

# 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 1  
JANUARY 2026

ISSN 1225-9071 (Print)  
ISSN 2287-8769 (Online)

# 취임사



**이상원**  
성균관대학교

존경하는 한국정밀공학회 회원 여러분,

2026년 새해를 맞이하며, 제31대 회장으로서는 여러분께 인사를 드리게 되어 큰 영광으로 생각합니다. 창립 이후 40여 년간 우리 학회가 이룩해 온 눈부신 성장은 역대 회장단과 임원진, 그리고 각자의 자리에서 학회를 지켜주신 회원 여러분과 사무국의 헌신적인 노력 덕분입니다. 이 자리를 빌려 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

오늘날 우리는 정치·경제·산업 전반에 걸친 불확실성과 급격한 기술 전환의 시대를 마주하고 있습니다. 이러한 변화 속에서 한국정밀공학회는 정밀공학 분야의 중심 학회로서, 학문적 책임을 넘어 국가 산업과 사회 전반의 혁신에 기여해야 할 시대적 책무를 안고 있습니다. 이에 저는 KSPE Vision 2030을 새로운 관점에서 점검하고, AI 전환과 산업 구조 변화, 글로벌 경쟁 환경을 반영하여 학회의 미래 방향을 보다 확장적으로 재정립하고자 합니다. 회원 여러분의 소중한 의견을 바탕으로 다음과 같은 중점 과제를 추진하고자 합니다.

## 1. AI 전환을 선도하는 학회

정밀공학은 이제 전통적인 초정밀 가공과 측정 등의 영역을 넘어, 데이터와 AI를 기반으로 스스로 판단하고 진화하는 영역으로 확장되고 있습니다. 이에 제조 AI, 디지털 트윈, 지능형 공정 제어, 예측·자율 최적화 기술은 정밀공학의 새로운 핵심 축이 되고 있습니다. 따라서 학회는 이러한 흐름을 선도하기 위해 AI 기반 정밀공학 연구를 적극적으로 포용하고, 학술대회와 학술지를 통해 관련 연구 교류와 담론 형성을 강화하겠습니다. 이를 통해 한국정밀공학회가 AI 전환 시대의 제조 및 정밀공학을 대표하는 학회로 자리매김하도록 하겠습니다.

## 2. 학술지 개방화와 지식 생태계 확장

우리 학회의 학술지인 한국정밀공학회지(JKSPE), IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology는 이미 국제적으로 높은 평가를 받고 있습니다. 특히 지난 2025년 모든 국제학술지의 완전한 오픈 액세스(Full Open Access) 계약을 체결하였고 EM(Editorial Management) 시스템을 정비하는 등 학계는 물론 산업계와 미래 세대 연구자들이 최신 연구 성과에 보다 쉽게 접근할 수 있는 체계를 마련하였습니다. 이를 통해 단순한 논문 게재를 넘어, AI·데이터 기반 연구와 산업 연계 연구가 자유롭게 공유되는 개방형 지식 플랫폼으로 발전시켜 나가겠습니다.

## 3. 산학연 협력의 실질적 고도화

정밀공학은 자동차, 반도체, 배터리 산업을 넘어 로봇, 국방, 바이오·메디컬, 차세대 제조 등 다양한 산업 전반과 긴밀히 연결되어 있습니다. 이제 산학연협력은 단순한 기술 이전을 넘어, 공동 문제 정의와 공동 혁신을 이루는 전략적 파트너십으로 발전해야 합니다. 학술대회 산업체 세션의 고도화, 산업계·연구소의 학회 참여 확대, 문제 해결형 산학연 프로그램을 통해 AI 전환 시대 학회가 산업 혁신의 실질적 연결 허브가 되도록 노력하겠습니다.

#### 4. 국제화와 글로벌 위상 강화

우리 학회의 학문적 성과는 이미 세계적 수준에 도달해 있습니다. 이제는 이를 넘어 글로벌 정밀공학 생태계를 선도하는 학회로 도약해야 할 시점입니다. 국제 공동학술대회, 글로벌 학회와의 전략적 협력, 젊은 연구자 국제 교류를 확대하여, 국내 연구 성과가 세계 무대에서 지속적으로 논의되고 확산될 수 있는 기반을 구축하겠습니다. 이를 통해 한국정밀공학회가 아시아를 넘어 글로벌 정밀공학 커뮤니티의 핵심 축으로 자리매김하도록 하겠습니다.

#### 5. 학회의 외연 확장과 미래 세대 육성

학회의 지속가능한 발전은 미래 세대에 달려 있습니다. 신진 연구자와 대학원생, 그리고 융합 분야 연구자들이 학회를 통해 성장과 도전을 경험할 수 있도록, 학회의 문을 더욱 넓게 열겠습니다.

정밀공학의 경계를 확장하여 로봇, AI, 모빌리티, 에너지, 스마트 제조 등 인접 분야와의 융합을 강화하고, 젊은 연구자들이 주도적으로 참여할 수 있는 열린 학회 문화를 만들어 가겠습니다.

존경하는 회원 여러분,

2026년은 한국정밀공학회가 전통 위에 혁신을 더해 새로운 외연으로 확장하는 전환의 해가 되어야 합니다. 저는 회장으로서 회원 여러분과 함께 고민하고, 함께 도전하며, 함께 미래를 만들어 가고자 합니다. 회원 여러분의 적극적인 참여와 지혜를 부탁드립니다. 모든 회원님의 건승과 학회의 지속적인 발전을 위해 최선을 다해 노력하겠습니다.

감사합니다.

2026년 1월  
사단법인 한국정밀공학회 2026년 회장 이상 원



# 이 임 사



**안 성 훈**  
서울대학교

회원 여러분, 2026년 새해, 희망찬 기운이 가득하시기를 바랍니다.

2025년 한 해, 한국정밀공학회 회장으로서 회원 여러분과 함께한 귀한 시간을 돌아보며 이임의 말씀을 전합니다. 지난 한 해 동안 학회를 위해 봉사할 수 있었던 것은 제게 큰 영광이자 잊지 못할 보람이었습니다. 이 자리를 빌려 학회 발전을 위해 헌신해 주신 임직원 여러분과 적극적으로 참여해 주신 회원 여러분께 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

우리 학회는 지난 40년간 정밀공학 분야를 넘어 기계, 제조, AI, 로봇틱스까지 아우르며 대한민국 과학기술과 산업 발전을 이끄는 국제적인 학술 단체로 굳건히 자리매김해 왔습니다. 지난 한 해 동안 학회는 여러 분야에서 의미 있는 성과를 이루었으며, 미래를 향한 중요한 변화를 추진했습니다. 특히 국제학술지인 IJPPEM, IJPPEM-Green Technology, IJPPEM-Smart Technology를 Open Access 저널로 전환하기 위해 옥스퍼드 대학교 출판사와 계약을 체결하였고, 1년간의 준비를 거쳐 2027년부터 누구나 무료로 우리 국제학술지의 내용을 접근하고 활용할 수 있게 되었습니다. 또한 PRESM 학술대회를 통해 글로벌 네트워크를 더욱 확장하였으며, 춘·추계 학술대회 참석자 수도 꾸준히 증가하여 학회의 활기를 더했습니다. 더불어 국내외 저명 연구자의 업적을 기리기 위한 KSPE Fellow 제도를 정비하고, 미래발전위원회, 산학협력위원회, 초정밀 위치결정연구회를 새롭게 신설하여 젊은 연구자와 산업체 회원들의 참여를 확대하고 학회 활동에 새로운 동력을 불어넣었습니다. 이러한 변화와 성과는 우리 학회의 학문적 위상을 한층 높이고 정밀공학 발전에 크게 기여할 것입니다.

한국정밀공학회는 우리나라 과학기술, 산업, 경제, 문화 전반에 걸쳐 중요한 영향력을 행사하는 기관임을 늘 깊이 인식하고 있습니다. 앞으로 마주할 국내외의 도전과 변화 속에서도 우리 학회가 지혜와 역량을 모아 이를 극복하고 새로운 시대를 선도해 나갈 것이라고 확신합니다.

지난 한 해 동안 베풀어 주신 따뜻한 관심과 격려에 다시 한번 진심으로 감사드립니다. 2026년 한 해가 회원 여러분 모두에게 건강과 행복, 그리고 학문적 성취로 가득한 한 해가 되기를 진심으로 기원합니다. 아울러 새롭게 한국정밀공학회를 이끌어 가실 이상원 신임 회장님과 임직원 여러분께도 무궁한 발전과 행운이 함께하시기를 바랍니다.

감사합니다.



2026년 1월  
사단법인 한국정밀공학회 2025년 회장 안 성 훈

# 사단법인 한국정밀공학회 2026년 임원



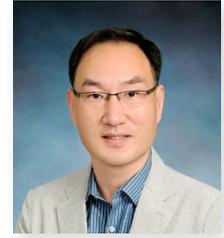
회장 **이상원**  
성균관대학교



수석부회장 **오정석**  
한국기계연구원



부회장 **김규만**  
경북대학교



부회장 **안형준**  
송실대학교



부회장 **김호찬**  
국립경국대학교



부회장 **류상문**  
(주)DN솔루션즈



부회장 **박상후**  
부산대학교



부회장 **성대운**  
현대자동차(주)



부회장 **이영수**  
삼성전자



부회장 **이인환**  
충북대학교



부회장 **최영재**  
한국생산기술연구원



감사 **이동원**  
전남대학교



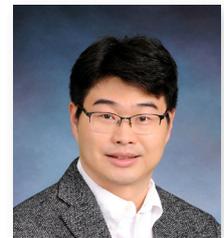
감사 **현승민**  
한국기계연구원



총무이사 **곽문규**  
경북대학교



총무이사 **김남근**  
서강대학교



총무이사 **김보현**  
송실대학교



총무이사 **문두환**  
고려대학교



재무이사 **고승환**  
서울대학교



재무이사 **김양진**  
부산대학교



재무이사 **김태곤**  
한국생산기술연구원



재무이사 **이창우**  
건국대학교



편집이사 **강봉철**  
국민대학교



편집이사 **강현욱**  
UNIST



편집이사 **김동립**  
한양대학교



편집이사 **김산하**  
KAIST



편집이사 **김석민**  
중앙대학교



편집이사 **김영진**  
KAIST



편집이사 **김해진**  
연세대학교



편집이사 **김효영**  
한국공학대학교



편집이사 **박근**  
서울과학기술대학교



편집이사 **박영빈**  
UNIST



편집이사 **박인규**  
KAIST



편집이사 **손정우**  
국립금오공과대학교



편집이사 **안지환**  
POSTECH



편집이사 **오기용**  
한양대학교



편집이사 **윤준영**  
연세대학교



편집이사 **윤헌준**  
송실대학교



편집이사 **윤희택**  
KAIST



편집이사 **이광일**  
경일대학교



편집이사 **이동훈**  
송실대학교



편집이사 **이운석**  
서울대학교



편집이사 **이현택**  
인하대학교



편집이사 **이호원**  
서울대학교



편집이사 **정구현**  
울산대학교



편집이사 **정훈익**  
UNIST



편집이사 **주백석**  
국립금오공과대학교



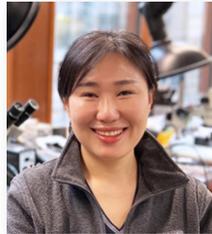
편집이사 **진종한**  
㈜미터랩



편집이사 **천두만**  
울산대학교



편집이사 **추원식**  
경상국립대학교



사업이사 **강운정**  
제주대학교



사업이사 **강태준**  
인하대학교



사업이사 **권지연**  
동국대학교



사업이사 **김무림**  
한국로봇융합연구원



사업이사 **김종백**  
연세대학교



사업이사 **김진호**  
영남대학교



사업이사 **김흥수**  
Eloi MaterialS (EML)



사업이사 **김현준**  
경북대학교



사업이사 **박석희**  
부산대학교



사업이사 **박용재**  
강원대학교



사업이사 **박준**  
한국광기술원



사업이사 **서진호**  
국립부경대학교



사업이사 **송용남**  
고려대학교



사업이사 **신현정**  
KAIST



사업이사 **안상훈**  
한국기계연구원



사업이사 **윤주성**  
경남대학교



사업이사 **이문구**  
아주대학교



사업이사 **이봉기**  
전남대학교



사업이사 **이원균**  
충남대학교



사업이사 **이지혜**  
한국기계연구원



사업이사 **이현섭**  
동아대학교



사업이사 **이현욱**  
한국철도기술연구원



사업이사 **임지석**  
영남대학교



사업이사 **장진아**  
POSTECH



사업이사 **정영훈**  
경북대학교



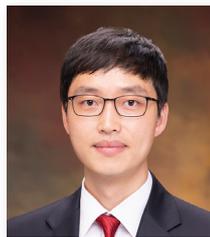
사업이사 **정재일**  
국민대학교



사업이사 **조영삼**  
원광대학교



사업이사 **주기남**  
조선대학교



사업이사 **최정욱**  
중앙대학교



사업이사 **한민우**  
동국대학교



기획홍보이사 **류시형**  
전북대학교



기획홍보이사 **이동운**  
한국생산기술연구원



기획홍보이사 **이주연**  
서울과학기술대학교



기획홍보이사 **허세곤**  
한국기계연구원



기획홍보이사 **김동성**  
POSTECH



국제이사 **김미소**  
KAIST



국제이사 **김영범**  
한양대학교



국제이사 **김창주**  
한국기계연구원



국제이사 **남정수**  
한국생산기술연구원



국제이사 **노준석**  
POSTECH



국제이사 **맹상진**  
홍익대학교



국제이사 **박형욱**  
UNIST



국제이사 **송지현**  
단국대학교



국제이사 **이동진**  
건국대학교



국제이사 **전용호**  
아주대학교



국제이사 **조영태**  
국립창원대학교



국제이사 **차석원**  
서울대학교



국제이사 **홍성태**  
울산대학교



대외협력이사 **권석진**  
한국철도기술연구원



대외협력이사 **김건희**  
국립한밭대학교



대외협력이사 **김민찬**  
(주)DN솔루션즈



대외협력이사 **김종혁**  
위아공작기계(주)



대외협력이사 **송시한**  
(주)와이지-원



대외협력이사 **심창섭**  
한국산업기술기획평가원



대외협력이사 **이강재**  
(주)DN솔루션즈



대외협력이사 **이재열**  
한국로봇융합연구원



대외협력이사 **장원석**  
한국기계연구원



대외협력이사 **조영환**  
LIG넥스원(주)



대외협력이사 **조정대**  
한국기계연구원



대외협력이사 **최정오**  
LG전자



대외협력이사 **한국현**  
(주)삼영기계

## Editor-in-Chief

**Bo Hyun Kim**

Soongsil University  
bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

**Jihwan An**  
POSTECH

**Younghak Cho**  
Seoul National University of Science & Technology

**Baeksuk Chu**  
Kumoh National Institute of Technology

**Won-Shik Chu**  
Gyeongsang National University

**Doo-Man Chun**  
University of Ulsan

**Koo Hyun Chung**  
University of Ulsan

**Jihong Hwang**  
Seoul National University of Science & Technology

**Yongho Jeon**  
Ajou University

**Jonghan Jin**  
Meter-Lab. Inc.

**Maolin Jin**  
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

**Bongchul Kang**  
Kookmin University

**Sung-Mook Kang**  
Daegu Catholic University

**Hyun-Wook Kang**  
UNIST

**Yang Jin Kim**  
Pusan National University

**Hyo-Young Kim**  
Korea Polytechnic University

**Sanha Kim**  
KAIST

**Namkeun Kim**  
Sogang University

**Chang-Ju Kim**  
Korea Institute of Machinery & Materials

**Dong Sung Kim**  
POSTECH

**Seung Hwan Ko**  
Seoul National University

**Moonkyu Kwak**  
Kyungpook National University

**Hyunseop Lee**  
Dong-A University

**HyunWook Lee**  
Korea Railroad Research Institute

**Changwoo Lee**  
Konkuk University

**Chang-Whan Lee**  
Seoul National University of Science & Technology

**Kwang-Il Lee**  
Kyungil University

**Duhwan Mun**  
Korea University

**Jungjae Park**  
Meter-Lab. Inc.

**Hyung Wook Park**  
UNIST

**MinSoo Park**  
Seoul National University of Science & Technology

**Jung Woo Sohn**  
Kumoh National Institute of Technology

## Members of Editorial Board

**Sanghoon Ahn**  
Korea Institute of Machinery & Materials

**Dahoon Ahn**  
Seoul National University of Science & Technology

**Dongwhi Choi**  
Kyung Hee University

**Young-Man Choi**  
Ajou University

**Jungwook Choi**  
Chung-Ang University

**Jin-Seung Choi**  
Konkuk University

**Min-Woo Han**  
Dongguk University

**Segon Heo**  
Korea Institute of Machinery & Materials

**Jinah Jang**  
POSTECH

**Ki Nam Joo**  
Chosun University

**Woo Kyun Kim**  
University of Cincinnati

**Gap-Yong Kim**  
Iowa State University

**Beomjoon Kim**  
University of Tokyo

**Patrick Kwon**  
San Diego State University

**Wonkyun Lee**  
Chungnam National University

**Howon Lee**  
Seoul National University

**Bong-Kee Lee**  
Chonnam National University

**Hyun-Taek Lee**  
Inha University

**Sangjin Maeng**  
Hongik University

**Sangkee Min**  
University of Wisconsin-Madison

**Simon Park**  
University of Calgory

**Suk-Hee Park**  
Pusan National University

**Heonjun Yoon**  
Soongsil University

**Hae-Sung Yoon**  
Korea Aerospace University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

**VOLUME 43, NUMBER 1 / January 2026**

ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

**Aims and Scope** The Journal of the Korean Society for Precision Engineering is devoted to publishing original research articles on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on various fields including: Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology.

**Year of Launching** Journal of Korea Society for Precision Engineering was launched by the Korea Society for Precision Engineering in June of 1984. The name was changed to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering in December of 1985.

**Abbreviation of Title** J. Korean Soc. Precis. Eng.

**Full Text Available** at <http://jkspe.kspe.or.kr/>

**Indexed in** SCOPUS, Korea Citation Index (KCI) and Korea Science

**Subscription Fee** Free to KSPE Members (Membership Fee: 50,000 KRW per Year)

**Published on** January 1, 2026 (Monthly)

**Published by** The Korean Society for Precision Engineering

**Publisher** Sang Won Lee (President, KSPE)

**Manuscript Editor** So Jin Kim

**Journal Office** 12F, SKY 1004 Bldg., 50-1 Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul, 04508, Republic of Korea / TEL +82-2-518-2928 / FAX +82-2-518-2937 / [paper@kspe.or.kr](mailto:paper@kspe.or.kr) / <http://www.kspe.or.kr>

**Printed by** Hanrimwon Co., Ltd.

**Copyright** © The Korean Society for Precision Engineering

This work was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies (KOFST) Grant funded by the Korean Government.

## 목차

### 일 반

- 13 파이프라인 누출 탐지를 위한 컨볼루션 뉴럴 네트워크를 이용한 유연 음향 방출 센서 신호 분류  
박병재
- 21 자동차 전장용 커넥터의 미동마멸 부식 특성 측정을 위한 시험장치 개발  
김정현, 이상훈
- 29 다양한 발사 환경을 고려한 쿼드콥터형 캔위성의 구조 설계와 안전성 연구  
이용선, 임현규, 양현창, 최창범, 노진성
- 37 대테러 보안 점검을 위한 천장 위험물 탐색 로봇  
이상웅, 고대권, 이명석, 송형석, 표주현, 서진호, 김무림
- 47 스피들 진동 신호 검출에 의한 오토인코더 기반 밀링 절삭력 모니터링  
류제두, 이정민, 김성렬, 이민철
- 55 정전기 분무 증착법으로 제작된 Lithium Lanthanum Titanate 박막의 광소결 전압에 따른 미세구조 및 화학적 특성 분석  
김선민, 송인석, 안효준, 김민지, 김영범
- 61 미세 방전 가공에서 형성되는 방전흔 형상에 대한 실험적 분석  
김재연, 이의석, 공희진, 김보현
- 69 볼바를 이용한 원호 테스트를 통한 6축 직렬 로봇의 기구학적 파라미터 추정  
전흥기, 권성환, 이광일, 양승한
- 79 폴리머 튜브 압출 공정 변수에 따른 의료용 풍선의 기계적 성능 변화 연구  
이진수, 김규만, 이성권, 김우진, 이은택
- 91 압출 분주 시스템을 이용한 텅스텐 평면 패턴의 잉크직접인쇄  
이민형, 최승현, 유재욱, 박지수, 권혁천, 이호창, 오성욱, 최승곤, 최인구, 이길용
- 99 액화 천연가스 화물 펌프 내 유동 특성에 의한 인두서 최적설계  
송지훈, 이동렬
- 105 정전 대전된 입자의 이온중화기에 의한 대전량 저감에 대한 연구  
김덕형, 이성빈, 김건호, 고성현, 박희성
- 113 레이저 변조에 따른 목재 상 레이저-유도 그래핀 성능 평가  
하형준, 최형렬, 김도정, 김영진, 남한구

# JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 1 / January 2026

ISSN 1225-9071 (Print)  
ISSN 2287-8769 (Online)

## CONTENTS

### REGULAR

- 13 Flexible Acoustic Emission Sensor Signal Classification Using Convolutional Neural Networks for Pipeline Leak Detection  
**Byungjae Park**
- 21 Development of the Fretting Corrosion Test Equipment for the Automotive Electrical Connector  
**Jeong Hyun Kim and Sang Hoon Lee**
- 29 Structural Design and Analysis of a Quadcopter Type CanSat for Diverse Launch Conditions  
**Yongseon Lee, Hyeongyu Lim, Hyeonchang Yang, Changbeom Choi, and Jinsung Rho**
- 37 Ceiling Hazardous Object Inspection Robot for Counter-terrorism Security Check  
**Sangwoong Lee, Daegwon Koh, Meungsuk Lee, Hyeongseok Song, Juhyun Pyo, Jinho Suh, and Murim Kim**
- 47 Autoencoder-based Milling Cutting Force Monitoring by Spindle Vibration Signal Detection  
**Je-Doo Ryu, Jung-Min Lee, Sung-Ryul Kim, and Min Cheol Lee**
- 55 Effect of Flash-light Sintering Voltage on the Microstructure and Chemical Properties of Lithium Lanthanum Titanate Thin Films Prepared by Electrostatic Spray Deposition  
**Sun Min Kim, In Suk Song, Hyo Jun Ahn, Min Ji Kim, and Young-Beom Kim**
- 61 Experimental Study on the Formation of Discharge Crater Morphology in Micro EDM  
**Jae Yeon Kim, Ui Seok Lee, Hee Jin Kong, and Bo Hyun Kim**
- 69 Estimation of Kinematic Parameters of a 6-Axis Serial Robot through a Circular Test Using a Double Ball-Bar  
**Heung Ki Jeon, Sung Hwan Kweon, Kwang Il Lee, and Seung Han Yang**
- 79 Study on the Variation in Mechanical Performance of Medical Balloons depending on Polymer Tube Extrusion Process Variables  
**Jin Su Lee, Gyu Man Kim, Sungkwon Lee, Woojin Kim, and Euntaek Lee**
- 91 Direct Ink Writing of Tungsten Planar Patterns by Extrusion-based Dispensing System  
**Min-Hyeong Lee, Seung-Hyeon Choi, Jae-Wook Yu, Ji-Su Park, Hyuk-Chun Kwon, Ho-Chang Lee, Seong-Uk Oh, Seung-Gon Choi, In-Gu Choi, and Gil-Yong Lee**
- 99 Optimal Design of Inducer by Flow Characteristics in LNG Cargo Pump  
**Jihun Song and Dong-Ryul Lee**
- 105 Study on the Reduction of Charge in Electrostatically Charged Particles Using a Neutralizer  
**Deokhyeong Kim, Sungbin Lee, Geonho Kim, Seonghyun Ko, and Heesung Park**
- 113 Performance Evaluation of Laser-induced Graphene on Wood under Laser Modulation  
**Hyungjun Ha, Hyeong Ryeol Choi, Do-Jeong Kim, Young-Jin Kim, and Han Ku Nam**

# 파이프라인 누출 탐지를 위한 컨볼루션 뉴럴 네트워크를 이용한 유연 음향 방출 센서 신호 분류

## Flexible Acoustic Emission Sensor Signal Classification Using Convolutional Neural Networks for Pipeline Leak Detection

박병재<sup>1,#</sup>  
Byungjae Park<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 한국기술교육대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education)  
# Corresponding Author / E-mail: bjp@koreatech.ac.kr  
ORCID: 0000-0002-8952-0736

KEYWORDS: Acoustic emission (음향 방출), Spectrogram (스펙트로그램), Convolutional neural network (컨볼루션 뉴럴 네트워크), Pipeline monitoring (파이프라인 모니터링)

*This paper presents a method for the real-time detection of pipeline leaks using flexible Acoustic Emission (AE) sensors. The signals gathered from the AE sensor are transformed into RGB images through the application of Mel-spectrogram and color coding. These converted images serve as input for a Convolutional Neural Network (CNN) based on ResNet18. With this approach, both the presence and intensity of leaks in a pipeline can be identified using the AE sensor. The effectiveness of the proposed method was validated through data collected from a testbed featuring a galvanized pipe.*

Manuscript received: February 14, 2025 / Revised: June 24, 2025 / Accepted: August 30, 2025

### 1. 서론

파이프라인은 플랜트 등 제조 시설에서 액체와 기체를 수송하는 데 널리 사용된다. 파이프라인이 다양한 요인으로 손상되면 대량의 액체나 기체가 유출되어 환경 오염과 경제적 손실을 초래한다. 이를 예방하려면 파이프라인의 실시간 모니터링이 필요하다. 여러 기법이 실시간 모니터링에 활용되고 있다.

음향 방출(Acoustic Emission, AE) 센서는 재료 내부에서 발생하는 미세 균열, 변형, 마찰 등에 의해 생성되는 고주파 탄성파를 실시간으로 감지하는 비파괴 검사(Nondestructive Evaluation, NDE)에 사용된다. AE 센서는 주로 압전효과를 이용하여 탄성파를 전기 신호로 변환하며, 이를 통해 구조물 내부의 손상 발생 및 진행 상황을 모니터링할 수 있다[1]. AE 센서는 높은 감도와 빠른 응답 특성을 가지므로, 미세한 변화를 조기에 검출할 수 있는 장점을 가진다. 그리고 AE 센서는 기존의 초음파 검사 등 다른 NDE 기법에 비해 설치가 간편하고 실시간 모니터링 시스템에

적합하다[2]. 그러나 외란 신호와의 구분, 신호 전파 경로의 복잡성 등으로 인해 여러 가지 신호 처리 기법의 적용을 필요로 한다.

AE 파이프라인 표면에 부착하여 소음을 측정할 수 있다. AE 센서는 작은 소음까지 탐지할 수 있고, 크기가 작아 설치가 용이하다. 그러나 노이즈의 영향을 많이 받는 단점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 AE 신호를 활용한 다양한 방법이 제안되었다.

AE 센서를 이용하여 파이프라인의 누출을 탐지하기 위해서 머신 러닝을 이용한 다양한 방법이 제안되어 왔다. 힐베르트-황 변환(Hilbert-huang Transform, HHT)과 도착 시간 차 분석(Time Difference Of Arrival, TDOA)을 기반으로 파이프라인 모니터링 시스템에서 타깃 위치를 추정하는 방법이 제안되었다[3]. 튜닝된 웨이블릿 변환을 통해 물이 충전된 플라스틱 파이프 내 AE 신호의 시간 및 주파수 특성을 정밀하게 분석하여 누출 검출 성능을 향상시키는 방법이 제안되었다[4]. 러프 셋 이론을 활용하여 데이터 차원을 축소한 후 인공벌집(Artificial Bee Colony, ABC) 알고리즘으로 최적화된 서포트 벡터 머신(Support Vector

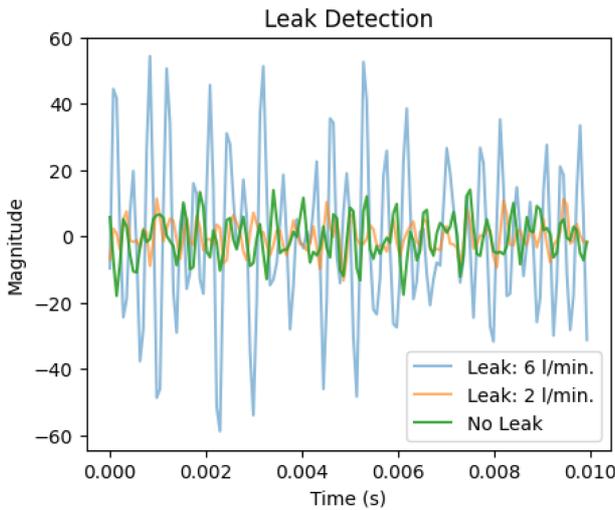


Fig. 1 Acoustic emission signals

Machine, SVM)을 적용해 누출 여부를 분류, 오탐률을 낮추는 접근법이 제안되었다[5]. 동적 압력 송신기와 웨이블릿 패킷 엔트로피(Wavelet Packet Entropy, WPE)를 결합하여 장거리 가스 파이프라인에서 누출을 탐지하는 방법이 제안되었다[6]. 최적의 웨이블릿 변환과 SVM을 이용해 가스 파이프라인의 누출 상태를 매우 높은 정확도로 분류하는 방법이 제안되었다[7].

최근 들어 파이프라인 누출 탐지에 딥러닝을 적용한 여러 가지 방법들이 제안되고 있다. 다중 스케일 멀티스케일 컨볼루션 신경 네트워크(Multiscale Fully Convolutional Networks, MFCN)을 활용하여 도시 상수도 네트워크의 누출 탐지 및 물 손실 관리 시스템을 구현하는 방법이 제안되었다[8]. 롱-텀 숏-텀 메모리 네트워크(Long Short Term Memory Network, LSTM) 오토 인코더(Auto Encoder)와 1-Class SVM을 결합한 반지도 학습 기법을 통해 천연가스 파이프라인의 누출을 높은 정확도로 검출하는 방법이 제안되었다[9]. CNN과 양방향 LSTM (Bidirectional Long-term Short-term Memory, BiLSTM)을 결합하여 공간적 및 시간적 특징을 효과적으로 모델링함으로써 가스 누출의 발생 및 크기 분류를 신속하게 수행하는 방법이 제안되었다[10]. 푸리에(Fourier) 변환 기반 스펙트로그램과 최적화된 CNN을 결합하여 파이프-인-파이프(Pipe-in-Pipe, PIP) 구조 내 열 및 기체의 누출 문제를 해결하는 방법이 제안되었다[9]. 누출 민감도 지표와 1-D CNN을 결합하여 다양한 유체 압력 조건 하에서도 누출 발생 및 크기를 정확하게 식별하는 방법이 제안되었다[11].

앞에서 언급한 대부분의 방법은 AE 신호를 시간-도메인과 주파수-도메인에서 다양한 피쳐를 추출하는 전처리 과정을 거친다. 멜-스펙트로그램은 신호의 시간-주파수 특성을 동시에 시각화 한 것으로 신호를 이미지 형태로 표현할 수 있기 때문에 AE 신호의 시간-주파수 공간에서의 패턴을 잘 표현할 수 있는 장점이 있다[12]. 멜-스펙트로그램은 이미지와 유사한 형태를 가지고 있기 때문에 이미지를 처리하는 방식과 같은 방법으로 CNN 모델의 입력으로 사용할 수 있다[9,13,14].

본 논문에서는 파이프라인 누출을 탐지하기 위해 컨볼루션 신경 네트워크(Convolutional Neural Network, CNN)를 사용하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 AE 신호를 이미지 형태로 변환한 후 CNN에 입력한다. 그리고 수집한 AE 신호를 변환하는 과정에서 컬러 코딩을 사용하여 기존의 검증된 이미지 처리 모델을 활용할 수 있도록 한다. 제안하는 방법은 두 가지 장점을 가지고 있다. 1) 전통적인 머신 러닝 기반의 방법과 달리 신호 처리를 위한 피쳐 엔지니어링(Feature Engineering)을 필요로 하지 않는다. 2) 신호 처리를 위하여 검증된 이미지 분류를 위한 CNN 모델 구조를 활용할 수 있다.

이 방법은 누출 발생과 누출 강도를 분류할 수 있다. 구축한 테스트베드에서 수집한 데이터 셋을 이용해 제안한 방법의 성능을 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 관련 연구를 소개한다. 3장과 4장에서는 제안하는 방법에 대해 설명과 제안하는 방법의 성능을 보여준다. 5장에서는 결론과 향후 과제를 논의한다.

## 2. 파이프라인 누출 탐지

본 논문에서 제안하는 파이프라인 누출 탐지 방법은 다음 두 단계로 구성된다. 1) AE 신호의 이미지 변환, 2) CNN을 이용한 정상 및 비정상 상태 분류.

### 2.1 AE 신호 변환

AE 신호를 이미지 형태로 변화시키기 위하여 제안하는 방법에서는 멜-스펙트로그램(Mel-spectrogram)을 사용하였다[12]. 멜-스펙트로그램은 신호의 시간-주파수 특성을 시각화 한 것으로 신호를 이미지 형태로 표현할 수 있다. 멜-스펙트로그램은 신호의 시간-주파수 특성을 인간의 청각 특성을 고려할 수 있도록 변환된 이미지 형태의 주파수 축을 멜 스케일을 적용한다. AE 신호를 멜-스펙트로그램을 이용해 이미지 형태로 변환하기 위해서는 다음과 같은 절차를 거친다. 1) 단시간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform, STFT), 2) 파워 스펙트럼 계산, 3) 멜 필터 적용.

STFT는 입력 신호  $x[n]$ 에 대해서 짧은 시간 윈도우를 적용하여 시간-주파수 영역으로 변환한다.

$$X(m, k) = \sum_{n=0}^{N+1} x_m[n] e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (1)$$

식(1)에서  $m$ 은 프레임 인덱스,  $k$ 은 주파수 히스토그램 bin의 인덱스, 그리고  $x_m[n]$ 은  $m$ 번째 신호 프레임이다. STFT에 의해 변환된 신호 프레임을 바탕으로 파워 스펙트럼을 계산한다.

$$P(m, k) = |X(m, k)|^2 \quad (2)$$

멜-스펙트럼은 삼각형 형태의 필터를 적용하여 구한다.

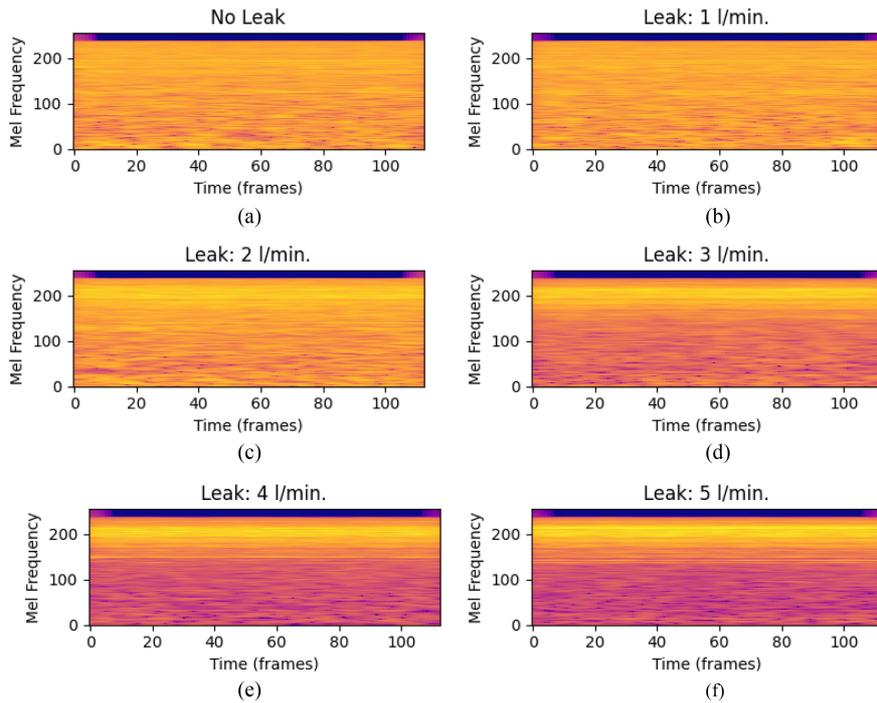


Fig. 2 Plasma color-coded Mel-Spectrogram of an acoustic emission signal

Table 1 ResNet18-based model

Layer name	Output size	Layers
conv1	112 × 112	-
conv2_x	56 × 56	2 × [3 × 3, 64]
conv3_x	28 × 28	2 × [3 × 3, 128]
conv4_x	14 × 14	2 × [3 × 3, 256]
conv5_x	7 × 7	2 × [3 × 3, 512]
Output	1 × 1	average pool, 6-d fc, softmax
FLOPs		2.55 × 10 <sup>9</sup>

Table 2 Hyper parameters

Name	Value
Image size (H × W)	128 × 256
Batch size	256
Num. epoch	900
Learning rate	1.0e-6

$$S(m, i) = \sum_{k=0}^{N-1} P(m, k) H_i(f_k) \quad (3)$$

식(3)에서  $H_i$ 와  $f_k$ 는 멜-필터와  $k$  번째 주파수 히스토그램 빈의 인덱스에 해당하는 주파수를 의미한다. 사용된 멜-필터 멜 스케일에 따라 식(4)와 같이 계산된다.

$$H_i(f) = \begin{cases} \frac{f-f_{i-1}}{f_i-f_{i-1}} & f_{i-1} \leq f \leq f_i \\ \frac{f_{i+1}-f}{f_{i+1}-f_i} & f_i \leq f < f_{i+1}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

식(4)에서  $f_{i-1}$ ,  $f_i$ ,  $f_{i+1}$ 은  $i$  번째 필터의 각각 최소, 중간, 최고 주파수를 의미하며 멜 스케일과 주파수의 관계는 식(5)와 같다.

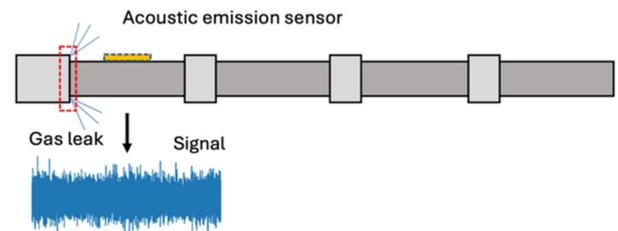


Fig. 3 Testbed

$$f = 700 \left( 10^{\frac{m}{2595}} - 1 \right) \quad (5)$$

멜-스펙트럼의 값은 로그를 취하여 최종적으로 구해지게 된다.

$$L(m, i) = \log(S(m, i) + \epsilon) \quad (6)$$

## 2.2 CNN을 이용한 누출 여부 및 누출 강도 탐지

제안하는 방법은 멜-스펙트로그램 이미지를 분류할 수 있도록 CNN을 훈련시켜 파이프라인에 발생한 누출 여부 및 누출 강도를 탐지한다. 이미지 분류를 위한 CNN 사용하는 경우 다음과

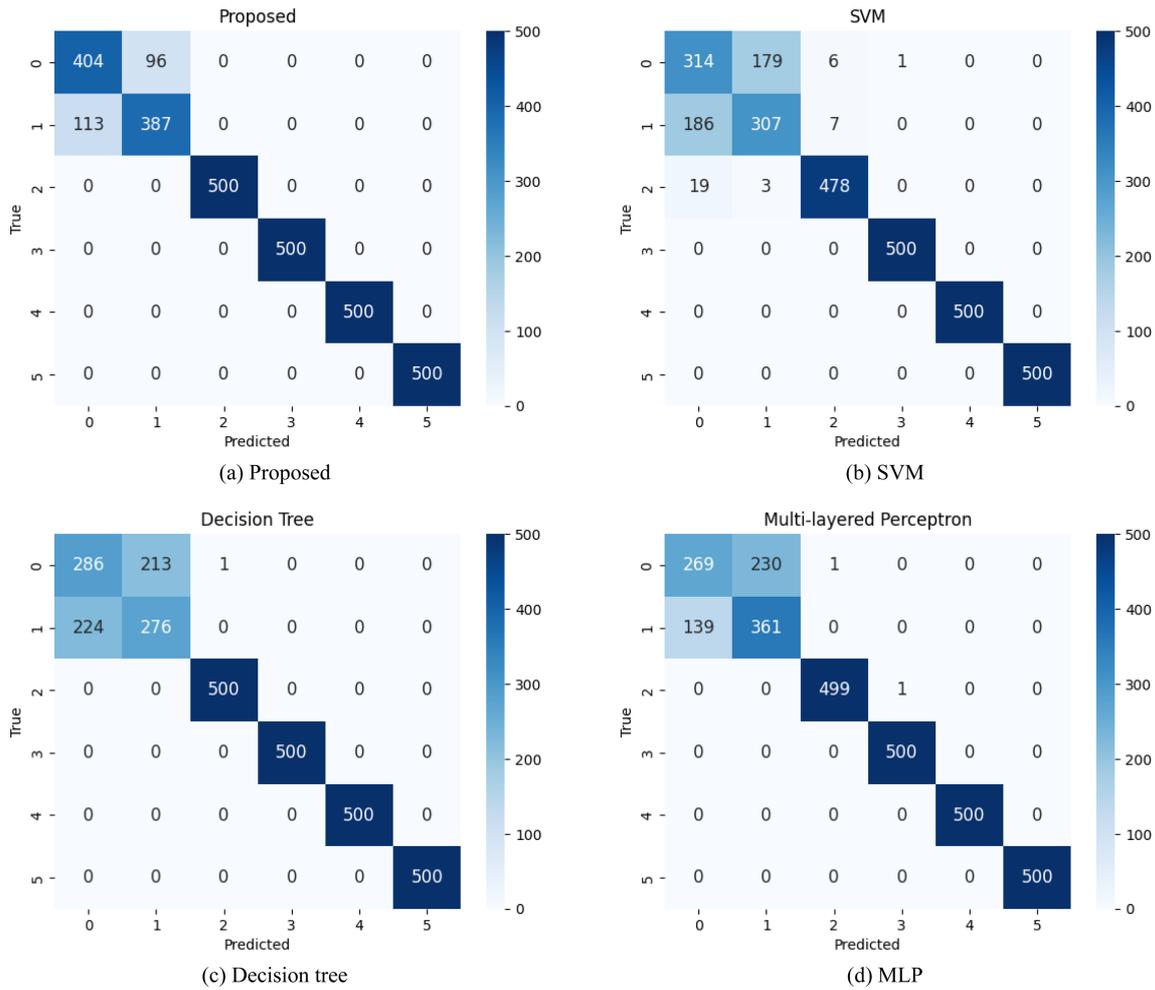


Fig. 4 Confusion matrices of the proposed method and the other methods

같은 장점이 있다. 1) 이미지 분류를 위해 프리-트레이닝(Pre-training)이 완료된 다양한 모델이 공개되어 있다. 2) 이미지 증강(Augmentation)을 위한 다양한 기법을 활용하는 것이 가능하다. 제안하는 방법에서는 공개된 모델 중 ResNet18을 바탕으로 CNN을 구성하였다.

ResNet은 CNN의 네트워크 모델의 깊이가 깊어짐에 따라 발생하게 되는 기울기 소실(Vanishing Gradient) 이슈를 해결하기 위해 제안되었다[15]. ResNet의 단위 모듈인 레지듀얼 블록은 스킵 커넥션(Skip Connection)을 가지고 있다. 스킵 커넥션은 컨볼루션 레이어(Convolutional Layer)를 거치지 않는 통로를 제공하여 역전파(Backpropagation) 과정에서 그래디언트(Gradient)를 흐름에 도움을 준다[16]. 레지듀얼 블록을 사용하면 네트워크 모델의 깊이가 깊은 네트워크를 구성할 수 있다. 다양한 모델이 공개되어 왔지만 ResNet은 이미지 분류나 이미지를 처리하는 다양한 작업의 베이스라인으로 사용되고 있다. Table 1에는 제안하는 방법에서 사용하는 CNN의 구조를 보여주고 있다. CNN 모델에서 출력(Output) 레이어의 출력 채널 숫자가 파이프라인에 발생한 누출을 탐지하기 위하여 변경되었으며 이에 따라 플롭스(Floating Point Operations Per Second, FLOPS) 값이

Table 3 Accuracy and F1 scores

	Accuracy	F1 score
Proposed	0.930	0.930
SVM	0.866	0.867
Decision tree	0.854	0.875
MLP	0.876	0.875

변경되었다.

ResNet18 기반의 CNN을 멜-스펙트로그램 이미지를 이용해 훈련시키는 과정에서 두 가지 추가적인 이슈가 존재한다. 첫 번째 이슈는 멜-스펙트로그램의 각 셀 값은 dB 단위로 나타나기 때문에 일반적인 이미지의 픽셀이 가지고 있는 값의 범위와 매우 다르다는 것이다. 이로 인해 전이 학습(Transfer Learning)을 이용해 프리-트레이닝이 완료된 값을 가져와 사용하더라도 ResNet18의 cov1 레이어를 새로 만들어야 하기 때문에 CNN의 학습이 효과적으로 진행되지 않을 수 있다. 두 번째 이슈는 ResNet18은 3개 채널을 가진 이미지를 입력으로 사용하는데 비해 멜-스펙트로그램 이미지는 1개의 채널을 가지고 있다는 것이다.

Table 4 Color coding

Colormap	Accuracy	F1 Score
Grayscale	0.917	0.917
Plasma	0.930	0.930

이 이슈를 해결하기 위하여 다음과 같은 과정을 통해 멜-스펙트로그램을 전처리 한다. 1) 멜-스펙트로그램 이미지의 픽셀 값들을 그레이 스케일 이미지의 범위로 정규화 한다. 2) 1개 채널을 가진 그레이 스케일 이미지화 된 멜-스펙트로그램을 컬러 코딩을 통해 3개 채널을 가진 RGB 이미지로 변환한다. 제안하는 방법에서 컬러 코딩은 플라즈마 컬러맵(Plasma Colormap)을 이용한다.

$$\begin{aligned}
 R(S) &= 0.058 + 1256S - 0.816S^2 + 0.721S^3 \\
 G(S) &= 0.644S + 0.680S^2 - 1.385S^3 \\
 B(S) &= 0.077 + 2.105 - 3.023S^2 + 2.176S^3
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$S = \frac{S_{uint8}}{255}$$

식(6)에서 R(S), G(S), B(S)는 각각 RGB 채널의 값이고 S\_ "uint8"는 그레이 스케일로 정규화된 멜-스펙트로그램 셀의 값이다.

