. (주)호원 기술연구소, 선행연구팀장 E-mail:shlee@howon.com

## 열변형 차체부품 교정기 설계

최현범<sup>1</sup>· 이서한<sup>1</sup>· 이정우<sup>1</sup>· 이상현<sup>#</sup>· 김동근<sup>2</sup>· 남경욱<sup>3</sup>

### Design of Heat-deformed CarBody Part Straightener

H. B. Choi, S. H. Lee, J. W. Lee, S. H. Lee, D. G. Kim, K. Y. Nam

#### 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 공정에는 반영되지는 못하고 있다.

본 연구는 초 고장력강을 적용한 범퍼빔 판넬 제작을 둘러 설비를 활용한 성형과 홀/플랜지 가공이 별도로 진행되는 이중적인 생산 설비가 요구되는 둘포밍 공법 대신 현 프레스 냉간 설비를 활용하여 양산 및 경제성을 얻고자 한다. 또한 고장력 강 적용된 범퍼빔 모듈의 조립 제작하면서 발행한 용접열에 의한 변형이 모듈의 품질치수에 영향을 미쳐 수작업으로 진행되는 활동을 대체하기 위하여 강화학습을 통한 AI의 열변형 거동 데이터를 활용하여 변형된 범퍼빔 모듈의 품질치수를 AI가 예측하여 보정데이터를 도출, 값의 입력을 통하여 교정작업을 수행하는 열변형 차체부품 교정기 개발 설계 컨셉을 도출하고자 한다.

**Keywords:** Ultra high strength Steel, Heat deformation, Spot Welding, Reinforcement Learning

본 연구는 한국산업기술평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)” 수행된 연구결과입니다.  
(RS-2024-00453431)

1#. ㈜호원 기술연구소, 선행연구팀장 E-mail:shlee@howon.com

2. 한국자동차연구원 광주지역본부

3. 조선대학교 산학협력단

## 범퍼빔 교정기 개발에 따른 설비용량 도출

최현범<sup>1</sup>· 이서한<sup>1</sup>· 이정우<sup>1</sup>· 이상현<sup>2</sup>· 김동근<sup>2</sup>· 남경욱<sup>3</sup>

### Derivation of Equipment Capacity for Bumper Beam Straightener Development

**H. B. Choi, S. H. Lee, J. W. Lee, S. H. Lee, D. G. Kim, K. Y. Nam**

#### 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 공정에는 반영되지는 못하고 있다.

본 논문은 초 고장력강을 적용한 상용EV 범퍼빔 메인제작을 설비투자가 큰 롤포밍 공법 대신 당사가 보유한 프레스 설비 및 기술을 활용하여 생산 및 용접열에 의한 변형에 대한 치수품질을 확보할수 있는 범퍼빔 교정기 개발을 추진하고자 한다. 숙련된 작업자의 수공정을 대체하기 위하여 AI를 활용하여 열변형 거동 및 보정데이터를 확보하여 이를 데이터 베이스화를 진행을 추진하고 있으며, 초고장력 강 원자재의 적용으로 인한 교정지그의 실 개선을 위한 설비의 용량을 도출하기 위하여 위상 최적화 해석 프로그램을 이용하여 변위 제어별 범퍼빔 판넬 등 부품들의 소성변형 거동을 비교하여 교정지그 설비용량을 도출, 제작에 반영하고자 한다.

**Keywords:** Ultra high strength Steel, Heat deformation, Spot Welding, Reinforcement Learning

본 연구는 한국산업기술평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)” 수행된 연구결과입니다.  
(RS-2024-00453431)

1#. (주)호원 기술연구소, 선행연구팀장 E-mail:shlee@howon.com

2. 한국자동차연구원 광주지역본부

3. 조선대학교 산학협력단

## 가상해석 기반의 차체부품 소재비용 산출

최현범<sup>1</sup>· 이서한<sup>1</sup>· 이정우<sup>1</sup>· 이상현<sup>2</sup>

### Material Cost Estimation for Automotive Body Parts based on Virtual Analysis

H. B. Choi, S. H. Lee, J. W. Lee, S. H. Lee

#### Abstract

자동차 차체부품은 프레스를 활용하여 제작 및 용접을 통하여 차체구조체(BIW, Body In White)를 구성한다. 차체부품은 강성, 경량화, 제조비용 등을 고려하여 설계 및 제작이 진행되며, 최근, 친환경 정책 및 소비시장의 EV모델의 확대됨에 따라 경량화를 통한 주행거리 효율증가의 필요성이 더욱 부각되었다. 특히, 차체부품 제조업체 측에서는 EV모델 개발로 인한 부품 증가로 합리적인 제조비용 산출에 대한 방법론이 대두되고 있다.