제안하는 방법은 파이프라인의 누출을 재연할 수 있는 테스트베드에서 수집되었다. 테스트베드는 플랜트에서 널리 사용되는 35 mm 아연 도금 파이프를 이용하여 구성하였다(Fig. 2). Fig. 2는 전처리가 완료된 멜-스펙트로그램 이미지이다. 컬러 코딩을 통해 다른 셀 보다 신호 강도가 강한 셀들이 좀 더 잘 드러나는 것을 확인할 수 있다.

파이프라인의 누출을 연출하기 위하여 파이프의 이음새 부분을 느슨하게 만들었으며 누출 정도는 파이프라인에 주입되는 질소의 압력을 이용해 조절하였다. 누출이 발생하는 부위에서 15 cm 떨어진 부분에 AE 센서를 부착하였다[17]. 질소 압력을 조절하여 발생시킨 누출의 크기는 총 6단계로 0, 2, 4, 6, 8, 10 ml/min.이다. AE 센서로부터 수집된 신호를 증폭하기 위해 프리 앰프(40dB)에 연결한 200 KHz로 샘플링 하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 데이터셋

훈련 및 테스트 데이터셋은 누출 크기가 0 l/min.인 정상 상태와 누출 크기의 강도가 2, 4, 6, 8, 10 l/min.인 5단계의 누출 상태 총 6개의 클래스로 이루어져 있다. 훈련 데이터셋의 경우 총 7,800개의 데이터 포인트를 가지고 있으며 테스트 데이터셋의 경우 3,000개의 데이터 포인트가 포함되어 있다.

#### 3.2 성능

제안한 방법의 CNN은 PyTorch로 구현되었으며 7,200장의

멜-스펙트로그램 이미지를 사용해 1대의 Nvidia RTX A5000로 학습되었다. CNN의 파라미터를 업데이트 하기 위한 옵티마이저(Optimizer)는 AdamW [18]를 사용하였고 매 300 에폭(Epoch)마다 러닝 레이트(Learning Rate)를 1/10씩 감소시켰다. 학습에 사용한 하이퍼파라미터(Hyperparameter)는 Table 2에 나타나 있다.

제안한 방법의 누출 탐지 성능을 SVM, 디시전 트리(Decision Tree, DT), 그리고 멀티-레이어드 퍼셉트론(Multi-layered Perceptron, MLP)의 누출 탐지 성능과 비교하였다. 세 가지 방법 모두 AE 신호의 시간-도메인과 주파수-도메인에서 피쳐를 추출하였다[18]. 시간-도메인에서 신호 강도의 평균, 표준편차, 루트 민 스퀘어(Root Mean Square, RMS), 그리고 피크(Peak) 피쳐를 추출하였다. 주파수-도메인에서는 주파수의 무게 중심, 피크 주파수, 그리고 평균 주파수를 추출하였다. 성능 비교를 위한 SVM은 라디얼 커널 함수(Radial Kernel Function)를 사용하였다. 성능 비교를 위해 사용된 MLP의 하이퍼 파라미터는 경우 히든 레이어(Hidden Layer)의 크기는 100이며 러닝 레이트와 옵티마이저는 각각 0.001과 Adam [18]이다.

테스트 데이터셋을 이용하여 확인한 제안한 방법과 다른 방법들의 정확도와 F1 스코어는 Table 3에 나타나 있다. 제안한 방법이 다른 방법들보다 누출 여부 및 누출의 크기를 잘 분류하는 것을 확인할 수 있다.

제안하는 방법과 다른 방법들의 성능 차이는 컨퓨전 매트릭스(Confusion Matrix)에서 좀 더 분명하게 드러난다(Fig. 4). 누출의 크기가 증가할 수록 타임-도메인에서 표현된 AE 신호의 강도가 증가하기 때문에 누출이 없는 정상 상태와 구분하기 쉽다(Fig. 1). 반대로 누출의 크기가 작은 경우 AE 신호의 강도가 크지 않으며 AE 센서가 노이즈에 취약하기 때문에 정상 상태와 구분하기 어렵다. 네 개의 CM들을 비교해 볼 때 제안하는 방법이 다른 방법들에 비해 누출이 없는 정상 상태인 레이블 0와 작은 크기의 누출이 있는 레이블 1을 좀 더 잘 구분하는 것을 확인할 수 있다.

가장 약한 크기의 누출인 2 l/min.의 경우 신호 강도가 크지 않아 정상 상태와 구분이 어렵기 때문에(Fig. 2) 제안한 방법과 다른 방법들 모두에서 잘못 예측하는 경우가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 제안하는 방법과 다른 방법에 비하여 잘못 예측하는 경우가 더 적은 것을 확인할 수 있다.

제안하는 방법에서는 그레이 스케일로 정규화된 멜-스펙트로그램을 플라즈마 컬러 코딩을 한 후 CNN 네트워크 모델의 입력으로 사용한다. 이는 검증된 CNN 모델의 구조를 최대한 바꾸지 않기 위한 목적도 있으나 그레이스케일 멜-스펙트로그램의 각 셀의 값의 차이를 더 잘 드러낼 수 있는 형태로 변환하는 효과도 있다. 그레이스케일 멜-스펙트로그램을 3개 채널로 쌓아 CNN 모델의 입력으로 사용한 경우와 플라즈마 컬러 맵으로 코딩된 멜-스펙트로그램을 CNN의 입력으로 사용했을 때 플라즈마 컬러 맵 코딩이 효과가 있다는 것을 실험적으로 확인할 수 있다(Table 4).

#### 4. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 AE 센서를 이용하여 파이프라인에 발생하는 누출을 탐지하기 위한 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 멜-스펙트로그램과 컬러 코딩을 통해 AE 신호를 이미지 형태로 전처리 한 다음 CNN에 입력하여 누출 및 누출의 강도를 분류할 수 있다. AE 신호를 이미지 형태로 전처리 하는 과정을 통하여 프리-트레이닝 된 공개 모델을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 제안한 방법의 성능은 테스트베드에서 수집한 데이터를 사용하여 검증하였다. 제안한 방법은 누출 발생 및 누출의 강도를 탐지하는 것이 가능하며 강도가 약한 누출을 다른 방법들 보다 더 잘 탐지하는 것을 확인할 수 있다.

멜-스펙트로그램은 일반적인 이미지 보다 각 셀이 가지고 있을 수 있는 값의 범위가 넓다. 멜-스펙트로그램의 정규화와 컬러 코딩 과정에서 소실되는 정보가 존재할 수 있다. 향후 과제로는 정규화와 컬러 코딩 과정을 생략하고 멜-스펙트로그램을 직접 처리할 수 있는 CNN 구조를 설계하여 학습시키는 방향으로 연구를 진행할 계획이다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

본 성과물은 중소벤처기업부에서 지원하는 2025년도 산학연 Collabo R&D사업(No. RS-2025-02310175)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

본 논문에서 사용된 데이터는 (주)리나솔루션에 의해 수집된 것임.

#### REFERENCES

- Lee, M., Jeong, I., Chae, J., (2025), Machine learning-based classification of acoustic emission signals in SiC cathode ultrasonic machining process, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 42(6), 431-439.
- Ohtsu, M., (2021), *Acoustic emission and related non-destructive evaluation techniques in the fracture mechanics of concrete*, Woodhead Publishing.
- Sun, J., Wen, J., (2013), Target location method for pipeline pre-warning system based on HHT and time difference of arrival, *Measurement*, 46(8), 2716-2725.
- Ahadi, M., Bakhtiar, M. S., (2010), Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals, *Applied Acoustics*, 71(7), 634-639.
- Mandal, S. K., Chan, F. T., Tiwari, M., (2012), Leak detection of pipeline: An integrated approach of rough set theory and artificial bee colony trained SVM, *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3071-3080.
- Zhang, Y., Chen, S., Li, J., Jin, S., (2014), Leak detection monitoring system of long distance oil pipeline based on dynamic pressure transmitter, *Measurement*, 49, 382-389.
- Xiao, R., Hu, Q., Li, J., (2019), Leak detection of gas pipelines using acoustic signals based on wavelet transform and support vector machine, *Measurement*, 146, 479-489.
- Hu, X., Han, Y., Yu, B., Geng, Z., Fan, J., (2021), Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks, *Journal of Cleaner Production*, 278, 123611.
- Zuo, Z., Ma, L., Liang, S., Liang, J., Zhang, H., Liu, T., (2022), A semi-supervised leakage detection method driven by multivariate time series for natural gas gathering pipeline, *Process Safety and Environmental Protection*, 164, 468-478.
- Kopbayev, A., Khan, F., Yang, M., Halim, S. Z., (2022), Gas leakage detection using spatial and temporal neural network model, *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 968-975.
- Kim, H., Lee, J., Kim, T., Park, S. J., Kim, H., Jung, I. D., (2023), Advanced thermal fluid leakage detection system with machine learning algorithm for pipe-in-pipe structure, *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102747.
- Ahmad, Z., Nguyen, T.-K., Kim, J.-M., (2023), Leak detection and size identification in fluid pipelines using a novel vulnerability index and 1-D convolutional neural network, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 17(1), 2165159.
- Logan, B., (2000), Mel frequency cepstral coefficients for music modeling, *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference*.
- Purohit, H., Tanabe, R., Ichige, K., Endo, T., Nikaido, Y., Suefusa, K., Kawaguchi, Y., (2019), MIMII dataset: Sound dataset for malfunctioning industrial machine investigation and inspection, *Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events Workshop*, 209-213.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., (2016), Deep residual learning for image recognition, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770-778.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., (2016), Identity mappings in deep residual networks, *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 630-645.
- Park, J., Lee, S.-M., Lee, B.-J., Kim, S. J., Yoo, H.-M., (2023), Acoustic emission (AE) technology-based leak detection system using macro-fiber composite (MFC) sensor, *Composites Research*, 36(6), 429-434.
- Loshchilov, I., Hutter, F., (2017), Decoupled weight decay regularization, *Proceedings of the International Conference on Learning Representations*.



**Byungjae Park**

BS, MS, and PhD degrees in POSTECH. He is currently an assistant professor at KOREATECH. His main research interests are robotic perception, machine learning, and sensor fusion.

E-mail: [bjp@koreatech.ac.kr](mailto:bjp@koreatech.ac.kr)



# 자동차 전장용 커넥터의 미동마멸 부식 특성 측정을 위한 시험장치 개발

## Development of the Fretting Corrosion Test Equipment for the Automotive Electrical Connector

김정현<sup>1</sup>, 이상훈<sup>1,2,#</sup>  
Jeong Hyun Kim<sup>1</sup> and Sang Hoon Lee<sup>1,2,#</sup>

1 서울과학기술대학교 일반대학원 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology)

2 서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과 (Department of Rolling Stock System, Seoul National University of Science and Technology)

# Corresponding Author / E-mail: [hyla@seoultech.ac.kr](mailto:hyla@seoultech.ac.kr), TEL: +82-2-970-6433

ORCID: 0000-0001-9530-2818

KEYWORDS: Fretting corrosion (프레팅부식), Low temperature condition (저온온도조건), Automotive electrical connector (자동차전기커넥터)

*Fretting corrosion results from microscopic abrasion of connector contacts and is influenced by environmental conditions in automotive applications. This study designed and fabricated test equipment capable of evaluating fretting corrosion characteristics at low temperatures. A temperature–humidity environmental chamber was used, and a compact test jig box was created to fit inside it. The specimen was positioned outside the box and fully exposed to low temperatures, while the driving components were enclosed inside the box. To ensure their reliable operation, warm air was supplied using vortex tubes, maintaining the internal box temperature above 0°C even when chamber conditions reached -40°C. A hemispherical-tip jig was also produced to enable consistent specimen preparation. Experiments conducted at -40°C used a constant current–resistance method to measure output signals. The system successfully captured accurate and stable resistance changes corresponding to displacement cycles. These findings indicate that the developed equipment provides stable low-temperature operation and reliable measurement performance. Therefore, the system is expected to support fretting corrosion characterization across a wide range of environments, including low-temperature, high-temperature, and temperature-cycling conditions.*

Manuscript received: March 5, 2025 / Revised: June 27, 2025 / Accepted: August 21, 2025  
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2024

### 1. 서론

일반적으로 자동차는 수 만개 이상의 부품으로 구성되어 있으며 완성차의 크기 및 기능에 따라 소요 부품이 세부적으로 다양하게 구분되어 있다. 자동차 부품 분류는 엔진용 부품, 차체용 부품, 동력 전달장치, 전기장치, 조향장치 및 현가장치, 제동장치, 실내부품 등으로 나뉘어져 있다. 각각의 분류에서 다시 세부적인 부품으로 확대 전개할 경우 수십, 수백 개의 부품으로 구분되어 존재한다.

차량의 다양한 부품을 제어하기 위해 전자제어 시스템이 많이 적용되고 있으며, 안전, 편의성 등에 대한 관심이 늘어남에

따라 사용되는 개수 또한 지속적으로 증가하는 추세이다. 특히 차량의 핵심 전자제어 시스템인 ECU (Electronic Control Unit) 개수도 약 50개에서 70여개 이상으로 될 것으로 예상되어진다. 커넥터는 이러한 ECU제어시스템과 각종 액츄에이터 부품을 전기적으로 연결해주는 중요한 부품이다. 차량의 전동화라는 현재의 추세에 비추어볼 때, 차량용 커넥터의 개수는 현재 500개에서 앞으로 더 많이 증가할 것으로 판단되고 있다[1].

이처럼 커넥터 사용이 높아짐에 따라 발생하는 문제점도 많이 있다. 특히, 자동차에서 발생하는 높은 온도와 습도, 진동 및 기계적 충격으로 인하여 각종 커넥터에 미동 마멸부식 현상이 발생할 수 있는 경우가 많다. 미동 마멸부식은 커넥터 단자

접촉부의 상대적으로 미세한 이동으로 인한 미세 마모현상을 동반한 부식현상을 말한다. 이러한 현상은 차량에 장착된 각종 센서 및 전기적인 신호의 왜곡 및 신호품질 저하를 유발하여 자동차 주행 및 안전에 심각한 문제를 유발할 수 있다. 예를 들어 차량의 커넥터 단자는 여러 환경 스트레스 요인중 진동과 기계적 충격, 엔진의 정지 및 재가동으로 인한 부품간의 온도 차이로 단자 접촉점의 미세한 이동 및 마모가 발생하며, 엔진 주변의 온도로 인해 커넥터 접촉점의 산화막 생성이 촉진되어 전기 접촉저항이 증가하게 된다. 이로 인해 각종 센서에서 출력하는 신호의 값이 왜곡되고, 신호의 품질이 낮아짐에 따라 차량의 ECU에서 잘못된 출력 신호를 보내어 관련 액츄에이터 동작의 오류를 초래할 수 있다[2]. 일반적으로 자동차에서 발생하는 전기전자적 고장의 30% 이상이 커넥터의 문제이며 커넥터의 문제를 발생시키는 주요 환경적 스트레스 원인은 미동마멸로 인해 발생하는 커넥터 부식 현상으로 알려져 있다[3].

이러한 미동마멸 현상에 대해서는 많은 연구들이 진행되어져 왔다. 커넥터 단자의 미동 마멸부식에 영향을 미치는 주요한 환경스트레스 인자들은 접촉 하중, 변위 진폭, 주변 온도, 주파수, 통전전류, 분위기 환경, 습도, 진동 등으로 알려져 있다[4-7]. 자체 특성인 다양한 재료와 도금 조건에 대해 실험이 진행된 바 있으며 하중과 온도, 습도 등에 대한 연구도 발표된 바 있다[8,9]. 그러나, 이러한 연구의 대부분은 25-100°C의 상온 혹은 고온에서의 미동마멸 현상에 대해 실험을 진행하였다[10,11].

실제 자동차의 운행 환경 온도 스트레스 조건을 보면 저온에서 고온까지 다양한 환경스트레스 속에서 운행이 되고 있다. 환경시험의 국제 규격인 IEC 60068-1은 저온, 고온, 먼지 및 모래, 강우 등과 같은 환경스트레스 인자가 제품에 미치는 영향과 고장의 유형을 파악하기 위한 규격이다. 이 규격은 환경시험과 해당 가혹도에 대한 일련의 방법을 규정하며 운반, 보관 및 모든 사용 조건에서 수행할 수 있는 제품의 능력을 평가하도록 고안되었으며 측정 및 시험에 대한 여러가지 조건을 규정하고 있다[12]. 이 규정을 고려해본다면 온도에 대한 스트레스가 제품의 고장에 영향을 많이 주기 때문에, 고온뿐만 아니라 특히 저온까지 다양한 온도 스트레스 조건에서 미동마멸 실험이 진행되어야 한다.

그러나, 앞서 언급한 바와 같이 대부분의 연구가 상온 혹은 고온에서 진행된다. 이는 히터를 이용하여 비교적 간단히 구현할 수 있는 고온에 비해 저온 실험 환경 구현이 상대적으로 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 저온구간에서의 미동마멸 현상을 확인할 수 있도록 시험기를 개발하고 그 특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 시험기 설계 및 제작

본 연구에서 제작하고자 하는 것은 저온환경 스트레스 조건에서의 미동마멸 영향성을 실험할 수 있는 실험장치이다. 이러한 장치는 낮은 온도에서도 정교한 이동변위 및 접촉저항을 제어하고

측정할 수 있어야만 한다. 기존의 여러 논문에서 제작한 시험기는 피에조 방식 및 캠을 이용한 구동 방식을 주로 채택하여 개발이 되었으며, 제작된 시험기는 주로 상온 및 고온 상황에서 시험을 실시하였다[13-15]. 상온 이상의 높은 온도를 구현하기 위해서 시료 주변을 단열하고 히터를 이용하여 시료 부분만 가열하는 형태로 진행되었으며, 내부 온도를 열전대로 측정, 제어함으로써 비교적 용이하게 작업을 진행할 수 있다. 이렇듯 가열방법은 작은 부위에만 국한하여 작업이 용이하며 구동계에 대한 영향은 최소화하여 구동의 신뢰성을 확보하도록 구성되어 있다.

하지만, 실제 자동차 사용 환경은 저온부터 고온에 이르기까지 다양한 온도환경에서 스트레스 영향을 받고 있기 때문에 저온 실험 환경이 반드시 필요하다. 그러나, 일반적으로 저온을 구현하기 위해서는 냉각기를 비롯한 부가적인 장치들이 필요하기 때문에 크기가 커지는 문제점이 발생하며, 이로 인해 제작과정이 쉽지 않다. 또한, 실제로 저온이 구현된다 하더라도 기존의 실험장치는 시편과 이동 제어 부품들이 모두 외부에 노출되는 구조로 되어 있어 이러한 장치를 바로 저온 실험에 적용하기는 무리가 있다. 장치의 이동변위를 제어하는 부품들은 저온 환경에서 신뢰성 있는 변위제어가 어렵기 때문에 저온이라는 환경스트레스로부터 분리될 필요가 있기 때문이다.

본 연구에서는 고온환경 외에 저온환경에서도 실험을 진행하기 위해 전체 시스템을 구현하는 것이 아니라, 기존의 환경챔버(Environment Chamber)를 그대로 활용할 수 있는 형태로 제작하고자 하였다. 환경챔버는 저온에서부터 고온까지 온도와 습도를 조절할 수 있는 고가의 장비이다. 이러한 장비를 활용할 수 있다면 따로 냉각장치를 개발하지 않고도 저온 실험을 진행할 수 있다. 다만, 이러한 환경챔버를 활용하는 행태가 되려면, 제작되는 실험장치는 환경챔버 내부에 들어갈 수 있는 형태로 컴팩트하게 구성되어야 한다. 또한, 환경챔버 속에 넣어서 저온 실험이 가능하게 하되, 시료 부분만 이러한 온도의 영향을 받고 구동부분은 분리된 형태로 만들어 구동의 신뢰성을 확보하여야만 한다. 여기에 더해 시료와 구동기에 전기를 인가해주고 신호를 받아 분석할 수 있는 시스템 또한 구축되어야 한다.

이러한 조건을 바탕으로 차량용 전기 커넥터의 미동마멸부식 실험을 진행하기 위한 실험장치 시스템을 개발하였으며 Fig. 1은 그 시스템의 구성도를 나타낸다. 전체적으로 환경챔버 내로 들어가서 시편을 기계적으로 움직여 실험하는 테스트 지그 박스부분이 있으며, 지그 박스에서 전력을 인가하고 신호를 측정하여 분석하는 측정/제어 시스템 부분으로 구성된다. 측정/제어 시스템은 시스템 컨트롤 PC, 모니터, 로드셀 박스, 멀티미터, 전원공급기, 전기적부하, 통신을 위한 USB 허브 등으로 구성되어 있다.

특히 제어기기인 Control PC와 RS232 통신을 하기 위한 장치로 USB HUB를 사용하여 실시간으로 통신을 할 수 있도록 설계하였고, 5개의 Port USB HUB를 가지고 있어서 확장성을 좋게 하였다. 시험장비에 사용된 측정 및 제어시스템의 성능은 Table 1과 같다.

각 구성요소 중 가장 중요한 부분은 Fig. 2와 같은 테스트

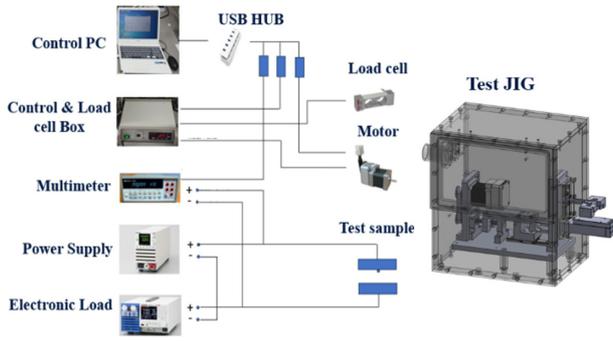


Fig. 1 The schematic of fretting corrosion testing system

Table 1 Specification of test equipment

Equipment	Model	Specification	Make
Digital multimeter	34401A	0-1,000 V, 0-3 A, 3-300 kHz	HP
Power supply	PWR401ML	0-80 V, 0-20 A, 400 W	Kikisui
Electronic load	PLZ205W	1-150 V, 0-40 A, 200 W	Kikisui
Motor	CM1-17L30A17L30A	18 W, 3,000 rpm, DC24V 0-40°C	Cool muscle
Load cell	OBUG-3	3 kg, 1.0±0.1 mV/V, -20-80°C	Bongshin
USB HUB	UH305	4 USB3.0 Port, 1 Power only port	iPTIME

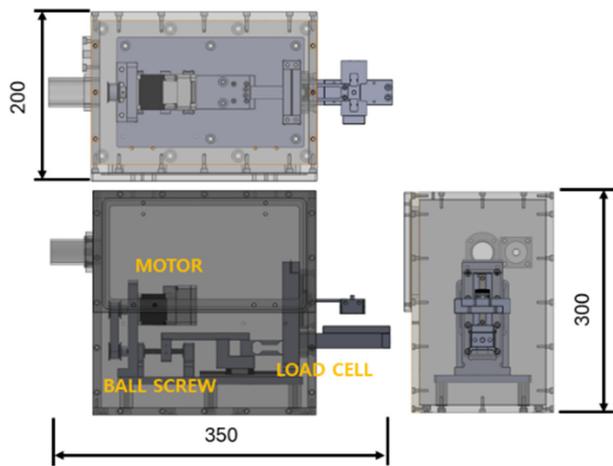


Fig. 2 The design of test jig box system (unit: mm)

지그 박스이다. 테스트 지그는 저온에서 실험을 위해 개발된 새로운 시험장치이다. 이 장치는 다양한 환경스트레스 조건, 즉 고온뿐만 아니라 저온에서도 시험을 실행할 수 있도록 설계된 장치이며, 저온의 경우 -40°C 에서도 실험을 할 수 있도록 설계하였다. 기본적으로 테스트 지그 박스는 환경챔버에 들어갈 수 있도록 소형 컴팩트한 크기(350 × 200 × 300 mm)로 구성되었다.

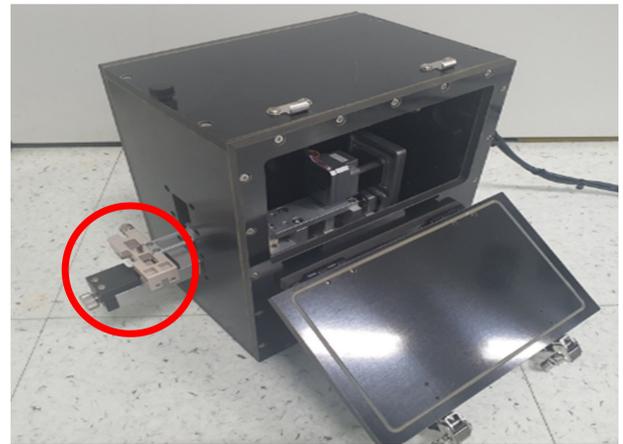


Fig. 3 Manufactured fretting corrosion test jig box

이를 통해 추가적인 저온 시스템을 만들지 않더라도 저온실험이 가능하도록 하였다.

Fig. 3은 실제로 제작한 테스트 지그 박스이다. 그림에서 보듯이 실제 실험이 이루어지는 부분은 박스 외부로 돌출된 시편 실험부(붉은 색 원)이며, 구동을 위한 시스템은 박스 내부에 구성되어 있다. 구동부는 모터와 볼 스크류로 구성되어 있으며, 외부 시편에 가해지는 힘을 측정하기 위해 로드셀이 사용되었다. 박스 내부는 Table 1에 나타난 것과 같이 부품의 정상동작 온도 조건인 -10°C-상온을 유지할 수 있도록 외부에서 공기를 주입하도록 하였으며, Vortex Tubes를 이용하여 보다 높은 온도의 공기를 주입하도록 하였다. 박스 외곽은 단열특성이 우수하면서도 강도가 큰 베크라이트 재질을 사용하여 제작되었다. 이를 통해 외부온도가 영하에서도 내부의 구동시스템은 -10°C-상온상태를 유지하게 되어 모터와 볼 스크류의 신뢰성있는 동작을 보장할 수 있다.

일반적으로 시험기에는 알루미늄 재질을 사용하여 많이 제작이 된다. 알루미늄 재질은 가공성이 매우 용이하여 쉽게 제작이 되고 재료의 재활용성이 좋아 많이 사용되고 있다. 하지만 전기전도성이 높고, 열전도성도 높아서 본 시험기기의 재질로는 맞지 않았다. 본 시험기기의 제작을 위한 재료로 베크라이트 재질을 사용한 이유는 금속 제품에 비해 경량이며, 상대 밀도는 알루미늄보다 50% 가볍고, 강철보다는 75% 가볍다. 또한 단열, 내마모성, 내식성등이 우수하여 시험기기 제작에 적합하여 사용하게 되었다. 특히 열전도성이 알루미늄에 비해 낮기 때문에 시험기기 내부의 부품을 보다 안전하게 동작할 수 있도록 시험기기를 설계할 수 있었다. 본 시험기기는 환경챔버 안에서 직접 온도스트레스에 노출이 되어야 하고, 내부 전기부품의 원활한 동작을 위해서는 온도 및 전기절연 특성이 좋은 재질을 선정할 필요성이 있었다. 베크라이트 재질은 전기, 전자, 기계, 자동차 부품을 비롯해 전기절연판, 회로판, 단열제 등 다양한 산업분야에 적용되며 널리 사용되고 있다. 아울러 가공이후 치수의 변화가 작아 보관에 용이한 장점이 있다. 베크라이트 재질의 세부특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Material property of bakelite &amp; aluminum

Category	Bakelite	Aluminum
Material type	Thermosetting plastic	Non-ferrous metal
Density	1.3-1.5 g/cm <sup>3</sup>	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Specific gravity	1.4	2.7
Tensile strength	550 Mpa	90-200 MPa
Thermal conductivity	Low (0.2 W/m.k)	High (205 W/m.k)
Conductivity	Low (insulator)	High
Corrosion resistance	High	High
Abrasion resistance	High	Medium

테스트 지그 박스에서 시료실험을 진행하기 위해서는 전력을 공급하고 신호를 측정하는 측정/제어 시스템이 필요하다. 기본적으로 미동마멸부식 실험은 접촉부의 저항값이 일정값 이상 증가하는가를 바탕으로 한계에 도달했는지를 판단한다. 이때 사용하는 것은 정전류-저항변화법으로 옴의 법칙( $R = V/I$ )을 이용하여 계산된다. 즉, 저항 변화를 정확히 측정하기 위해 실제 실험시에는 저항을 바로 측정하는 것이 아니라, 정전류 하에서 전압 측정을 통해 저항변화를 측정하고 이를 통해 미동마멸부식 특성을 측정하게 되는 것이다. 이러한 정전류를 인가하기 위해 파워서플라이와 전기적 로드(Electronic Load)를 사용하였다. 이를 통해 커넥터 양단에 0.1 A의 정전류를 흐르게 하고 고해상도 멀티미터(HP 34401A)를 이용하여 시료 접점간 전압을 측정하였다. 또한, 컨트롤 박스(Control Box)를 통해 로드셀(Load Cell)과 모터(Motor)를 제어하였으며 하중정보를 실시간으로 시험자가 확인할 수 있고, 모터에 전원공급 및 제어하도록 하였다. 이를 통해 구현한 미동마멸 시험기의 제원은 Table 3과 같다.

이렇게 본 논문에서는 저온에서 미동 마멸 부식현상을 실험하기 위해 환경챔버 내부에 넣어 실험할 수 있는 저온 실험이 가능한 테스트 지그를 설계하였고, 시료 실험부분과 구동기를 분리하여 구동기의 신뢰성 또한 확보하고자 하였다. 이를 통해 환경챔버를 사용하여 테스트 지그를 환경챔버에 직접 넣어서 시편이 저온 스트레스 환경에 노출할 수 있게 설계 및 제작하였다.

## 2.2 시험편 제작

일반적으로 커넥터는 압수로 나누어지며 안정적인 전기적 연결을 위해 요철부분(돌출부분)이 있어야 된다. 이런 형상의 커넥터 모양을 모사하기 위해 Fig. 4와 같이 요철이 있는 시험편을 제작하여야 하며, 시편간 일관성을 유지하기 위해서는 별도의

Table 3 Specification of fretting corrosion testing

Specification	Data
Displacement [ $\mu$ m]	1-1,000
Frequency setting [Hz]	1-100
Data logging interval [case]	100
Test data logging [case]	99,999



Fig. 4 Preparation of test specimen

시편 제작 지그가 필요하다.

기존 논문의 시편제작 지그는 반구형 팁을 이용하여 시편을 금형 위에 올려 놓고 펀치로 내려치는 형태로 제작이 되었다[13]. 간단한 과정이라는 장점은 있으나, 시편 제작 시 충격을 받아 시료자체의 정확성이 떨어지는 경우가 발생할 수 있었다. 이런 문제점을 해결하기 위해 Fig. 5와 같이 반구형팁을 제작할 수 있는 시험편 제작 지그를 구성하였다.

스토퍼 형식을 이용하여 반구형팁의 이동거리를 제어할 수 있는 리미트를 설정할 수 있게 하였고, 반구형팁을 가볍게 눌러서 균일한 볼록 시편을 제작할 수 있도록 하였다. 또한 시편하부 금형의 볼트 고정부분을 돌출형으로 제작하여 시편의 고정시 흔들림을 최소화하고, 다양한 크기의 시편을 동일한 센터 기준으로 제작할 수 있도록 설계를 하였다. 시편제작용 지그를 같이 개발함에 따라 시편의 정확한 제작을 통해 시험오류를 최소화할 수 있게 되었다.

실험에 사용된 전기 접촉 시편은 자동차용 전기 커넥터 제품으로 가장 많이 사용되고 있는 주석 도금된 황동을 사용하였다. 기존 논문들의 시험편은 소규모로 직접 도금하여 사용하였으나 본 논문에서는 자동차용으로 널리 사용되는 주석 도금 C2600의 커넥터 원자재를 사용하여 제작을 하였다. 본 시험에 사용되는 시편은 주석이 Hot Dipping으로 도금된 C2600R-1/2H가 사용되었으며 재현성 있는 실험 결과를 위하여 스트립형태의 시편 코일을 펀칭 다이를 통하여 제작하였다.

시편의 재료는 이국산업의 커넥터용 제품이며 업체를 통하여 공급받거나 구입을 하였다. 주석 도금은 자동차용 커넥터에 널리 사용되고, 터미널의 내부와 외부 보호하여 외부 요인에 의한 부식을 방지하고, 또한 주석 도금은 전기 신호의 안정성을

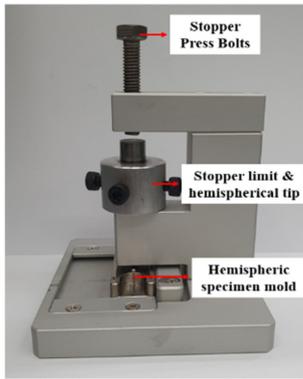


Fig. 5 Equipment for preparing the hemispheric specimen

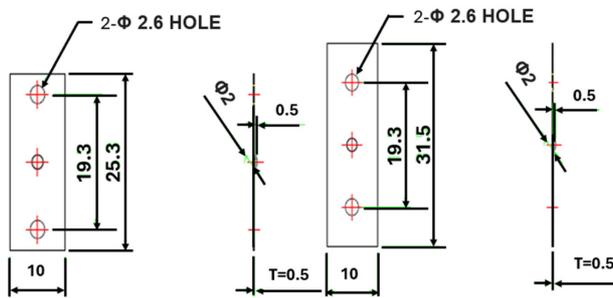


Fig. 6 Dimensions of specimen-hemispheric specimen

높여주는 역할도 한다. 제작이 용이하고 비용이 낮으며, 고온 및 다습 환경에서의 안정적인 동작, 신뢰성과 내구성이 뛰어난 장점이 있어 다양한 차량 부품 제조사에서 사용되고 있다. 사용된 시험시편은 주석을 도금한 두께 0.3 mm의 황동으로 Cu: 68.5-71.5, Zn: Remainder, Pb: ≤0.05, Fe: ≤0.05의 물성을 가지고 있다.

주석 도금은 1.2 μm 두께로 도금되어 있으며, 시험편은 Fig. 4와 같이 상부 시험편(Upper Specimen)은 반구형 요철을 가진 볼록 시험편으로 제작하였고 하부 시험편(Lower Specimen)은 평판으로 제작하였다. 볼록 시험편은 직경 2 mm의 볼 베어링용 강구를 압입자로 사용하여 직경 2 mm의 구멍으로 제작된 시험편 제작용 지그를 사용하여 곡률반경 1 mm의 시험편을 제작하였다. 본 실험에서 사용한 2종류의 볼록 시험편의 치수와 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 본 실험에서는 이 치수를 사용하나, 각 커넥터 업체별로 치수가 다르기 때문에 시험편 제작 지그는 여러 사이즈로 시험용 샘플을 제작할 수 있도록 하였다.

시험편을 제작하여 장비 검증을 실시한 결과 시험편을 정확히 고정하지 않으면 시험결과가 매번 다르게 나타나는 현상을 발견하였다. 그 이유는 시험편이 미세하게 마이크로 움직이는 동안 시험편이 조금이라도 시험 중에 움직일 경우 2개의 시험편이 마찰이 일어나지 않아 시험 사이클은 증가하지만 전압의 변화가 전혀 일어나지 않는 현상이 발생되었다. 이를 해결하기 위해 완성된 시험편은 시험기의 시험 장착부(평면 시험편 및 볼록 시험편)에 정확히 밀착되어 고정될 수 있도록 고정 나사를 이용하여 지그에 고정하여 시험 시 시험편의 움직임 없이 시험을 할 수 있게 하였다.

### 3. 실험 및 결과

시험기기의 성능평가는 시험기가 -40°C 환경에서도 시험기 내부 각각 부품의 동작온도 조건인 -10°C 상온을 유지할 수 있는지 시험기 내부온도 측정과 온도조건을 주면서 20, 0, -10, -40°C에서도 각 부품의 동작 및 실험이 가능한지 확인 하였다.

#### 3.1 시험기 성능평가

미동마멸 시험기의 경우 변위제어가 매우 중요하다. 하중의 경우 고정된 무게추를 각각 사용하기 때문에 제어에는 문제가 없으나 변위의 경우 시험편에 변위를 전달하기 위해서는 여러 구성품의 연결부를 거쳐 변위가 전달되므로 정밀하게 변위 제어에 어려움이 발생한다. 즉 시험기의 각 부분의 미세한 간극과 오차가 누적되어 변위 제어에 어려움이 발생한다. 일반적으로 이러한 변위제어는 직접 변위 실험 후 결과를 바탕으로 조절하게 된다. 본 논문 역시 사용된 시험기의 변위 제어 평가에 대해서는 시험요인으로 적용한 변위 300, 500 μm의 변위를 직접 시험 시편에 제공하고 시험이 완료된 시편을 직접 측정하여 실제 장비의 셋팅 값과 출력 값의 차이를 측정하여 변위제어를 평가하였다.

자동차부품의 환경시험의 온도조건은 각 부품의 설치위치에 따라 다양하다. 보편적으로 엔진룸장착, 실내장착으로 나뉘어지며 온도기준으로 저온 -40°C-고온 120°C 구간에서 시험이 이루어진다. 차량용 커넥터 역시 온도구간은 동일하게 적용되고 있다. 본 시험기는 저온에서의 미동마멸부식현상을 실험하기 위한 설비로써 저온구간에서의 동작상태가 중요하다. 환경챔버속에 테스트 지그를 설치하고 환경챔버의 온도를 저온인 -40°C까지 설정하여 각 저온온도에서의 동작상태를 확인하였다. Fig. 7은 환경챔버내부에 테스트 지그가 설치된 전체적인 실험 장치의 모습을 나타낸다.

테스트 지그 내부는 모터, 로드셀 및 기타 기계부품들로 구성되어 있기 때문에 외부온도의 영향을 직접적으로 받으면 성능을 발휘할 수 없다. 이 때문에 별도의 온도유지 장치가 필요하며, 여기서는 Vortex Tubes를 이용하여 외부에서 따뜻한 공기를 테스트 지그에 넣어주는 방식으로 내부온도를 상온상태로 유지하고자 하였다. 실제 테스트 지그 내부가 상온으로 유지된다는 것을 판단하기 위해, 지그 내부에 열전대를 설치하여 온도측정기로 내부온도를 확인하였다. Fig. 8은 테스트 지그 내부 온도를 측정하기 위해 열전대를 설치한 모습이다.

지그 내부 부품의 안정적인 동작을 위해 내부온도 측정시 4개의 열전대를 사용하여 측정하였다. 1번 포인트는 지그 내부 온도 측정용 열전대이다. 2번 포인트는 모터의 표면 온도 측정용이며, 3번은 기구적인 움직임을 수행하는 볼-스크류의 표면 온도 측정용이다. 마지막으로 4번은 지그 하단부의 표면에 부착하여 온도를 측정하였다.

자동차 환경시험 조건에 따라 시험기기의 저온 내부온도 측정은 상온 20°C에서 시작하여 0, -10, -15, -20, -25, -30, -35, -40°C,

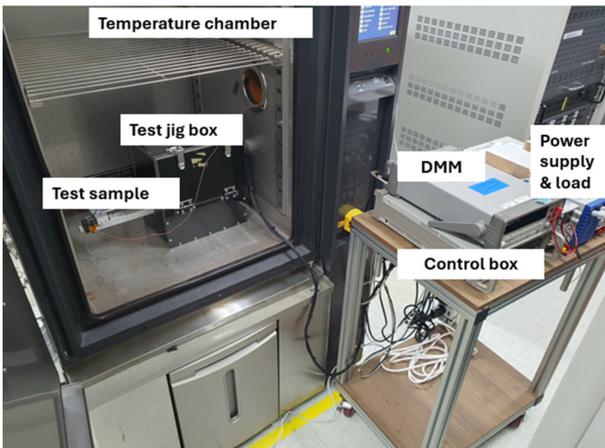


Fig. 7 Experimental setup for fretting corrosion test under low temperature condition

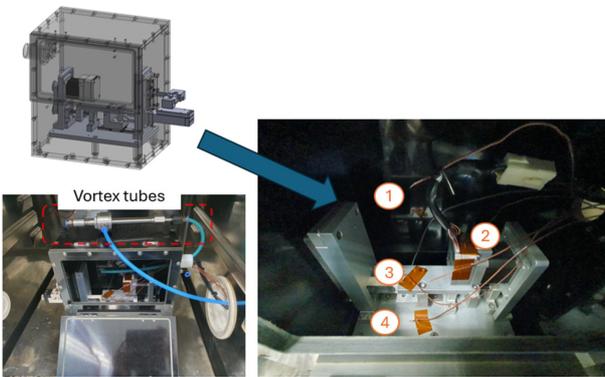


Fig. 8 Measurement of internal temperature of test jig box

저온구간에서 5°C씩 낮추어 -40°C까지 시험기내부온도 측정시험을 진행 하였다.

Fig. 9는 이렇게 측정된 온도 결과를 나타낸다. 그림 좌측과 같이 최저 온도인 -40°C를 유지한 상태에서 테스트 지그 박스 내부 온도를 측정하였다. Fig. 9 우측과 같이 부착된 4개의 열전대 측정값이 1.8~2.0°C로 측정되었으며, 거의 4군데 측정 포인트의 온도 차이가 나지 않아 하나의 그래프처럼 보임을 확인할 수 있다. 결국 외부의 매우 낮은 온도인 -40°C에서도 테스트 지그 박스 내의 각 부품의 사용 온도가 상온으로 유지됨을 확인할 수 있었다. 모터를 비롯하여 볼-스크류 또한 -10°C-상온에서 정상적인 작동을 보장할 수 있으므로 본 시험기기를 활용하면 저온에서도 원활한 실험이 가능함을 확인할 수 있으며, 결론적으로 저온시험에 적합한 시험기기의 설계 및 제작이 이루어 졌음을 알 수 있다.

시험기의 내부 온도측정후 시험기 동작성능 평가는 이동 변위 300 μm, 시험 사이클 수 600회로 진행한 후 그 결과를 측정하여 평가를 진행하였다. 시험 완료 후 Fig. 10과 같이 시편 측정결과 300 μm의 경우 셋팅 값과 결과값이 거의 같음을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 500 μm 이동 변위에 대한 결과를 나타낸 것으로 1,000회 반복 진행 후 그 결과를 측정하였다. 그림에서

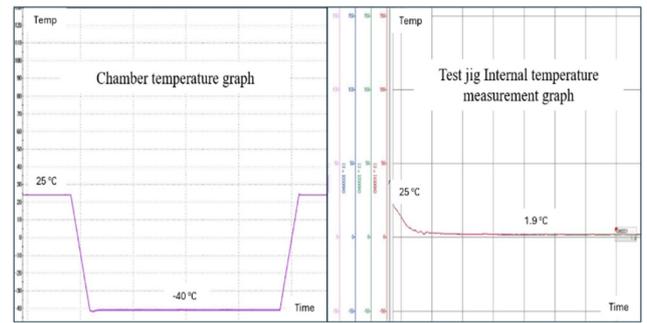


Fig. 9 Temperature measurement result of test jig box

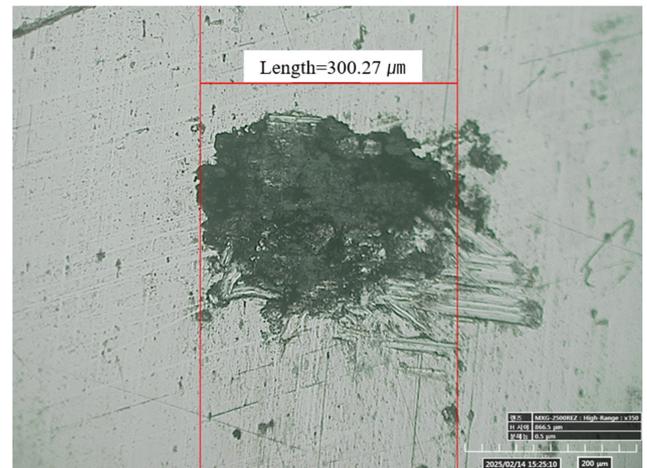


Fig. 10 Photography about 300 μm length displacement

보는 바와 같이, 실험횟수가 많고 간격이 넓어짐에 따라 500 μm를 벗어나는 영역의 마찰현상도 일부 발견되었으나 전체적인 구동범위는 500 μm에 맞게 진행되었음을 확인할 수 있다. 시험기의 성능평가는 Table 4와 같다.

### 3.2 시험결과

미동마멸 부식 특성 측정시 부식에 의한 접촉저항 변화를 측정한다. 시편의 변화하는 전기접촉 저항을 측정하기 위해 본 연구에서는 Fig. 12와 같이 정전류-저항측정법을 사용하였다. 커넥터 양단에 0.1 A의 정전류를 흐르게 하고 대각선 방향에서는 1 nV까지 측정이 가능한 고해상도 멀티미터를 이용하여 전압을 측정하였다.

자동차 커넥터의 접촉 저항은 전기 회로에서 전류흐름을 방해하는 의미하며, 커넥터의 성능과 신뢰성에 중요한 영향을 미친다. 일반적으로 수 mΩ서 10 mΩ (0.01 Ω) 이하의 값을 갖는 것이 바람직 하며, 접촉 저항이 높으면 전압 강하, 전력 손실, 발열 증가로 이어질 수 있습니다. 뿐만 아니라 접촉 저항 증가는 커넥터의 연결 상태를 불안정하게 만들어 전체 시스템의 신뢰성을 떨어뜨리는 이유가 되기 때문이다.

이러한 측정시 무한수명에 해당하는 하한계 변위진폭 (Threshold Displacement Amplitude)은 다양하게 사용되었지만

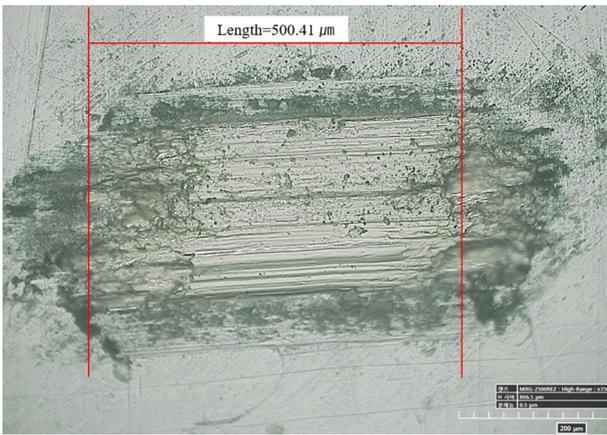


Fig. 11 Photography about 500 μm length displacement

Table 4 Performance test with temperature range

Temperature	Displacement [μm]
20°C	500
0°C	500
-10°C	500
-40°C	300 / 500

임계점으로 사용하는 임계저항은 대부분의 연구에서 0.01 Ω을 기준으로 선택하고 있다[13-17]. 본 연구의 미동마멸 시험조건을 정하기 위하여 여러연구자들의 기준으로 잡고 사용한 마모시점(End-of-life)으로 전기 접촉저항의 임계저항을 0.01 Ω으로 설정하였다.

자동차에 사용되는 커넥터 및 단자는 다양한 환경인자들에 대해 시험을 한다. 기계적인 시험, 전기, 전자적인 특성시험 및 환경시험등 많은 시험을 거쳐 신뢰성이 확보된 제품을 사용하고 있다. 환경시험 항목중 온도특성에 대한 시험들이 많다. 저온, 고온방치, 냉열충격, 온도사이클 시험등 저온에 대한 시험이 많이 진행됨에 따라 저온에서의 미동마멸 현상을 확인 하는 실험 또한 필요하다. 이를 위해 본 시험기기를 개발하였으며 이를 통해 실제 저온 실험을 진행하였다.

시험은 저온인 -40°C에서 진행되었으며, 측정된 시편의 저항 변화 결과는 Fig. 13과 같고 시험사이클 구역별로 나눈 것은 Table 5와 같다.

저온구간에서 시험기기의 원활한 동작으로 인해 시험결과를 확인할 수 있었고, 총 550 사이클 진행중 시편의 파손기준으로 잡은 0.01 Ω은 505사이클 진행 후 파손기준 0.01 Ω에 도달하였음을 확인할 수 있었다. 시험을 시작한 초기부터 300사이클 이내 까지는 저항의 변화가 크지 않고 서서히 증가되는 모습을 보이다가 300-400사이클 때 저항의 변화량이 초기보다 크게 나타나는 모습을 확인할 수 있다. 이는 시편의 미동마멸 부식 현상이 점차 증가되는 현상에 따라 나타나는 저항 변화로 판단되었다. 이후 400사이클 이상부터 파손기준인 0.01 Ω에 도달하기 까지는 저항의 변동폭이 400사이클 이전보다 상대적으로

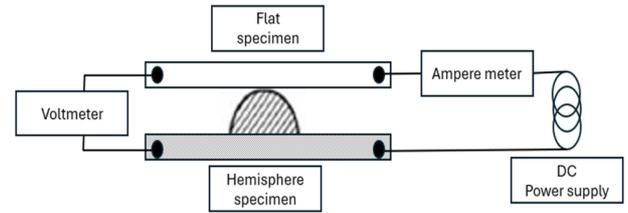


Fig. 12 Circuit used to measure the contact resistance

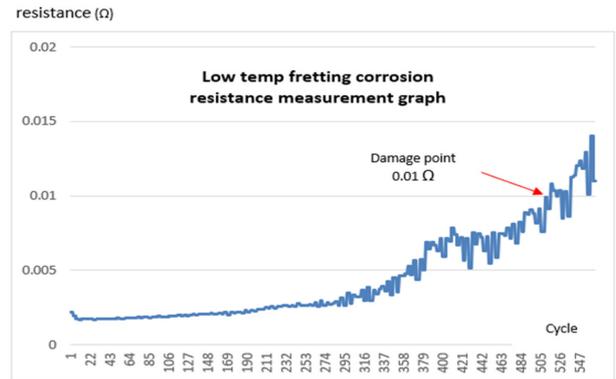


Fig. 13 Result of fretting corrosion test under -40°C condition

Table 5 Results according to the test cycle

Test cycle	Resistor [Ω]
0-300	Less then 0.005
300-400	≥ 0.005
400-500	≤ 0.01
505	Greater than 0.01

크게 나타났으며 이는 시편의 미동마멸 부식현상이 지속적으로 진행됨에 따라 시편의 저항변화가 계속 나타나고 있음을 나타낸다고 볼 수 있다. 사이클별 온도변화는 Table 5와 같다. 이렇게 저온에서 측정된 결과를 바탕으로 제작된 시험기기가 저온에서 미동마멸부식 특성을 측정하기에 충분한 성능을 지녔음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

전기적 커넥터의 미동마멸부식 현상에 있어서 영향을 끼치는 주요 인자 중 하나인 온도의 효과를 분석하기 위하여 저온에서도 실험이 가능한 실험장치를 설계, 제작하였다. 제작된 실험기의 온도, 변위 실험을 통해 상온뿐만 아니라 -40°C의 저온까지 안정적으로 작동함을 확인하였으며, 이를 통해 저온실험이 가능함을 보였다. 이러한 내용을 정리하면 다음과 같다.

저온에서도 측정이 가능한 미동마멸부식 측정기기를 설계, 제작하였다. 베크라이트 박스를 이용하여 구동부를 분리하고, Vortex Tube를 이용하여 따뜻한 공기를 주입하여 구동기의 작동성을

확보하였다. 또한, 환경챔버에 넣어 실험할 수 있도록 전체적인 크기 또한 컴팩트한 크기로 구성하였다.

시험편의 정확한 제작을 위해 시험시편 지그 또한 설계, 제작하였다. 기존 펀치와 달리, 일정한 힘이 인가되도록 스톱퍼를 구성하였다. 이를 통해 균일한 품질의 시험시편을 제작할 수 있도록 하였다.

제작된 시험기를 환경챔버에 넣어 성능시험을 진행하였다. 환경챔버의 온도는  $-40^{\circ}\text{C}$  였으나 박스 내부 온도는 영상을 유지하였으며, 변위 300, 500  $\mu\text{m}$ 에 대해 1,000사이클까지 잘 작동하는 것을 확인할 수 있었다.

주석 도금한 시험편을 이용하여  $-40^{\circ}\text{C}$ 의 저온환경에서 정전류법을 이용하여 시험을 진행하였으며, 505사이클에서 파손기준인 0.01  $\Omega$ 에 도달함을 확인하였다. 이를 통해 제작된 시험기기가  $-40^{\circ}\text{C}$ 의 환경에서도 미동마멸부식 실험이 가능함을 확인하였다.

본 시험기와 시험편을 통하여 상온뿐만 아니라 저온에서의 미동마멸 거동을 구현하는 것이 가능하여, 이를 통해 커넥터를 설계하는데 필요한 정보를 획득하는데 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- Swingler, J., McBride, J., (1998), The synergistic relationship of stresses in the automotive connector, Proceedings of the 19th International Conference on Electric Contact Phenomena, 141-145.
- Neyer, A., Wittmann, B., Johnck, M., (2002), Plastic-optical-fiber-based parallel optical interconnects, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 5(2), 193-200.
- Swingler, J., McBride, J. W., Maul, C., (2002), Degradation of road tested automotive connectors, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 23(1), 157-164.
- Antler, M., (1985), Electrical effects of fretting connector contact materials: A review, Wear, 106(1-3), 5-33.
- Hannel, S., Fouvry, S., Kapsa, P., Vincent, L., (2001), The fretting sliding transition as a criterion for electrical contact performance, Wear, 249(9), 761-770.
- Fouvry, S., Jedrzejczyk, P., Chalandon, P., (2011), Introduction of an exponential formulation to quantify the electrical endurance of micro-contacts enduring fretting wear: Application to sn, ag and au coatings, Wear, 271(9-10), 1524-1534.
- Jedrzejczyk, P., Chad, S., Fouvry, S., Chalandon, P., (2009), Impact of the nickel interlayer on the electrical resistance of tin-tin interface submitted to fretting loading, Surface and Coatings Technology, 203(12), 1624-1628.
- Park, Y. W., Lee, K. Y., (2008), Development of empirical equations for fretting-corrosion failure-time of tin-plated contacts, Wear, 265(5-6), 756-762.
- Oh, M.-J., Kim, M.-J., Kim, T.-Y., Kang, S.-H., Kim, H.-K., (2014), Fretting corrosion behavior of silver-plated electric connectors with constant displacement amplitude, Tribology and Lubricants, 30(2), 99-107.
- Lee, D.-J., Lee, C.-E., Kim, H.-K., (2020), Effect of normal forces on the electrical endurance of tin-plated contacts under elevated temperature fretting conditions, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 10(7), 1158-1165.
- Oh, M.-J., Kang, S.-H., Lee, M.-S., Kim, H.-K., (2014), Fretting corrosion behavior of tin-plated electric connectors with variation in temperature, Tribology and Lubricants, 30(3), 146-155.
- Kim, Y. S., (2018), Environmental test specifications for automotive electrical units, Journal of Korean Society for Quality Management, 46(2), 311-326.
- Kim, M. J., (2017), Effect of normal forces on fretting corrosion of tin-plated electrical contacts, Ph.D. Dissertation, Seoul National University of Science and Technology.
- Hwang, S. W., (2023), Temperature effects on the durability of an au-plated electrical contact under fretting conditions, Ph.D. Dissertation, Gyeongsang National University.
- Park, Y. W., (2008), Studies on fretting corrosion of Tin coated electrical contacts, Ph.D. Dissertation, Yonsei University.
- Mroczkowski, R. S., (1998), Electronic connector handbook: Theory and applications, McGraw-Hill.
- Oh, M. J., (2016), Improvement methods for degradation of copper alloy electric connectors under fretting corrosion, Ph.D. Dissertation, Seoul National University of Science and Technology.



**Jeong Hyun Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is automotive electric and electronic engineering.  
E-mail: eoskjh@naver.com



**Sang Hoon Lee**

Professor in the Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is micro/nano fabrication, MEMS, and sensors.  
E-mail: hyla@seoultech.ac.kr

# 다양한 발사 환경을 고려한 쿼드콥터형 캔위성의 구조 설계와 안전성 연구

## Structural Design and Analysis of a Quadcopter Type CanSat for Diverse Launch Conditions

이용선<sup>1</sup>, 임현규<sup>1</sup>, 양현창<sup>1</sup>, 최창범<sup>2, #</sup>, 노진성<sup>1, #</sup>  
Yongseon Lee<sup>1</sup>, Hyeongyu Lim<sup>1</sup>, Hyeonchang Yang<sup>1</sup>, Changbeom Cho<sup>2, #</sup>, and Jinsung Rho<sup>1, #</sup>

<sup>1</sup> 국립한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University)  
<sup>2</sup> 국립한밭대학교 컴퓨터공학과 (Department of Computer Engineering, Hanbat National University)  
# Corresponding Author / E-mail: cbchoi@hanbat.ac.kr, TEL: +82-42-821-1144, ORCID: 0000-0002-4826-7949  
E-mail: jinsung.rho@hanbat.ac.kr, TEL: +82-42-821-1155, ORCID: 0000-0002-4525-8860

KEYWORDS: Structural analysis (구조해석), Modal analysis (모드 해석), Random vibration analysis (랜덤 진동 해석), Acceleration load analysis (가속도 하중 해석)

*This study evaluates the structural design and safety of the CanSat in launch environments. The CanSat serves as an educational replica satellite, allowing users to experience the design and operation of small satellites. To ensure stable operation during launch, the structural analysis and design must consider external forces, including vibration and acceleration loads. We determined the material properties for the structure and conducted modal and random vibration analyses, comparing the results with launch environment data from NASA, ECSS, Falcon 9, and Soyuz-2. Additionally, we performed an acceleration load analysis using actual data from CanSat launches during competitions. The modal analysis indicated that the first natural frequency was 65.34 Hz, which exceeds the required threshold. The random vibration and acceleration load analyses further confirmed the structural safety of the design. While the data from NASA and ECSS were conservatively set, reflecting higher vibration intensities, the Falcon 9 and Soyuz-2 launch vehicles provided relatively lower vibration environments due to differences in their designs. Overall, the results demonstrate that the CanSat's structural integrity is maintained under the conditions analyzed for Falcon 9 and Soyuz-2.*

Manuscript received: March 21, 2025 / Revised: August 24, 2025 / Accepted: August 27, 2025

### 1. 서론

최근 우주 산업은 급격한 변화와 혁신을 겪으며 ‘뉴스페이스 (New Space)’ 시대에 진입하고 있다. 이 시대는 민간 기업의 적극적인 우주 개발 참여와 기술 발전을 바탕으로 우주 산업이 기존의 정부 중심에서 상업적, 민간 주도로 전환되고 있는 것을 의미한다[1]. 특히 저비용 고효율을 추구하는 초소형 저궤도 위성에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 초소형 위성은 근접 운용으로 임무를 수행하는 100 kg급 이하 위성을 총칭하는 용어로 통신, 지구 관측, 과학 탐사 등 다양한 분야에서 초소형 위성의 역할이 날로 중요 해지고 있다. 이러한 흐름에 따라 초소형 위성의 설계와 운영을 실제로 경험할 수 있는 교육 프로그램의 필요성이 높아지고 있다. 교육적 요구를 충족하기 위해 교육용

모사 위성인 캔위성이 활용되고 있다[2]. 캔위성은 음료수 캔 형태의 초소형 위성으로 로켓을 이용하여 지상으로부터 약 500-1,000 m 높이까지 발사되며 공중에서 서서히 낙하하면서 임무를 수행한다. 이는 기본적인 위성의 구조 및 체계를 이해하는데 도움이 된다. 발사체에 탑재된 위성은 발사 시 충격 하중, 음향 진동, 랜덤 진동 등을 받게 된다[3]. 캔위성의 안정적인 운용을 위해서 설계 시 로켓과 구조체의 공진 방지와 발사 시 발생할 수 있는 불규칙한 진동과 충격, 하중 변화에 대한 안전성 평가를 위해 구조해석 및 설계가 이루어져야 한다.

이에 따라 해외에서 캔위성의 구조해석에 관한 연구가 선행되었다. 로버 형태 캔위성의 비공기압 바퀴가 장애물 경로 주행에 대한 시뮬레이션을 수행하여 구조해석 결과를 분석하는 연구[4]를 수행하였으며, 캔위성 설계 및 드론이나 로켓 발사체와

같은 운송 수단으로 인해 발생하는 진동 환경 및 가속도에서의 동적 거동을 구조해석 하여 연구[5] 사례가 있다. 하지만 일부 모델에 대해 진행하거나 로켓 발사체의 가속도를 예측하여 구조해석을 진행하기 때문에 전체적으로 다양한 동적 거동을 확인하기 어렵다는 한계가 있다.

또한 국내에서도 초소형 위성인 큐브위성의 구조체 설계와 구조해석을 통해 설계된 구조체의 안전성을 분석하는 연구[6-8]가 수행되었다. 국내 캔위성과 관련해서는 인공지능 알고리즘을 운용할 수 있는 소형 컴퓨터를 기반으로 차량 추적 기능을 수행하는 캔위성 시스템을 개발하는 연구[9] 및 낙하하는 동안 태양이 떠 있는 방향으로 센서부를 지향하는 캔위성을 제작하는 논문[10]이 보고되었다. 이러한 선행 연구들은 진동 환경에 대한 구조물 신뢰성 분석이 중요함을 보여준다. 본 연구와 유사하게 부품의 구조적 신뢰성을 예측하기 위해 유한요소 모델을 활용한 모드 해석 및 진동 특성 분석과 관련된 연구 사례가 있다[11-13].

본 논문에서는 캔위성의 전체 모델에 대한 발사체 발사 시 가속도에서의 동적거동 뿐만 아니라 모드 해석과 발사체에서 제공하는 진동 데이터를 이용하여 구조체의 안전성을 평가하고자 한다. 발사체 제작 회사 및 국가별 항공우주국에서 설계 시 필요한 자료들을 제공하고 있다. 이 자료들은 발사체의 엔진, 분리 과정, 추진체 등 다양한 요인들에 의해 데이터 값이 달라질 수 있다. 본 논문에서 SpaceX의 Falcon 9, 러시아의 Soyuz와 National Aeronautics and Space Administration (NASA), European Cooperation for Space Standardization (ECSS)에서 제공하는 발사 환경 데이터들을 비교하여 구조해석을 진행하였다.

## 2. 캔위성 구조체의 설계 및 구조해석

### 2.1 구조체 형상 기초설계 및 재료선정

설정한 캔위성의 임무는 공중에서 낙하하면서 탑재된 카메라 모듈로 지상을 감시하는 역할로 낙하 과정에서 촬영의 안정성과 낙하 지연을 제어하기 위해 쿼드콥터가 사용된다. 캔위성은 4개의 모터와 프로펠러를 포함하여 센서, 통신 모듈, GPS 모듈, 카메라 모듈, 배터리, 서보 모터, Single Board Computer (SBD) 등 다양한 구성요소로 이루어져 있으며, 이러한 부품들은 Fig. 1에 나타나 있다. 구조체는 발사체에 탑재될 수 있도록 지름 110 mm, 높이 200 mm, 무게 1 kg 이내로 제작하였으며 질량 중심(Center of Mass)은 캔위성의 안정적인 운용을 보장하기 위해 Fig. 2와 같이 구조체의 중심부에 위치하도록 설계되었다. 쿼드콥터 전개는 내부에 서보 모터가 회전하여 모터 암(Motor Arm)이 전개할 수 있도록 설계하였다. 각 센서와 부품들은 구조체에 볼트와 너트로 체결되었으며, 외부와의 간섭을 방지하기 위해 카운터 보어(Counterbore) 기법을 사용하여 설계하였다.

구조체 주재료는 PLA로 3D 프린터를 통해 출력하였으며, 추가적인 내구성을 위해 STS 304 서포트를 사용하였다. 설계에

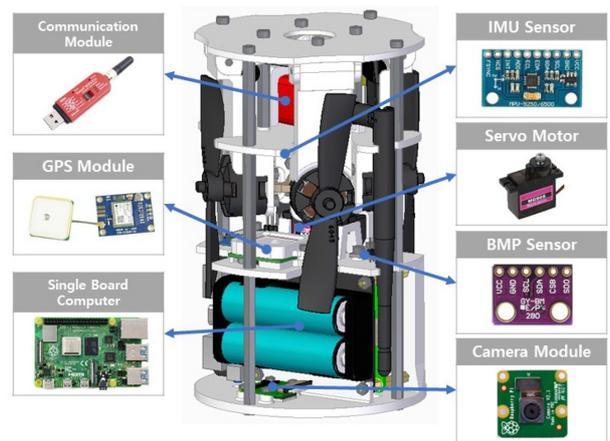


Fig. 1 Overall configurations for CanSat

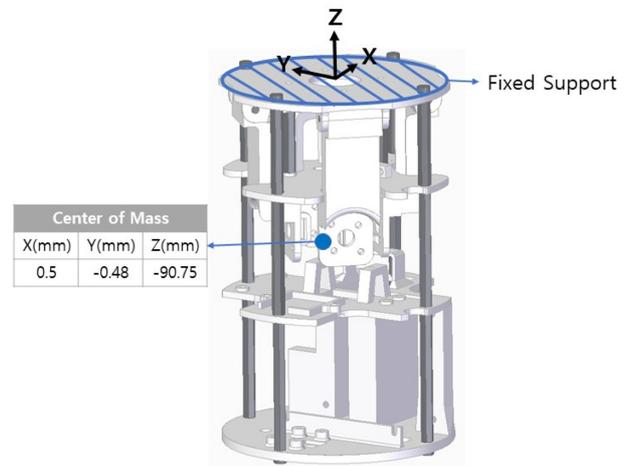


Fig. 2 Designed CanSat structure

Table 1 Material properties of CanSat structure

Properties	Unit	PLA (30%)	PLA (75%)	STS 304
Young's Modulus	GPa	0.375	0.473	195
Poisson's ratio	-	0.36	0.36	0.27
Density	kg/m <sup>3</sup>	870	1140	7969
Yield strength	MPa	14	24	252.1
Tensile strength	MPa	17.7	28.7	565.1

사용된 PLA 필라멘트 출력물은 내부 채움(Infill)에 따라 기계적 성질이 달라진다. PLA의 인장 실험을 통해 내부 채움이 30-50%일 때 인장 계수의 큰 차이가 없고[14] PLA가 열에 의한 수축 팽창이 있다는 점에서 큰 밀도는 출력과정에서 변형이 발생하여 가벼우면서 강도는 차이가 없는 30%를 선정하였으며, 그 외 응력을 집중적으로 받는 부분에 대해서는 75%의 내부 채움을 적용하였다. 내부 채움에 따라 탄성계수와 항복응력도 달라지는데 인장시험 연구 결과를 통해 선정하였으며[15,16], STS 304의 물성치와 함께 Table 1에 정리해 두었다.

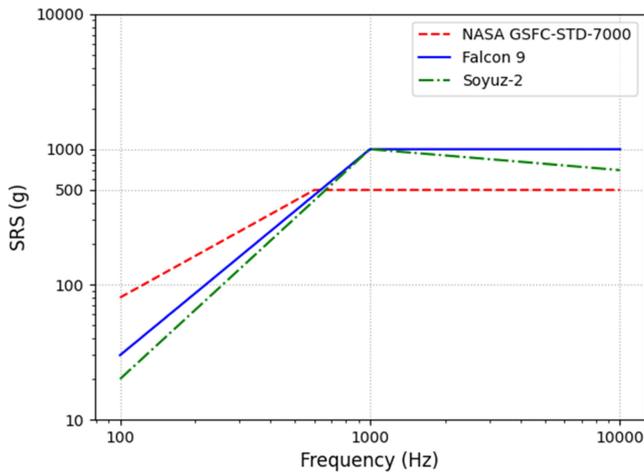


Fig. 3 Shock response spectrum at the space craft separation event

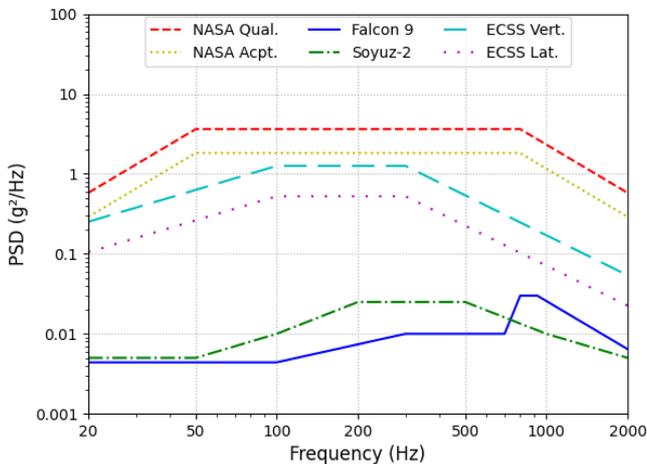


Fig. 4 Power spectral density according to launch environment

2.2 발사 환경 데이터 분석

발사체 제작 회사 및 국가별 항공우주국에서 다양한 자료를 제공하고 있다. Fig. 3은 NASA, SpaceX의 Falcon 9, 러시아의 Soyuz-2에서 제공하는 발사 환경 데이터 중 Shock Response Spectrum (SRS)을 나타낸 그래프이다[17-19]. Falcon 9과 Soyuz의 SRS는 발사체 분리 과정에 대한 충격 응답 스펙트럼이며, NASA의 데이터는 기타 하드웨어 요구사항을 위한 가이드라인으로 이 곡선을 초과하는 경우 하드웨어에 대한 비행 충격 테스트를 고려해야 한다.

Fig. 4는 발사 시 랜덤 진동 환경에서의 Power Spectral Density (PSD) 데이터이다. NASA는 Qualification (Qual.)과 Acceptance (Acpt.) 시험으로 나누어 기준을 제공한다[17]. ECSS는 탑재체의 위치에 따라 제공하는 기준이 다르며 위치가 외부 패널 또는 위치를 특정할 수 없는 경우 Vertical (Vert.)과 Lateral (Lat.) 방향의 기준을 제시하며, 외부 패널에 위치하지 않는 경우 모든 축방향으로 Lat.와 같은 기준을 제시한다[20]. NASA와 ECSS는 탑재체의 무게를 고려한 기준을 제시한다.

NASA의 General Environmental Verification Standard (GEVS) [17]와 ECSS의 Space Engineering – Testing [20] 기준에 명시된 절차를 참고하여, 무게가 1 kg을 기준으로 입력진동을 계산하였다. 이 기준들은 다양한 탑재체의 질량에 따른 진동 응답을 예측할 수 있는 가이드라인을 제공하며, 본 연구에서는 이 가이드라인에 따라 1 kg 캔위성에 적용되는 PSD 곡선을 설정하였다.

NASA와 ECSS의 경우 보수적인 설계, 광범위한 적용 범위와 같은 다양한 요소에 기인하여 높은 PSD 값이 설정되었다고 판단하였다. Falcon 9과 Soyuz-2는 LOX 산화제와 RP-1 연료를 추진제로 사용하며, 단 분리 시 공압 푸셔 분리 방식을 사용한다. Falcon 9은 2단 로켓에 9개의 Merlin 1D 엔진을 사용하지만, Soyuz-2는 3-4단 로켓에 1개의 RD-107 엔진과 같은 엔진을 사용하는 부스터가 4개이다. 그 외 다양한 차이점으로 인해 주어진 발사 환경 데이터가 다를 수 있다.

2.3 구조해석 조건 및 방법

2.3.1 안전계수 설정 및 해석 모델의 가정

재료 특성의 불균일성, 하중 및 응력 해석의 불확실성에 대비하여 안전계수를 설정해야 한다. NASA의 GSFC-STD-7000 [17]을 참고하여 금속 재질은 1.25, PLA는 1.5의 안전계수를 선정하였다. 또한 구조체의 안전성을 평가하기 위해 Margin of Safety (M.o.S)를 식(1)과 같이 값이 0 이상일 때 안전성을 확보한 경우로 판단하였다.

$$M.o.S = \frac{Yield\ Stress}{Safety\ Factor \times Equivalent\ Stress} - 1 \geq 0 \quad (1)$$

발사체에 탑재된 위성은 발사 시 충격 하중, 음향 진동, 랜덤 진동 등을 받게 된다. 캔위성의 경우 최대 1 km 상공까지 날아가기 때문에 상대적으로 짧은 비행 거리와 간단한 발사 환경 때문에 음향 진동과 분리 이벤트로 인한 충격 하중은 크지 않으며 캔위성은 발사체 내부에 탑재되어 비행하므로 외부 공기와의 직접적인 마찰이나 압력 변화에 의한 유체역학적 하중의 영향은 미미하다고 판단하였다. 따라서 발사체 내부에서 발생하는 랜덤 진동과 가속도 하중만을 고려하여 구조해석을 진행하였다.

캔위성은 별다른 결속장치 없이 위성의 윗부분이 발사체의 아래쪽을 향하도록 탑재되기 때문에 구속조건이 명확하지 않다. 따라서 중력과 낙하산에 의한 고정과 가속한 조건을 고려하여 Fig. 2와 같은 구속조건을 선정하였다. 각각의 부품은 접착제나 볼트를 사용하여 연결하였으며, 캔위성 구조체의 프레임과 지지대는 실제 볼트 체결 형상을 단순화하여 접촉면을 Bonded 조건으로 모델링하였다, 이는 계산 효율성을 확보하고 연결부에서의 상대 변위를 억제하여 강성 중심의 해석을 하기 위함이다. 센서와 같이 복잡한 형상의 부품을 모델링하는 것은 계산 시간과 자원을 많이 소모하므로 무게 중심과 질량만을 고려하여 Point Mass로 단순화시켜 해석을 진행하였다. 이러한 단순화는 캔위성 구조물 전체의 질량 분포와 관성 모멘트를 반영하여 전체 강성 및 동적 특성을 파악하는데 충분하다.

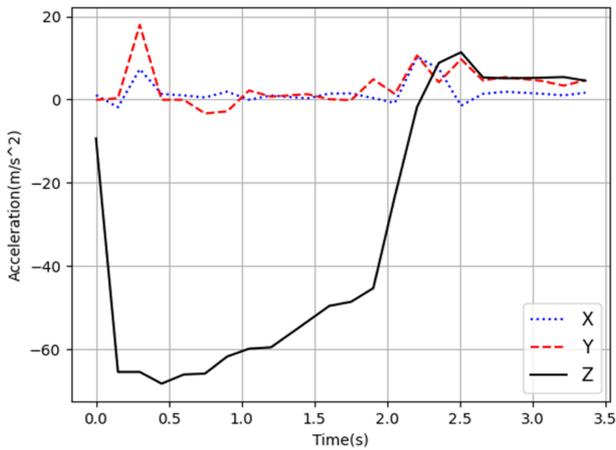


Fig. 5 Actual X, Y, Z axis acceleration data from CanSat launch environment

2.3.2 해석 방법 및 입력 조건

랜덤 진동 해석 시 발사 중 공진 현상을 피하고 동적 하중에 대한 안정성을 보장하기 위해 모드 해석을 진행하였으며, ECSS를 제외한 방향에 대해 조건이 없는 경우 X, Y, Z축에 각각 랜덤 진동을 가하였다. 해석 조건은 Fig. 3의 NASA와 ECSS, Falcon 9, Soyuz-2의 진동 규격을 기반으로[17-20] 다섯 조건에 대해 해석을 진행하였다. 여기서 감쇠비(Damping ratio)는 3D 프린터로 제작된 구조물의 진동 시험과 굽힘 시험을 통해 얻은 0.04로 선정하였다[21]. Fig. 5는 캔위성 경연대회에 참가하여 위성을 발사하는 과정에서 획득하였다. 캔위성 내부에 탑재된 가속도센서의 Z축을 발사체의 진행 방향으로 설정하였고 발사되는 동안의 X, Y, Z축별 가속도 값을 시간에 따라 측정된 값이다. 이 데이터를 활용하여 과도해석(Transient Analysis)을 통해 구조체에 가해지는 가속도 하중 해석을 진행하였다.

본 연구는 범용 해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 구조해석을 수행하였으며 Fig. 6과 같이 삼면체와 사면체 형상의 요소 수 37,443개, 절점 수 66,922개가 사용되었다.

3. 구조해석 결과

3.1 모드 해석

Falcon 9의 고유 진동수 기준은 횡방향 10 Hz, 축방향 25 Hz, 2차 구조물의 최소 공진 주파수는 35 Hz 이상을 요구한다[18]. 본 연구에서는 33개의 모드를 계산하였으며 결과는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 1차 고유 진동수는 65.34 Hz로 발사체의 고유 진동수와 30 Hz 이상의 차이를 보여 구조체가 발사체와의 공진에 대해 안정성을 확보하였다고 판단하였다.

3.2 랜덤 진동 해석

본 해석의 입력조건은 Fig.4에 제시된 NASA, ECSS, Falcon 9, Soyuz-2의 PSD 곡선을 사용하였다. 또한 발사 시 발생하는

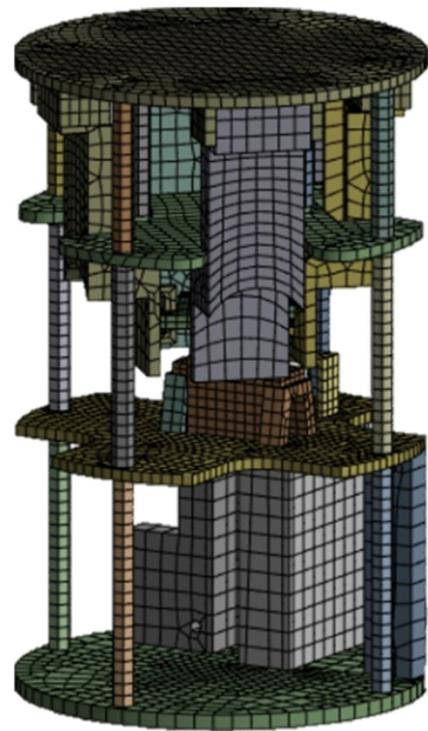


Fig. 6 Finite element mesh model of CanSat structure

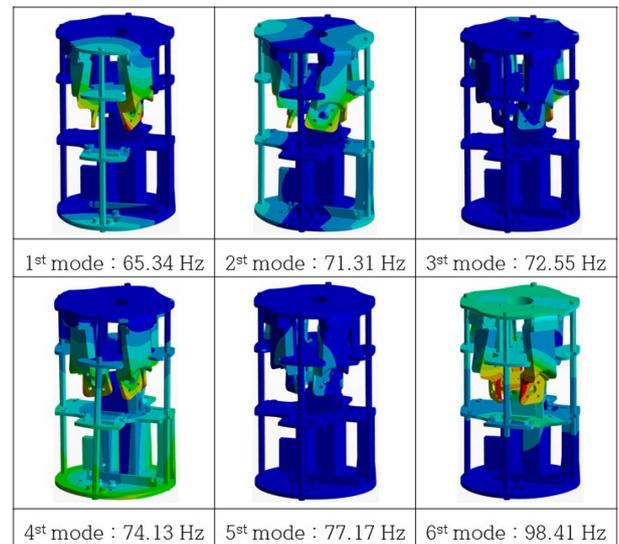


Fig. 7 Mode shape of structure

음향 및 구조적 진동이 20-20,000 Hz의 전 주파수 대역에 걸쳐 발생하며, 발사 초기에는 강한 저주파와 음속 돌파 시 중간 주파수, 단 분리 및 음향 반사에 의한 고주파가 발생한다[22]. 캔위성은 단 분리 없는 간단한 발사와 비교적 낮은 소음으로 20-500 Hz 대역의 모드 값을 구하여 랜덤 진동 해석을 진행하였다.

해석 결과는 Table 2에 정리된 M.o.S로 나타났다. Table 2를 보면 Falcon 9과 Soyuz-2 발사 환경에서의 캔위성이 구조적 안전성을 확보한 반면, NASA와 ECSS에서는 높은 진동 강도로

Table 2 Random vibration analysis results

Test Type	Dir	Max Stress [MPa]	M.o.S	
NASA	Qual.	X	1677.10	-0.88
		Y	1695.80	-0.88
		Z	581.88	-0.65
	Acpt.	X	1185.90	-0.83
		Y	1199.19	-0.83
		Z	411.45	-0.51
Falcon 9	X	65.29	2.09	
	Y	69.70	1.89	
	Z	22.95	7.79	
Soyuz-2	X	110.66	0.82	
	Y	117.86	0.71	
	Z	79.44	1.54	
ECSS	X	479.31	-0.58	
	Y	497.64	-0.59	
	Z	340.04	-0.41	

인해 안전여유율이 음수로 계산되어 안전성을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 각 발사 환경에서의 응력 분포를 시각적으로 보여주기 위해 최대 등가응력이 X, Y, Z축에서 1677.10, 1695.80, 581.88 MPa로 가장 높은 NASA Qual. 조건과 각각 65.29, 69.70, 22.95 MPa로 가장 낮은 Falcon 9 조건의 결과를 각각 Figs. 8과 9에 나타냈다. 두 환경의 응력 레벨 차이가 크기 때문에 각 그림은 최대 응력이 발생하는 지점을 명확하게 보여 줄 수 있도록 개별적인 색상 범례를 적용하였다.

Fig. 4의 NASA와 ECSS, Falcon 9, Soyuz-2의 PSD 데이터와 Table 2의 결과를 비교해 보면 Falcon 9의 진동 강도가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. NASA와 ECSS는 보다 다양한 상황에 대비해야 하므로 더 높은 진동 강도를 기준으로 하였고, Falcon 9과 Soyuz-2의 경우 화약을 이용한 분리가 아닌 공압식 시스템을 사용하여 페어링 분리 시 발생하는 충격과 진동이 크게 줄어들었으며, 액체 연료 추진 방식과 추력 조절을 통해 발사 시 발생하는 가속과 감속을 제어하여 탑재체에 도달하는 진동 강도를 감소시켜 NASA 대비 더 낮은 결과를 얻었다. 20-500 Hz의 진동 대역을 사용하여 상대적으로 중간 주파수가 더 높은 Soyuz-2가 Falcon 9 대비 응력이 더 높은 경향을 보였다.

3.3 가속도 하중 해석

가속도 하중 해석은 캔위성이 발사될 때 발생하는 정적 가속도 하중에 대한 구조적 안전성을 평가하기 위해 수행되었다. 본 해석의 입력 데이터는 Fig. 5에 제시된 X, Y, Z축 가속도 데이터를 사용하였다. 설정된 가속도 하중 조건 하에 구조 해석을 수행한 결과 각 축 방향의 가속도 하중에 대한 등가 응력 분포는 Fig. 10에 나타나 있다. 또한 발사 중 시간에 따라 변화하는 응력 값은 Fig. 11 그래프를 통해 확인할 수 있다. 발사 후

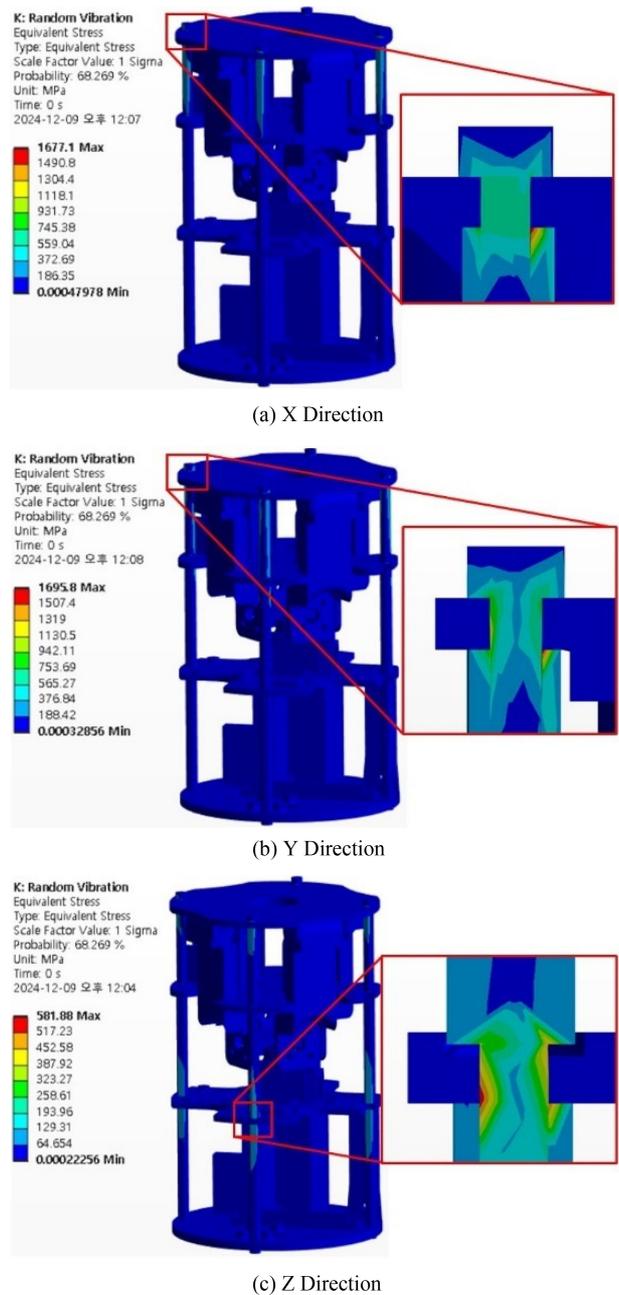


Fig. 8 Random vibration analysis for NASA Qual

0.30575 s에서 서포트 부분에 최대 70.94 MPa의 등가응력이 발생하였으며, 결과에 대한 M.o.S값은 1.84로 구조체가 실제 캔위성 발사체에도 안전성을 확보하였음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 쿼드콥터 형태 캔위성에 대하여 설계 및 항공 우주국과 기업에서 제공하는 발사 환경 데이터를 비교하여 구조해석을 진행하였다. 설계된 구조체의 안전성을 확인하고자 ANSYS Workbench 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다.

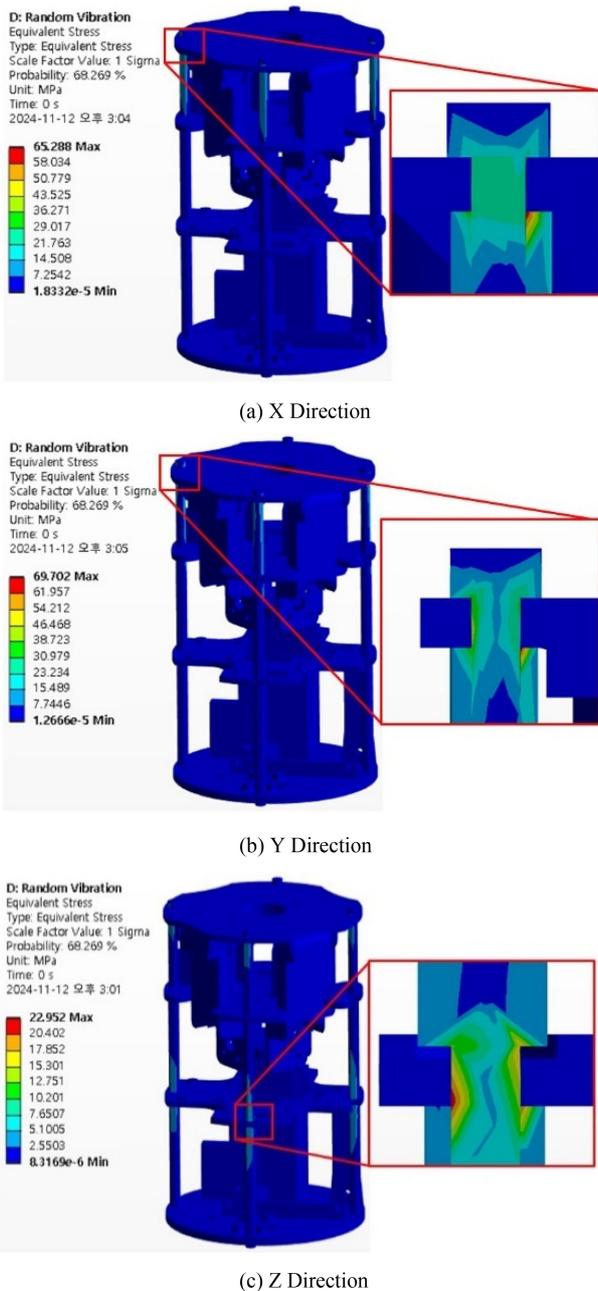


Fig. 9 Random vibration analysis for Falcon 9

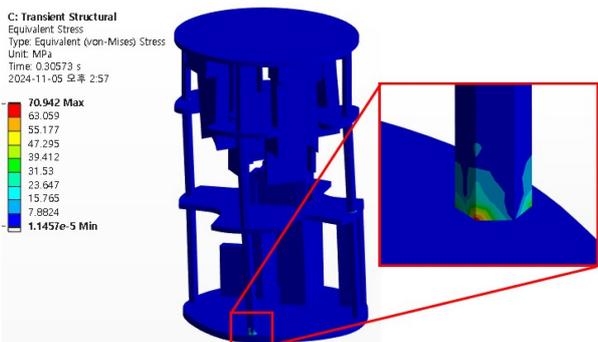


Fig. 10 Acceleration load analysis for X, Y, Z axis acceleration

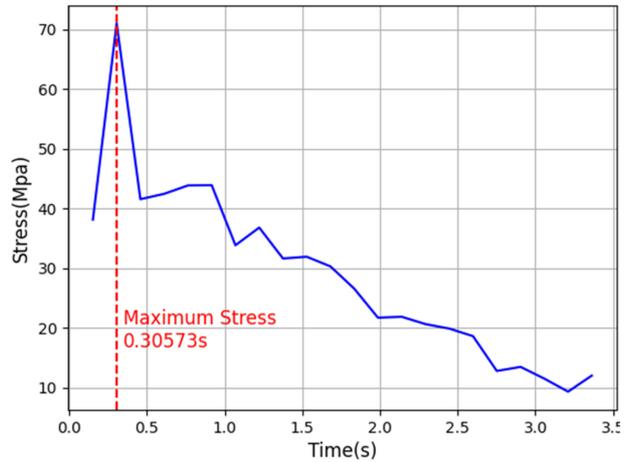


Fig. 11 Equivalent stress under acceleration load

NASA와 ECSS, Falcon 9, Soyuz-2에서 제공하는 데이터와 경연대회를 통해 얻은 캔위성 발사체의 축별 가속도 데이터를 구조체에 인가하였고 모드 해석, 랜덤 진동 해석 및 가속도 하중 해석을 수행하였다. 33개의 모드를 계산하여 수행한 모드 해석 결과 1차 모드는 65.34 Hz로 Falcon 9의 요구사항인 35 Hz 이상을 만족시켜 발사체와의 공진에 대해 안정성을 확보하였으며, 구조체의 X, Y, Z축 방향으로 다섯 조건의 랜덤 진동을 적용한 결과 NASA Qual.의 조건에서 가장 큰 최대 등가응력이 발생하였으며, Falcon 9에서 가장 작은 최대 등가응력이 계산되었다. 가속도 하중 해석 결과 최대응력은 70.94 MPa이었으며 서포트 연결부에서 발생하였다. 실제 캔위성 발사체의 가속도 데이터와 Falcon 9, Soyuz-2의 기준을 이용한 구조해석 결과 모두 0 이상의 안전여유율을 가졌으며 0에 근접한 결과라도 실제 위성 발사 환경이 캔위성의 발사 환경보다 가혹한 환경임을 고려했을 때 구조적으로 안전함을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업(No. 22-CM-EC-35)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Lee, K. O., (2024), Changes in space policy brought by spacex, Space Policy Research, 9, 8-21.
2. Won, S.-H., Jun, H.-Y., Kim, S.-H., and Lee, S.-R., (2012), Very small satellite program for expanding the space technology base: cansat competition, Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 40(7), 636-645.