본 연구는 차체부품의 하중에 의한 처짐을 해석으로 구현하여 탄성한도 내에서 차체부품의 강성을 일정수준 이상 유지하는 것을 초점에 맞춰 부품 원자재 소재의 두께에 따른 강성 및 조건 부여를 통하여 최적화를 도출하였다. 차체부품 사이드 멤버 인너에 대하여 구조해석 프로그램으로 3점 굽힘 정적 FEM 모델링을 구성한 뒤, ISIGHT 소프트웨어에 조건을 부여하여 반복적인 수행 알고리즘을 통하여 최적화된 소재 두께값을 구하여 경량화 및 소재비용 절감의 기대효과를 도출하여 신규차종 모델 개발 입찰시 제안하고자 한다.

**Keywords:** Automotive body components, Roof member, Optimization, Panel Type, Static stiffness

본 연구는 한국산업기술평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)” 수행된 연구결과입니다.  
(RS-2024-00453431)

# 전기차 배터리 냉각판용 철강 기반 신공정 개발 및 성능 평가

위상권<sup>#</sup>·박재현<sup>1</sup>·최한호<sup>1</sup>·정창규<sup>1</sup>

## Development and Performance Evaluation of a New Steel-Based Process for Electric Vehicle Battery Cooling Plates

S. K. Wee, J. H. Park, H. H. Choi, C. K. Jung

### Abstract

본 연구는 전기차 배터리 냉각판에 기존 알루미늄 소재 대신 스테인리스강과 고내식 도금강판 등 철강재를 적용한 기술 개발과 성능 평가를 수행하였다. 최근 전기차 시장의 확대와 함께 배터리 냉각판의 원가 절감 및 내구성 향상에 대한 요구가 증가함에 따라, 저원가형 철강 소재의 적용 가능성을 검토하였다. 냉각판의 상판은 알루미늄, 하판은 스테인리스강(STS304L, 409L) 및 도금강판(EG, POSMAC) 등 다양한 소재 조합을 대상으로 수밀성, 냉각 성능, 접합 강도, 파열 성능 등 주요 성능을 평가하였다. 냉각 성능은 배터리셀 층·방전 시 발생하는 열을 냉각수로 전달하여 배터리 온도를 기준 온도 이하로 유지할 수 있는지 시제품 평가를 통해 검증하였다. 접합 강도는 에폭시계 및 아크릴계 접착제 본딩, 기계적 접합(클린칭), 스폽 용접 등 다양한 공정을 적용하여 수밀성과 파열 성능을 평가하였다. 간이형(300×300mm)부터 풀 사이즈(1,178×1,882mm)까지 다양한 크기의 냉각판을 제작하여 실험한 결과, 아크릴계 접착제와 클린칭을 병행할 경우 파열압 3.0bar 이상을 만족하는 성능을 확보할 수 있었다. 소재별로는 상판 두께가 두꺼울수록 파열 성능이 우수하였다. 냉각 성능 평가에서는 스테인리스강 적용 시 알루미늄 대비 배터리셀의 온도 상승폭이 1°C 내외로 관리 가능하였다. 이러한 평가를 통해 냉각판에 스테인리스강을 적용해도 배터리 수명 및 안전성에 큰 영향이 없는 수준임을 확인하였다. 본 연구 결과, 철강 기반 배터리 냉각판의 원가 절감, 내구성 및 성능 확보 가능성을 실증하였으며, 향후 대량 생산 및 다양한 전기차 플랫폼 적용을 위한 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** Electric Vehicle, Battery Pack, Cooling Plate, Stainless Steel, Galvanized Steel

---

# POSCO 철강솔루션연구소, 성형연구그룹, 수석연구원, E-mail: skwee@posco.com

1. POSCO 철강솔루션연구소, 성형연구그룹, 수석연구원