3. Israr, A., (2014), Vibration and modal analysis of low earth orbit satellite, *Shock and Vibration*, 2014, 1-8.
4. Nuñez-Quispe, J. J., (2021), Design and simulation of a rover cansat non-pneumatic wheel: preliminary study for a certain test obstacle path, *Proceeding of the 12th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, 484-488.
5. Gómez Roa, A., Paz González, M. L., Calvillo Téllez, A., Paz González, J. A., Morales Contreras, O. A., and Núñez Pérez, J. C., (2018), Structural dynamic analysis of cansat educational satellite, *Computación y Sistemas*, 22(2), 451-461.
6. Jang, J. I., and Park, S. H., (2019), Structural design and analysis of nanosatellite for microgravity scientific missions, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 28(2), 93-99.
7. Park, Y.-K., Kim, G.-N., and Park, S.-Y., (2021), Novel structure and thermal design and analysis for cubesats in formation flying, *Aerospace*, 8(6), 150
8. Shin, H.-S., and Kim, H.-D., (2018), Structural design and analysis of a 6U nano-satellite HiREV, *Journal of Aerospace System Engineering*, 12(3), 26-37.
9. Lee, Y. G., Yoo, S. H., Lee, S. H., and Lee, S. K., (2023), Development of CanSat system for vehicle tracking based on jetson nano, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 27(2), 161-169.
10. Jung, I.-J., Moon, J.-H., Kim, M.-S., and Lim, B.-D., (2013), Design of solar tracking CanSat, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 41(4), 327-334.
11. Go, E. Y., Lee, G. S., and Nam, D. Y., (2012), A study on the vibration characteristic of the PCB assembly housing using modal analysis, *Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference*, 683-684.
12. Kim, K. B., Kim, J. N., Lee, H. S., Kim, H. C., Ku, T.-W., and Kang, B.-S., (2022), Structural integrity improvement on engine-generator support structure for hybrid drone through finite element analysis and experimental verification, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(12), 913-921.
13. Shin, D., Jang, S., and Kwon, M., (2025), Safety analysis of transportation vibration and mounting methods for a large radar system with a commercial truck, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 42(1), 11-18.
14. Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P., and Fernando, A., (2020), Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3), 284-297
15. Seol, K.-S., Zhao, P., Shin, B.-C., and Zhang, S.-U., (2018), Infill print parameters for mechanical properties of 3D printed PLA parts, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(4), 9-16.
16. Seol, K.-S., Zhang, S.-U., Jo, V.-H., and Shin, B.-C., (2017), Evaluation of equivalent mechanical properties according to filling density of PLA parts fabricated by fused deposition modeling, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Autumn Conference*, 36.
17. NASA Goddard Space Flight Center, (2013), General environmental verification standard (GEVS) for GSFC flight programs and projects, (Report No. GSFC-STD-7000A). [https://explorers.larc.nasa.gov/2019APSMEX/MO/pdf\\_files/gsfcd-std-7000a\\_final\\_3-28-18.pdf](https://explorers.larc.nasa.gov/2019APSMEX/MO/pdf_files/gsfcd-std-7000a_final_3-28-18.pdf)
18. Space Exploration Technologies Corp., (2021), Falcon user's guide. <https://web.mit.edu/2.70/Reading%20Materials/SpaceX%20Falcon-users-guide-2021-09.pdf>
19. Arianespace, (2018), Soyuz CSG user's manual, (Report No. Soyuz-2-usersmanuel-issue2-revision1). <https://www.yumpu.com/en/document/view/8552991/soyuz-csg-users-manual-arianespace>
20. European Cooperation for Space Standardization, (2002), Space engineering: testing, (Report No. ECSS-E-10-03A). <https://ecss.nl/standard/ecss-e-10-03a-testing/>
21. Yadav, P. K., Abhishek, Singh, K., and Bhaskar, J., (2021), Effect of infill percentage on vibration characteristic of 3D-printed structure, *Proceeding of the International Conference on Advances Production and Industrial Engineering*, 565-573.
22. Arenas, J. P., and Margasahayam, R. N., (2006), Noise and vibration of spacecraft structures, *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 14(3), 251-264.

**Yongseon Lee**

Received a B.S. degree in Mechanical Engineering from Hanbat National University in 2025, with research interests in aerospace engineering.

E-mail: apple9035@naver.com

**Hyeongyu Lim**

Received a B.S. degree in Mechanical Engineering from Hanbat National University in 2025, with research interests in aerospace engineering.

E-mail: a3756@naver.com

**Hyeonchang Yang**

Received a B.S. degree in Mechanical Engineering from Hanbat National University in 2025, with research interests in aerospace engineering.

E-mail: did46@naver.com

**Changbeom Choi**

Professor in the Department of Computer Engineering at Hanbat National University, with research interests in computer simulation.

E-mail: cbchoi@hanbat.ac.kr

**Jinsung Rho**

Professor in the Department of Mechanical Engineering at Hanbat National University. His research interests include nano/microscale technologies and semiconductor metrology and inspection (MI) techniques, as well as structural and thermal analysis for space systems.

E-mail: Jinsung.rho@hanbat.ac.kr

## 대테러 보안 점검을 위한 천장 위험물 탐색 로봇

# Ceiling Hazardous Object Inspection Robot for Counter-terrorism Security Check

이상웅<sup>1</sup>, 고대권<sup>1</sup>, 이명석<sup>1</sup>, 송형석<sup>1</sup>, 표주현<sup>1</sup>, 서진호<sup>2</sup>, 김무림<sup>1, #</sup>  
Sangwoong Lee<sup>1</sup>, Daegwon Koh<sup>1</sup>, Meungsuk Lee<sup>1</sup>, Hyeongseok Song<sup>1</sup>, Juhyun Pyo<sup>1</sup>, Jinho Suh<sup>2</sup>, and Murim Kim<sup>1, #</sup>

<sup>1</sup> 한국로봇융합연구원 (Korea Institute of Robotics & Technology Convergence)  
<sup>2</sup> 경북대학교 기계시스템공학전공 (Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University)  
# Corresponding Author / E-mail: mulimkim@kro.re.kr, TEL: +82-54-240-2531  
ORCID: 0000-0001-5420-9705

KEYWORDS: Hazardous object detection (위험물 탐지), Search robot (탐색 로봇), Anti-terror security inspections (대테러 보안 점검)

*Ceiling inspections present challenges due to limited accessibility and structural constraints. To ease the burden on security personnel, who would otherwise need to manually disassemble, inspect, and restore ceiling components, this study proposes a robotic system for detecting hazardous objects within ceiling environments. The proposed system features several key innovations: a hollow-structured track mechanism designed to reduce vibrations from jolting while traversing structural beams and to improve localization accuracy. We optimized the robot's mass distribution and required drive torque through dynamic simulations to ensure stable mobility in confined ceiling spaces. For effective hazardous object detection, we developed a YOLOv8-Seg-based background learning algorithm that suppresses ceiling-structure patterns, allowing for the identification of unknown objects without prior class-specific training. Additionally, we introduced a frame-based filtering algorithm to enhance detection reliability by reducing false positives caused by motion blur during movement. The system's effectiveness was validated through experiments conducted in a ceiling-structured testbed, demonstrating its capability for accurate hazardous object detection under realistic operating conditions.*

Manuscript received: April 1, 2025 / Revised: July 21, 2025 / Accepted: August 27, 2025

### 1. 서론

경호팀에서는 경호 대상자가 도착하기 전에 사제 폭발물, 시한 폭탄 등이 설치되어 있는지를 방바닥부터 천장까지 순차적으로 수색하는데 천장 수색이 가장 어렵다. 천장은 협소하여 사람의 접근이 어려워 보안 사각지대로 남는 경우가 많으며, 이로 인해 위험물 은닉에 악용될 가능성이 높다. 현재 경호 요원들은 높은 곳에 있는 천장을 뜯어 수색하고 안전이 확인되면 다시 복구하고 있는데 이는 많은 시간과 비용을 수반한다. 천장 공간은 협소하며 최대 75 mm 높이의 장애물, 케이블, 배관 등이 밀집되어 있다. 이러한 요소들은 경량 철골(M-바) 구조와 천장판으로 구성된 내부에 배치되어 있다(Fig. 1). 본 논문에서는 천장 내부와 같은 협소한 환경에서의 장애물 극복 및 위험물 탐지가

가능한 로봇 시스템을 제안한다.

협소 공간 탐색을 위해 기존에 제안된 로봇으로는 뱀형 로봇, 덩굴 로봇 등이 있다. 뱀형 로봇은 유연한 구조를 바탕으로 좁고 복잡한 공간에서의 기동성이 우수하여 곡선이나 분기 구조가 많은 배관 내 탐색에 적합하다[1,2]. 그러나 뱀형 로봇은 유선(Tether)으로 구동되기 때문에 운용 범위가 제한적이며 기동을 돌다가 케이블에 매듭이 생기면 풀기가 어렵다. 덩굴 로봇은 공기압을 기반으로 한 유연한 튜브 형태로 구성되어 협소한 공간 접근성과 장애물 회피 성능이 뛰어나지만, 내구성이 낮고, 길이가 길어질수록 이동 속도가 저하되며 방향 제어가 어렵다[3-5]. 따라서 상술한 로봇들은 천장환경에서 사용하기에 적합하지 않다.

천장 환경에서 사용하려는 로봇은 천장판이 버틸 수 있는 하중인 5 kg 이내를 만족해야 하며, 70 mm 정도의 철골 구조물을

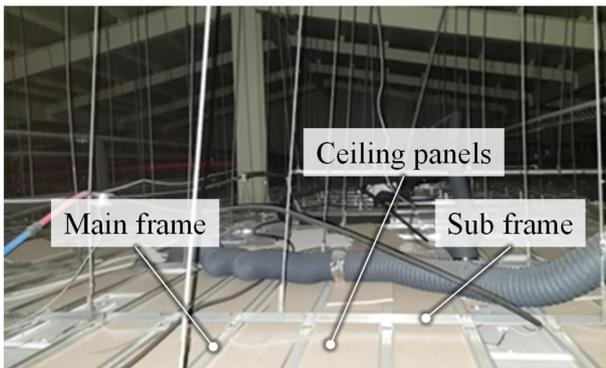


Fig. 1 Narrow-space environment (M-bar ceiling system)

넘을 수 있어야 하고, 천장 환경 내에서 이동하며 지도를 생성하고 의심스러운 물체가 있으면 지도에 그 물체의 위치를 표시해야 한다. 본 논문에서는 이러한 요구사항을 만족하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. (1) 로봇이 철골 구조물을 넘을 때 발생하는 충격에 의한 진동을 줄이고 위치 인식 정확도를 향상시키기 위해 트랙 시스템에 중공(Hollow) 구조를 도입하였고, 장애물 극복 성능 향상을 위한 러그(Lug) 형상을 설계하였다. 로봇의 무게와 구동 토크는 동역학 시뮬레이션을 통해 설계 사양을 도출하였다. 로봇이 안정적으로 동작하고 장애물을 효과적으로 극복할 수 있도록, 해석을 통해 질량 중심의 적정한 위치를 도출하였다. (2) 효과적인 위험물 탐지를 위해, YOLOv8-Seg 기반 배경 학습 기법을 개발하여 천장 구조 패턴을 배제하고 사전 클래스 학습 없이 미지의 물체를 탐지할 수 있게 하였다. (3) 모션 블러에 의해 발생하는 오탐을 줄이기 위해 프레임 기반 필터링 알고리즘을 적용하였다.

위험물 탐지를 위해 인공지능(AI) 기반 객체 탐지 기술이 활용될 수 있으나, 객체 탐지 AI 모델은 인식하려는 객체에 대해 대규모 학습 데이터를 미리 구축해야 한다는 한계를 갖는다 [6,7]. 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위해, 사전 정의된 객체 대신 배경을 학습하여 이를 제거한 후, 잔여 이미지 영역을 위험 요소로 판단하는 방식의 알고리즘을 제안한다. 해당 접근법은 학습 데이터에 대한 의존성을 낮추고, 다양한 환경에서 일반화된 위험물 탐지 성능을 확보할 수 있다. 제안한 로봇을 실제 천장 구조를 모사한 테스트베드에서 실험하여 효과적으로 위험물을 탐지할 수 있음을 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 로봇 플랫폼의 설계 방안을 소개하고, 3장에서 천장 장애물 극복 실험 결과를 소개한다. 4장에서는 천장 위험물 인식을 위한 알고리즘과 천장환경을 모사한 테스트베드 실험 결과를 소개한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론과 향후 계획을 서술한다.

## 2. 제안하는 로봇 플랫폼

### 2.1 천장 환경 특성

천장 환경은 Fig. 1과 같이 좁고 복잡한 구조로 인해 내부

탐색과 보안 점검에 어려움이 많다. 특히 철골 부재, 전선, 배관 등 다양한 구조물과 장애물이 혼재된 천장 환경은 로봇의 장애물 극복 높이, 회전반경, 크기 등 운용에 제약을 발생시킨다.

상업용 건물과 공공시설에 널리 사용되는 경량 철골 천장 시스템은 주 골조, 보조 골조, 천장 패널, 연결 부품으로 구성되며, 골조의 형상과 배치에 따라 M-bar, Chip-bar, T&H-bar 구조 등으로 구분된다[8]. 본 연구에서는 로봇 운용 천장 환경으로 M-bar 구조를 선정하였다.

M-bar 구조에서 주 골조는 17-20 mm, 보조 골조는 주 골조 위에 20-50 mm높이로 설치되며, 로봇이 극복해야 할 최대 단차 높이는 주 골조와 보조 골조의 높이를 합한 70 mm이다. 또한, 일반적인 천장 패널의 크기가 300 × 600 mm임을 고려할 때, 로봇이 골조 간섭 없이 회전할 수 있는 최소 공간은 300 × 300 mm이며, M-bar 주 골조 최소 폭 38 mm를 고려한 로봇 구동부 설계가 필요하다.

### 2.2 장애물 극복을 위한 로봇 동역학 해석

로봇은 천장 환경 내 최대 70 mm 높이의 단차를 극복할 수 있어야 한다. 이를 위해 질량 중심의 위치를 설계 변수로 설정하였는데 질량 중심의 위치는 로봇의 외부 형상을 유지하면서 배터리, 구동 모터 등 내부 구성품의 배치를 통해 조정할 수 있다. 장애물 극복 과정에서 로봇 플랫폼의 질량 중심이 장애물의 최상단을 통과하면 안정적으로 극복할 수 있다. 하지만, 이를 넘지 못하는 경우에는 전복이 발생한다[9,10].

로봇의 질량 중심에 따른 장애물 극복 가능 여부를 확인하고 적절한 질량 중심 위치를 도출하고자 동역학 해석을 수행하였다. 또한, 해석 결과를 통해서 장애물 극복에 필요한 모터의 구동 토크를 도출하였다.

동역학 해석 도구로는 RecurDyn을 활용하였으며, 궤도형 이동 로봇의 주행을 구현하기 위해 TrackLM 툴킷을 적용하였다. 해석을 위해, 로봇 플랫폼은 Fig. 2와 같이 차체, 궤도, 아이들러, 스프로킷으로 구성하였고, 천장 환경 내 골조 구조를 반영하여 높이( $h$ ) 70 mm, 폭( $w$ ) 20 mm의 장애물이 있는 천장 환경으로 모델링하였다. 또한, 로봇의 무게는 4.35 kg, 주행 속도는 0.3 m/s로 설정하였다.

Fig. 3과 같이 질량 중심( $CoM$ )의 위치는 스프로킷 중심( $O$ )로부터  $x$ 축 방향으로 거리( $L$ ) 만큼 떨어진 지점을 의미한다. 장애물 극복이 가능한 로봇의 질량 중심( $CoM$ ) 위치를 도출하기 위해, 휠 베이스(Wheel base,  $d_1$ ) 범위 내에서 거리( $L$ )를 다양하게 변화시키며 반복적인 해석을 수행하였다. 또한,  $d_2$ 는 로봇의 폭,  $d_3$ 는 로봇의 높이를 나타내며, 이에 대한 상세한 값은 Table 1에서 확인할 수 있다.

해석 결과는 Figs. 4(a) 및 4(b) 대표적으로 두 가지 경우(Case)다. Case 1에서는 거리  $L$ 이 69 mm로, 질량 중심이 로봇 플랫폼 중앙에 위치하며, Case 2에서는 거리  $L$ 이 91 mm로, 질량 중심이 로봇 플랫폼의 전방에 위치한다.

Fig. 4(a)에서 확인할 수 있듯이, Case 1에서는 질량 중심이

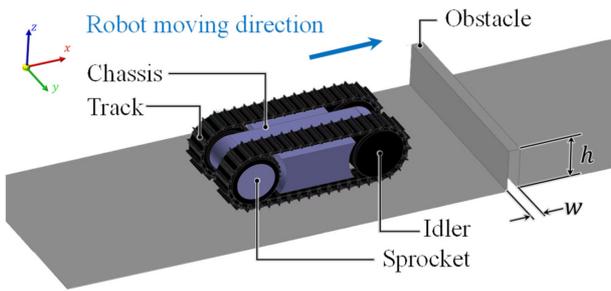


Fig. 2 Robot platform and simulation environment model

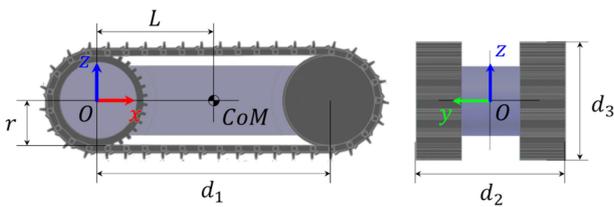


Fig. 3 Geometric parameters and center of mass of the robot

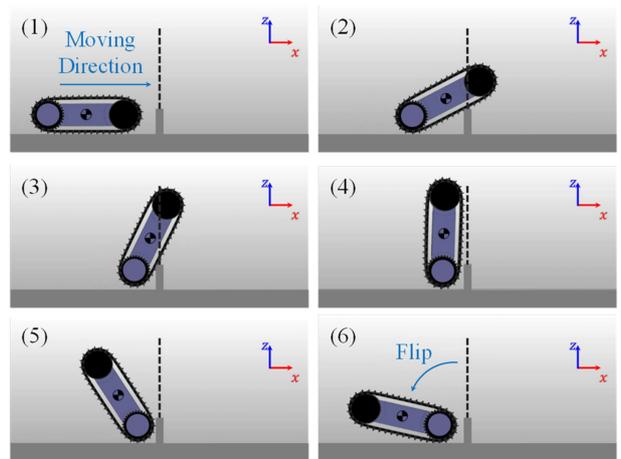
Table 1 Geometric model parameters

Parameter	Symbol	Length [mm]
Obstacle height	$h$	70
Wheel radius	$r$	44
Wheel base	$d_1$	220
Track width	$d_2$	138
Platform height	$d_3$	113

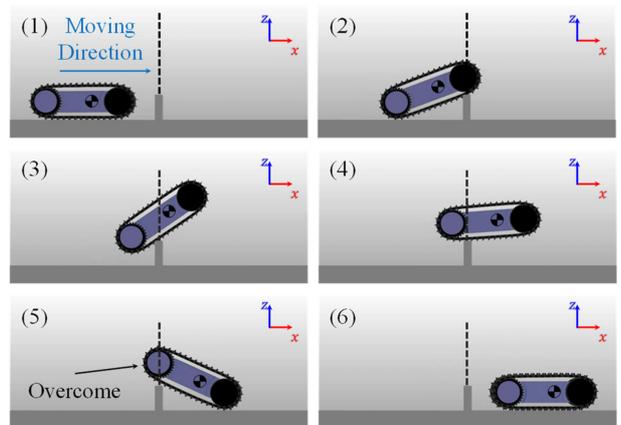
장애물의 최상단을 통과하지 못해 로봇이 전복되는 결과를 나타낸다. 반면, Fig. 4(b)와 같이 질량 중심이 전방에 위치할 경우, 질량 중심이 장애물의 최상단을 통과하면서, 결과적으로 장애물을 성공적으로 극복할 수 있음을 확인하였다.

해석 결과, 질량 중심 위치가 장애물 극복 성능에 큰 영향을 미친다는 점을 확인할 수 있었다. 특히, 질량 중심이 로봇 플랫폼의 전방으로 이동할수록 장애물 극복에 대한 안정성이 향상됨을 확인할 수 있었다. 그러나 질량 중심이 지나치게 전방에 위치할 경우에는 로봇의 후방 트랙에 가해지는 접지력이 감소하여 구동력 손실이 발생할 수 있고, 이로 인해 주행 안정성이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 장애물 극복 성능뿐만 아니라 일반적인 주행 성능까지 종합적으로 고려한 균형 잡힌 질량 중심 배치가 필요하다. 본 연구에서는 이런 점을 고려하여 로봇 질량 중심 위치를 적절하게 선정하고 모터 구동 토크를 동역학 해석을 통해 분석하였다. Fig. 5의 그래프는 시간에 따른 로봇 모터의 구동 토크 변화를 나타내며, 로봇이 주행하고 장애물을 극복하는 동안의 단계별 토크 변화를 보여준다. 각 구간은 Fig. 4(b)의 (1), (2)-(5), (6)과 대응되며, 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 구간(0-4 sec): 로봇이 평지에서 최고 속도 0.3m/s로 주행하는 동안, 평균 토크는 약 0.06 Nm로 나타났으며, 토크의 진폭은 최대 0.4 Nm로 확인되었다.



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 4 Obstacle overcoming simulation results

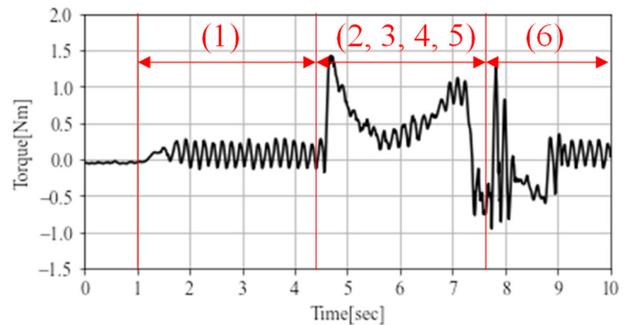


Fig. 5 Drive torque in obstacle overcoming simulation

(2)-(5) 구간(4-7 sec): 로봇이 장애물에 접근하고 이를 극복하는 과정으로, 장애물을 넘기 위해 요구되는 구동 토크가 급격히 증가하여 최대 1.5 Nm까지 상승하는 것으로 나타났다.

(6) 구간(7-10 sec): 로봇이 장애물을 극복한 후, 바닥과 충돌하며 평지 주행으로 전환되는 구간으로, 이 과정에서 순간적으로 큰 충격이 발생하여 모터에 약 1.3 Nm의 일시적인 부하가 가해지는 것으로 확인되었다.

이처럼 장애물 극복 과정에서 요구되는 로봇의 토크 변화

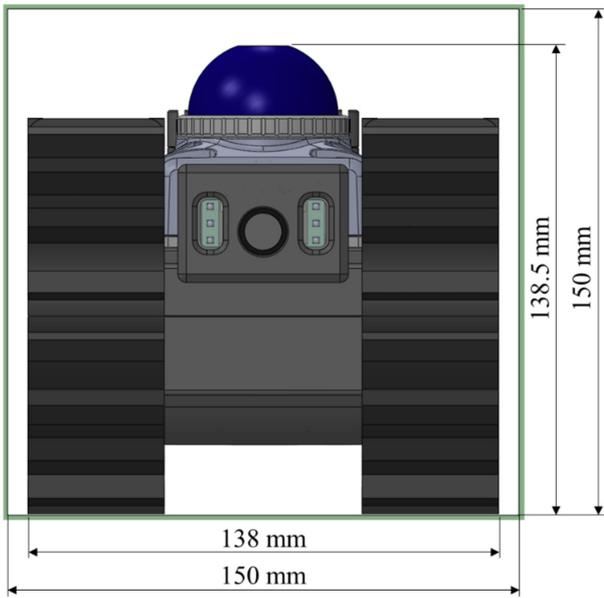


Fig. 6 Robot size for limited cross-sectional entry

특성을 파악하였다. 특히 장애물 극복 시 순간적으로 높은 토크가 필요함을 확인하고 충분한 토크 여유를 확보할 수 있는 모터를 선정하였다.

2.3 로봇 하드웨어 플랫폼 설계

천장을 점검하기 위해 환풍구, 석고 타일 등을 투입구로 활용한다. 이를 고려하여 개발된 로봇의 통과 가능한 최소 단면 크기는 150 × 150 mm로 설정하였다(Fig. 6). 천장 환경에서는 주행 시 17 mm에서 최대 70 mm의 단차를 극복해야 한다. 트랙형 구동부는 바퀴 기반 구동부보다 넓은 접지 면적으로 높은 마찰력을 제공하여 미끄러짐을 방지하고, 안정적인 장애물 극복을 가능하게 한다. 트랙은 장애물을 만났을 때 구동력이 일정하게 유지하며 장벽을 타고 넘는 방식으로 장애물을 극복할 수 있어, 협소하고 불규칙한 천장 공간에서도 안정적인 주행이 가능하다.

로봇이 평지 주행과 장애물 극복을 할 수 있게 하기 위해 필요한 트랙형 구동부 토크는 평지에서 최대 0.4 Nm, 장애물 극복 시 1.5 Nm이다. 이러한 사양을 만족하기 위해 모터와 기어를 다음과 같이 선정하였다. 모터는 MAXON의 ECX FLAT 32S (50 W, 24 V) 모델로, 주요 사양은 Table 2에 요약되어 있다. 이 모터는 고성능을 제공하면서도 로봇의 소형 설계에도 적합하다. 모터와 결합된 기어박스는 GPX32 모델이며, 이 조합은 장애물 극복 시 필요한 1.5 Nm의 토크를 충분히 제공하며, 최대 출력 시 2.5 Nm까지 도달할 수 있어 요구사항을 만족한다.

장애물을 넘는 과정에서 전복 방지를 위해 로봇 내부 부품 배치를 최적화하였다. 동역학 해석을 통해 스프로킷 중심과 질량 중심간 거리  $L$ 을 91 mm로 설정하였다. 이러한 동역학 해석 기반 설계 방식으로 실제 제작 없이도 목표 성능을 만족할 수

Table 2 Specifications of the selected motor

Motor: ECX FLAT 32S (50 W, 24 V)	
Nominal speed [rpm]	10,000
Nominal torque [Nm]	0.0478
Max. torque [Nm]	0.0914
Current [A]	3.04
Size [mm]	Ø32 × 17.5
Gear: GPX32	
Gear ratio	35 : 1
Efficiency [%]	78
Combined output	
Nominal speed [rpm]	285.7
Nominal torque [Nm]	1.3
Max. torque [Nm]	2.5

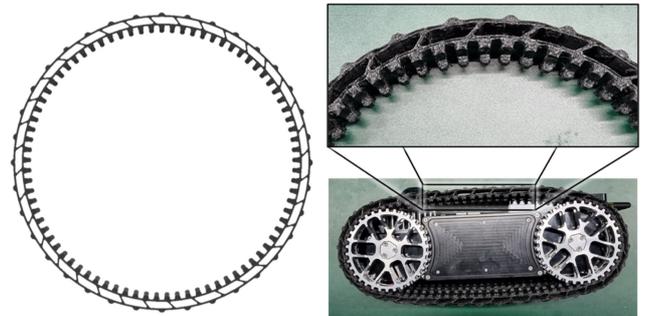


Fig. 7 Design and fabrication of the tracked drive system

있는 구조를 도출할 수 있었다.

구동부 트랙을 설계할 때 로봇 크기 제약과 탑재 용량을 고려하여 트랙 폭, 바퀴 크기, 돌기의 형상과 간격, 충격 흡수 구조 등을 종합적으로 최적화하였다. 먼저 트랙 폭은 석고보드 고정용 M-bar 시스템의 클립에 끼이지 않도록 최소 40 mm 이상으로 설정하였다. 바퀴 크기는 장애물 극복 성능을 높이기 위해 클수록 유리하지만, 로봇 상단에 위치한 LiDAR (Light Detection And Ranging) 센서의 시야(Field of view)를 방해하지 않는 범위 내에서 결정해야 한다. 본 연구에서는 바퀴의 직경을 120 mm로 하여 장애물 극복 성능을 확보하면서도 센서 시야에 영향을 미치지 않도록 설계하였다.

트랙의 설계, 돌기의 형상과 실제 제작한 트랙 실물 사진을 Fig. 7에 도시하였다. 다양한 장애물 환경에서 실제 실험을 수차례 실시하여 트랙의 돌기 형상과 간격에 대한 최적 값을 찾을 수 있었으며, 그 결과 접지 성능과 장애물 극복 성능을 향상하였다. 장애물을 넘은 후 로봇의 앞부분이 지면에 떨어지면서 발생하는 충격을 완화하기 위해 트랙 사이에 빈 공간을 추가함으로써 주행 안정성과 로봇 위치 추정 정확도를 높였다. 이렇게 개선한 로봇이 70 mm 높이의 장애물을 안정적으로 극복할 수 있음을 확인하였다(Fig. 8).



Fig. 8 Obstacle overcoming test of the developed robot

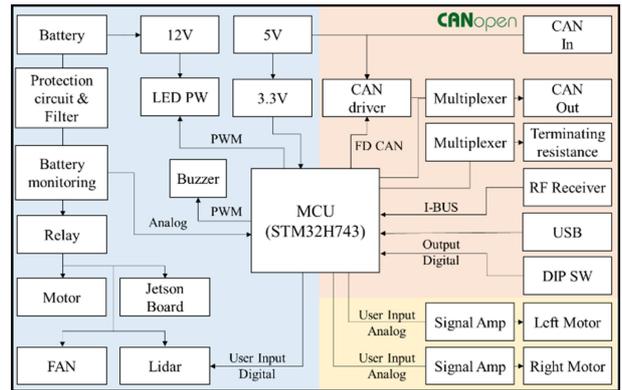


Fig. 10 Diagram of compact electronic system

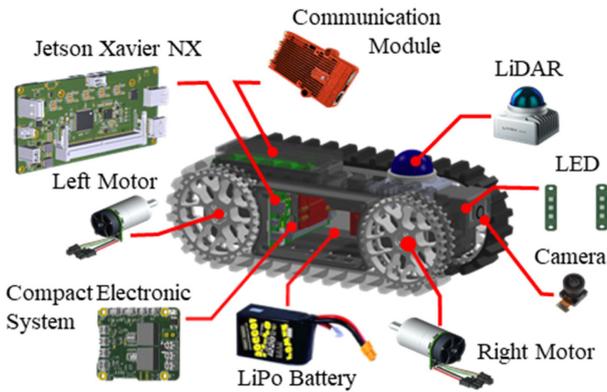


Fig. 9 System configuration of the narrow-space exploration robot

2.4 전장 설계

천장 탐색 로봇 전장 시스템의 구성은 Fig. 9와 같다. 전장 시스템은 고성능 연산과 실시간 제어를 수행할 수 있으며 위험물 탐지와 원격 조종 기능을 지원한다.

고성능 연산이 요구되는 작업과 기본적인 제어 기능을 효율적으로 분담하기 위해, 전장 구조는 상위 제어기와 하위 제어기로 구분하였다. 위험물 탐지 알고리즘과 같이 고속 연산이 필요한 기능은 상위 제어기(Jetson Xavier NX)에서 처리하고, 모터 제어, 전원 관리, RF (Radio Frequency) 통신 등 실시간성이 요구되는 제어 기능은 하위 제어기(STM32)를 통해 수행함으로써 연산 효율성과 제어 성능을 극대화하였다.

하위 제어기는 Fig. 10과 같이 STM32H7 시리즈 MCU (Micro Controller Unit)를 기반으로 설계되었으며, GPIO (General Purpose Input Output), ADC (Analog-to-Digital Converter), DAC (Digital-to-Analog Converter), CAN FD (Controller Area Network Flexible Data-rate), UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) 등의 인터페이스를 활용하여 모터 및 센서를 실시간으로 제어한다. 모터 제어, CANopen 프로토콜, RF 통신, 센서 전원 관리, 전원 보호 기능 등을 통합하여 Fig. 11과 같이 가로 74 mm, 세로 64 mm, 높이 21 mm의 소형 단일 보드 형태로 구현하였으며, 이를 통해 공간 활용도와 무게 절감을 동시에 실현하였다.

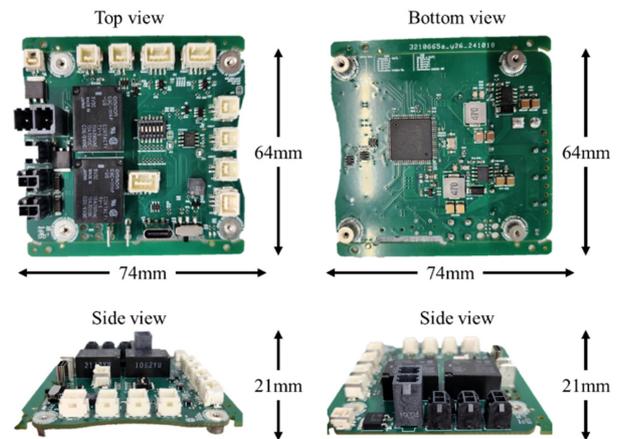


Fig. 11 Developed compact electronic system

이러한 설계는 고성능 연산과 정밀한 실시간 제어가 동시에 요구되는 로봇의 특성에 부합하는 하드웨어 구조를 제공한다.

모터 제어 명령은 상위 제어기에서 생성되어 CAN FD 통신을 통해 하위 제어기로 전달되며, 하위 제어기는 이를 아날로그 신호로 변환하여 모터의 속도를 정밀하게 제어한다. 모터 제어 회로는 하위 제어기에서 출력된 아날로그 신호를 0-10 V 범위의 안정적인 전압으로 증폭시켜, 정밀한 속도 제어를 가능하게 한다. 또한 하위 제어기에는 RF 수신기가 내장되어 있어 RF 조종기를 통하여 원격으로 조종할 수 있다. 상위 제어기를 거치지 않고도 로봇을 직접 제어할 수 있어 긴급 상황 발생 시 즉각적인 수동 대응이 가능하다는 장점을 가진다. 또한, 상위 제어기에서 생성된 제어 명령을 실시간으로 처리할 수 있어 시스템의 확장성과 실시간성을 동시에 확보하였다.

전원 제어 회로는 PWM (Pulse Width Modulation) 신호를 활용하여 LED의 밝기를 조절하고, GPIO 신호를 통해 센서의 동작을 제어할 수 있도록 설계되었다. 또한, 6셀 리튬 폴리머 배터리에서 공급되는 전원을 릴레이를 통해 차단할 수 있는 구조로 구성하였으며, 배터리 전압이 일정 임계 값 이하로 떨어질 경우 자동으로 전원을 차단하는 보호 회로를 탑재하였다. 또한 실시간 배터리 전압 모니터링 기능을 통해 이상 전압 발생 시 버저가 울리도록 하였다.

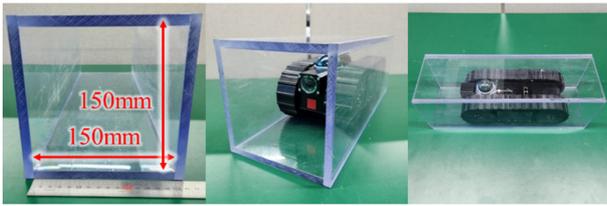


Fig. 12 Experiment in narrow inlet environment

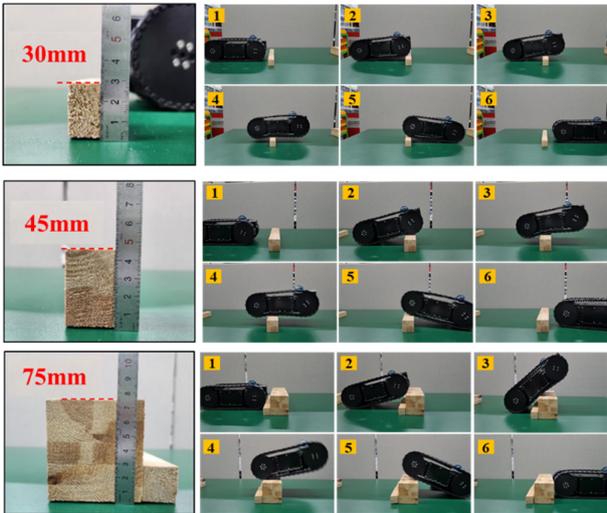


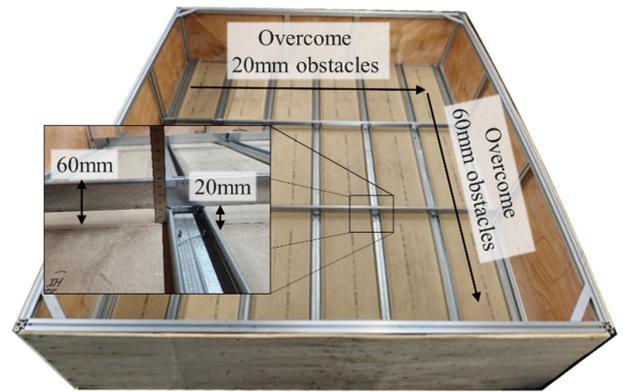
Fig. 13 Obstacle overcoming experiment

3. 천장 환경 주행 실험

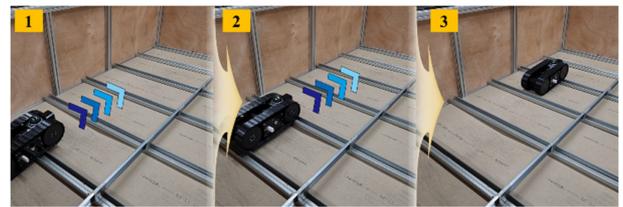
로봇의 주행 성능은 다음의 세 가지 실험을 통해 평가하였다. 첫 번째는 좁은 투입구를 통해 로봇이 진입할 수 있는지를 확인하는 협소 통로 진입 성능 실험, 두 번째는 다양한 높이의 단차를 가진 장애물을 로봇이 극복할 수 있는지를 검증하는 장애물 극복 실험, 세 번째는 실제 천장 구조를 모사한 환경에서의 주행 성능 실험이다.

크기(가로 150 mm × 세로 150 mm)의 단면을 통과하는 실험을 수행하였다(Fig. 12). 로봇은 사각형 구조물 내부를 주행하며, 끼임이나 간섭 없이 통과하는 데 성공하였다. 이를 통해, 환풍구나 석고 타일과 같은 좁은 투입구를 통해 건물 내 천장 공간으로 진입할 수 있음을 확인하였다.

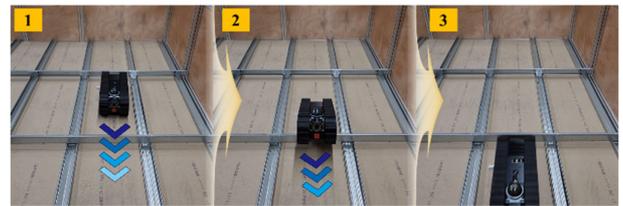
천장 환경의 구조물로 인해 발생할 수 있는 단차는 최소 17 mm에서 최대 70 mm에 이르며, 내부에는 전선, 배관 등 다양한 높이의 장애물이 혼재한다. 로봇이 장애물을 안정적으로 극복하며 주행할 수 있는지를 확인하기 위해, 장애물의 높이를 30, 45, 75 mm로 단계적으로 증가시키며 장애물 극복 성능을 평가하였다. 실험 결과(Fig. 13), 동역학 해석을 통해 예측된 최대 극복 가능 높이인 70 mm뿐만 아니라, 그를 초과하는 75 mm 높이의 장애물도 넘을 수 있음이 확인되었다. 또한, 10회 이상의 반복 실험에서도 구조적 손상이나 부품 탈락 없이 정상적으로 작동하였다.



(a) Reduced-scale ceiling environment



(b) Driving experiment on a 20 mm ceiling obstacle



(c) Driving experiment on a 60 mm ceiling obstacle

Fig. 14 Results of the reduced-scale ceiling driving experiment

실제 천장 환경과 유사한 조건을 구현하기 위해, M-bar 구조의 경량 철골 천장 시스템을 Fig. 14(a)와 같이 제작하고, 해당 환경에서 장애물 극복 및 주행 성능을 평가하였다. 로봇을 Fig. 14(b)와 같이 천장 모사 환경에 투입하였으며, 300 mm 간격으로 배치된 높이 20 mm의 주 골조를 극복하며 주행한 후, 시계 방향으로 회전하여 Fig. 14(c)와 같이 60 mm 단차를 극복하는 과정을 10회 이상 반복하였다. 이를 통해, 로봇이 성공적으로 천장 환경 내에서 주행 가능함을 입증할 수 있었다.

4. 천장 환경 위험물 인식 기술

4.1 위험물 탐지 모델 및 데이터 셋

천장 내부 환경은 좁은 폭과 복잡한 구조물이 얽혀 있는 협소한 공간으로, 이러한 특성을 악용하여 테러 목적의 폭발물이 설치되거나, 상자나 가방 속에 숨겨진 폭발물이 배치될 가능성이 있다. 일반적으로 이러한 위험물을 탐지하기 위해 AI 객체 탐지 모델을 활용하여 위험물 이미지를 학습시키는 방법이 사용된다. 그러나 학습 데이터에 포함되지 않은 유형의 위험물에

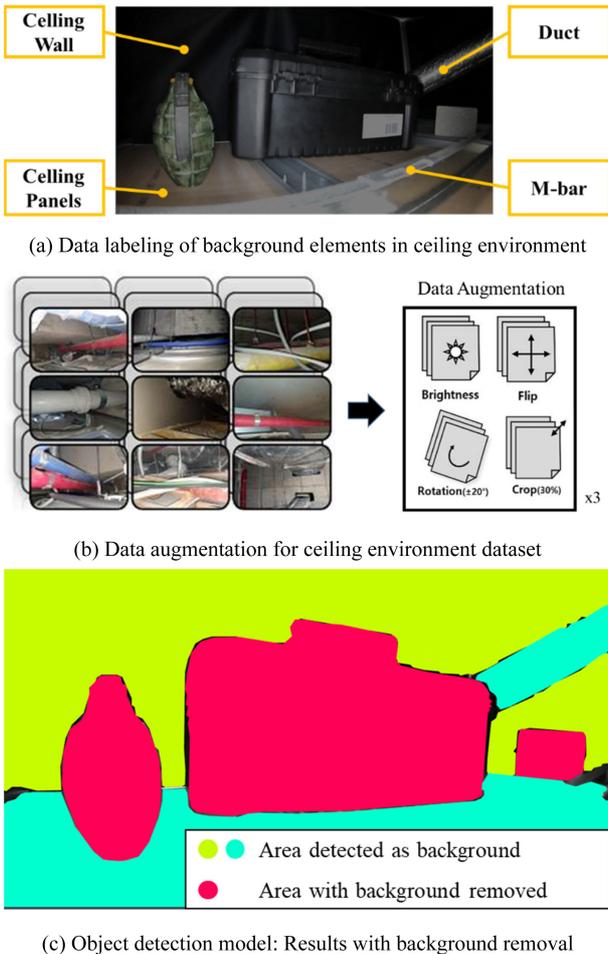


Fig. 15 Training dataset and results of the hazardous object detection

대해서는 탐지 정확도가 크게 저하될 가능성이 있으며, 이로 인해 탐지 실패가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 천장 환경의 공통적인 구조적 특성을 활용하는 방법을 적용하였다. 천장 환경은 천장 패널, 경량 철골 부재, 연결 부품 등 유사한 구조로 구성되어 있다. 이를 바탕으로, AI 객체 탐지 모델이 Fig. 15(a)와 같은 천장 환경 요소를 학습한 후, 이 요소들을 제거하고 남은 영역을 위험물로 특징하는 방식을 적용하여 위험물을 탐지하였다.

천장 환경 학습을 위해 YOLOv8-Seg 기반 객체 탐지 모델을 활용하였다[11]. 데이터 셋은 실제 천장 환경 이미지 874장, 천장 모의 환경 이미지 3,083장을 포함하여 총 3,957장을 확보하였고, Fig. 15(b)와 같이 이미지 증강(Data Augmentation) 기법을 적용하여 훈련 데이터 10,835장과 검증 데이터 1,625장의 데이터 셋을 구축하였다.

객체 탐지 모델은 철골 구조물, 천장 패널, 천장 환경 벽면, 환풍구 등 천장 환경 구조물을 학습하도록 설정하였으며, batch 16, epoch 130 기준으로 학습한 결과, mAP (mean Average Precision) 0.88을 달성하였다. 천장 환경 탐색 완료 후, 저장된 이미지 데이터를 기반으로 로봇의 상위 제어기에서 객체 탐지

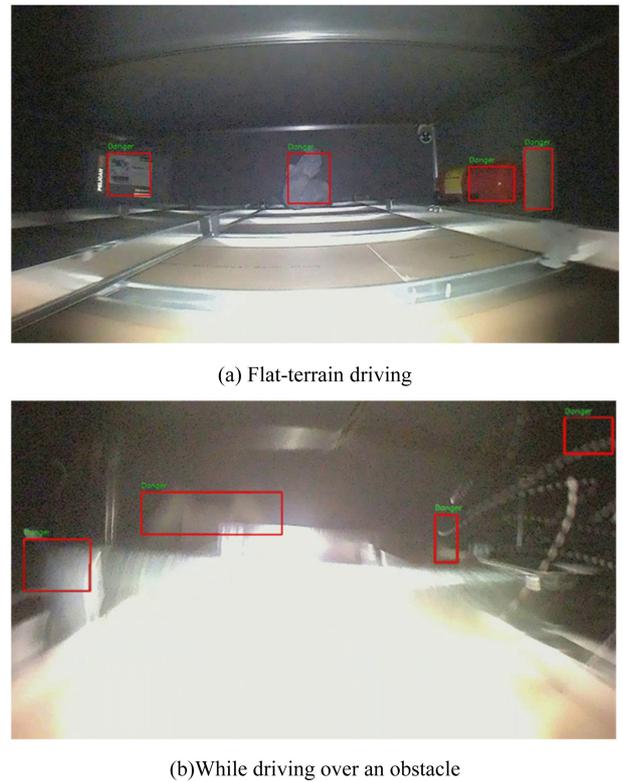


Fig. 16 Hazardous object detection during normal driving and under visual challenges caused by obstacle overcoming

모델을 활용하여 오프라인 방식으로 위험물 탐지를 수행한다. 이때 위험물 탐지 알고리즘의 평균 연산 속도는 21.2 fps이며, Fig. 15(c)에서 확인할 수 있듯이, AI 모델이 천장 환경의 배경 요소를 제거한 후, 이외의 영역을 위험물로 탐지하는데 성공하였다.

#### 4.2 객체 필터 설계 및 적용

천장을 구성하는 부품과 반복되는 구조적 특성은 위험물 탐지에 유리한 요소로 작용하지만, 주 골조와 보조 골조로 인해 발생하는 17-70 mm의 단차는 심각한 오탐지(False Positive)를 초래할 수 있다. 일반적인 상황에서는 Figs. 16(a)와 같이 위험물을 정확히 탐지할 수 있으나, 골조의 장애물을 극복하는 과정에서는 16(b)와 같이 카메라의 흔들림이 발생하여 모션 블러(Motion Blur)가 유발될 수 있다. 이로 인해 이미지의 선명도가 저하되면서, 객체 탐지 모델이 배경을 위험물로 잘못 인식하는 오탐지가 발생할 가능성이 존재한다. 이를 극복하기 위해, 객체가 일정 프레임 이상 지속적으로 탐지되어야 최종 검출 대상으로 간주하는 객체 필터를 적용하였다. 객체 필터는 다음과 같은 순서로 작동한다.

탐지된 객체 집합 정의: 현재 프레임에서 탐지된 객체( $O_{i,t}$ )의 집합( $C_t$ )은 식(1)과 같이 정의된다.

$$C_t = \{O_{1,p}, O_{2,p}, \dots, O_{i,t}\} \tag{1}$$

연속 프레임 간 객체 일치 판단: 이전 프레임의 객체 집합

```

Algorithm 1: False Positive Filtering for Object Tracking
1 Initialize tracked objects and their confidence scores;
2 for each frame  $t$  do
3   Detect objects  $C_t$  in frame  $t$ ;
4   Initialize new filtered objects list:  $filtered\_objects \leftarrow []$ ;
5   Create a spatial index for tracked objects;
6   for each object  $O_{i,t}$  in  $C_t$  do
7     matched  $\leftarrow$  False;
8     Find nearest neighbors  $O_{j,t-1}$  in tracked objects within distance  $S$ ;
9     for each  $O_{j,t-1}$  in nearest neighbors do
10      if  $IoU(O_{j,t-1}, O_{i,t}) > T$  then
11         $confidence(O_{i,t}) \leftarrow$ 
12           $\alpha \cdot confidence(O_{j,t-1}) + (1 - \alpha) \cdot confidence(O_{i,t})$ ;
13        Increase object persistence count:
14         $count(O_{i,t}) \leftarrow count(O_{j,t-1}) + 1$ ;
15        Append  $O_{i,t}$  to filtered objects with updated confidence;
16        matched  $\leftarrow$  True;
17        break;
18   if not matched then
19     Initialize new object with
20      $confidence(O_{i,t}) \leftarrow initial\_confidence$ ;
21     Append  $O_{i,t}$  to filtered objects with count 1;
22   Update tracked objects:  $tracked\_objects \leftarrow filtered\_objects$ ;
23   for each object  $O$  in tracked objects do
24     if  $count(O) \geq T_c$  and  $confidence(O) \geq C_{min}$  then
25       Draw bounding box for  $O$ ;
    
```

Fig. 17 Pseudo code of object filtering algorithm

( $C_{t-1}$ ) 내 탐지 객체( $O_{i,t-1}$ )와 현재 프레임 객체( $O_{i,t}$ ) 간의 유클리드 거리가 허용 반경  $r$  이하일 경우, 동일한 객체로 간주한다.

$$D(O_{i,t}, O_{j,t-1}) \leq r \tag{2}$$

연속 탐지 조건 충족 시 유효 객체로 판정: 특정 객체( $O_{i,t}$ )가 연속된 프레임에서 최소  $n$  번 탐지된 경우, 최종 검출 대상으로 간주한다. 이를 위해 각 객체의 탐지 횟수를 누적하여 계산한다.

$$\forall O_p, \text{if } count(O_p) \geq n, O_p \rightarrow \text{valid detection} \tag{3}$$

본 연구에서 설계한 객체 필터는 연속적인 프레임 검출 조건과 거리 기반 필터링을 결합하여 오탐지를 줄이고, 신뢰할 수 있는 객체 검출을 수행하도록 설계되었다. Fig. 17에서 객체 필터 알고리즘의 의사코드(Pseudo-code)를 확인할 수 있다.

### 4.3 천장 모사 환경 위험물 탐지 실험 결과 및 분석

협소 공간 환경에서의 위험물 탐지 성능을 평가하기 위해, Fig. 18과 같이 가로 1.8 m, 세로 1.8 m 크기의 구역 4개로 구성된 총 12.96 m<sup>2</sup>의 천장 모사 환경을 구축하고, 내부에 폭탄 형태의 물체, 소화기, 종이박스, 전자통신 기기 등 탐지 대상이 될 수 있는 위험물 객체 15종을 배치하였다.

로봇은 리튬폴리머(Lithium-Polymer), 6-cell (22.2 V), 1,550 mAh 배터리를 탑재하고 있으며, 1회 충전 기준 1시간 연속 주행이 가능하다. 본 실험에서는 사용자가 직접 조종기를 통해 로봇을 수동 조작하였으며, 약 2분 46초 동안 천장 환경을 탐색하며, 총 5,000프레임의 천장 환경 내부 이미지를 30 fps로 취득하였다. 획득한 모든 이미지에 대해 GT (Ground Truth) 위험물 데이터 라벨링을 수행한 후, 4.1절에서 학습한 위험물 탐지 모델을 적용하여 객체 탐지를 수행하였다. 탐지 결과를 GT 데이터와

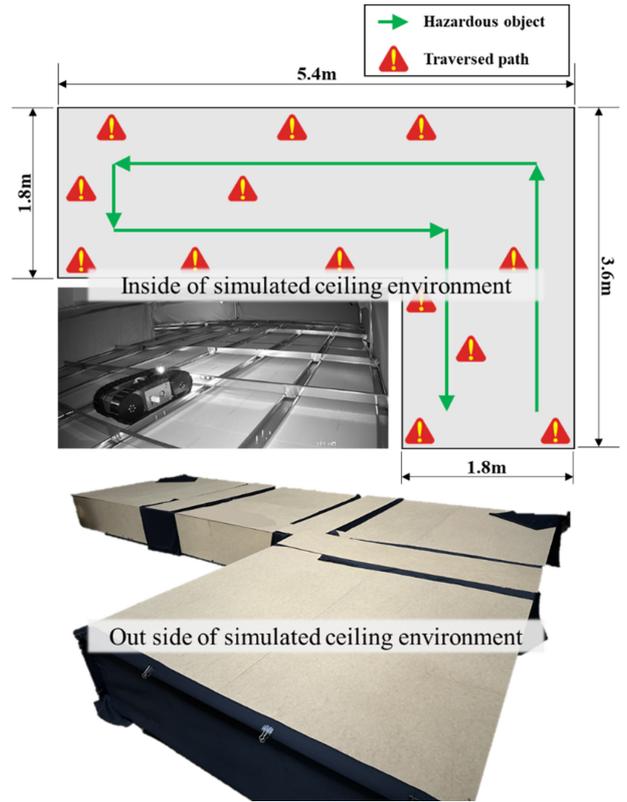


Fig. 18 Reduced-scale ceiling environment

Table 3 Results of hazardous object detection with object filter applied

Confusion matrix	Object detected	Not detected	Recall
Object	TP: 4168	FN: 412	0.91
Background	FP: 322	-	-
Precision	0.93	-	-

Table 4 Results of hazardous object detection without object filter

Confusion matrix	Object detected	Not detected	Recall
Object	TP: 4427	FN: 695	0.86
Background	FP: 1402	-	-
Precision	0.76	-	-

비교하여 객체 필터 적용 여부에 따른 성능 차이를 분석하였다. 객체 필터의 성능을 평가하기 위해, 탐지된 객체와 GT간의 일치 정도를 판단하는 IoU (Intersection over Union) 개념을 적용하였다. IoU는 예측된 객체 영역과 실제 GT객체 영역 간의 교집합(Intersection)과 합집합(Union)의 비율을 의미하며, 값이 1에 가까울수록 정확한 탐지 결과를 의미한다. IoU를 활용하여 탐지 결과의 신뢰도를 평가하고, 이를 바탕으로 탐지 성능을 정량적으로 분석하였다. 객체 탐지 성능 평가는 다음 지표를 통해 수행되었다.

- TP (True Positive): GT 위험물과 위험물 탐지 결과의 IoU가 0.5 이상일 때 TP로 판정

- FN (False Negative): GT 위험물에 대해 탐지 결과가 없거나, IoU가 0.5 미만인 경우
- FP (False Positive): GT 위험물이 없는 위치에 위험물 탐지 결과가 존재하는 경우
- Recall: GT 위험물 중 위험물 탐지 모델이 탐지한 비율

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \tag{4}$$

- Precision: 위험물 탐지 모델이 탐지한 객체 중 실제로 GT 위험물인 비율

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \tag{5}$$

본 연구에서는 오탐지(False Positive)가 증가하더라도 모든 위험물을 탐지하는 것이 목적이므로 FN을 최소화하는 것이 중요하다. 그러나, 오탐지가 과도하게 많으면 불필요한 경보가 발생하여 탐지 신뢰도가 저하될 수 있는데 이를 필터링할 수 있는 객체 필터의 성능 또한 중요하다. 본 연구에서는 이러한 요소를 종합적으로 고려하여 평가지표를 구성하여 탐지 성능을 평가하였다. 객체 필터를 적용한 결과, Table 3에 요약된 바와 같이 TP 4,168, FN 412, FP 322를 기록하였으며, Precision 0.93, Recall 0.91을 달성하였다. 이는 객체 탐지 모델이 실제 위험물을 높은 신뢰도로 탐지할 수 있음을 입증하며, 객체 필터가 오탐지를 효과적으로 감소시켜줌을 의미한다. 반면, 객체 필터를 적용하지 않은 경우(Table 4) TP 4,427로 소폭 증가하였으나, FP가 1,402로 급증하면서 Precision이 0.76으로 감소하였다. 또한, FN이 695로 증가하여 Recall도 0.86으로 낮아지는 결과를 보였다. 이는 객체 필터를 적용하지 않을 경우, 모델이 다양한 배경 요소를 위험물로 오인하는 경향이 증가하여 탐지 성능이 저하됨을 의미한다.

## 5. 결론

기존에는 경호요원이 높은 곳에 있는 천장을 뜯어 수색하고 복구하는 방식으로 수행하던 천장 위험물 탐색 작업을 본 연구에서 제안한 로봇을 활용하면 편리하고 효과적으로 수행할 수 있다. 개발한 로봇은 150 × 150 mm 크기의 좁은 투입구를 원활하게 통과하고, 최대 75 mm 높이의 장애물을 넘을 수 있음을 실제 천장 환경에서 실험적으로 검증하였다. 위험물 탐지를 위해 YOLOv8-Seg 기반의 위험물 탐지 모델을 개발하였으며, 천장 환경의 구조적 요소를 학습한 후 이를 제거하여 위험물을 탐지하는 방식을 적용하고 객체 필터를 추가하여 탐지 신뢰성을 향상한 결과 Precision 0.93, Recall 0.91의 높은 위험물 탐지 성능을 얻었다.

향후에는 본 연구에서 개발한 로봇으로 천장 환경에서 실시간 위치 인식과 지도 생성(SLAM)을 수행하여 위험물의 위치를 지도에 표시해 주는 기능을 개발할 예정이다. 또한 더 높은 장애물을 넘고 더 많은 센서를 탑재할 수 있도록 여러 대의 로봇을 연결한 사슬형 로봇에 관한 연구를 진행할 예정이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업 및 한국산업기술기획평가원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No. 20018110).

## REFERENCES

1. Pettersen, K. Y., (2017), Snake robots, Annual Reviews in Control, 44, 19-44.
2. Liu, J., Tong, Y., Liu, J., (2021), Review of snake robots in constrained environments, Robotics and Autonomous Systems, 141, 103785.
3. Coad, M. M., Blumenschein, L. H., Cutler, S., Zepeda, J. A. R., Naclerio, N. D., El-Hussieny, H., Mehmood, U., Ryu, J. H., Hawkes, E. W., Okamura, A. M., (2019), Vine robots, IEEE Robotics & Automation Magazine, 27(3), 120-132.
4. Blumenschein, L. H., Coad, M. M., Haggerty, D. A., Okamura, A. M., Hawkes, E. W., (2020), Design, modeling, control, and application of everting vine robots, Frontiers in Robotics and AI, 7, 548266.
5. Hawkes, E. W., Blumenschein, L. H., Greer, J. D., Okamura, A. M., (2017), A soft robot that navigates its environment through growth, Science Robotics, 2(8), eaan3028.
6. Oza, P., Sindagi, V. A., Sharmini, V. V., Patel, V. M., (2023), Unsupervised domain adaptation of object detectors: A survey, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 46(6), 4018-4040.
7. Xu, Y., Zhu, L., Yang, Y., Wu, F., (2021), Training robust object detectors from noisy category labels and imprecise bounding boxes, IEEE Transactions on Image Processing, 30, 5782-5792.
8. Kim, H., Bae, S., (2017), A study of the development of a modular, lightweight steel ceiling system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 29(5), 269-277.
9. Sim, B., Kim, K., Yu, K., (2017), Design of exploration rover platform with movable center of mass for enhancement of trafficability and stability, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 23(10), 873-878.
10. Lee, S., Park, J., Park, J., (2015), Design and implementation of a mobile robot with a variable structure for tip-over prevention, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 21(4), 356-360.
11. Ultralytics, Ultralytics YOLOv8. <https://docs.ultralytics.com/ko/models/yolov8/>



**Sangwoong Lee**

Graduated from Kumoh Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, M.S. degree. He is currently a researcher at the Korea Institute of Robotics & Technology Convergence. His research interests include field robotics.

E-mail: woong2479@kiro.re.kr



**Jinho Suh**

Professor in the Major of Mechanical System Engineering, Division of Energy Transport Systems Engineering, College of Engineering, Pukyong National University. His research interest is disaster response robot, underwater robots, and system control & integration in field robotics.

E-mail: suhgang@pknu.ac.kr



**Daegwon Koh**

Graduated from Gwangju Institute of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering, M.S. degree. He is currently a researcher at the Korea Institute of Robotics & Technology Convergence. His research interests include Fault Diagnosis of Robots.

E-mail: daegwon@kiro.re.kr



**Murim Kim**

Director and Chief Researcher with the Human-centered Robotics R&D Division of the KIRO, Pohang, South Korea. His research interests include robust control of nonlinear plants, time-delay control, robot motion control, collaborative robots, disaster robotics, and factory automation. Dr. Kim serves as an associate editor of the International Journal of Control, Automation, and Systems, and Journal of the Korean Society for Precision Engineering.

E-mail: mulimkim@kiro.re.kr



**Meungsuk Lee**

Graduated from Pohang University of Science and Technology, Department of Electronic Engineering, M.S. degree. He is currently a researcher at the Korea Institute of Robotics & Technology Convergence. His research interest include field robotics, robot system integration and intelligent robotics.

E-mail: meungsuklee@kiro.re.kr



**Hyeongseok Song**

Graduated from Handong Global University, Department of Mechanical & Control System, M.S. degree. He is currently a researcher at the Korea Institute of Robotics & Technology Convergence. His research interest include sensor calibration, robot vision, and autonomous driving.

E-mail: hssong@kiro.re.kr



**Juhyun Pyo**

Ph.D. in Creative IT Convergence, Pohang University of Science and Technology(POSTECH) in 2018. Since 2019, Senior Researcher at the Korea Institute of Robotics & Technology Convergence. His research interests include field robotics, disaster safety robots, and robot system development.

E-mail: jhpyo@kiro.re.kr

# 스핀들 진동 신호 검출에 의한 오토인코더 기반 밀링 절삭력 모니터링

## Autoencoder-based Milling Cutting Force Monitoring by Spindle Vibration Signal Detection

류제두<sup>1,2</sup>, 이정민<sup>1</sup>, 김성렬<sup>1,#</sup>, 이민철<sup>2,#</sup>  
Je-Doo Ryu<sup>1,2</sup>, Jung-Min Lee<sup>1</sup>, Sung-Ryul Kim<sup>1,#</sup>, and Min Cheol Lee<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 (Korea Institute of Industrial Technology)  
<sup>2</sup> 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)  
# Corresponding Author / E-mail: mclee@pusan.ac.kr, TEL: +82-10-3861-2688, ORCID: 0000-0003-4472-1267  
E-mail: sungrkim@kitech.re.kr, TEL: +82-51-309-7451, ORCID: 0009-0006-9961-9584

KEYWORDS: Tool condition monitoring (공구 상태 모니터링), Cutting force (절삭력), Spindle vibration (스핀들 진동), Machine learning (기계학습), Autoencoder (오토인코더)

*In machining operations, dynamometers are typically used to directly measure the forces acting on cutting tools. However, their high cost and complex setup restrict their use to laboratory environments, making them unsuitable for real-time monitoring in general production settings. To overcome this limitation, this study proposes an autoencoder-based learning model for estimating cutting forces using only spindle vibration signals acquired during milling. The model features a deep neural network (DNN) that takes processed spindle vibration signals as input and predicts latent features derived from cutting force signals through an autoencoder. These predicted latent features are then fed into a pretrained decoder to reconstruct the corresponding cutting force signals. To enhance the model's accuracy and robustness, the raw vibration signals sampled at 20 kHz were filtered with a bandpass filter that spans the effective frequency range of 20–2500 Hz, effectively removing irrelevant noise. For validation, an accelerometer was mounted on the spindle head of a milling machine, and vibration data were collected during cutting. The estimated cutting forces were compared to ground truth measurements obtained from a dynamometer. The model achieved a Pearson correlation coefficient of 0.943, demonstrating that reliable cutting force estimation is achievable using only low-cost vibration sensors.*

Manuscript received: April 2, 2025 / Revised: July 21, 2025 / Accepted: August 28, 2025

### 1. 서론

절삭공정에서 사용되는 절삭 공구는 공정 성능과 제품 품질에 결정적인 영향을 미치며, 공구의 마모(Wear), 파손(Breakage), 비정상 상태(Abnormal Conditions)는 곧바로 생산 효율성 저하, 품질 불량, 장비 손상 등으로 이어진다. 종래의 경험적 교체 주기나 일정 생산량 기준에 의존한 경우, 공구의 과잉 교체 또는 교체 시점을 놓쳐 품질 이상을 야기한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 공구 상태 모니터링(Tool Condition Monitoring, TCM)은 공정 안정화를 위한 핵심 기술로 인식되고 있다[1-4]. TCM에 사용되는 진동, 소음, 열로 나타나는 다양한 물리 신호 중,

절삭력(Cutting Force)은 공구와 공작물 간의 직접적인 상호작용을 반영하는 주요 변수이다. 절삭력은 가공조건, 공구형상, 공작물 재질 등 가공공정 인자들에 영향을 받으며, 이를 실시간 측정 및 분석함으로써 공구 마모와 공정 이상을 모니터링할 수 있다. 그러나 절삭력을 직접 측정하기 위해 사용되는 공구동력계(Dynamometer)는 고비용과 설치 환경의 제약으로 인해 일반 생산 현장에 적용하기에는 한계가 있다. 또한 장시간의 측정 과정에서 센서의 비선형성 또는 누적 오차가 발생할 가능성이 있으며, 주변 환경에 따라 노이즈의 영향으로 측정 신뢰도가 저하될 수 있다[4,5].

따라서, 공구동력계에 의한 절삭력 측정이 직접적이고 정밀한 방법임에도 불구하고, 현장 적용 가능성이 낮아서 절삭력과

상관성이 높은 신호를 활용한 간접 추정 방법이 활발히 연구되고 있다. 기존 연구에서는 전류, 진동, 음향방출(Acoustic Emission, AE) 센서 등을 이용하여 절삭력을 추정하는 방법이 제안되어 왔다. 전류 센서에 의한 절삭력 추종은 주로 스핀들 전류의 부하 변동을 검출하는 방식으로, 기계 시스템의 구조와 제어 특성 및 가공조건에 따라 신호의 일관성이 저하되는 문제가 있다. AE 센서는 절삭 중 발생하는 수십 kHz에서 수 MHz의 고주파 수 신호를 기반한 RMS (Root Mean Square)의 레벨로 공구의 상태를 감지하지만, 외부 환경에 민감하고 고속 샘플링이 요구되어 실시간 응용에 제약이 따른다[4-8].

진동 기반 절삭력 추정은 가속도 센서에 의해 공구와 공작물의 물리적 충돌에 의해 발생하는 진동이 공구와 직접 맞물려 있는 스핀들에 전달되는 구조적 특성을 활용하는 방법으로, 저비용·간편 설치의 장점을 가지며 산업 현장에서의 적용성이 높다. 그러나 진동의 발생원인이 공구와 공작물의 접촉 외 공작기계의 구조, 주변의 진동, 스핀들과 같은 동력전달 부품에 의한 진동 등에 영향을 받기 쉬우며, 절삭력과 관계가 비선형적이므로, 기존의 선형 회귀 기반 접근으로는 높은 정밀도의 추정이 어려운 한계를 갖는다. 이에 따라 가공과 관련된 진동 성분의 추출과 절삭력과 비선형 관계를 선형화하기 위한 머신러닝 모델링이 요구되고 있다[7-11].

본 연구에서는 기존 공구동력계에 의한 절삭력 측정을 대체하기 위해, 스핀들 진동 신호만으로 절삭력을 실시간으로 추정할 수 있는 머신러닝 기반의 추정 모델을 제안하고, 머신러닝 학습 방법 중 비지도학습인 오토인코더(Autoencoder)를 적용했다. 공구동력계로부터 측정된 절삭력을 입력 데이터로 한 인코더(Encoder) 기능을 통해 절삭력의 특징 벡터(Latent Vector)를 학습한다. 이 때 추출된 특징 벡터는 목표 출력을 정의하는 데 사용되며, DNN (Deep Neural Network)은 진동 신호를 입력데이터로 받아 해당 특징 벡터를 추정하도록 학습한다. 학습이 완료된 후, DNN의 출력은 디코더(Decoder) 기능에 입력되어 최종적으로 절삭력 신호로 복원한다. 이를 통해, 가공 중 공구동력계에 의한 절삭력 측정없이 진동 신호만으로 절삭력을 실시간 추정할 수 있는 모델을 제시한다. 제안된 모델의 신뢰성 검증에 위해, 가속도 센서를 통해 측정된 진동 신호와 공구동력계에 의한 절삭력 신호를 비교 분석하였으며, 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient) 분석을 통해 추정 정확도를 평가하였다.

## 2. 오토인코더 학습 알고리즘

본 연구에서는 공구동력계로부터 측정된 절삭력 데이터를 압축된 특징 벡터로 변환하고, 이를 활용하여 진동 신호 기반의 절삭력 추정이 가능하도록 하기 위해 오토인코더를 활용하였다. 본 장에서는 오토인코더의 개념, 학습 알고리즘, 그리고 본 연구에 적용된 모델의 구성과 학습 과정을 기술한다.

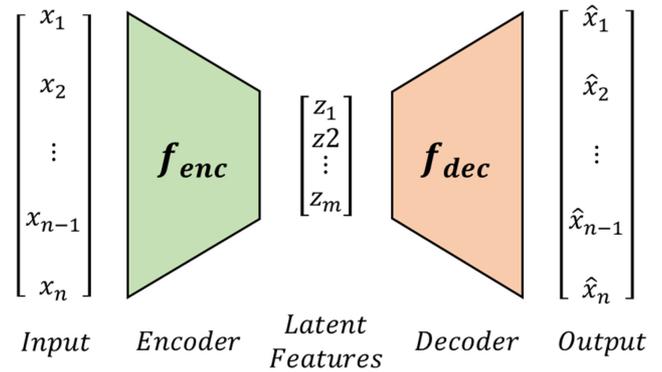


Fig. 1 Architecture of autoencoder

### 2.1 오토인코더 개요

오토인코더는 입력 데이터를 저차원 공간으로 압축하고, 다시 원래 차원으로 복원하는 비지도 학습 기반의 신경망 구조이다. 기본적으로 인코더와 디코더로 구성되며, 인코더는 고차원의 입력 데이터를 압축하여 특징 벡터를 생성하고, 디코더는 이를 원래의 입력 차원으로 복원하는 역할을 수행한다. 이러한 일반적인 오토인코더의 구조는 Fig. 1에 나타난 바와 같다[12-14].

인코더는 입력 신호를 저차원의 특징 벡터로 압축하는 과정으로, 이는 식(1)과 같이 정의된다.

$$z = \sigma(W_e \cdot x + b_e) \quad (1)$$

여기서  $W_e$ 는 인코더의 가중치 행렬,  $b_e$ 는 편향 벡터,  $\sigma$ 는 비선형 활성화 함수이며,  $z$ 는 특징 벡터이다.

생성된 특징 벡터는 디코더를 통해 입력 차원으로 복원되며, 이는 식(2)로 정의된다.

$$\hat{x} = \sigma(W_d \cdot z + b_d) \quad (2)$$

여기서  $W_d$ 와  $b_d$ 는 각각 디코더의 가중치와 편향을 나타낸다.

### 2.2 특징 벡터 추출을 위한 학습모델 구성

본 연구에 실제로 적용된 오토인코더 구조는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 다층 신경망 구조로 구성되었다. 인코더는 입력 절삭력 시계열(250차원)을 시작으로, 은닉층을 거쳐 각각 128, 64차원으로 점진적으로 축소되며, 최종적으로 32차원의 특징 벡터를 출력한다[15,16]. 디코더는 이 특징 벡터를 입력받아, 대칭 구조로 차원을 확장하여 원래 절삭력 차원으로 복원한다. 인코더와 디코더의 각 은닉층에는 Tanh 활성화 함수가 적용되었으며, 출력층은 선형(Linear) 활성화로 구성되었다. 학습된 오토인코더는 절삭력의 압축 표현 학습에 사용되며, 추출된 특징 벡터는 이후 스핀들 진동 기반 DNN 추정 모델의 목표 출력값으로 활용된다.

이러한 구조를 기반으로 인코더와 디코더의 연산은 각각 식(3) 및 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

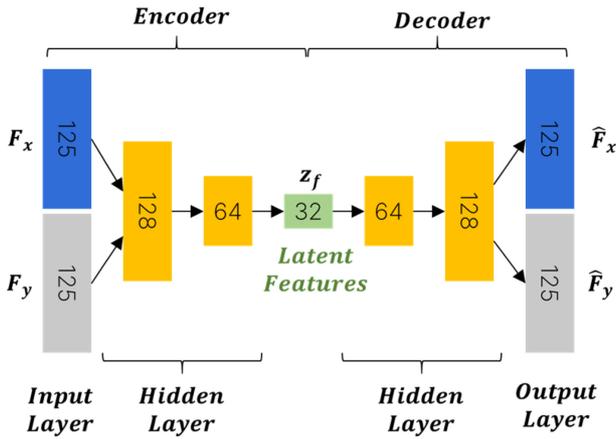


Fig. 2 Architecture of cutting force autoencoder model

$$z_f = f_e(F) \tag{3}$$

$$\hat{F} = f_d(z_f) \tag{4}$$

여기서  $F$ 는 절삭력의 입력 신호이며,  $\hat{F}$ 는 오토인코더를 통해 복원된 절삭력 신호이다.  $z_f$ 가 절삭력 신호에서 추출한 특징 벡터이다.

$\tanh$  함수의 출력 범위는  $[-1,1]$ 로 제한되므로, 입력 데이터는 사전에 정규화 되어야 한다. 본 연구에서는 절삭력의 최대 절대 값을 기준으로 데이터를 정규화 하였으며, 정규화는 식(5)와 같이 수행된다.

$$F_{norm} = \frac{F}{\max|F|} \tag{5}$$

복원된 데이터는 식(6)에 따라 원래 스케일로 변환된다.

$$\hat{F} = \hat{F}_{norm} \times \max|F| \tag{6}$$

여기서  $\hat{F}_{norm}$ 는 오토인코더를 통해 복원된 정규화된 힘의 값이며, 이를 각 성분의 최대값을 곱하여 최종 복원된 힘의 값  $\hat{F}$ 이 된다.

모델 학습은 원본 데이터  $F$ 와 복원된 데이터  $\hat{F}$  간의 오차를 최소화하는 방향으로 수행되며, 손실 함수로 평균 제곱 오차 (Mean Squared Error, MSE)를 사용한다. MSE는 식(7)과 같이 정의된다.

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|\hat{F}_i - F_i|^2) \tag{7}$$

여기서  $N$ 은 전체 학습 데이터 샘플 수를 의미한다.

### 3. DNN 기반 절삭력 추정 학습 모델

본 장에서는 공구동력계 기반 오토인코더에서 추출된 절삭력의 최종 특징벡터를 목표값으로 설정하고, 이를 진동 신호로부터

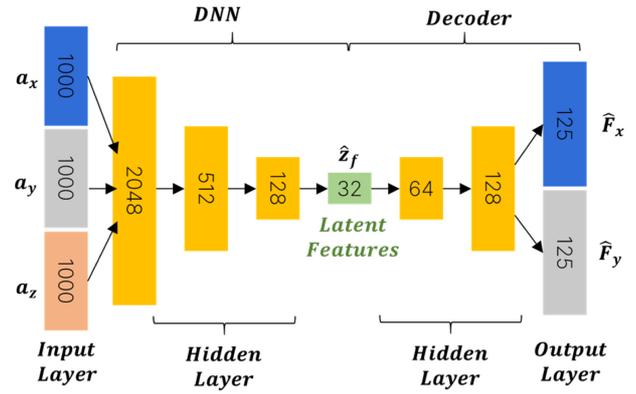


Fig. 3 Architecture of the autoencoder-based cutting force estimation model using spindle vibration signals

추정하기 위한 DNN 기반 학습 모델을 제안한다.

제안된 DNN 모델의 구조는 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 정규화된 3축 스핀들 진동 신호( $V_s$ )를 입력으로 사용하며, 총 3,000 차원의 입력 데이터로 구성된다. DNN은 해당 입력으로부터 오토인코더의 인코더에서 추출된 32차원 절삭력의 특징벡터를 추정하도록 학습되며, 이를 위해 총 3개의 은닉층(Hidden Layers)을 포함한다. 각 은닉층은 순차적으로 2,048  $\rightarrow$  512  $\rightarrow$  128 차원으로 구성되어 입력 차원을 점진적으로 축소하며, 최종 출력층은 32차원으로 설정되어 오토인코더의 특징벡터 차원과 일치하도록 설계되었다.

복원 단계에서는, DNN 모델( $f_{DNN}$ )을 통해 추정된 특징벡터( $\hat{z}_f$ )를 오토인코더의 디코더에 입력하여 원래의 절삭력 신호( $\hat{F}_v$ )를 복원한다. 해당 디코더는 오토인코더 학습 단계에서 공구동력계 기반의 절삭력 데이터를 이용하여 이미 학습이 완료된 구조이며, DNN 기반 추정 과정에서는 디코더 파라미터를 고정하여 사용한다.

이 디코더는 식(4)에서 정의된 것과 동일한 구조를 가지며, 단지 입력이 기존 인코더 출력이 아닌 DNN으로부터 추정된 특징벡터로 대체되었고, 이에 따라 식(8)로 표현된다. 최종적으로 복원된 출력은 식(9)와 같이 정의된다.

$$\hat{z}_f = f_{DNN}(V_s) \tag{8}$$

$$\hat{F}_v = f_d(\hat{z}_f) \times \max|F| \tag{9}$$

진동 신호로부터 추출된  $\hat{z}_f$ 을 오토인코더 기반의 절삭력  $z_f$ 에 매칭되도록 DNN 학습을 수행하고, 디코더의 파라미터를 고정함으로써 전체 구조의 학습 안정성을 높이고, 모델의 화 성능과 효율성을 동시에 확보함으로써 고가의 센서 없이도 정밀한 절삭력 파형 복원이 가능하다.

본 연구에서는 진동 신호로부터 추정된 저차원 특징벡터  $\hat{z}_f$ 이 오토인코더 기반 절삭력 특성  $z_f$ 에 매칭되도록 DNN 학습을 수행하며, 디코더 파라미터를 고정함으로써 전체 구조의 학습 안정성을 높였다. 이를 통해 모델의 일반화 성능과 계산 효율성을 동시에 확보하였으며, 진동신호로 절삭력을 추정하도록 설계하였다.

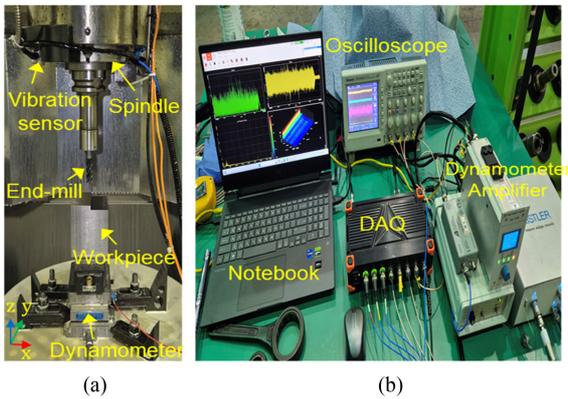


Fig. 4 Experimental setup: (a) Sensor placement on the 5-axis machining center and (b) Data acquisition system used for force and vibration signal measurement

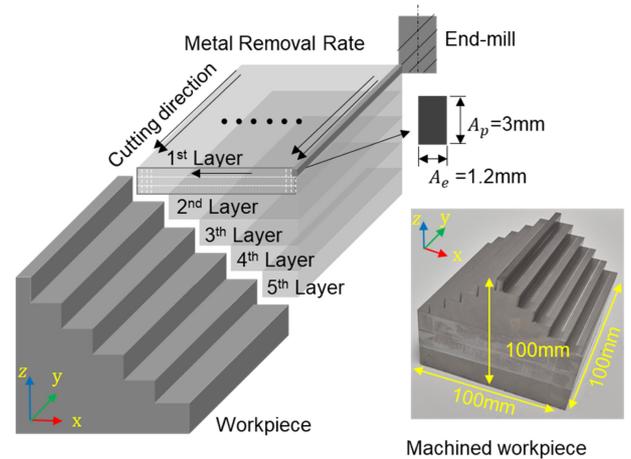


Fig. 5 Multi-layer stepped cutting path

Table 1 Data acquisition system specifications

List	Specifications	
Dynamometer (9257B & 5167A81 Kistler)	Range Fx, Fy	-5 to 5 kN
	Sensitivity	7.5 pC/N
	Analog output	-10 to 10 V
Vibration sensor (356A15, PCB)	Range	-50 to 50
	Sensitivity	100 mV/g
Data acquisition (SIRIUS-HS-8xACC, DEWESoft)	Analog input	-10 to 10 V
	ADC resolution	16 Bit
	Sample rate	Max 1MS/s

#### 4. 절삭력 추정 성능 평가

본 장에서는 제안된 오토인코더 및 DNN 기반 절삭력 추정 모델의 유효성을 평가하기 위해 수행한 절삭 가공 실험 조건과, 획득된 데이터를 기반으로 한 모델 학습 및 성능 검증 결과를 설명한다.

##### 4.1 절삭 가공 실험 조건

제안된 절삭력 추정 모델의 유효성을 검증하기 위해, 5축 머시닝 센터(Mytrunnion-5G, Kitamura)를 활용하여 Ti-6Al-4V 합금에 대한 절삭 실험을 수행하였다. Figs. 4는 실험에 사용된 전체 장비 구성을 나타내며, 4(a)는 가속도계 및 공구동력계의 설치 위치를, 4(b)는 진동 및 절삭력 신호 수집을 위한 데이터 획득 시스템(DAQ)을 보여준다. 본 실험에 사용된 센서 및 DAQ 시스템의 상세 사양은 Table 1에 정리하였다.

가공 조건은  $\Phi 12$  mm의 평면 4날 엔드밀(MC326-12.0A4B-WK40TF, WALTER)로 스피들 회전수 1,220 rpm, 이송속도 585 mm/min, 축 방향 절입깊이( $A_p$ ) 3 mm, 반경 방향 절입 깊이( $A_e$ ) 1.2 mm으로 수행하였다. 샘플링 주파수는 공구동력계는 2.5 kHz, 가속도계는 20 kHz로 설정하였다. Fig. 5와 같이 계단 형태로 가공된 전체 가공 경로 및 가공 완료의 공작물을 나타낸다.

#### 4.2 오토인코더 학습모델 성능 평가

획득된 절삭력 데이터는 앞서 설계한 오토인코더 학습 모델에 적용되었다. 데이터 복원은 50 ms마다 이루어지게 설계하였으며,  $F_x$ ,  $F_y$  각각 125개씩 총 250차원이 입력력으로 설정하였다. 이를 바탕으로 총 104,740 데이터셋을 구성하였으며, 이 중 80%는 학습용, 나머지 20%는 검증용으로 사용되었다.

복원된 절삭력과 실제 절삭력 간의 유사도는 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)를 통해 평가하였으며, 계산식은 식(11)와 같다.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

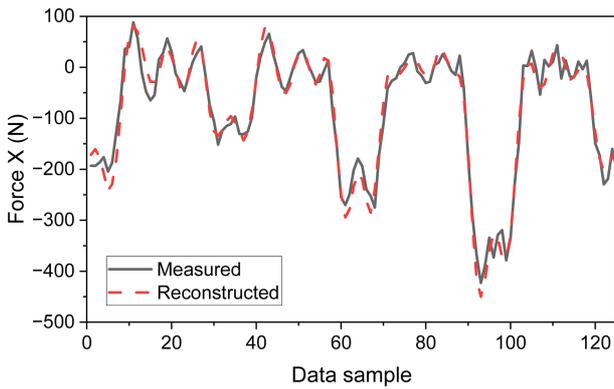
여기서  $X_i$ ,  $Y_i$ 는 비교 대상 신호이며,  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$ 는 각각의 평균값이다.

학습 결과, Fig. 6과 같이 공구동력계로 측정된 절삭력과 오토인코더를 통해 압축 후 복원된 절삭력의 평균 상관계수는  $F_x$ : 0.987,  $F_y$ : 0.979으로 높은 정확도를 보였다.

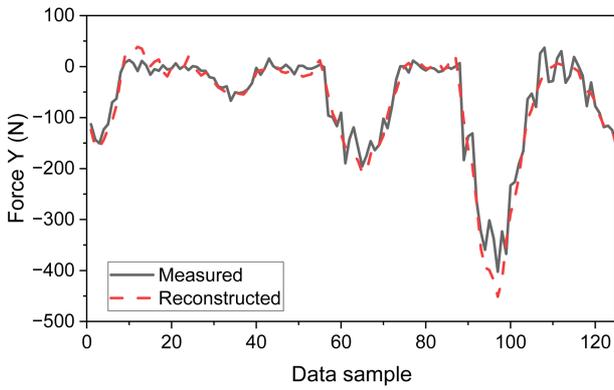
#### 4.3 스피들 진동 신호를 활용한 절삭력 추정 학습모델 성능 평가

스피들 진동 신호는 20 kHz의 샘플링 주파수로 수집되었으며, 주파수 분석 결과 유효한 정보가 포함된 주요 대역은 20-2,500 Hz로 확인되었다. 이에 따라 FIR Band-pass 필터를 설계하여 해당 주파수 대역을 중심으로 필터링을 적용하였으며, 필터링 결과는 Fig. 7에 나타난 바와 같다. 이와 같이 잡음을 제거한 진동 신호를 기반으로, 50 ms 간격으로 각 축(x, y, z)에 대해 1,000개씩 총 3,000차원의 입력 벡터를 구성하였고, 이를 DNN 학습 모델의 입력값으로 사용하였다.

학습된 DNN의 출력은 Fig. 8에 도시된 바와 같이, 공구동력계 기반 오토인코더의 인코더를 통해 추출된 특징벡터와 유사한 형태를 나타냈다. 특히, DNN은 스피들 진동 신호만을 입력으로 하여 절삭력 신호의 특징벡터를 추정하였으며, 추정된 특징벡터는 사전 학습된 오토인코더의 디코더에 입력되어 최종



(a) X-axis ( $\rho = 0.987$ )



(b) Y-axis ( $\rho = 0.979$ )

Fig. 6 Cutting force reconstruction using the autoencoder

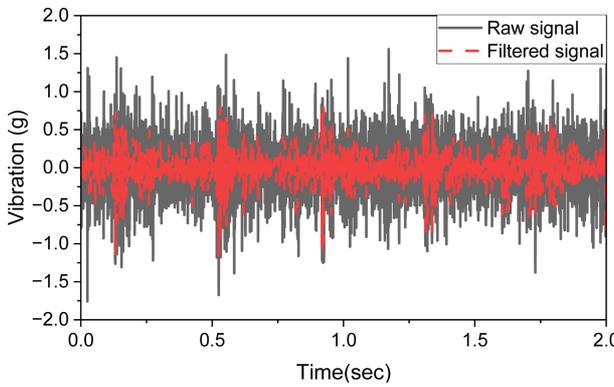


Fig. 7 Preprocessed spindle vibration signals after FIR band-pass filtering (20-2,500 Hz)

절삭력 파형으로 복원되었다.

복원된 절삭력 파형은 공구동력계로 측정된 실제 절삭력과 비교하여 모델의 추정 성능을 평가하였으며, Fig. 9는 일반적인 테스트 데이터셋에 대해 X축 및 Y축 방향의 절삭력 추정 결과를 나타낸다. 두 축 모두 실측값과 추정값 사이의 높은 상관성을 나타냈으며, Pearson 상관계수는 X축  $\rho = 0.97$ , Y축  $\rho = 0.94$ 로 도출되어 전체 평균 상관계수는  $\rho = 0.943$ 임을 확인하였다. 이는 본 연구에서 제안한 오토인코더 기반 DNN 추정 모델이 정상 가공 조건 하에서 매우 높은 절삭력 추정 정확도를

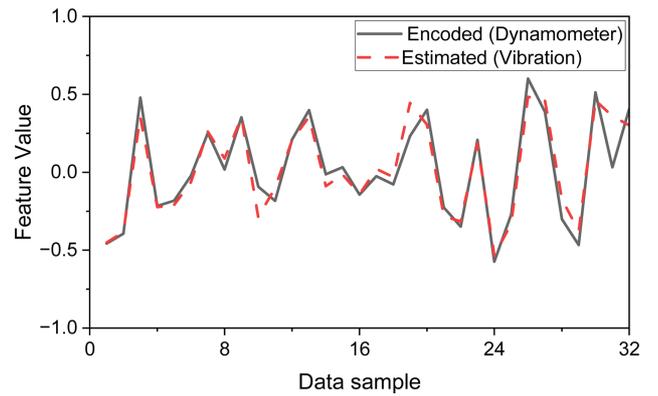
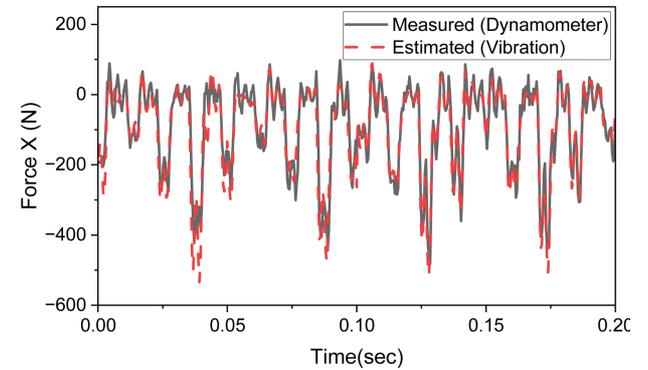
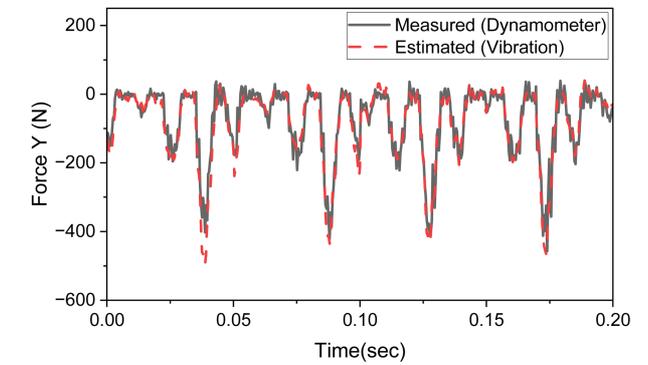


Fig. 8 Results of latent feature estimation of DNN using vibration signals



(a) X-axis ( $\rho = 0.937$ )



(b) Y-axis ( $\rho = 0.951$ )

Fig. 9 Cutting force estimation results under test data set

확보할 수 있음을 보여준다.

또한 추정값과 측정값 간의 정합성을 보다 직관적으로 시각화하기 위하여, 학습모델의 입력 및 출력 주기인 50 ms 구간에 대한 각 절삭력의 평균값과 실제 절삭력 평균값을 기준으로 산점도 및 선형 회귀 분석을 수행하였다. Fig. 10은 이러한 평균값 기반 산점도 결과를 나타낸 것으로, 절삭력 X축에 대한 회귀선은  $y = 1.044x + 0.159$ , y축에 대해서는  $y = 1.033x + 0.182$ 로 도출되어, 두 축 모두에서 학습모델을 통해 추정된 절삭력이 측정값과 매우 높은 선형 관계를 유지함을 확인할 수 있다.

한편, 정상 가공 조건 기반으로 학습된 모델의 일반화 가능성과

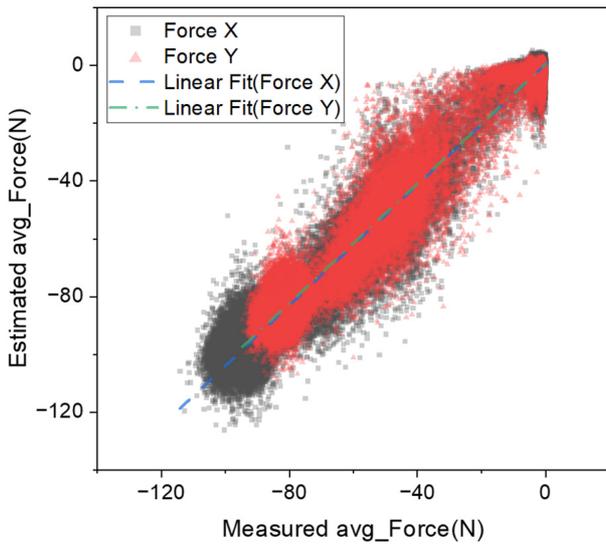


Fig. 10 Scatter plot and linear regression between predicted and measured cutting forces based on 50ms mean values

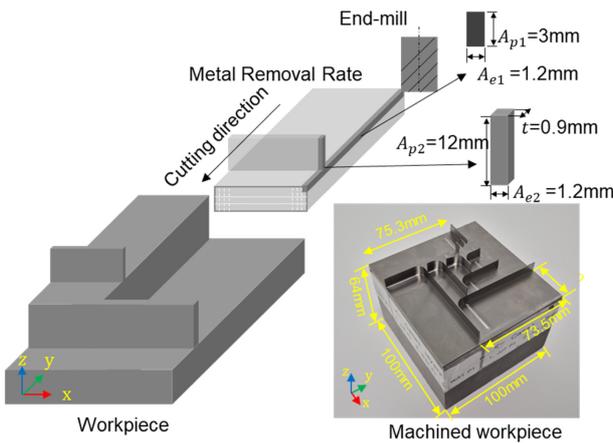
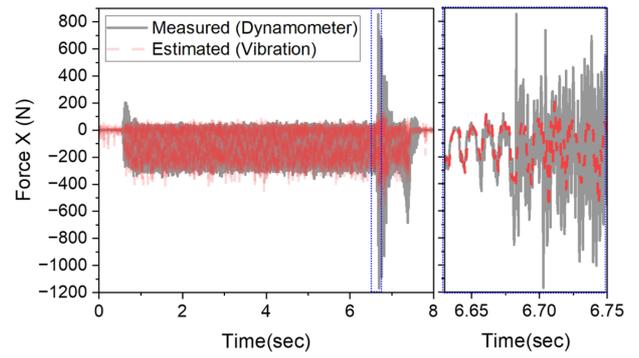


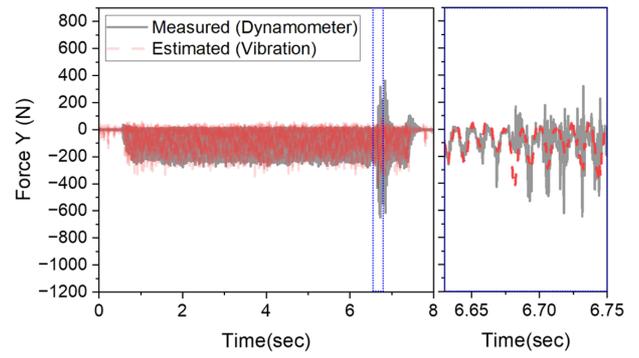
Fig. 11 Cutting path with localized abnormal force induced by increased

실제 가공 환경에서의 활용성을 추가적으로 검증하고자, 본 연구에서는 공구 충돌 또는 가공 경로 이상 등으로 절삭력이 국부적으로 급격히 증가하는 비정상 상황에 대해 학습된 모델을 적용하였다. Fig. 11은 이러한 비정상 조건을 재현하기 위해 설계된 가공 경로로, 일정 구간에서  $A_p$  를 기존 3에서 12 mm로 약 4배 증가시키는 구조를 갖는다. 해당 형상은 공구가 단면이 얇은 벽을 가공하는 구간에서 높은 절삭 부하와 급격한 힘 변화가 유발되도록 구성되었다.

이 조건 하에서 획득한 스핀들 진동 신호를 기존에 학습된 모델에 입력한 결과는 Fig. 12에 나타난 바와 같다. 해당 데이터는 학습 과정에서 사용되지 않았으며, 비정상 조건 특성상 학습 데이터의 양이 매우 제한적이었기 때문에 추정 성능은 정상 조건에 비해 일부 저하되었다. 실제로 Figs. 12(a)와 12(b)에서 보이듯, 실측 절삭력과 추정값 간 Pearson 상관계수는 각각 X축  $\rho = 0.65$ , Y축  $\rho = 0.82$ 로 나타났으며, 정상 조건 대비 오차가 증가하였다.



(a)



(b)

Fig. 12 Cutting force estimation under unseen abnormal cutting conditions: (a) X-axis ( $\rho = 0.65$ ), (b) Y-axis ( $\rho = 0.82$ )

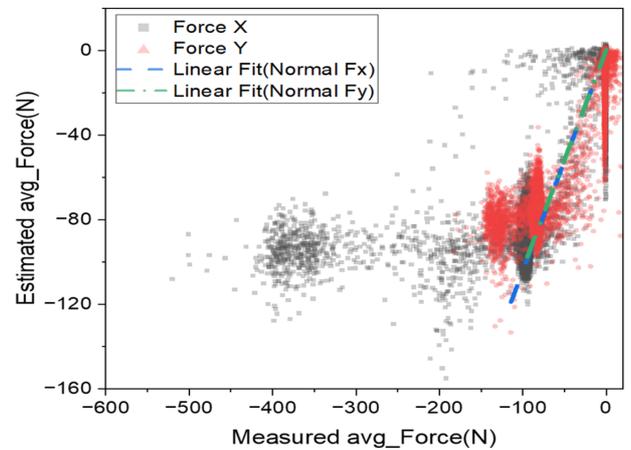


Fig. 13 Scatter plot between predicted and measured cutting forces under unseen abnormal cutting conditions

이러한 원인을 분석하기 위해 Fig. 13에서는 비정상 조건에서의 추정값과 측정값의 50 ms 평균값 기반 산점도에 정상 가공 조건에서 도출된 회귀선(참조 기준선)을 함께 중첩하였다. 그 결과, 모델은 정상 상태의 회귀선 범위 내에서는 비교적 일관된 추정 성능을 유지하였으나, 절삭력이 학습 범위를 벗어나는 고하중 영역에서는 추정값이 회귀선과 점차 괴리되거나 분산이 증가하는 경향을 보였다. 특히, 일부 구간에서는 추정값이 기존 학습 범위 내의 최대값에 수렴하거나 과도하게 확대되어

출력되었으며, 이는 딥러닝 회귀 모델이 학습 범위 내의 보간(Interpolation)에는 강하지만, 학습되지 않은 분포 외 영역(Out-of-distribution, OOD)에서는 신뢰도와 정밀도가 급격히 저하되는 경향과 일치한다.

그럼에도 불구하고, Fig. 13의 결과는 모델이 학습되지 않은 비정상 조건에서도 절삭력의 증가 방향성과 경향성을 일정 부분 감지하고 있음을 보여준다. 이는 수치적으로 완전한 정밀 추정에는 어려울 수 있으나, 비정상 상태 발생의 징후를 사전 인지할 수 있는 반응 특성을 갖추고 있다는 점에서 의미가 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 고가의 공구동력계 없이도 절삭력을 실시간으로 추정할 수 있는 머신러닝 기반 절삭력 추정 모델을 제안하였다. 제안된 방법은 먼저 공구동력계로 측정된 절삭력 데이터를 활용하여 오토인코더를 학습하고, 이 과정에서 도출된 특징 벡터를 목표 출력으로 설정하여, 스핀들 진동 신호 기반의 DNN 모델을 구성하였다. DNN 모델은 정규화된 스핀들 진동 신호를 입력으로 받아 오토인코더의 인코더 역할을 대체하며, 디코더는 사전 학습된 파라미터를 고정된 상태로 절삭력 복원에 활용된다. 이러한 구조는 공구동력계를 초기 학습 단계에만 사용하고, 실제 가공 현장에서는 저가의 가속도 센서만으로 스핀들의 진동을 측정하여 절삭력을 간접 추정할 수 있도록 설계되어 높은 실용성을 갖는다.

Ti-6Al-4V 소재에 대한 절삭 가공 실험을 통해 제안된 모델의 성능을 평가한 결과, 정상 가공 조건에서는 실측 절삭력과의 Pearson 상관관계수가 X축  $\rho = 0.97$ , Y축  $\rho = 0.94$ 로, 전체 평균  $\rho = 0.943$ 을 기록하며 높은 적합성을 나타냈다. 또한 50 ms 구간 평균값 기준 산점도에서 도출된 선형 회귀식은 X축에 대해  $y = 1.044x + 0.159$ , Y축에 대해  $y = 1.033x + 0.182$ 로 도출되어, 측정값과 추정값 간의 강한 선형성이 확인되었다.

한편, 절삭 깊이( $A_p$ )를 급격히 증가시켜 절삭력이 비정상적으로 상승하는 조건에서는 Pearson 상관관계수가 X축  $\rho = 0.65$ , Y축  $\rho = 0.82$ 로 낮아졌으며, 이는 학습에 포함되지 않은 분포 외데이터에 대해 추정값이 회귀선 범위를 벗어나는 경향을 보였기 때문으로 해석된다. 특히 고하중 영역에서는 추정값이 기존 학습 범위 내 최대값에 수렴하거나 과도하게 확장되어 나타났으며, 이는 딥러닝 회귀 모델의 일반적인 한계로서, 학습 범위 내에서는 정밀한 추정이 가능하지만, 학습되지 않은 영역에서는 신뢰도와 정밀도가 저하되는 특성과 일치한다.

그럼에도 불구하고, Fig. 13의 결과는 모델이 학습되지 않은 비정상 조건에서도 절삭력의 증가 방향성과 경향성을 일정 수준 이상 감지하고 있음을 보여준다. 이는 정밀한 수치 추정은 어렵더라도, 공정 이상 발생의 징후를 사전 감지할 수 있는 반응 특성 및 일반화 능력을 갖추고 있다는 점에서 의미가 있다.

따라서 본 연구에서 제안한 구조는 고가 센서에 대한 의존성을

줄이면서도 절삭력 추정의 정밀도와 실시간성을 동시에 확보할 수 있는 효과적인 대안으로서, 향후 이상 가공 상태 탐지 및 공정 모니터링 시스템에의 확장 가능성도 높은 것으로 판단된다.

### ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 산업통상자원부 “뿌리산업 고도화를 위한 BIZ 플랫폼 구축사업(No. MZ250010)” 및 한국생산기술연구원 기본사업 “의료 수술현장 진단 지원을 위한 스마트 센싱 및 디지털 의료공정 핵심기술 개발(No. KITECH EH-25-0002)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

### REFERENCES

- Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ketteler, G., König, W., Teti, R., (1995), Tool condition monitoring (TCM)—the status of research and industrial application, *CIRP Annals*, 44(2), 541-567.
- de Leon, M. A. L., Kolarik, J., Byrtus, R., Koziorek, J., Zmij, P., Martinek, R., (2024), Tool condition monitoring methods applicable in the metalworking process, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(1), 221-242.
- Siddhpura, A., Paurobally, R., (2013), A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1), 371-393.
- Serin, G., Sener, B., Ozbayoglu, A. M., Unver, H. O., (2020), Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(3), 953-974.
- Nasir, V., Sassani, F., (2021), A review on deep learning in machining and tool monitoring: Methods, opportunities, and challenges, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(9), 2683-2709.
- Peng, D., Li, H., (2024), Intelligent monitoring of milling tool wear based on milling force coefficients by prediction of instantaneous milling forces, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208, 111033.
- Peng, D., Li, H., Dai, Y., Wang, Z., Ou, J., (2022), Prediction of milling force based on spindle current signal by neural networks, *Measurement*, 205, 112153.
- Kim, J. E., Oh, J. Y., Sim, B., Lee, W., (2025), Cutting force monitoring considering electrical characteristics of spindle motor, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 42(1), 19-25.
- Zhang, X., Han, C., Luo, M., Zhang, D., (2020), Tool wear monitoring for complex part milling based on deep learning, *Applied Sciences*, 10(19), 6916.

10. El-Taybany, Y., Elhendawy, G. A., (2025), Experimental investigation of different machine learning approaches for tool wear classification based on vision system of milled surface, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 19(2), 849-866.
11. Ryu, J.-D., Lee, H.-H., Ha, K.-N., Kim, S.-R., Lee, M. C., (2025), Cutting force estimation using milling spindle vibration-based machine learning, *Applied Sciences* (2076-3417), 15(5), 2336.
12. Ou, J., Li, H., Huang, G., Yang, G., (2021), Intelligent analysis of tool wear state using stacked denoising autoencoder with online sequential-extreme learning machine, *Measurement*, 167, 108153.
13. Kulkarni, N. N., Valente, N. A., Sabato, A., (2023), Time-inferred autoencoder: A noise adaptive condition monitoring tool, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 204, 110789.
14. Choi, S., Kim, D., (2024), Diagnosis of combustion instability in gas turbine combustor using auto-encoder-based machine learning, *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, 27(1), 49-56.
15. Ou, J., Li, H., Huang, G., Zhou, Q., (2020), A novel order analysis and stacked sparse auto-encoder feature learning method for milling tool wear condition monitoring, *Sensors*, 20(10), 2878.
16. Lee, J. H., Kwak, J. S., (2025), A study on optimization of autoencoder-based latent variables for improving surface roughness prediction, *Journal of Power System Engineering*, 29(1), 23-29.



#### **Je-Doo Ryu**

Researcher in the Korea Institute of Industrial Technology. Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interests are machining process monitoring and signal analysis.

E-mail: ryujd88@kitech.re.kr



#### **Jung-Min Lee**

Principal Researcher in the Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are mechatronics, smart monitoring, and fault diagnosis/prognostics.

E-mail: jungminlee@kitech.re.kr



#### **Sung-Ryul Kim**

Principal Researcher in the Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are mechatronics, smart monitoring, and fault diagnosis/prognostics.

E-mail: sungkim@kitech.re.kr



#### **Min Cheol Lee**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interests are intelligent robot control, autonomous mobile robot, medical robotics, system identification, sliding mode control, and navigation/ localization of mobile robots

E-mail: mclee@pusan.ac.kr

# 정전기 분무 증착법으로 제작된 Lithium Lanthanum Titanate 박막의 광소결 전압에 따른 미세구조 및 화학적 특성 분석

## Effect of Flash-light Sintering Voltage on the Microstructure and Chemical Properties of Lithium Lanthanum Titanate Thin Films Prepared by Electrostatic Spray Deposition

김선민<sup>1</sup>, 송인석<sup>1</sup>, 안효준<sup>1</sup>, 김민지<sup>1</sup>, 김영범<sup>1,#</sup>

Sun Min Kim<sup>1</sup>, In Suk Song<sup>1</sup>, Hyo Jun Ahn<sup>1</sup>, Min Ji Kim<sup>1</sup>, and Young-Beom Kim<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 한양대학교 융합기계공학과 (Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University)  
# Corresponding Author / E-mail: ybkim@hanyang.ac.kr, TEL: +82-2-2220-4544  
ORCID: 0000-0002-0307-0595

KEYWORDS: Lithium lanthanum titanate (LLTO), Electrostatic spray deposition (정전기 분무 증착법), Flash light sintering (광소결), Perovskite (페로브스카이트), All-solid-state batteries (전고체전지)

*All-solid-state batteries (ASSBs) utilizing non-flammable inorganic electrolytes are gaining significant attention due to safety concerns associated with conventional lithium-ion batteries. Among various oxide electrolytes, lithium lanthanum titanate (LLTO) demonstrates high ionic conductivity at room temperature but is prone to lithium loss at elevated sintering temperatures. In this study, we employed electrostatic spray deposition (ESD) at 250°C, followed by flash light sintering within milliseconds using a xenon lamp. This approach enabled the production of dense and highly crystalline LLTO thin films with minimal lithium evaporation. Scanning electron microscopy (SEM) analysis confirmed reduced porosity at 650V, while X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) revealed stable lithium content. Additionally, X-ray diffraction (XRD) indicated the formation of a cubic perovskite structure that is beneficial for ionic transport. This rapid and scalable process shows promise for producing high-quality LLTO electrolytes, thereby enhancing the safety and performance of next-generation ASSBs.*

Manuscript received: April 9, 2025 / Revised: July 15, 2025 / Accepted: August 22, 2025

### 1. 서론

리튬이온전지는 전기차 등에서 에너지 저장체로 사용되면서, 안전성의 중요성이 점차 부각되고 있다. 기존 리튬이온전지에 사용되는 액체 전해질은 가연성 유기물을 함유하고 있어 폭발이나 화재의 위험성을 내재하고 있다. 이러한 이유로, 비가연성 무기 고체 전해질을 사용하는 전고체전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전고체전지에서 고체 전해질은 기존 리튬이온전지의 분리막 기능과 동시에 리튬이온을 전도하는 전해질 역할을 수행해야 하므로, 높은 이온 전도성이 필수적이다.

산화물과 황화물 전해질은 상용 액체 전해질과 유사한 수준의

이온 전도도를 나타내는 대표적인 고체 전해질이다. 그러나 황화물 전해질에 포함된 황(S)은 산소와 반응하여 SO<sub>x</sub> 등의 유독성 가스를 생성할 뿐만 아니라, 주로 산화물로 구성된 양극 활물질과 부반응을 일으킬 수도 있다[1]. 이로 인해 안전성과 계면 안정성이 상대적으로 보장되는 산화물 전해질, 특히 Lithium Lanthanum Titanate (LLTO)와 같은 물질이 고체 전해질의 유력한 후보로 주목받고 있다[2]. LLTO는 상온에서 우수한 이온 전도도를 나타내는 페로브스카이트 구조의 산화물로, 리튬(Li)과 란타넘(La), 티타늄(Ti)의 비율이 각각 0.33, 0.55, 1일 때 이온 전도도가 가장 높다고 보고된다[3].

LLTO 전해질의 제조 방법으로는 주로 펠릿화(Pelletizing)와

테이프 캐스팅(Tape Casting)이 알려져 있으나, 공정이 복잡하고 1,500°C 이상의 높은 소결 온도를 필요로 하여 대량 생산에는 적합하지 않다. 이에 비해 박막 증착 방식은 공정이 단순하고, 소결 온도 및 제조 비용이 상대적으로 낮아 대량 생산에 유리하다[4]. 진공 환경이 필요한 펄스 레이저 증착법(Pulsed Laser Deposition, PLD)이나 원자층 증착법(Atomic Layer Deposition, ALD) 등의 증착 방법은 박막 두께를 정밀하게 제어할 수 있지만, 진공을 유지하는 데 드는 비용과 시간이 증가하여 생산 효율이 떨어진다. 반면에 Sol-gel법과 결합된 정전기 분분 증착법(Electrostatic Spray Deposition, ESD)은 공정이 단순하면서도 원하는 화학 조성과 면적의 박막을 구현할 수 있어, 비교적 저렴한 비용으로 고품질 박막을 대량 생산할 수 있는 유망한 기술이다.

펠릿화 및 테이프 캐스팅 방법에 비해 박막 공정에서는 소결 온도를 다소 낮출 수 있지만, 페로브스카이트 구조 형성을 위해서는 여전히 800°C 이상의 소결이 필요하며, 박막 내부 기공 제거와 치밀화를 위해서는 최대 1,200°C 이상의 추가 소결이 요구된다. 그러나 LLTO에 함유된 리튬은 용점이 낮아 1,200°C 이상에서 쉽게 증발함으로써, 결국 리튬, 란타늄, 티타늄의 비율이 깨지는 문제가 발생한다.

이를 해결하기 위해, 소결 과정 전에 리튬을 10-20% 과량 첨가하는 방안이 제시되었지만, 이는 원료 비용의 증가와 공정 효율성 저하를 야기한다. 다른 방법으로는 소결 시간을 극도로 단축하여 리튬 증발을 억제하는 방식을 시도할 수 있다. 예를 들어, 탄소 가열 소자를 이용해 세라믹 소재를 수초 내에 3,000°C 까지 가열하거나[5], 스프레이 코팅된 박막 전해질을 방사 가열 방식으로 소결한 사례가 보고된 바 있다[6].

본 연구에서는 제논 램프에서 방출되는 가시광선 펄스를 박막에 조사하는 광소결(Flash Light Sintering, FLS) 기법을 활용하였다. 이 방법은 수 밀리초 이내에 소결을 완료할 수 있으며, 다른 단시간 소결 방법에 비해 조사 면적이 넓어 대량 생산에도 유리하다. 또한 상온에서 조사 후 빠르게 냉각되는 특성상, Tetragonal 페로브스카이트 구조에 비해 높은 이온 전도도를 보이는 Cubic 페로브스카이트 구조가 형성될 수 있다는 점이 보고되고 있다. 이를 통해 광소결 기술을 박막 LLTO 제조 공정에 도입함으로써, 상용화의 최대 난제로 지적되어 온 리튬 증발 문제를 근본적으로 억제하였다. 그 결과, 조성 변화에 민감한 LLTO 시스템에서도 목표 조성을 정밀하게 유지할 수 있었으며, 상온에서 상대적으로 높은 이온 전도도를 제공하는 Cubic 페로브스카이트 상을 완전 치밀화된 형태로 구현하였다. 나아가 광소결의 초단시간 특성은 리튬뿐 아니라 낮은 용융점으로 인해 기존 고온 소결에서 휘발 또는 분해되기 쉬운 다양한 휘발성 원소를 포함한 산화물 물질까지 적용 범위를 확장할 가능성을 보여준다. 따라서 광소결은 조성 안정성과 고이온전도성을 동시에 확보한 차세대 산화물 고체 전해질 양산 플랫폼으로 활용될 수 있음을 실험적으로 입증하며, 고전도 고에너지밀도 전고체전지 개발에 새로운 제조 패러다임을 제시한다.

## 2. 실험

### 2.1 LLTO 박막 전해질 제작 방법

본 연구에서는 LLTO 용액을 제조하기 위해, 먼저 상온에서 2시간 동안 에탄올(99.5%, Sigma Aldrich)에  $\text{LiNO}_3$  (99.0%, Sigma Aldrich)와  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (99.9%, Sigma Aldrich)를 혼합하였고, 별도로  $\text{Ti}(\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$  (97.0%, Sigma Aldrich)를 아세틸아세톤(99.5%, Sigma Aldrich)에 혼합하였다. 이후, 두 혼합액을 상온에서 2시간 추가로 혼합한 뒤, 부틸카비톨(99%, Sigma Aldrich)을 첨가하여 24시간 동안 혼합하였다. 이때 부틸카비톨은 에탄올과 1 : 1의 부피비가 되도록 조절하였으며, 리튬과 란타늄, 티타늄의 몰비율은 각각 0.33 : 0.55 : 1로 설정하였다. 최종 완성된 용액의 농도는 0.008 M이었다.

제조된 LLTO 용액은 ESD 기법을 이용해 두께 0.5 mm의 Si 웨이퍼 위에 증착하였다. 이때 사용된 시린지 노즐의 직경은 0.34 mm이며, 분당 토출 속도는 15  $\mu\text{L}/\text{min}$ , 인가 전압은 12 kV로 고정하였다. 노즐과 기판 사이의 거리는 50 mm로 설정하였고, 증착 온도는 250°C에서 진행하였다. 제작된 LLTO 전해질 박막은 페로브스카이트 결정 구조 발현 및 치밀화를 위해 광소결법을 진행하였다. 광소결의 인가전압은 550, 600, 650V에서 진행하였고 on-time은 10 ms, off-time은 100 ms, 펄스 수는 5번으로 고정하였다.

### 2.2 LLTO 박막 특성 분석 방법

LLTO 박막의 표면 및 두께는 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM, Nova Nano SEM 450, FEI)을 이용하여 관찰하였다. LLTO의 조성과 화학적 특성은 X선 광전자 분광(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS, K-Alpha, Thermo Fisher Scientific)을 통해 분석하였으며, 박막의 결정 구조는 X선 회절(X-ray Diffraction, XRD, SmartLab, Rigaku)을 이용하여 확인하였다.

## 3. 결과

### 3.1 표면 및 두께 분석

ESD 기법으로 Si 웨이퍼 위에 형성된 LLTO 전해질 박막의 표면 및 두께를 관찰하기 위해 SEM 분석을 수행하였다. Figs. 1(a)-1(c)는 각각 550, 600, 650 V에서 광소결이 진행된 LLTO 박막의 표면을 나타낸다. 550과 600 V에서 광소결된 LLTO 박막에서는 여전히 기공이 관찰되며, 이러한 기공들은 리튬 이온의 전도를 방해하여 이온 전도도를 저해한다[7,8]. 따라서 치밀도가 높은 박막의 제조가 필수적이며, 실제로 650 V에서 광소결한 결과 기공이 크게 감소하여 고밀도의 박막을 형성할 수 있음을 확인하였다.

Figs. 2(a)-2(d)는 각각 광소결 전 LLTO 박막과 550, 600,

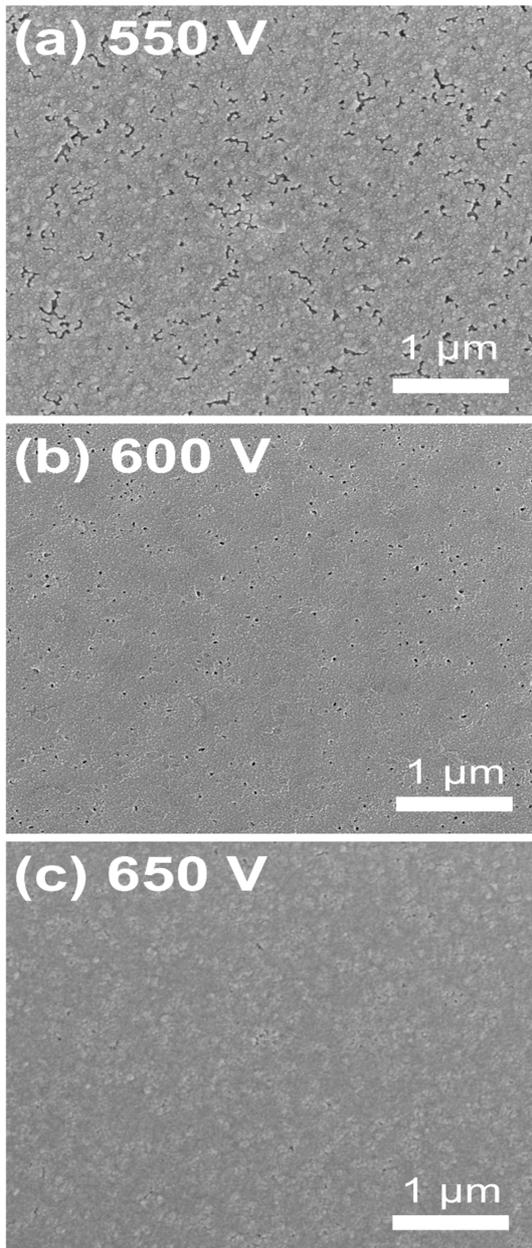


Fig. 1 SEM images of the surface morphology of the LLTO thin film flash light sintered under (a) 550 V, (b) 600 V, and (c) 650 V

650 V에서 광소결된 LLTO 박막의 두께를 나타낸다. 광소결 공정이 진행되기 전 LLTO 박막의 두께는 약 350 nm였으며 광소결 공정이 진행된 후에도 모두 약 350 nm의 두께를 유지하여, 광소결로 인한 두께 변화가 없었음을 확인할 수 있다. 일반적으로 소결 전에 LLTO 박막 내에 유기물이 다량 포함되어 있으면, 소결 과정에서 유기물이 증발하고 기공이 메워지면서 두께가 감소한다[9]. 그러나 본 연구에서는 ESD 증착 시 온도를 250°C로 설정하여 이미 유기물 증발이 가능한 환경을 마련하였으므로, 광소결 이전에 대부분의 유기물이 제거되었고 추가로 증발할 물질도 없었다. 또한, 용융점이 낮은 리튬 등의 물질 증발로

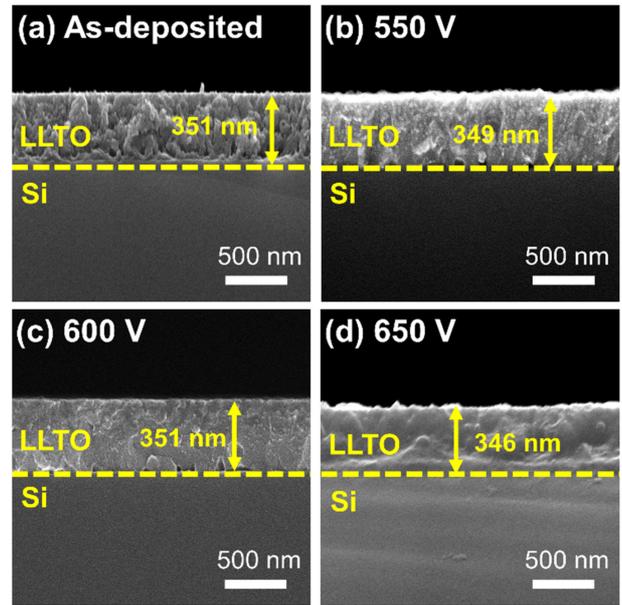


Fig. 2 Cross-sectional SEM images of (a) as-deposited LLTO thin film and flash light sintered under (b) 550 V, (c) 600 V, and (d) 650 V

인해 두께가 줄어드는 경우도 고려해야 하지만, SEM 분석 결과 두께 변화가 관찰되지 않아 리튬 증발 역시 효과적으로 억제되었음을 확인하였다[10].

본 연구에서는 두께가 350 nm인 LLTO 박막이 광소결 후에도 두께 변화 없이 완전히 조밀화됨을 확인하였다. 광소결은 단일 펄스 조건에서도 광에너지가 상부층에 효율적으로 흡수·확산되어 약 1 μm 두께까지의 세라믹 박막을 균일하게 소결할 수 있고 수 마이크로미터 범위의 두꺼운 박막을 소결하기 위해서 인가 전압을 높이고 펄스 횟수를 증가시켜 열 침투 깊이를 확장한 공정이 보고된 바 있다. 전고체전지용 전해질은 미세 분말을 성형한 수십 마이크로미터 두께의 펠릿 형태로도 사용되지만, 두께가 증가할수록 이온 전도도가 감소하고 부피당 에너지 밀도가 저하된다. 이에 따라 박막 전해질에 대한 수요가 증가하고 있으며, 내부 단락을 방지할 수 있는 기계적 견고성을 확보한 상태에서 최적 두께를 설정하는 것이 필수적이다. Ruzmetov 등은 두께 110 nm 전해질에서는 단락 현상이 확인한 반면, 180 nm 전해질을 적용한 마이크로 배터리에서는 안정적인 작동을 보고하였다[11]. 전해질을 얇게 만들면 그만큼 양극의 두께를 늘릴 수 있어, 고용량 배터리 설계에도 유리하다.

### 3.2 화학적 특성 분석

Fig. 3은 증착 직후 LLTO 박막과 각각 550, 600, 650 V에서 광소결된 LLTO 박막에 대한 XPS 분석 결과를 나타낸다. Li 1s 피크는 약 55.2 eV 부근에서 관찰되었으며, 광소결 전압이 증가해도 그 위치에 변화가 없어 리튬 증발이 효과적으로 억제되었음을 확인할 수 있다[12,13]. Ti 2p 스펙트럼은 각각 464.1 eV와 458.3 eV에서 두 개의 피크가 관찰되어 전형적인 Ti<sup>4+</sup> 상태임을

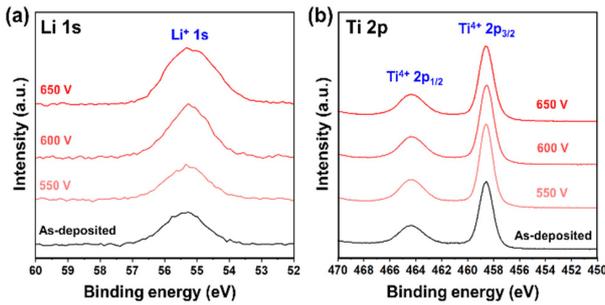


Fig. 3 XPS spectra of (a) Li 1s and (b) Ti 2p of as-deposited LLTO thin film and flash light sintered under 550, 600, and 650 V

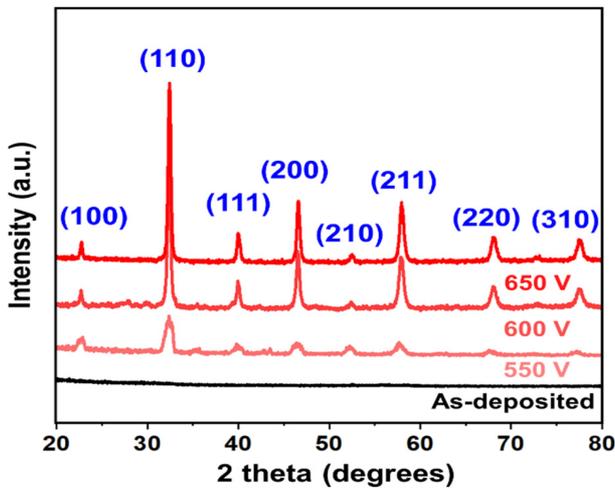


Fig. 4 XRD patterns of as-deposited LLTO thin film and flash light sintered under 550, 600, and 650 V

보여준다. 또한 462 eV와 456.4 eV 근처에서 추가적인 피크가 확인되지 않아,  $Ti^{3+}$ 가 존재하지 않음을 알 수 있었다. 일반적으로 리튬이 증발하면 일부  $Ti^{4+}$ 가  $Ti^{3+}$ 로 환원되는 현상이 나타나지만,  $Ti^{3+}$  피크가 관찰되지 않았으므로 리튬 증발과 이에 따른 환원 반응이 모두 억제되었음을 확인하였다[14-17]. 화학적 조성의 안정성은 고체 전해질의 전기화학적 특성과 직결되며 Ti가  $Ti^{4+}$  상태를 유지할 경우 보상용 산소 공공이 생성되지 않아 이에 따른 계면 저항 증가를 방지할 수 있다[16]. 따라서, 광소결을 통해 리튬 증발을 방지하여  $Ti^{4+}$ 의 환원을 억제하였을 뿐 아니라, 리튬 손실 시 발생하는 Orthorhombic 페로브스카이트 상 형성에 따른 이온 전도도 저하를 억제할 수 있다[3].

### 3.3 결정구조 분석

Fig. 4는 증착 직후 LLTO 박막과 각각 550, 600, 650 V에서 광소결된 LLTO 박막의 XRD 분석 결과를 나타낸다. 먼저, 증착 직후의 LLTO 박막은 뚜렷한 회절 피크 없이 비정질 특성을 보인다. 그러나 550 V에서 광소결이 시작되면서부터 페로브스카이트 피크가 형성되기 시작하였고, 인가 전압이 높아질수록 LLTO 박막의 결정성이 더욱 뚜렷해짐을 확인할 수 있다. 이는 증착 온도가 결정성 발현에 큰 영향을 주지 않았으며, 광소결에

의해서만 결정 구조가 형성되었음을 의미한다.

또한, LLTO 박막의 결정성 피크는 Tetragonal이 아닌 Cubic 페로브스카이트로 확인되었다. 이는 광소결 후 상온으로 빠르게 냉각되는(Quenching) 과정에서 양이온 재배열이 억제되어 발생하는 현상으로, 소결 과정 중 양이온들은 무질서하게 배치되어 있다가 냉각 시 열 에너지가 급격히 소실되며 재배열되지 않고 그대로 유지된다[18,19]. 이러한 Cubic 페로브스카이트 구조에서의 양이온 랜덤 배치는, Tetragonal 페로브스카이트에 비해 리튬 이온이 결정 구조 내에서 더욱 자유롭게 이동할 수 있게 하여, 이온전도성 향상에 기여할 수 있다[20,21].

## 4. 결론

본 연구에서는 ESD 기법을 활용하여 Si 웨이퍼 위에 LLTO 박막을 증착한 뒤, 광소결을 통해 고밀도 및 높은 결정성을 갖는 LLTO 박막을 형성하였다. 기존의 높은 소결 온도로 인한 리튬 증발 문제를 극복하기 위해, 수 밀리초 이내에 열을 가하는 광소결을 적용하였고, 그 결과 650 V에서 소결된 박막은 기공이 크게 감소하여 치밀화가 탁월하게 이루어짐을 SEM 분석으로 확인하였다. 또한, 박막의 두께 변화가 관찰되지 않아 리튬 증발이 억제되었음을 확인하였으며, XPS 분석에서도 리튬 피크의 위치 변화와  $Ti^{3+}$  피크가 나타나지 않는 점을 통해 이러한 결과를 재확인하였다. 나아가 XRD 분석 결과, 높은 결정성이 확보된 LLTO 박막은 Tetragonal이 아닌 Cubic 페로브스카이트 구조를 형성하였는데, 이는 광소결 후 급격한 냉각으로 인해 양이온 재배열이 억제된 결과로 해석된다. 이러한 Cubic 구조는 리튬 이온의 이동에 유리하여 이온 전도도 향상에 기여할 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서 제시한 ESD 공정과 광소결 방법은, 높은 온도로 인한 리튬 증발 문제를 효과적으로 억제하면서도 고품질 LLTO 박막을 구현하는 데 매우 유용한 접근법을 확인하였다. 이는 전고체전지용 산화물 전해질 제작 공정의 대량 생산과 안전성, 이온 전도도 향상에 기여할 수 있을 것으로 전망된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20213030030190, 연료전지 시스템의 스마트설계-제조안전 오픈 플랫폼 개발).

## REFERENCES

- Shoji, M., Cheng, E. J., Kimura, T., Kanamura, K., (2019), Recent progress for all solid state battery using sulfide and oxide solid electrolytes, Journal of Physics D: Applied Physics, 52(10), 103001.

2. Inaguma, Y., Liqun, C., Itoh, M., Nakamura, T., Uchida, T., Ikuta, H., Wakihara, M., (1993), High ionic conductivity in lithium lanthanum titanate, *Solid State Communications*, 86(10), 689-693.
3. Inaguma, Y., Chen, L., Itoh, M., Nakamura, T., (1994), Candidate compounds with perovskite structure for high lithium ionic conductivity, *Solid State Ionics*, 70, 196-202.
4. Balaish, M., Gonzalez-Rosillo, J. C., Kim, K. J., Zhu, Y., Hood, Z. D., Rupp, J. L., (2021), Processing thin but robust electrolytes for solid-state batteries, *Nature Energy*, 6(3), 227-239.
5. Wang, C., Ping, W., Bai, Q., Cui, H., Hensleigh, R., Wang, R., Brozena, A. H., Xu, Z., Dai, J., Pei, Y., (2020), A general method to synthesize and sinter bulk ceramics in seconds, *Science*, 368(6490), 521-526.
6. Ping, W., Wang, C., Wang, R., Dong, Q., Lin, Z., Brozena, A. H., Dai, J., Luo, J., Hu, L., (2020), Printable, high-performance solid-state electrolyte films, *Science Advances*, 6(47), eabc8641.
7. Wang, H., Huang, H., Wunder, S. L., (2000), Novel microporous poly (vinylidene fluoride) blend electrolytes for lithium-ion batteries, *Journal of the Electrochemical Society*, 147(8), 2853.
8. Chen, R.-J., Huang, M., Huang, W.-Z., Shen, Y., Lin, Y.-H., Nan, C.-W., (2014), Sol-gel derived Li-La-Zr-O thin films as solid electrolytes for lithium-ion batteries, *Journal of Materials Chemistry A*, 2(33), 13277-13282.
9. Teranishi, T., Ishii, Y., Hayashi, H., Kishimoto, A., (2016), Lithium ion conductivity of oriented  $\text{Li}_{0.33}\text{La}_{0.56}\text{TiO}_3$  solid electrolyte films prepared by a sol-gel process, *Solid State Ionics*, 284, 1-6.
10. Shin, S. H., Park, J.-S., Lee, H., Kong, S.-W., Park, J., Won, Y., Kim, Y.-B., (2019), Fabrication of scandia-stabilized zirconia thin films by instant flash light irradiation, *Coatings*, 10(1), 9.
11. Ruzmetov, D., Oleshko, V. P., Haney, P. M., Lezec, H. J., Karki, K., Baloch, K. H., Agrawal, A. K., Davydov, A. V., Krylyuk, S., Liu, Y., (2012), Electrolyte stability determines scaling limits for solid-state 3D Li ion batteries, *Nano Letters*, 12(1), 505-511.
12. Lu, D.-L., Zhao, R.-R., Wu, J.-L., Ma, J.-M., Huang, M.-L., Yao, Y.-B., Tao, T., Liang, B., Zhai, J.-W., Lu, S.-G., (2020), Investigations on the properties of  $\text{Li}_{3x}\text{La}_{2/3-x}\text{TiO}_3$  based all-solid-state supercapacitor: Relationships between the capacitance, ionic conductivity, and temperature, *Journal of the European Ceramic Society*, 40(6), 2396-2403.
13. Dai, K., Wang, Q., Xie, Y., Shui, M., Shu, J., (2022), Disordered carbon coating free  $\text{Li}_{0.2375}\text{La}_{0.5875}\text{TiO}_3$ : A superior perovskite anode material for high power long-life lithium-ion batteries, *Journal of Materials Science*, 57(4), 2825-2838.
14. Wang, M. J., Wolfenstine, J. B., Sakamoto, J., (2020), Mixed electronic and ionic conduction properties of lithium lanthanum titanate, *Advanced Functional Materials*, 30(10), 1909140.
15. Li, C.-L., Zhang, B., Fu, Z.-W., (2006), Physical and electrochemical characterization of amorphous lithium lanthanum titanate solid electrolyte thin-film fabricated by e-beam evaporation, *Thin Solid Films*, 515(4), 1886-1892.
16. Ma, C., Chen, K., Liang, C., Nan, C.-W., Ishikawa, R., More, K., Chi, M., (2014), Atomic-scale origin of the large grain-boundary resistance in perovskite Li-ion-conducting solid electrolytes, *Energy & Environmental Science*, 7(5), 1638-1642.
17. Zhang, L., Zhang, X., Tian, G., Zhang, Q., Knapp, M., Ehrenberg, H., Chen, G., Shen, Z., Yang, G., Gu, L., (2020), Lithium lanthanum titanate perovskite as an anode for lithium ion batteries, *Nature Communications*, 11(1), 3490.
18. Okumura, T., Yokoo, K., Fukutsuka, T., Uchimoto, Y., Saito, M., Amezawa, K., (2009), Improvement of Li-ion conductivity in a-site disordering lithium-lanthanum-titanate perovskite oxides by adding LiF in synthesis, *Journal of Power Sources*, 189(1), 536-538.
19. Harada, Y., Hirakoso, Y., Kawai, H., Kuwano, J., (1999), Order-disorder of the A-site ions and lithium ion conductivity in the perovskite solid solution  $\text{La}_{0.67-x}\text{Li}_{3x}\text{TiO}_3$  ( $x=0.11$ ). *Solid State Ionics*, 121(1-4), 245-251.
20. Harada, Y., Ishigaki, T., Kawai, H., Kuwano, J., (1998), Lithium ion conductivity of polycrystalline perovskite  $\text{La}_{0.67-x}\text{Li}_{3x}\text{TiO}_3$  with ordered and disordered arrangements of the A-site ions, *Solid State Ionics*, 108(1-4), 407-413.
21. Hu, X., Cheng, X., Qin, S., Yan, G., Malzbender, J., Qiang, W., Huang, B., (2018), Mechanical and electrochemical properties of cubic and tetragonal  $\text{Li}_x\text{La}_{0.557}\text{TiO}_3$  perovskite oxide electrolytes, *Ceramics International*, 44(2), 1902-1908.

**Sun Min Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. His research is about the electrode fabrication and interface of all solid state batteries.

E-mail: smkim93@hanyang.ac.kr

**In Suk Song**

Undergraduate Research Intern in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interest is all solid state batteries.

E-mail: song1203@hanyang.ac.kr

**Hyo Jun Ahn**

Undergraduate Research Intern in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interest is solid oxide fuel cells, all solid state batteries.

E-mail: dksgywns0301@hanyang.ac.kr

**Min Ji Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. Her research is about the electrode fabrication and interface of all solid state batteries.

E-mail: mjkim401@hanyang.ac.kr

**Young-Beom Kim**

Professor in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. His research interests include development of various solid-state energy conversion devices including solid oxide fuel cells, all-solid-state batteries etc.

E-mail: ybkim@hanyang.ac.kr

# 미세 방전 가공에서 형성되는 방전흔 형상에 대한 실험적 분석

## Experimental Study on the Formation of Discharge Crater Morphology in Micro EDM

김재연<sup>1</sup>, 이의석<sup>1</sup>, 공희진<sup>2</sup>, 김보현<sup>2, #</sup>  
Jae Yeon Kim<sup>1</sup>, Ui Seok Lee<sup>1</sup>, Hee Jin Kong<sup>2</sup>, and Bo Hyun Kim<sup>2, #</sup>

<sup>1</sup> 숭실대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University)  
<sup>2</sup> 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)  
# Corresponding Author / E-mail: bhkim@ssu.ac.kr, TEL: +82-2-820-0653  
ORCID: 0000-0002-1546-5420

KEYWORDS: Micro EDM (미세 방전 가공), Discharge crater (방전흔), Capacitance (축전용량)

*As advanced materials with high hardness, strength, and heat resistance are increasingly applied in fields such as aerospace, semiconductors, biomedical engineering, and mold manufacturing, the demand for high-precision machining technologies is growing. Micro electrical discharge machining (Micro-EDM) has gained attention as a non-contact process that locally melts and vaporizes conductive materials using electrical sparks, allowing for the fabrication of intricate 3D microstructures with high precision. This study analyzes the impact of capacitance in RC-type discharge circuits on the machining characteristics of single discharge craters using aluminum, brass, copper, STS304, and WC-Co. Additionally, we compare the overlapping behavior and morphological evolution of multiple discharge craters across these materials. We investigated the diameter and depth of single discharge craters, as well as the geometrical characteristics of overlapped craters. The results demonstrate the influence of discharge energy and material properties on discharge crater geometry, providing a quantitative basis for analyzing surface morphology in the Micro-EDM process.*

Manuscript received: April 24, 2025 / Revised: November 6, 2025 / Accepted: December 11, 2025

### 1. 서론

최근 기계, 항공우주, 바이오 등 다양한 산업 분야에서 높은 강도, 경도, 내열성을 지닌 소재의 사용이 증가함에 따라 이들을 정밀하게 가공할 수 있는 고도화된 제조 기술의 수요가 높아지고 있다[1]. 특히 항공우주, 반도체, 바이오 및 금형 산업 등에서는 미세 형상 가공, 정밀 부품 제작, 나노미터 수준의 표면 거칠기 확보가 요구되고 있다[2].

그러나 기존의 절삭, 연삭 등 기계적인 가공 방법은 고경도 재료의 가공 과정에서 공구 마모와 파손 등의 문제가 발생할 수 있으며 미세 형상의 가공 정밀도 측면에서도 제약이 발생한다[2,3]. 이러한 배경 속에서 비접촉 방식의 가공 기술인 방전 가공이 주목 받고 있다.

방전 가공은 도전성 재료를 전기적 스파크에 의해 국부적으로 용융 및 기화시키는 방식으로 이루어지며 전극과 가공물 사이에 기계적인 접촉이 발생하지 않는다[4]. 이러한 특성으로 높은 경도와 취성을 갖는 난삭재도 정밀하게 가공할 수 있으며 복잡한 형상을 제작하는 것이 가능하다[5,6]. 또한, 낮은 경도를 갖는 전극으로 높은 경도를 갖는 소재를 가공할 수 있다. 방전 가공은 주로 밀링, 드릴링, 역방전가공(Retrieve EDM), 블록 방전 가공(Block EDM), 와이어 방전 연삭(Wire Electrical Discharge Grinding, WEDG), 형조 방전 가공(Die-sinking EDM) 등 다양한 형태로 응용되며, 그 과정에서 발생하는 수많은 방전흔이 표면에 중첩되어 최종적인 가공 표면을 형성하게 된다[7-10].

방전 가공 과정에서 전극과 가공물이 일정한 간극에 도달하게 되면 플라즈마 채널을 형성하고, 이로 인해 가공물 표면에 높은

온도가 전달되며 국부적인 용융과 기화가 일어나게 된다[11]. 이 때 형성되는 용융 흔적을 방전흔이라고 하며, 이는 가공물의 표면 거칠기와 형상 정밀도에 결정적인 영향을 미치게 된다. 방전 가공의 특성 상 수많은 방전흔이 겹겹이 쌓여 전체 가공 표면을 형성하게 되며, 이들의 크기와 형상은 가공 품질과 직결된다[12,13]. RC 방전회로를 이용하는 미세 방전 가공에서 방전 에너지를 결정짓는 주요 인자는 축전용량이며, 이는 단발 방전 에너지의 크기에 직접적인 영향을 미친다. 축전 용량이 클수록 저장되는 전하의 양이 증가하고, 결과적으로 방전 가공에서 형성되는 플라즈마 채널의 온도와 범위가 넓어지면서 더 큰 방전흔을 형성하게 된다. 즉, 축전 용량의 변화는 단순한 전기적 변수의 변화가 아니라, 실질적으로 가공 표면의 품질 변화에 영향을 미치는 핵심 인자라고 할 수 있다. 따라서 축전 용량에 따른 단발 방전흔의 크기 및 형상을 정량적으로 분석하는 것은 가공 과정과 결과를 이해하는데 기여할 수 있다.

방전 가공 과정에서 단발 방전은 전체 방전 가공 공정의 미시적 단위로서, 하나의 스파크가 발생할 때 형성되는 방전흔의 크기, 형상, 깊이, 재용고 패턴 등을 관찰할 수 있는 기반이 된다[14]. 단발 방전을 분석함으로써 가공 조건에 따라 방전흔이 어떤 방식으로 표면에 형성되는지 분석할 수 있으며, 이는 수많은 단발 방전이 이루어지는 미세 방전 가공의 거동을 해석하는 과정에 기여할 수 있다. 특히 단발 방전 에너지와 방전흔을 분석하는 것은 전체 가공 과정에 대한 정량적 예측 및 공정 최적화를 위한 기초적인 접근이다.

하지만 대부분의 기본 연구는 누적된 가공 조건 하에서 형성된 전체 가공 표면을 분석하거나, 재료 제거율 및 표면 거칠기 등 성능 지표 위주의 연구가 이루어졌다. Lee 등은 방전 가공으로 실리콘 카바이드 웨이퍼와 소결 실리콘 카바이드에 미세 구멍과 미세 홈을 가공하였으며 축전 용량에 따른 가공 영역의 표면 거칠기와 전극 마모 등을 분석하였다[10]. Kim 등은 방전 가공을 이용하여 STS304 소재에 미세 구멍을 가공하였으며 축전 용량, 인가 전압, 전극 직경, 전극 회전 속도 등 가공 조건에 따른 재료 제거율과 전극 마모율을 분석하였다[13]. Lee 등은 황동, 스테인리스강, 초경합금 소재에 방전 가공을 수행하여 가공 영역의 방전흔 이미지 데이터를 기반으로 가공물 소재, 가공 조건, 표면 거칠기 등을 예측하는 CNN 모델을 제안하였다[14]. Keskin 등은 구리 전극을 이용하여 철계 금속에 방전 가공을 수행하였으며 표면 거칠기에 영향을 미치는 가공 조건을 분석하였다[15]. Bhatia 등은 고탄소 크롬강에 와이어 방전 가공을 수행하였으며 다구찌 기법을 활용해 우수한 표면 품질로 가공할 수 있는 방전 조건을 분석하였다[16]. Jabbaripour 등은 Ti-6Al-4V 합금 소재에 구리 전극을 이용하여 방전 가공을 수행하였으며 표면 품질, 재료 제거율, 전극 마모율 등을 분석하였다[17]. Kim 등은 유리질 탄소 소재에 초경합금 전극을 이용하여 미세 구멍을 가공하였으며 인가 전압, 축전 용량에 따른 재료 제거율, 전극 마모율, 가공 영역의 표면거칠기 등을 분석하였다[18].

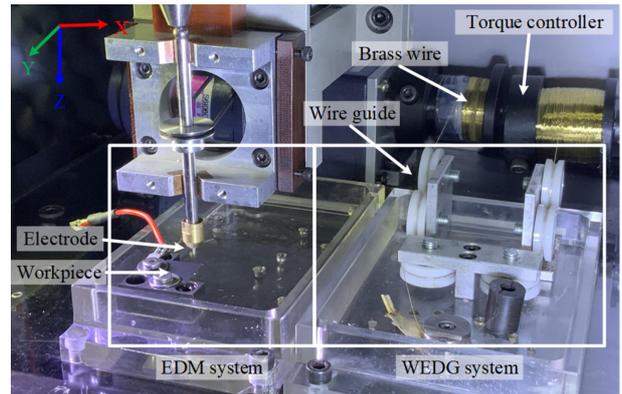


Fig. 1 Experimental setup

하지만, 현재까지 축전 용량에 따른 단발 방전흔의 크기, 깊이 및 형상과 중첩된 방전흔에 대한 분석은 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 축전 용량을 사용하여 알루미늄, 황동, 구리, 스테인리스, 초경합금 소재에 단발 방전을 수행하고, 이에 따라 표면에 형성되는 방전흔의 직경, 깊이, 형상 등을 분석하였다. 또한, 재료 별로 중첩된 방전흔들을 분석하였다.

## 2. 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 방전 가공 시스템을 나타낸다. 방전 가공 시스템은 전극 제작을 위한 와이어 방전 연삭 시스템과 방전 가공 시스템으로 구성되었다.

와이어 방전 연삭 시스템의 경우, 직경 200  $\mu\text{m}$ 의 황동 와이어, RC 방전 회로, 전극 회전을 위한 스피들, 와이어 가이드, 토크 컨트롤러 등으로 구성되었다. 와이어 방전 연삭 시스템과 방전 가공 시스템을 하나의 시스템으로 구성하여 전극 장착 간 발생할 수 있는 런아웃을 방지하였다. 방전 가공 시스템은 와이어 방전 연삭 시스템에서 사용한 RC 방전회로와 방전 수조 등으로 구성하였다. 두 공정 모두 방전 가공 중 발생하는 부스러기의 원활한 배출과 방전 간극(Discharge Gap)의 절연 상태를 회복을 위해 등유를 절연액으로 사용하였다.

가공물의 표면에 발생한 단발 방전흔과 중첩 방전흔 등을 공초점 현미경(OLS-5000, Olympus Corp.)과 주사전자현미경(FE-SEM, Carl Zeiss Corp.) 등을 사용하여 분석하였다. 중첩된 방전흔의 경우,  $130 \times 130 \mu\text{m}$  면적의 영역을 측정하였다.

## 3. 실험 방법

### 3.1 전극 제작

본 실험에서는 직경 1 mm의 초경합금 환봉을 와이어 방전 연삭 공정을 통해 직경 580  $\mu\text{m}$ 의 원통 형상 전극으로 제작하였다. 방전 가공 중, 전극 마모가 발생할 수 있고 본 연구는 축전

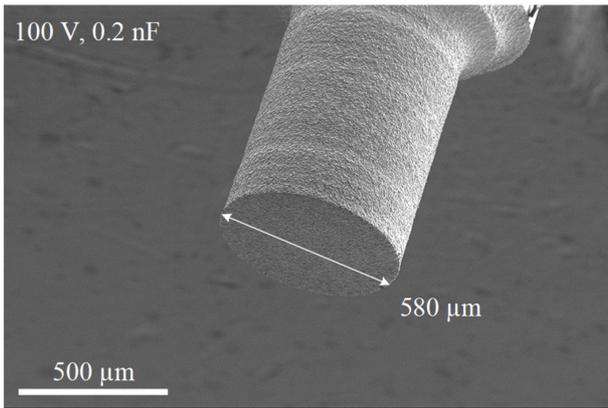


Fig. 2 SEM image of WC-Co electrode (Ø 580 μm)

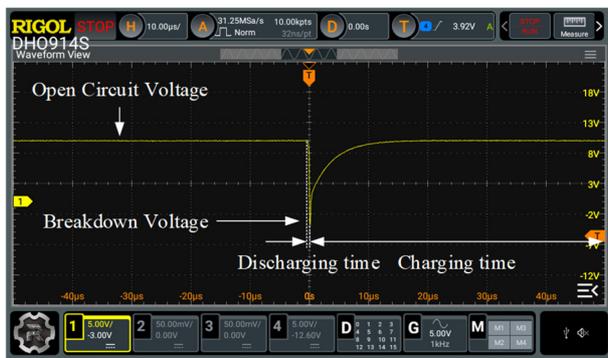


Fig. 3 Typical normal discharge voltage waveform in micro EDM

용량과 가공물에 따른 단발 방전흔의 크기, 형상 변화와 중첩된 방전흔을 정량적으로 분석하는 데 목적이 있어 상대적으로 큰 전극을 사용하였다. 제작된 전극을 가공물과 방전 간극을 형성하도록 이송하여 단발 방전흔을 형성시킬 수 있다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 초경합금 전극을 나타낸다.

3.2 방전 가공

RC 방전 회로를 이용하여 방전 가공을 수행할 경우, 단발 방전 에너지(E)는 식(1)과 같다[19].

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \tag{1}$$

축전 용량(C)과 인가 전압(V)이 증가할 경우, 단발 방전 에너지는 증가하게 된다. 단발 방전 에너지가 증가할수록 가공물의 표면에 형성되는 방전흔의 직경이 증가하게 된다.

RC 방전 회로를 이용하는 방전 가공 과정에서 단발 방전이 발생할 경우, 가공 중 발생하는 전압 파형은 Fig. 3과 같다. 프로브 감쇠율을 10 : 1로 설정하여 전압을 측정함으로써, 실제 방전 전압 100 V는 오실로스코프에서 10 V로 나타났다.

전극과 가공물 사이 거리가 방전 간극보다 클 경우, 회로는 개방 전압(Open Circuit Voltage)을 유지하면서 축전지는 충전된다. 이후, 공구와 가공물이 방전 간극에 도달하면, 축전지에

Table 1 Material properties of workpiece [22-25]

	Tm [K]	c [J/Kg × K]	k [W/m × K]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]
Aluminum	933	840	237	2700
Brass	1173	382	121	8450
Copper	1358	387	400	8930
STS304	1673	504	16	7930
WC-Co	3073	303	110	15800

저장된 에너지가 급격하게 방전되며, 이 때 스파크와 함께 고온의 플라즈마 채널이 형성되어 가공 영역이 용융 또는 기화된다. 해당 구간(Discharging Time)에서 급격하게 전압(Breakdown Voltage)이 하강한다. 이 때, 방전 에너지가 매우 크기 때문에 다량의 전자가 순간적으로 양극으로 이동하며, 이로 인해 단시간 동안 양극과 음극의 역할이 역전하여 전압이 음의 값으로 하강한다[20]. 방전 후에는 축전지가 일정 시간(Charging Time)동안 다시 충전되며, 이 구간은 전압이 점차 회복되는 곡선 형태로 나타나며, RC 방전회로의 시정수에 따라 충전 곡선이 결정된다. 동시에, 외부에서 공급되는 절연액은 전극과 가공물 사이의 절연 상태를 다시 회복시켜, 다음 방전을 위한 조건을 준비한다.

본 연구에서는 0.2, 2, 20, 200, 2000 nF의 축전 용량을 사용하였고, 이에 따른 단발 방전 에너지는 각각 1, 10, 100, 1000, 10000 μJ이다.

방전 가공 중에는 전극과 가공물 사이 절연 파괴에 의해 방전흔이 생성되며, 이는 단발 방전 에너지뿐만 아니라 가공물의 녹는 점(Melting Point, Tm), 비열(Specific Heat, c), 열전도도(Thermal Conductivity, k) 등의 영향을 받게 된다[21]. Table 1은 본 연구에서 사용한 각 재료의 녹는 점, 비열, 열전도도를 나타낸다.

본 연구에서는 와이어 방전 연삭 시스템으로 제작된 전극과 RC 방전 회로를 이용하여 방전 가공을 수행하였다. 가공물은 10 × 10 × 1 mm 크기의 알루미늄, 황동, 구리, STS304, 초경합금 기판을 사용하였다. 방전 가공 시 100 V의 전압을 인가하였으며, 각 조건에 대해 7회씩 반복 실험을 수행하여 가공 결과의 반복성과 신뢰성을 확보하였다. 전극과 가공물 사이 방전 스파크가 형성될 수 있도록 전극을 이송하여 방전 간극을 유지하여 단발 방전흔을 형성하였다. 또한, 중첩 방전흔의 경우, 방전 가공 시 발생하는 부스러기 배출을 위해 전극을 200 rpm의 속도로 회전시켰고, 1 μm/s의 속도로 이송시켜 중첩 방전흔을 형성시켰다.

가공 후 가공물의 표면에 형성된 방전흔의 경우, 가공 중 소재가 녹아 방전흔 가장 자리에 재응고되어 Fig. 4와 같은 형상으로 형성된다. 2D 현미경 이미지에서 외접원의 직경을 방전흔의 직경으로, 외접원 프로파일에서 가장 높은 점과 낮은 점 사이의 수직 거리를 방전흔의 깊이로 측정하였다. 중첩된 방전흔의 경우, 가공 영역에 충분히 형성되도록 깊이 15 μm, 길이 700 μm의 홈 가공을 수행한 후 측정하였다.

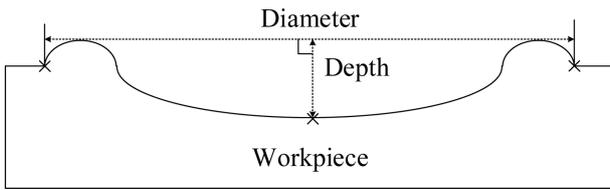


Fig. 4 Schematic diagram of discharge crater size

Table 2 Average diameter of single discharge crater according to workpiece materials and capacitance (100 V)

Material	Average diameter of discharge crater [ $\mu\text{m}$ ]				
	0.2 nF	2 nF	20 nF	200 nF	2000 nF
Aluminum	6.5	15.0	31.4	65.8	191.4
Brass	5.9	12.3	30.5	52.1	145.6
Copper	5	10.5	21.8	50.9	133.3
STS304	4.2	10.5	20.5	61.6	131.0
WC-Co	4.1	10.1	20.5	45.5	125.6

Table 3 Average depth of single discharge crater according to workpiece materials and capacitance (100 V)

Material	Average depth of discharge crater [ $\mu\text{m}$ ]				
	0.2 nF	2 nF	20 nF	200 nF	2000 nF
Aluminum	1.5	4.6	6.6	13.2	30.9
Brass	1.3	3.2	7.1	9.0	16.9
Copper	1.1	1.4	2.7	7.5	11.6
STS304	0.9	1.1	1.4	2.2	4.9
WC-Co	0.6	0.9	1.2	1.59	4.6

4. 실험 결과

4.1 단발 방전흔의 특성

Tables 2와 3은 각각 가공 소재와 축전 용량에 따른 방전흔의 직경과 크기를 측정한 결과를 나타낸다. Fig. 5는 축전 용량과 소재에 따른 단발 방전흔의 직경과 깊이를 나타낸 그래프이다. 모든 소재에서 축전 용량이 증가함에 따라 방전흔의 직경과 깊이가 함께 증가하는 경향을 보였다. 이는 식(1)에서 제시된 바와 같이 축전 용량 증가에 따라 단발 방전 에너지가 증가하기 때문으로 해석된다.

방전흔의 직경 및 깊이는 소재의 열적 물성과 관련을 보였다. 알루미늄, 황동, 구리, STS304, 초경합금의 녹는점은, 각각 660, 900, 1084, 1400, 2800°C 순으로 증가하고, 단위 체적당 비열 에너지는 각각 2.2, 3.2, 3.4, 4.0, 4.8 MJ/m<sup>3</sup>·K 순으로 증가한다. Tables 2와 3과 같이 실험 결과, 동일한 방전 에너지에서 방전흔의 직경과 깊이는 소재의 녹는 점, 단위 체적당 비열 에너지와 반비례하는 경향을 보였다. 즉, 낮은 녹는 점과 단위 체적당 비열 에너지를 갖는 알루미늄의 경우 가장 큰 방전흔이 형성되었으며,

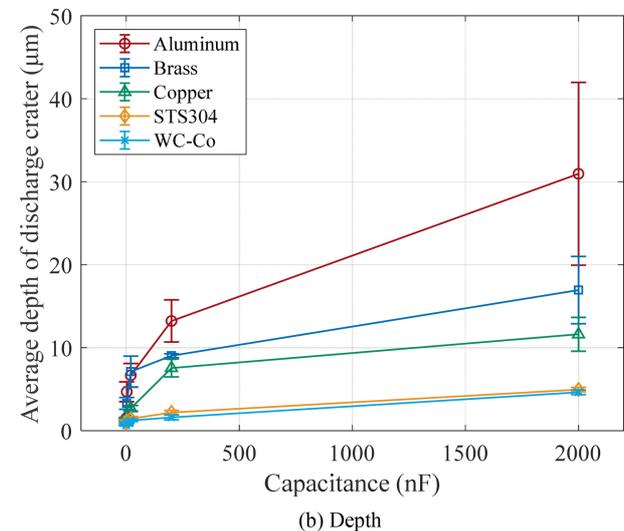
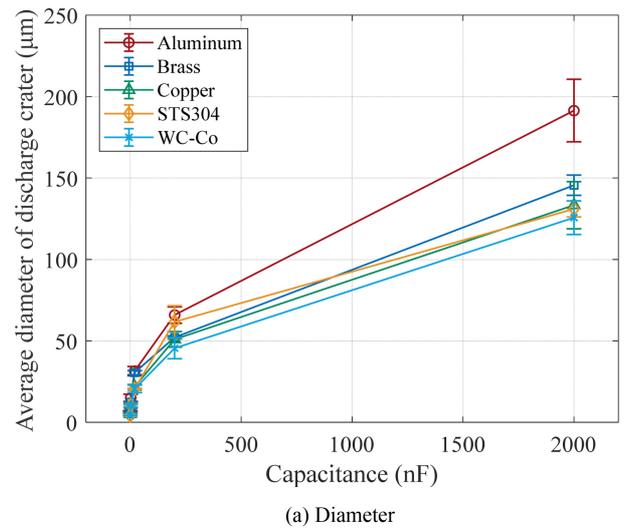


Fig. 5 Average diameter and depth of single discharge crater according to workpiece materials and capacitance (100 V)

반대로 초경합금의 경우 가장 작은 방전흔이 관찰되었다.

특히, 최대 방전 에너지에서 알루미늄의 평균 방전흔 직경은 약 191.4 μm, 깊이는 약 31.6 μm로 측정되었다. 이는 알루미늄이 상대적으로 낮은 내열성을 띄며, 동일한 방전 에너지가 가해질 경우 상대적으로 빠른 용융과 기화가 진행되기 때문이다.

반면, 초경합금은 가장 높은 녹는점과 단위 체적당 비열 에너지를 가져 모든 방전 조건에서 가장 작은 방전흔을 형성하였다. 초경합금의 최대 방전 에너지 조건에서 측정된 평균 방전흔 직경은 133.3 μm, 깊이는 11.6 μm로 확인되었다.

STS304는 낮은 열전도도(16 W/m·K)를 가지지만, 단위 체적당 비열에너지(4 MJ/m<sup>3</sup>·K)가 높아 재료 내부로의 열 확산이 억제된다. 그 결과, STS304의 방전흔은 구리보다 대체적으로 작지만 크기가 역전되는 현상도 발생하였으며, 최대 방전 에너지 조건에서 직경은 131.0 μm, 깊이는 4.9 μm로 측정되었다.

그러나 Table 4와 같이 일정 수준 이상의 축전 용량 영역에서는 방전흔 직경과 깊이의 증가 폭이 둔화되는 경향을 보였다. Fig. 6는

Table 4 Change in average diameter and depth of single discharge crater per unit capacitance (applied voltage = 100 V)

Material	$\Delta$ Capacitance [nF]	$\Delta$ Diameter [ $\mu\text{m}/\text{nF}$ ]	$\Delta$ Depth [ $\mu\text{m}/\text{nF}$ ]
Aluminum	0.2 $\rightarrow$ 2	25.14	5.2
	2 $\rightarrow$ 20	5.95	2.01
	20 $\rightarrow$ 200	1.26	0.27
	200 $\rightarrow$ 2000	0.23	0.05
Brass	0.2 $\rightarrow$ 2	23.52	5.31
	2 $\rightarrow$ 20	4.64	1.29
	20 $\rightarrow$ 200	1.27	0.31
	200 $\rightarrow$ 2000	0.19	0.04
Copper	0.2 $\rightarrow$ 2	19.75	4.81
	2 $\rightarrow$ 20	4.17	0.6
	20 $\rightarrow$ 200	0.84	0.1
	200 $\rightarrow$ 2000	0.19	0.03
STS304	0.2 $\rightarrow$ 2	15.88	3.99
	2 $\rightarrow$ 20	4.23	0.51
	20 $\rightarrow$ 200	0.72	0.06
	200 $\rightarrow$ 2000	0.24	0.01
WC-Co	0.2 $\rightarrow$ 2	15.72	2.81
	2 $\rightarrow$ 20	4.05	0.42
	20 $\rightarrow$ 200	0.8	0.05
	200 $\rightarrow$ 2000	0.16	0.01

단위 축전 용량 당 단발 방전흔의 직경과 깊이를 나타내며 축전 용량이 증가할수록 단위 축전 용량 당 직경과 깊이가 감소하게 된다. 즉, 방전 가공 과정에서 방전 에너지가 높을수록 재료 제거량은 증가하지만, 방전 에너지가 높아질수록 재료 제거 효율이 감소하게 된다. 낮은 축전 용량을 사용할 경우, 단발 방전 가공 과정에서 국소적인 지점에 높은 온도가 형성되어 에너지가 효과적으로 재료 제거에 활용되지만, 방전 에너지가 높아지면, 플라즈마 크기가 커지면서 온도분포가 가우시안 분포를 이루고 플라즈마 기동 주변은 재료를 제거할 만큼 온도에 도달하지 않아, 에너지 효율이 낮아진다. 그 결과 축전 용량이 커짐에 따라 방전흔의 크기 증가 폭이 감소하게 된다[19]. 또한, 방전흔의 깊이는 직경에 비해 상대적으로 적은 폭으로 증가하였다. 이것은 방전 중 발생한 열에 의해 용융된 재료가 다시 재응고층을 형성하기 때문이다[26].

이러한 결과를 종합하면, 낮은 녹는점과 단위 체적당 비열에너지를 가지는 재료는 동일한 방전 에너지를 가했을 때 방전흔 직경과 깊이가 크게 형성되는 경향이 있으며, 높은 녹는점과 열저항성을 갖는 재료는 작은 방전흔이 형성되는 특성을 나타낸다. 또한, 열전도도가 높을수록 열이 빠르게 확산되어 형성되는 단발 방전흔 크기가 감소하는 경우도 발생한다. 즉, 단발 방전흔 형성은 소재의 열적 특성의 영향을 받는다.

Fig. 7은 방전흔이 가장 뚜렷하게 나타나는 인가 전압 100 V,

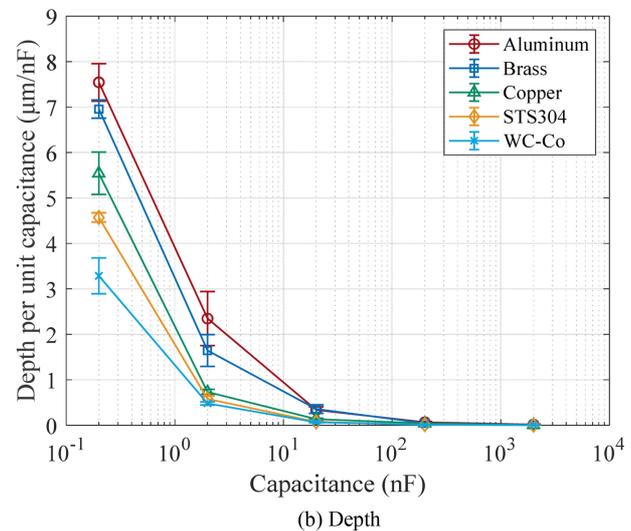
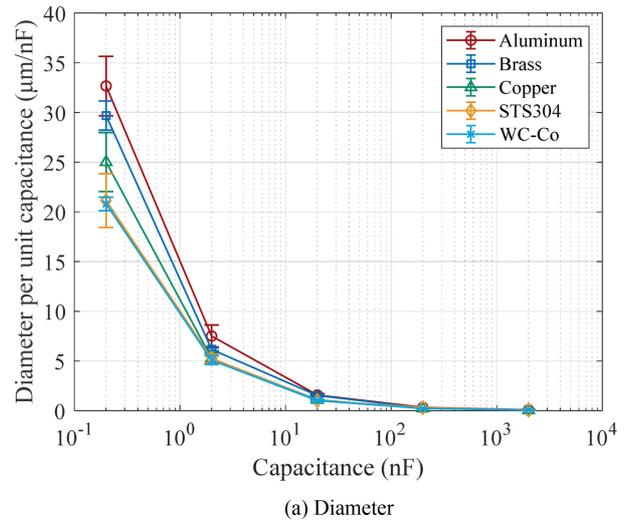


Fig. 6 Average diameter and depth of single discharge crater per unit capacitance (applied voltage = 100 V)

축전 용량 20 nF 조건에서 알루미늄, 황동, 구리, STS304, 초경합금 표면에 형성된 단발 방전흔 형상과 단면 프로파일을 나타낸다. 전반적으로 모든 소재에서 방전흔의 외형은 유사하게 형성되었으나, 단면 프로파일에서는 소재에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났다.

Figs. 7(a)-7(c)에 나타난 알루미늄, 황동, 구리의 경우, Fig. 4의 개략도와 유사한 형상으로 방전흔이 형성되었으며, 공통적으로 방전흔 주변에 기판 표면보다 돌출된 버(Burr)가 나타났다. 이러한 형상은 단순히 20 nF 조건뿐만 아니라 0.2, 2, 200, 2000 nF의 다른 축전 용량 조건에서도 유사하게 나타났으며, 특히 낮은 녹는점을 갖는 소재일수록 방전흔 크기와 버의 돌출 높이가 더욱 뚜렷하게 형성되는 경향을 보였다.

반면, Figs. 7(d)와 7(e)에 나타난 STS304와 초경합금의 경우, 대부분의 방전흔이 표면이 함몰된 골 형태로 형성되었으며, 버의 크기는 상대적으로 작았다. 특히, 초경합금의 높은 녹는점과 단위 체적당 비열에너지로 인해 방전흔의 깊이와 높낮이 변위가 제한적으로 형성되어, 전체적인 형상 변화를 식별하기 어려운 양상을 보였다.

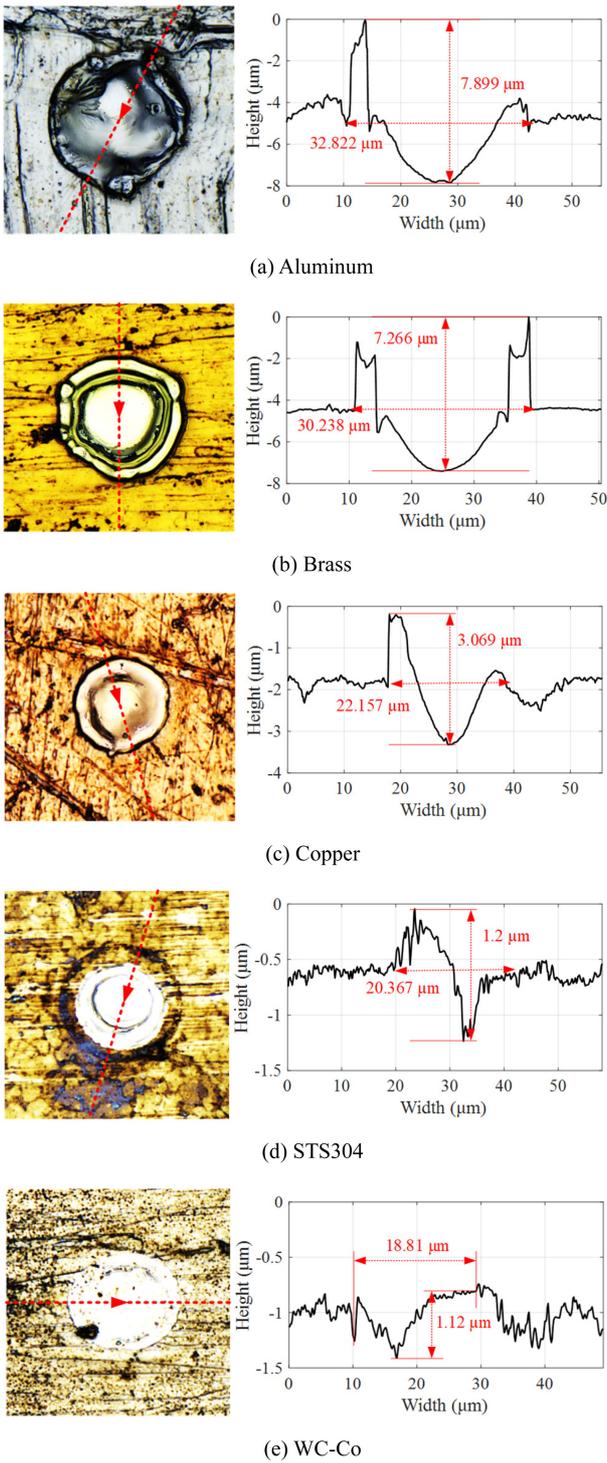


Fig. 7 Confocal images and cross section profiles of single discharge craters on (a) Aluminum, (b) Brass, (c) Copper, (d) STS304, and (e) WC-Co (applied voltage = 100 V, capacitance = 20 nF)

4.2 중첩된 방전흔의 특성

중첩된 방전흔의 특성을 분석하기 위해 인가 전압 100 V, 축전 용량 20 nF의 조건으로 깊이 15 μm의 미세 홈을 가공하였다. 부스러기 배출을 위해 전극을 200 rpm의 속도로 회전시켰으며

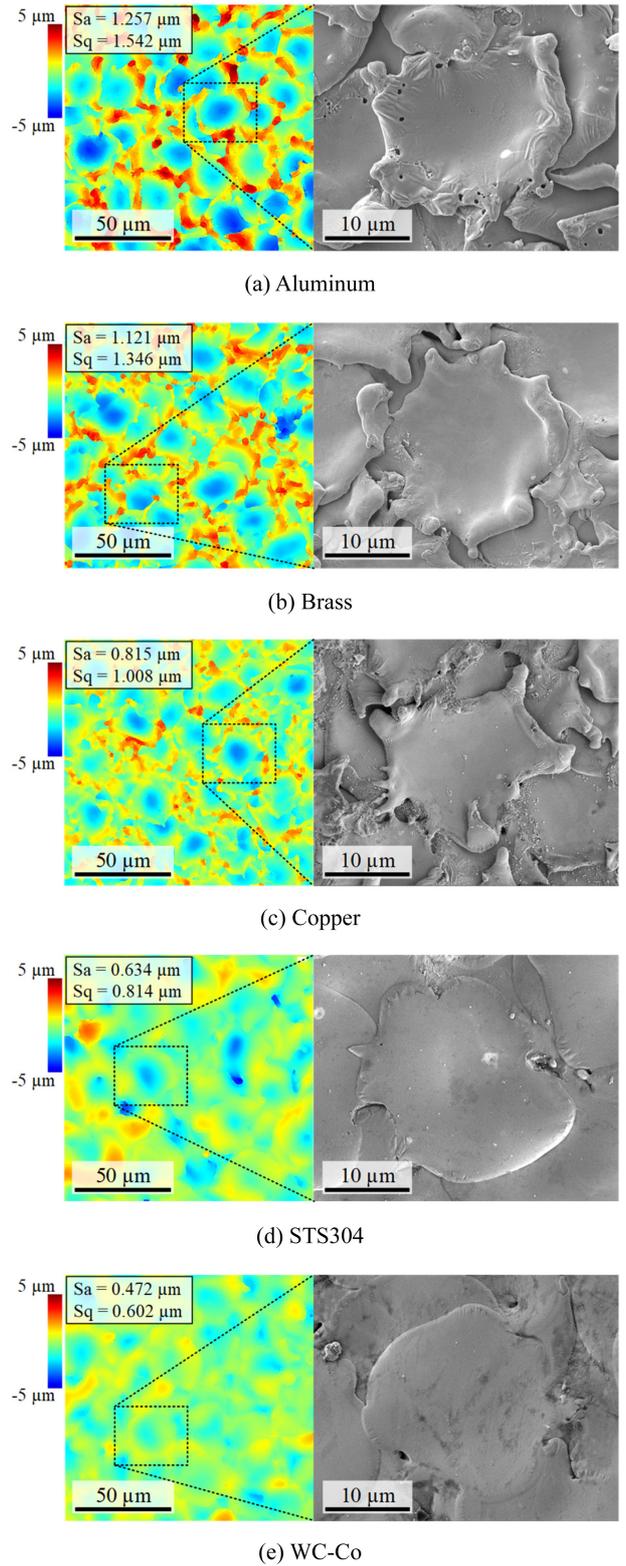


Fig. 8 3D height profiles and SEM images of overlapping discharge craters on (a) Aluminum, (b) Brass, (c) Copper, (d) STS304, and (e) WC-Co (applied voltage = 100 V, capacitance = 20 nF)

등유를 공급하여 간극 사이의 절연 상태를 회복하였다.

Fig. 8은 알루미늄, 황동, 구리, STS304, 초경합금에 가공된

미세 흠의 표면에 형성된 방전흔의 3D 높이 프로파일과 SEM 이미지를 나타낸다. 알루미늄, 황동, 구리, STS304, 초경합금 소재의 가공 영역의 산술 평균 높이(Sa)는 각각 1.257, 1.121, 0.815, 0.634, 0.472  $\mu\text{m}$ 으로 나타났으며, 평균 제곱근 높이(Sq)는 각각 1.562, 1.346, 1.008, 0.814, 0.602  $\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 알루미늄, 황동, 구리의 경우 STS304, 초경합금 소재에 비하여 상대적으로 높은 표면 거칠기가 측정되었다. 이는 해당 소재들의 녹는 점이 상대적으로 낮아 방전흔이 깊게 형성된 것이 원인이다. 또한, 단발 방전흔과 유사하게 방전흔 주위에 버가 형성되었다. 반면, 단발 방전흔과 마찬가지로 STS304, 초경합금 소재의 경우, 상대적으로 작은 방전흔이 형성되고 버가 작게 형성되어 가공 영역의 표면 거칠기도 낮게 측정되었다.

## 5. 결론

본 연구는 미세 방전 가공에서 가공 영역의 표면 거칠기 형성 과정을 이해하기 위해 축전 용량에 따른 단발 방전흔을 분석하였다. 직경 580  $\mu\text{m}$ 의 원통 형상 초경합금 전극으로 알루미늄, 황동, 구리, STS304, 초경합금 소재에 방전 가공을 수행하였다.

RC 방전회로를 이용하는 미세 방전 가공 과정에서 축전 용량이 증가함에 따라 단발 방전 에너지는 증가한다. 이 과정에서 가공 영역에 형성되는 단발 방전흔의 직경과 깊이는 증가한다. 하지만, 축전 용량이 일정 수준 이상으로 증가하게 되면 방전흔의 크기 변화 폭은 감소한다. 또한, 가공물의 녹는 점과 단위 체적당 비열 에너지가 높을 경우, 상대적으로 작은 크기의 단발 방전흔이 형성되었다.

방전흔이 중첩되는 경우, 단발 방전흔 형성과 마찬가지로 가공물의 녹는 점과 단위 체적당 비열 에너지가 높을 경우 버의 높이가 낮고 작은 방전흔들이 중첩되어 가공 영역의 표면 거칠기가 상대적으로 낮게 나타났다.

이러한 결과는 미세 방전 가공 공정에서 다양한 소재와 그 특성에 따른 방전 가공 조건 최적화에 활용될 수 있으며, 특히 높은 표면 품질이 요구되는 정밀 금형이나 소형 부품 가공 등에 축전 용량 조절을 통한 표면 거칠기 제어에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

그러나, 본 연구에서는 복잡한 3차원 미세 형상의 가공 특성이나 초경합금보다 높은 녹는 점을 가지는 소재에 대한 분석은 이루어지지 않았으므로, 향후에는 고용점 소재를 대상으로 한 3차원 미세 형상 가공과 이에 대한 단발 방전흔, 표면 거칠기 및 형상 정밀도 분석이 요구된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2025년도 교육부 및 서울특별시의 재원으로 서울 RISE센터의 지원을 받아 수행된 서울시 지역혁신중심 대학지원 체계(RISE)의 결과물입니다(No. 2025-RISE-01-020-04).

## REFERENCES

1. Park, J. A., Lee, U. S., Kim, B. H., (2020), Micro pin fabrication of tungsten carbide using polycrystalline diamond, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(11), 791-796.
2. Kim, J. Y., Lee, J. H., Sim, D. B., Kim, B. H., (2025), Experimental study to prevent the surface crack during microgrinding of glassy carbon, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 139(11), 5759-5771.
3. Sim, D. B., Yang, C. Y., Kim, B. H., (2022), Machining of V-shaped microchannel on cemented carbide using PCD tools, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(10), 747-752.
4. Chung, D. K., Shin, H. S., Park, M. S., Kim, B. H., Chu, C. N., (2011), Recent researches in micro electrical machining, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 371-380.
5. Na, Y., Kim, B. H., (2019), Effect of vibration and machining area in the fabrication of micro tool by reverse EDM, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 36(2), 169-175.
6. Doan, C. X., Kim, B. H., Chung, D. K., Chu, C. N., (2011), Fabrication of PCD micro tool and its hybrid micro machining, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 28(6), 694-700.
7. Lee, U. S., Sim, D. B., Lee, J. H., Kim, B. H., (2024), Fabrication of micro carbon mold for glass-based micro hole array, *Micromachines*, 15(2), 194.
8. Lee, P. A., Lee, U. S., Sim, D. B., Kim, B. H., (2022), Microfluidic chip fabrication of fused silica using microgrinding, *Micromachines*, 14(1), 96.
9. Lee, P. A., Kim, Y., Kim, B. H., (2015), Effect of low frequency vibration on micro EDM drilling, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16, 2617-2622.
10. Lee, J. H., Yang, C. Y., Kim, B. H., (2024), Machining characteristics of micro EDM of silicon carbide, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 41(2), 131-137.
11. Ho, K., Newman, S., (2003), State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13), 1287-1300.
12. Lee, U. S., Yang, C. Y., Lee, J. H., Kim, B. H., (2021), Micro drilling of single crystal SiC using polycrystalline diamond tool, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(7), 471-478.
13. Kim, G. M., Kim, B. H., Chu, C. N., (1999), Machining rate and electrode wear characteristics in micro-EDM of micro-holes, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 16(10), 94-100.
14. Lee, J. H., Kim, J. Y., Sim, D. B., Kim, B. H., (2024), Prediction of machining conditions from EDMed surface using CNN, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 41(11), 865-873.

15. Keskin, Y., Halkacı, H. S., Kizil, M., (2006), An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surface roughness in electrical discharge machining (EDM), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 1118-1121.
16. Bhatia, A., Kumar, S., Kumar, P., (2014), A study to achieve minimum surface roughness in wire EDM, *Procedia Materials Science*, 5, 2560-2566.
17. Jabbaripour, B., Sadeghi, M., Faridvand, S., Shabgard, M., (2012), Investigating the effects of EDM parameters on surface integrity, MRR and TWR in machining of Ti-6Al-4V, *Machining Science and Technology*, 16(3), 419-444.
18. Kim, J. Y., Lee, J. H., Kim, B. H., (2025), Micro hole machining characteristics of glassy carbon using electrical discharge machining (EDM), *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 42(4), 325-332.
19. Wong, Y., Rahman, M., Lim, H., Han, H., Ravi, N., (2003), Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges, *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 303-307.
20. Yeo, S., Aligiri, E., Tan, P., Zarepour, H., (2009), A new pulse discriminating system for micro-EDM, *Materials and Manufacturing Processes*, 24(12), 1297-1305.
21. Jilani, S. T., Pandey, P., (1982), Analysis and modelling of EDM parameters, *Precision Engineering*, 4(4), 215-221.
22. Cverna, F., (2002), ASM ready reference: thermal properties of metals, ASM International.
23. Buyco, E. H., Davis, F. E., (1970), Specific heat of aluminum from zero to its melting temperature and beyond. Equation for representation of the specific heat of solids, *Journal of Chemical and Engineering Data*, 15(4), 518-523.
24. Narasimhan, S., De Gironcoli, S., (2002), Ab initio calculation of the thermal properties of Cu: Performance of the LDA and GGA, *physical review B*, 65(6), 064302.
25. Reeber, R. R., Wang, K., (1999), Thermophysical properties of  $\alpha$ -tungsten carbide, *Journal of the American Ceramic Society*, 82(1), 129-135.
26. Qin, L., Huo, W., Li, Z., Zhang, Y.-o., Xi, X., Zhao, W., (2022), Study on energy distribution of discharge plasma and its effect on crater formation in EDM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(7), 5563-5585.



#### Jae Yeon Kim

M.S. student in the Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Korea. His research interest is micro machining.

E-mail: Kimjyprema@soongsil.ac.kr



#### Ui Seok Lee

M.S. student in the Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Korea. His research interest is micro machining.

E-mail: lus223@soongsil.ac.kr



#### Hee Jin Kong

Undergraduate student in the School of Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Korea. His research interest is micro machining.

E-mail: buruburo52@soongsil.ac.kr



#### Bo Hyun Kim

Professor in the School of Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Korea. His research interests include micro mechanical machining process and advanced manufacturing processes, including micro electrical discharge machining (EDM), electrochemical machining (ECM), and electrochemical discharge machining (ECDM).

E-mail: bhkim@ssu.ac.kr

# 볼바를 이용한 원호 테스트를 통한 6축 직렬 로봇의 기구학적 파라미터 추정

## Estimation of Kinematic Parameters of a 6-Axis Serial Robot through a Circular Test Using a Double Ball-Bar

전흥기<sup>1</sup>, 권성환<sup>2</sup>, 이광일<sup>3</sup>, 양승한<sup>1,#</sup>

Heung Ki Jeon<sup>1</sup>, Sung Hwan Kweon<sup>2</sup>, Kwang Il Lee<sup>3</sup>, and Seung Han Yang<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)

<sup>2</sup> 경북대학교 디지털설계및생산기술연구소 (Digital Design & Digital Manufacturing R&D Center, Kyungpook National University)

<sup>3</sup> 경일대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University)

# Corresponding Author / E-mail: syang@knu.ac.kr, TEL: +82-53-950-6569

ORCID: 0000-0001-7842-0492

KEYWORDS: Kinematic error (기구학적 오차), Kinematic parameter (기구학적 매개변수), Radial deviation (반경 편차), Double ball-bar (더블 볼바), Circular test (원호 테스트), 6-axis serial robot (6축 직렬 로봇)

*This study introduces a straightforward and cost-effective method to enhance the positional accuracy of a 6-axis serial robot using a double ball-bar (DBB). Kinematic errors, a primary source of inaccuracies in offline programming, are estimated and calibrated through circular tests. The kinematics of the robot are modeled using the Denavit-Hartenberg (D-H) convention, and a mathematical relationship between radial deviation and kinematic errors is established. To avoid singularities, identifiable parameters are selected using singular value decomposition. The method involves three steps: measuring the tool center point (TCP) with the DBB, estimating key kinematic parameters, and verifying the calibration results. Redundant or less significant parameters are excluded to concentrate on the most impactful ones. During the process, the robot is commanded to trace a circular path while radial deviations are recorded. This data is then utilized to estimate and adjust the kinematic model. After recalculating and executing the circular path with the calibrated model, a notable reduction in deviation is achieved. This proposed approach requires no additional equipment and provides a quick, affordable solution for improving the accuracy of industrial robots while lowering maintenance costs.*

Manuscript received: May 19, 2025 / Revised: September 17, 2025 / Accepted: September 29, 2025

### NOMENCLATURE

$R$  = Radius of a Double Ball-bar (DBB)  
 $\Delta R$  = Radial Deviation Measured by a DBB  
 $\Delta p_{TCP}$  = TCP Position Error  
 $\Delta \rho$  = Kinematic Error of the Robot  
 $\Delta \rho_{target}$  = Estimated Kinematic Error  
 $p_c$  = Center Position of the Circular Path

$p$  = Measured Position on the Circular Path  
 ${}^{i-1}T_i$  = Nominal Transformation Matrix (TM) that Defines Frame  $\{i\}$  Relative to the Frame  $\{i-1\}$   
 ${}^{i-1}T_{ia}$  = Actual TM with Kinematic Error  
 $T_6$  = Nominal TM for Joint 6  
 $T_{6a}$  = Actual TM for Joint 6

1. 서론

산업용 로봇은 자동 제어 및 프로그래밍이 가능한 다목적 매니플레이터로, 조립, 용접, 이송, 도장 등 다양한 제조 공정에 활용된다[1]. 이러한 로봇은 실린더형, 직교형, SCARA, 병렬형 등 다양한 형태로 나뉘며, 그중 다관절형 로봇은 높은 유연성과 유지보수의 용이성으로 인해 산업 현장에서 가장 널리 사용된다[2]. 그러나 다관절형 로봇은 동작기계에 비해 위치 정확도와 구조 강건성이 낮아 고정밀 공정에는 적합하지 않다. 이러한 문제는 가공, 측정, 조립 오차 등에서 비롯되는 기하학적 오차와 백래쉬, 링크의 휨, 마모 등 비기하학적 요인으로 인해 로봇의 기구학적 모델과 실제 동작 간 불일치가 발생하기 때문이다[3,4]. 수동 교시 기반 시스템에서는 반복 정밀도만으로도 충분한 경우가 많지만, 최근 생산 공정의 복잡화로 인해 교시점의 수가 증가하면서 시간과 인력 소모가 커지는 문제가 있다. 이에 따라 CAD 데이터를 기반으로 한 오프라인 프로그래밍 방식이 주목받고 있으며, 이는 절대 위치 정확도까지 확보해야 하므로 정밀한 기구학적 보정이 요구된다[5-7].

기구학적 보정은 모델링, 측정, 파라미터 추정, 보정의 네 단계로 구성된다[8]. 모델링은 주로 Denavit-Hartenberg (DH) 표기법을 활용하며[9-11], 측정은 레이저트래커, CMM, 볼바, PSD 등의 외부 측정기를 활용하여 엔드 이펙터의 위치 및 자세를 측정하는 개루프 측정방식이 많이 적용된다[12-14]. 수집된 데이터를 기반으로 최소자승법을 이용한 파라미터 추정이 이루어지며[8], 이때 직접탐색법(Direct Search Method), 경사하강법(Gradient Decent Method), Levenberg-Marquardt법 등의 최적화 알고리즘이 사용된다[15].

로봇의 위치 정확도는 진동, 하중, 온도 변화 등 다양한 외란으로 지속적으로 변화하므로, 주기적인 성능 평가 및 보정이 필요하다[16]. 하지만 보정 작업은 고가의 장비와 전문 인력이 요구되며, 측정 시간 동안 공정을 중단해야 하는 부담이 있다. 따라서 성능을 간단히 평가한 후, 필요한 경우에만 보정하는 방식이 경제적이다. 기존에는 ISO 9283 표준에 따른 레이저 트래커 기반 평가가 일반적으로 사용되었지만[17], 셋업 시간, 측정 환경 민감성, 경로 제약 등의 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 볼바를 활용한 원호 테스트가 제안되었다[18,19].

본 연구에서는 볼바를 이용한 원호테스트를 통해 6축 직렬 로봇의 기구학적 파라미터를 추정하고 보정함으로써 위치 정확도를 향상시키는 방법을 제안한다. DH 표기법과 특이값 분해를 통해 반경편차와 기구학 오차의 관계를 모델링하고 식별 가능한 파라미터를 도출한다. 원호테스트 실험을 수행하여 보정 전후의 반경 편차를 비교·분석함으로써 제안한 알고리즘의 유효성을 검증한다. 본 연구의 결과는 로봇 프로그래밍 및 캘리브레이션 과정에 직접 적용 가능하며, 산업용 로봇의 정확도 향상에 기여할 수 있다.

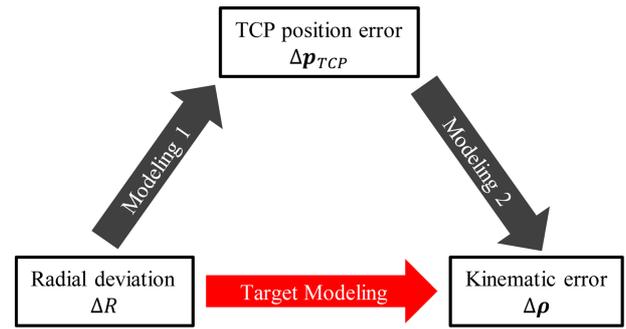


Fig. 1 An algorithm for estimating kinematic parameters from radial deviations

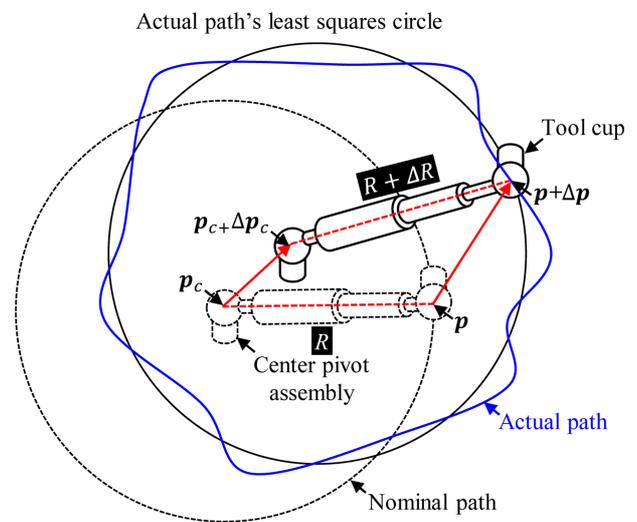


Fig. 2 Radial deviation induced in circular path test

2. 볼바 측정 기반 기구학적 파라미터 추정 알고리즘

본 절에서는 볼바 측정을 활용하여 6축 직렬 로봇의 기구학적 파라미터를 추정하는 알고리즘을 설명한다. 2.1절에서는 원호테스트에서 발생하는 반경 편차와 TCP 위치 오차 간의 관계(모델1), 그리고 TCP 위치 오차와 기구학적 오차 간의 관계(모델2)를 각각 모델링 한다. 이후 두 모델을 결합하여 반경 편차와 기구학적 오차 간의 선형관계를 도출한다. 2.2절에서는 이러한 관계를 기반으로 기구학적 파라미터를 추정하는 알고리즘을 제안하며, 전체적인 알고리즘의 개요는 Fig. 1에 나타내었다.

2.1 반경 편차 및 기구학적 오차모델링(모델1,2)

원호 테스트시 로봇의 기구학적 오차는 Fig. 2와 같이 원호 중심점  $p_c$  과 원호 상의 측정 점  $p$  를 각각  $p_c + \Delta p_c$  과  $p + \Delta p$  로 변위 시키며, 이로 인해 반경 편차  $\Delta R$  이 발생한다.

이를 수식으로 나타내면 식(1)과 같이 표현되며, 양변을 제곱한 뒤 미소하의 고차항을 제거하는 선형화 과정을 통해 반경 편차와 TCP 위치 오차 간의 관계(모델1)를 유도할 수 있고, 이는

식(2)와 같다.

$$(R + \Delta R)^2 = \|p + \Delta p - (p_c + \Delta p_c)\|^2 \quad (1)$$

$$R\Delta R = (p - p_c)^T(\Delta p - \Delta p_c) \quad (2)$$

링크의 기구학적 오차 모델은  $\{i-1\}$ ,  $\{i\}$  번째 링크계 사이 동중변환행렬로부터 유도한다. 기구학적 오차에 의하여 실제 변환행렬  ${}^{i-1}T_a$  과 공칭 변환행렬  ${}^{i-1}T$  사이 편차  $dT$  가 존재하며, 식(3)과 같이 나타낸다[20].

$${}^{i-1}T_a = {}^{i-1}T + dT_i \quad (3)$$

$dT_i$  를 테일러 전개(Taylor Expansion) 하여 미소 값을 가지는 고차항을 제거하면 식(4)와 같이 각 기구학적 오차 파라미터 ( $\Delta a$ ,  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta \theta$ )에 대한 선형 관계식을 유도할 수 있다.

$$dT_i = \frac{\partial[{}^{i-1}T]}{\partial a_{i-1}} \Delta a_{i-1} + \frac{\partial[{}^{i-1}T]}{\partial \alpha_{i-1}} \Delta \alpha_{i-1} + \frac{\partial[{}^{i-1}T]}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial[{}^{i-1}T]}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i \quad (4)$$

6축 직렬 로봇에 대하여, 6번 관절(플랜지)의 공칭 방위 및 위치 행렬(포즈)  $T_6$  는 식(5)와 같이 계산한다. 그러나 플랜지의 실제(Actual) 포즈 행렬  $T_{6a}$  는 식(6)과 같이  $T_6$  와 미소 변화량  $dT_6$  의 합이며,  $T_a$  의 순차적인 곱으로 이루어진다.

$$T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^5T_6 = \Pi_{i=1}^6 {}^{i-1}T \quad (5)$$

$$T_{6a} = T_6 + dT_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^5T_6 T_a = \Pi_{i=1}^6 {}^{i-1}T_a \quad (6)$$

식(3)을 식(6)에 대입하면,

$$\begin{aligned} T_{6a} &= ({}^0T_1 + dT_1)({}^1T_2 + dT_2) \dots ({}^5T_6 + dT_6) \\ &= \Pi_{i=1}^6 ({}^{i-1}T + dT_i) \end{aligned} \quad (7)$$

이때, 식(7)을 전개하고 미소한 값을 가지는 오차의 고차항을 제거함으로써  $dT_6$  는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} dT_6 &= (dT_1)({}^1T_2)({}^2T_3)({}^3T_4)({}^4T_5)({}^5T_6) + {}^0T_1(dT_2)({}^2T_3)({}^3T_4)({}^4T_5)({}^5T_6) + \\ &\dots + {}^0T_1 {}^1T_2 {}^3T_4 {}^4T_5 (dT_6) = \Sigma_{i=1}^6 {}^0T_1 {}^1T_2 \dots (dT_i) \dots {}^5T_6 \end{aligned} \quad (8)$$

공구가 부착된 로봇 TCP의 위치오차  $\Delta p_{TCP}$  는  $dT_6$  에 플랜지계에 대한 TCP의 위치  ${}^6p_{TCP}$  를 곱하고 기구학적 오차에 대해서 정리하면 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta p_{TCP} \\ 1 \end{bmatrix} = dT_6 \cdot \begin{bmatrix} {}^6p_{TCP} \\ 1 \end{bmatrix} = \quad (9)$$

$$\Sigma_{i=1}^4 \Sigma_{j=11}^6 {}^0T_1 {}^1T_2 {}^3T_4 \dots \left( \frac{\partial[{}^{j-1}T]}{\partial [\lambda_i]_j} \right) \dots {}^5T_6 \begin{bmatrix} {}^6p_{TCP} \\ 1 \end{bmatrix} \Delta[\lambda_i]_j$$

여기서,  $[\lambda_1]_j = a_j$ ,  $[\lambda_2]_j = \alpha_j$ ,  $[\lambda_3]_j = d_j$ ,  $[\lambda_4]_j = \theta_j$ .

결과적으로, TCP의 위치오차  $\Delta p_{TCP}$  와 기구학적 오차 벡터  $\Delta \rho$  간의 관계(모델2)는 식(10)과 같이 유도된다[21].

$$\Delta p_{TCP} = B \cdot \Delta \rho = \begin{bmatrix} b_{a,0} & b_{\alpha,0} & b_{d,1} & b_{\theta,1} \\ b_{a,1} & b_{\alpha,1} & b_{d,2} & b_{\theta,2} \\ b_{a,2} & b_{\alpha,2} & b_{d,3} & b_{\theta,3} \\ b_{a,3} & b_{\alpha,3} & b_{d,4} & b_{\theta,4} \\ b_{a,4} & b_{\alpha,4} & b_{d,5} & b_{\theta,5} \\ b_{a,5} & b_{\alpha,4} & b_{d,6} & b_{\theta,6} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$b_{\lambda,i} \begin{bmatrix} x_{\lambda,i} \\ y_{\lambda,i} \\ z_{\lambda,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0T_1 {}^1T_2 \dots \frac{\partial[{}^{i-1}T]}{\partial \lambda_i} \dots {}^5T_6 \begin{bmatrix} {}^6p_{TCP} \\ 1 \end{bmatrix} \Big|_{(1,1)} \\ {}^0T_1 {}^1T_2 \dots \frac{\partial[{}^{i-1}T]}{\partial \lambda_i} \dots {}^5T_6 \begin{bmatrix} {}^6p_{TCP} \\ 1 \end{bmatrix} \Big|_{(2,1)} \\ {}^0T_1 {}^1T_2 \dots \frac{\partial[{}^{i-1}T]}{\partial \lambda_i} \dots {}^5T_6 \begin{bmatrix} {}^6p_{TCP} \\ 1 \end{bmatrix} \Big|_{(3,1)} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \rho = [\Delta a_0 \dots \Delta a_5 \Delta \alpha_0 \dots \Delta \alpha_5 \Delta d_1 \dots \Delta d_6 \Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_6]^T$$

## 2.2 기구학적 파라미터 추정 알고리즘

2.1절에서 도출된 위치 오차와 기구학적 오차 간의 관계(모델 1)와 TCP 위치 오차와 기구학적 오차 간의 관계(모델 2)를 나타내는 식(2)와 식(10)을 결합함으로써, 식(11)과 같이 최종적으로 측정점  $p$  와 원호 중심점  $p_c$  사이의 반경 편차  $\Delta R$  과 기구학적 오차  $\Delta \rho$  간의 선형 관계행렬  $U$  를 유도할 수 있다.

$$\Delta R = U \Delta \rho \quad \left( U = \left( \frac{p - p_c}{R} \right)^T \cdot [B - B_c] \right) \quad (11)$$

$B_c$  는  $p_c$  에서의 행렬  $B$  를 의미한다. 이때 행렬  $U$  는 정사각행렬이 아니므로, 의사역행렬을 활용하여 기구학적 오차 벡터  $\Delta \rho$  의 값을 계산한다. 이때, 선형 최소자승법의 반복적인 수행을 통해 잔류 오차를 감소시킴으로써 측정된 반경 편차  $\Delta R_m$  에 대한  $\Delta \rho$  의 피팅(Fitting) 성능을 개선할 수 있다. 따라서, 매 반복 시 추정된  $\Delta \rho$  과 잔류 반경 편차를 이용해 새로운 선형 시스템을 유도하고,  $\Delta \rho$  를 업데이트 한다. 이러한 과정은 최종적으로  $\|\Delta \rho\|^2$  의 크기가  $10^{-5}$  이하가 될 때까지 진행된다.

앞서 정의한 기구학적 오차 중 일부 요소는 원호 테스트시 측정되는 반경 편차에 영향을 미치지 않으며. 이는 행렬  $U$  가 완전한 랭크(Full-rank)가 아니라는 점으로부터 확인할 수 있다. 랭크가 결여된(Rank-deficient) 행렬의 경우 역행렬의 신뢰성이 떨어지므로  $U$  에서 잉여 및 의존적 열을 제거함으로써 완전한 랭크로 만드는 과정이 필수적이다. 이러한 과정은 주로 특이값 분해를 통해 이루어진다[22]. 특이값 분해는 식(12)와 같이 대상 행렬을 두 개의 직교행렬  $M, V$  과 한개의 대각행렬  $\Sigma$  로 분해하는 것으로, 이 중  $\Sigma$  는 특이값(Singular Value,  $\sigma$ )으로 구성된

행렬이다. 이때,  $\sigma_{max}/\sigma_{min}$  으로 정의되는 조건수(Condition Number)는 행렬의 수치적 안정성을 나타내는 파라미터이며, 조건수가 클수록 입력 값의 작은 동요에도 큰 오차가 유발되는 불안정한 시스템을 의미한다[23].

$$U = M\Sigma V^T \tag{12}$$

여기서,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{N-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_N \end{bmatrix}$$

따라서, 식(11)의 행렬  $U$ 를 분해하여 특이값을 확인하고 시스템의 출력 값에 영향을 주지 않는 파라미터를 제거하였다. 이 과정으로부터 시스템에 영향을 주지 않는 오차 요소  $\Delta d_1, \Delta d_3, \Delta d_6$ 을 제거하였다. 추가적으로, 이후 서술되는 오차 추정 과정을 통해 유효한 값이 추정되지 않고 발산하는 파라미터  $\Delta d_2$ 를 제거하였다. 각 관절 축의 오프셋  $\Delta\theta_1 - \Delta\theta_6$  또한 추정 대상으로부터 제외하였는데, 이는  $\Delta\theta_1 - \Delta\theta_6$ 가 위치 의존적(Position-dependent) 파라미터인데 반하여 원호 테스트는 모든 관절 각도에서의 특성을 반영하지 않기 때문이다. 따라서  $\Delta\theta_1 - \Delta\theta_6$  추정은 측정 영역 외에서 오히려 큰 오차를 야기할 수 있기 때문에, 사전에 로봇의 작업 영역이 지정되지 않는 경우 추정 대상에서 제외하는 것이 합리적이다. 결과적으로, 목표 추정 기구학적 오차는 식(13)과 같다.

$$\Delta\rho_{target} = [\Delta a_1 \dots \Delta a_5 \Delta\alpha_1 \dots \Delta\alpha_5 \Delta d_4 \Delta d_5]^T \tag{13}$$

### 3. 볼바 측정 실험 및 추정 알고리즘 검증

#### 3.1 실험 장비

제안한 방법은 산업 현장에서 사용 중인 6축 직렬 로봇(KR 60 HA, KUKA)에 적용되었다. 로봇에는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 공구(DED적층 공정을 위한 레이저 발진기)가 장착되어 있으며, 레이저 초점 거리에 해당하는 위치에 볼바의 정밀구가 부착되도록 센터 컵(Center Cup)이 체결되었다.

또한, 원호 중심 위치를 고정하기 위해 테이블에는 자석을 이용해 센터 피봇 어셈블리(Center Pivot Assembly)를 설치하였다. 센터 컵과 센터 피봇 어셈블리 사이의 거리는 상용 볼바 시스템(QC-20W, Renishaw)을 통해 측정하였으며, 로봇과 볼바의 주요 제원은 각각 Tables 1과 2에 제시되어 있다.

#### 3.2 측정 실험 및 기구학적 파라미터 추정

측정을 위한 원호 경로는 Fig. 4와 같이 로봇의 작업 공간 상의 공칭 구(Nominal Sphere) 상에 위치하고 서로 수직인 세

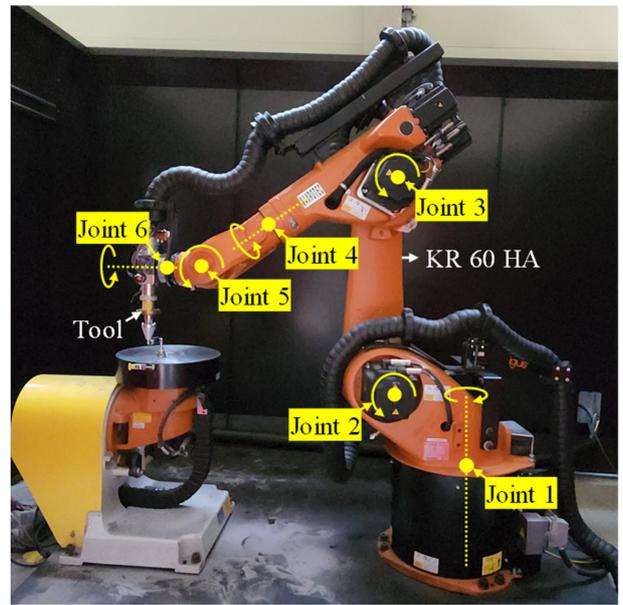


Fig. 3 The deployed robot (KR 60 HA, KUKA) and the attached tool

Table 1 Specification of the deployed robot

Manufacturer	KUKA (Germany)
Maximum reach [mm]	±2,033
Positional accuracy [mm]	±0.7
Positional repeatability [mm]	±0.05
Path accuracy (circular) [mm]	±0.4
Path repeatability (circular) [mm]	±0.16

Table 2 Specification of the utilized double ball-bar

Manufacturer	Renishaw (UK)
Part name	QC20-W
Accuracy [ $\mu\text{m}$ ]	±(0.7+0.3%L)
Resolution [ $\mu\text{m}$ ]	0.1
Measurable range [ $\mu\text{m}$ ]	±1

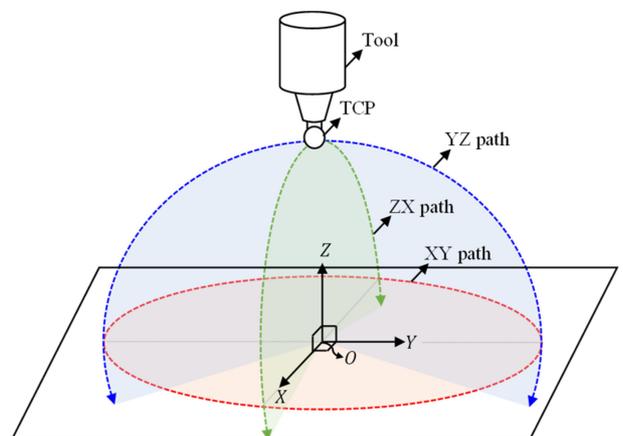


Fig. 4 Generated measurement paths for the circular test

Table 3 Estimated errors in link parameters

Parameter	Value
$\Delta a_1$ [mm]	-0.9132
$\Delta a_2$ [mm]	0.5287
$\Delta a_3$ [mm]	1.2681
$\Delta a_4$ [mm]	0.1194
$\Delta a_5$ [mm]	-0.2551
$\Delta \alpha_1$ [rad]	0.0002
$\Delta \alpha_2$ [rad]	0.0034
$\Delta \alpha_3$ [rad]	0.0008
$\Delta \alpha_4$ [rad]	0.0012
$\Delta \alpha_5$ [rad]	-0.0006
$\Delta d_4$ [mm]	0.9112
$\Delta d_5$ [mm]	-0.1850

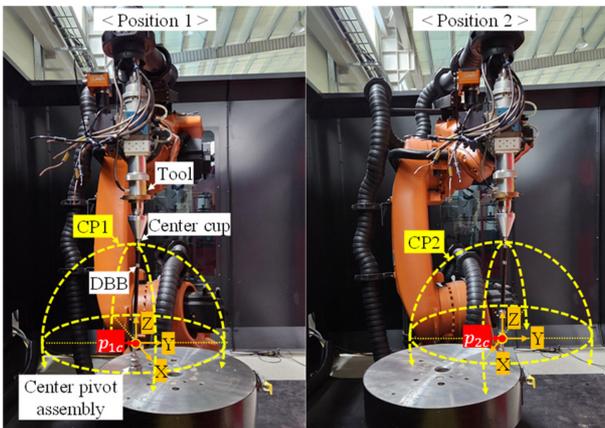


Fig. 5 Circular paths and their center points in position 1 & 2

평면(XY, YZ, ZX) 위의 반지름 300 mm인 원호로 지정하였다. XY 평면 위에는 원형 경로를 따라 3.6°의 단위 각도로 총 100 개의 측정점을 배치하였다. 그리고 YZ, ZX 평면 상에는 사이각이 201.6°인 호에 동일한 단위 각도로 각각 57개의 측정점을 지정하였다.

측정을 위해 중심 위치는 센터 피봇 어셈블리를 통해 고정하였다. 이후 주어진 경로로의 이송은 각 측정점에서 역기구학을 통해 사전에 계산한 관절 각도를 입력하여 제어하였다. 원호 테스트 전 공구의 끝단에 체결된 센터 컵과 센터 피봇 어셈블리에 볼바를 부착하고, 엔드 이펙터를 각 측정점으로 이송하면서 반경 편차를 기록하였다. 세 평면에 대하여 측정에 소요된 시간은 약 15분이다. 이 과정은 Fig. 5와 같이 로봇의 작업 영역 내를 중심으로 하는 두 원호 경로 CP1, CP2를 따라 진행하였다.

그 결과 총 6개의 경로, 428개의 측정 데이터(반경 편차)로부터 제안한 알고리즘을 통해 기구학적 오차를 추정하였다. 계산은 Fig. 5의 과정이 총 4회 반복되었으며, 잔류 오차의 Norm은 8.2602에서 1.4724 mm로 감소하였다. 그 결과, 추정된 기구학적 오차의 값은 Table 3과 같다.

### 3.3 추정된 기구학적 파라미터 검증

추정된 기구학적 파라미터는 로봇의 보정 기구학적 모델  $f_{calib}$  생성, 검증을 위한 원호 테스트 경로 생성 및  $f_{calib}$ 의 역기구학을 통해 각 측정점에서의 관절 각도 계산, 추정된 기구학적 파라미터 보정 전/후 반경 편차 측정 및 비교의 순서로 검증이 이루어진다.

$f_{calib}$ 은 식(14)와 같이 추정된 기구학적 오차를 로봇의 공칭 기구학적 모델  $f_{nom}$ 에 업데이트하여 생성한다.

$$f_{calib} = f_{nom}(\rho + \Delta\rho) \tag{14}$$

검증을 위한 측정경로는 기존의 CP1과 CP2를 포함하며, 추가적으로 두 영역의 가운데에 위치하는 경로 CP3를 생성하였다. 이는 추정된 파라미터가 기존의 측정 경로와 상이한 경로에서도 유효한지를 확인하기 위함이다. 이후 경로 CP1-CP3에 대하여,  $f_{calib}$ 의 역기구학을 통해 매 측정점에서 요구되는 로봇 관절의 각도를 계산한다. 이때,  $f_{calib}$ 는 분석적 역기구학을 위한 필요조건인 Euler Wrist(4-6번 관절의 회전 축이 한 점에서 교차)를 만족하지 않으므로 수치적 접근을 통한 방법이 요구된다[24]. 수치적 방법으로 역기구학을 하기 위해서는 목표 각도에 근접한 초기 각도가 요구되며, 이는 분석적 방법으로 계산한 각 관절의 각도로 지정하였다. 수치적 방법은 초기 로봇 엔드 이펙터의 포즈 행렬  $T_i$ 와 목표 행렬  $T_t$ 로부터 잔류 벡터(Residual Vector)  $\vec{e}$ 를 유도하여 이루어지며,  $\vec{e}$ 는 식(16) 및 식(17)과 같이 정의된다. 목표 관절각도는 식(18)과 같이 정의한 목적함수 S를 최소화시키는 각도와 같다. 본 논문에서는 S의 값이 기준값 ( $10^{-5}$ ) 이하가 될 때까지  $\theta$ 를 업데이트하여 계산한다. 이때, 목적함수 값의 감소를 위한 최적화 알고리즘으로 Levenberg-Marquardt (LM) 방법을 이용한다. LM 방법은 Gauss-Newton법의 수정된 형태로 자코비안을 이용한 의사역행렬에 완충 행렬  $\lambda I$ 을 추가하는 것이며,  $\lambda$ 는 완충 파라미터로써 매 단계에서 목적함수 S의 값의 증감에 따라 증가 또는 감소한다[25,26].

$$T_i = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i,x} & r_{i,y} & r_{i,z} & p_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_t = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{t,x} & r_{t,y} & r_{t,z} & p_t \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$e_x = r_{i,x} \cdot (p_t - p_i)$$

$$e_y = r_{i,y} \cdot (p_t - p_i)$$

$$e_z = r_{i,z} \cdot (p_t - p_i)$$

$$e_a = \frac{1}{2}((r_{i,z} \cdot r_{t,y}) - (r_{t,z} \cdot r_{i,y})) \tag{16}$$

$$e_b = \frac{1}{2}((r_{i,x} \cdot r_{t,z}) - (r_{t,x} \cdot r_{i,z}))$$

$$e_c = \frac{1}{2}((r_{i,y} \cdot r_{t,x}) - (r_{t,y} \cdot r_{i,x}))$$

Table 4 Convergence of joint angles in numerical inverse kinematics at  $p_{1c}$ 

Angle (deg)	Step 1		Step 2		Step 3	
	Joint value	$\Delta$	Joint value	$\Delta$	Joint value	$\Delta$
$\theta_1$	6.7440	0.1533	6.8973	0.0002	6.8975	0.0000
$\theta_2$	-94.3426	-0.0144	-94.3570	0.0001	-94.3569	0.0000
$\theta_3$	132.3457	0.0772	132.4229	0.0000	132.4229	0.0000
$\theta_4$	10.8680	-0.1694	10.6986	0.0010	10.6996	0.0000
$\theta_5$	-38.4947	-0.0202	-38.5149	-0.0270	-38.5419	0.0000
$\theta_6$	-8.5278	0.2086	-8.3192	-0.0011	-8.3203	0.0000
$S$ [mm <sup>2</sup> ]	4.697088		0.000014		0.000000	
$\lambda$	0.01		0.001		0.0001	

Table 5 Center positions with respect to the base coordinate system

Path	Center positions [mm]		
	$P_{c,x}$	$P_{c,y}$	$P_{c,z}$
CP1	1270.016	179.928	947.831
CP2	1269.937	-119.917	947.784
CP3	1270.003	29.983	947.921

$$\Delta\theta = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T \dot{\tilde{e}} \left( J = \frac{\partial \tilde{e}}{\partial \rho} \right) \quad (19)$$

각 측정점으로서의 이송은 보정된 기구학적 모델  $f_{calib}$ 의 역기구학을 통해 계산된 관절 각도를 로봇 제어기에 입력하여 수행하였으며, 측정 방식은 3.2절에서 기술한 방법과 동일하게 적용하였다.

보정 전후의 경로 CP1, CP2, CP3에 대해 측정된 반경 편차 결과는 Fig. 7과 Table 6에 제시하였으며, 제안한 알고리즘을 통해 추정된 기구학적 파라미터를 적용하였을 때 측정된 반경 편차가 보정 이전에 비해 크게 감소한 것을 보여준다.

먼저, 오차 추정을 위해 사용된 경로인 CP1과 CP2에서는 보정 후 반경 편차 절대값의 평균이 최대 88.79%까지 감소하였으며, 표준편차 또한 88.51% 감소함을 통해 보정 효과의 유효성이 확인되었다.

또한, 보정에 사용되지 않은 경로인 CP3에서도 반경 편차 절대값의 평균이 최대 87.00%, 표준편차는 81.51% 감소함으로써, 보정 경로 외 영역에서도 추정된 기구학적 파라미터가 여전히 유효함을 확인할 수 있다.

보정 이후에도 일부 잔류하는 반경 편차는 보정 전과 유사한 개형을 보이며 나타났으며, 이는 본 논문에서 고려하지 않은 각 관절의 변위 오차( $\Delta\theta_1 - \Delta\theta_6$ )에 기인한 것으로 판단된다.

종합적으로 볼 때, 제안한 기구학적 파라미터 보정 알고리즘은 실제 6축 산업용 로봇에 적용되었을 때 원호 테스트에서 반경 편차를 유의미하게 감소시켰으며, 이는 로봇의 위치 오차 개선에 효과적인 방법임을 입증한다.

#### 4. 결론

본 논문은 산업용 로봇의 위치 정확도 향상을 목적으로, 불바를 이용하여 기구학적 파라미터를 추정하는 방법을 제안하고, 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다. 최종적으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

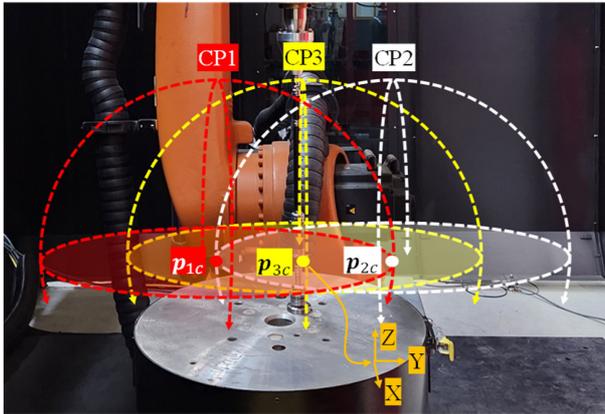


Fig. 6 Measurement paths for verification and their center points

$$\tilde{e} = [e_x \ e_y \ e_z \ e_a \ e_b \ e_c]^T \quad (17)$$

이전 단계에 비하여 목적함수의 값이 증가할 경우  $\lambda$  또한 미리 지정한 곱셈계수  $n$ 배 증가시킨다. 이때  $n$ 이 증가할 수록 알고리즘은 경사하강법(Gradient-descent Method)의 특성에 가까워지며, 수렴에 대한 강건성이 증대되지만 수렴 속도는 감소한다. 반대로 목적함수의 값이 감소하면  $\lambda$ 가  $n$ 배 감소되며, Newton-Raphson법의 특성에 가까워지며 수렴의 속도가 증대되지만 수렴에 대한 강건성이 감소한다[26]. 계산을 위해 초기  $\lambda$ 의 값은 0.01,  $n$ 은 10으로 설정하였다. 예를 들어, Fig. 5의  $p_{1c}$  대하여 보정된 기구학적 모델의 역기구학을 수행하면 Table 4의 과정을 통해 목표 관절 각도가 계산된다.

$$\underset{\theta}{\operatorname{argmin}} S = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \|\tilde{e}\|^2 \quad (18)$$

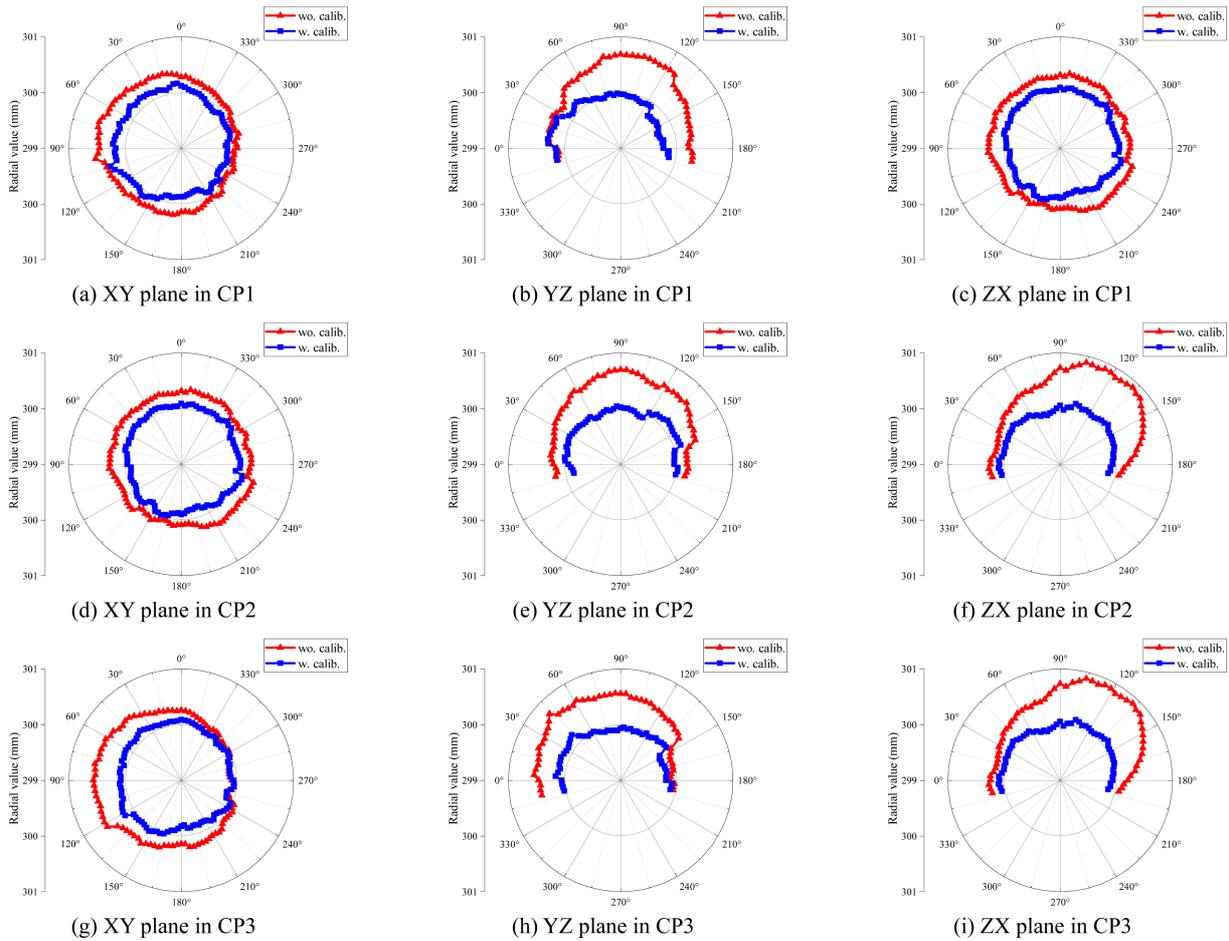


Fig. 7 Measured radial deviation without / with calibration

Table 6 Summary of the measurement results without/ with calibration

Path	Plane	Without calibration		With calibration	
		Average $ \Delta R $ [mm]	Standard deviation [mm]	Average $ \Delta R $ [mm]	Standard deviation [mm]
CP1	XY	0.2168	0.1126	0.1255	0.0566
	YZ	0.4166	0.1754	0.1450	0.0938
	ZX	0.4769	0.2466	0.0627	0.0499
CP2	XY	0.2166	0.0600	0.0680	0.0420
	YZ	0.4280	0.1775	0.0497	0.0451
	ZX	0.4810	0.2621	0.0539	0.0301
CP3	XY	0.2547	0.1789	0.0877	0.0442
	YZ	0.4461	0.2235	0.0952	0.0597
	ZX	0.4671	0.2575	0.0607	0.0476

산업용 로봇의 위치 오차는 공칭 기구학적 모델과 실제 로봇 시스템 간의 차이에서 기인하며, 이를 주기적으로 측정하고 보정하는 과정은 정확도 유지에 필수적이다. 본 연구에서는

볼바를 이용한 원호 테스트를 통해 측정된 반경 편차와 로봇의 기구학적 오차 간의 관계를 모델링하고, 반복적인 최소자승법을 적용하여 파라미터 오차를 추정하는 방법을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 실제 산업 현장의 6축 로봇에 적용되었으며, 보정 전후 서로 다른 위치에 설정된 세 개의 시험 영역에서 수행된 원호 테스트를 통해 반경 편차가 감소하는 것을 확인함으로써 기구학적 파라미터 추정의 타당성을 입증하였다.

제시된 방법은 원호 테스트 기반으로 측정 절차 및 방법이 간단하고 신속하며, 레이저 트래커에 비해 상대적으로 저렴한 측정 장비를 사용함으로써 측정 비용을 절감할 수 있다. 이를 통해 로봇 보정에 소요되는 시간과 비용을 줄이고, 전반적인 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 D-H 파라미터 추정 시 로봇 동작에 따라 지속적으로 변하는 변수  $\theta$ 를 제외하였다. 이는  $\theta$ 가 구조적·기하학적 특성을 나타내는 고정 파라미터와 달라 함께 추정할 경우 모델의 일반화 성능이 저하될 수 있으며 동작 시마다 재 추정이 필요할 수 있기 때문이다. 향후 연구에서는 추정된 구조적 파라미터를 기반으로  $\theta$ 를 포함한 통합적 추정을 수행하여 시스템의 성능을 향상시킬 예정이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-NR076978).

## REFERENCES

- ISO 8373, (2012), Robots and robotic devices - Vocabulary.
- Petrescu, F.I.T., (2022), Advanced dynamics processes applied to an articulated robot, *Processes*, 10(4), 640-668.
- Schneider, U., Drust, M., Ansaloni, M., Lehmann, C., Pellicciari, M., Leali, F., Gunnink J. W., Verl, A., (2016), Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation, *International Journal of Manufacturing Technology*, 85, 3-15.
- Sun, T., Liu, C., Lian, B., Wang, P., Song, Y., (2021), Calibration for precision kinematic control of an articulated serial robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(7), 6000-6009.
- Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., van Duin, S., Norrish, J., (2012), Recent progress on programming methods for industrial robots, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(2), 87-94.
- Roth, Z., Mooring, B., Ravani, B., (1987), An overview of robot calibration, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(5), 377-385.
- Elatta, A. Y., Gen, L. P., Zhi, F. L., Daoyuan, Y., Fei, L., (2004), An overview of robot calibration, *Information Technology Journal*, 3(1), 74-78.
- Mooring, B. W., Roth, Z. S., Driels, M. R., (1991), *Fundamentals of calibration*, John Wiley & Sons.
- Denavit, J., Hartenberg, R. S., (1955), A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, *Journal of Applied Mechanics*, 22(2), 215-221.
- Siciliano, B., Khatib, O., (2008), *Springer handbook of robotics*, Springer.
- Craig, J. J., (2005), *Introduction to robotics: Mechanics and control*, 3rd Ed., Pearson Education.
- He, R., Zhao, Y., Yang, S., Yang, S., (2010), Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on poe formula, *IEEE Transactions on Robotics*, 26(3), 411-423.
- Wu, C., (1984), A kinematic cad tool for the design and control of a robot manipulator, *The International Journal of Robotics Research*, 3(1), 58-67.
- Hollerbach, J. M., Wampler, C. W., (1996), The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods, *The International Journal of Robotics Research*, 15(6), 573-591.
- Fares, F., Souifi, H., Bouslimani, Y., Ghribi, M., (2021), Tool center point calibration method for an industrial robots based on spheres fitting method, *Proceedings of the 2021 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments*, 1-6.
- Le Reun, A., Subrin, K., Dubois, A., Garnier, S., (2022), Thermal drift and backlash issues for industrial robots positioning performance, *Robotica*, 40(9), 2933-2952.
- ISO 9283, (1998), *Manipulating industrial robots-performance criteria related test methods*.
- Slamani, M., Nubiola, A., Bonev, I., (2012), Assessment of the positioning performance of an industrial robot, *Industrial Robot: An International Journal*, 39(1), 57-68.
- Kuric, I., Tlach, V., Sága, M., Císar, M., Zajačko, I., (2021), Industrial robot positioning performance measured on inclined and parallel planes by double ballbar, *Applied Sciences*, 11(4), 1777-1793.
- Veitschegger, W., Wu, C. H., (1986), Robot accuracy analysis based on kinematics, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(3), 171-179.
- Zhenhua, W., Hui, X., Guodong, C., Rongchuan, S., Sun, L., (2014), A distance error based industrial robot kinematic calibration method, *Industrial robot: An International Journal*, 41(5), 439-446.
- Gao, G., Li, Y., Liu, F., Han, S., (2021), Kinematic calibration of industrial robots based on distance information using a hybrid identification method, *Complexity*, 2021,1-10.
- Strang, G., (2006), *Linear algebra and its applications*, 4th Ed., Cengage Learning.
- Kucuk, S., Bingul, Z., (2014), Inverse kinematics solutions for industrial robot manipulators with offset wrists, *Applied Mathematical Modelling*, 38(7-8), 1983-1999.
- Levenberg, K., (1944), A method for the solution of certain non-linear problems in least squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, 2(2), 164-168.
- Gavin, H. P., (2024), *The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems*, Duke University, 1-23.



**Heung Ki Jeon**

MA.Sc. degree in the School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interests are metrology, improving the positioning accuracy of robot and machine tool.

E-mail: gmdrl523@gmail.com



**Sung Hwan Kweon**

Research Fellow at the Digital Design & Digital Manufacturing R&D Center, Kyungpook National University. His research interests are methodology and performance evaluation of robots.

E-mail: kesar@knu.ac.kr



**Kwang Il Lee**

Professor in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University. His research interests are precision methodologies for machine tools, Robots and 3D printer.

E-mail: kilee@kiu.kr



**Seung Han Yang**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interests are intelligent manufacturing systems and CAD/CAM.

E-mail: syang@knu.ac.kr



# 폴리머 튜브 압출 공정 변수에 따른 의료용 풍선의 기계적 성능 변화 연구

## Study on the Variation in Mechanical Performance of Medical Balloons depending on Polymer Tube Extrusion Process Variables

이진수<sup>1,2</sup>, 김규만<sup>2</sup>, 이성권<sup>1</sup>, 김우진<sup>1,#</sup>, 이은택<sup>3,#</sup>  
Jin Su Lee<sup>1</sup>, Gyu Man Kim<sup>2</sup>, Sungkwon Lee<sup>1</sup>, Woojin Kim<sup>1,#</sup>, and Euntaek Lee<sup>3,#</sup>

1 한국생산기술연구원 바이오메디칼생산기술센터 (Biomedical Manufacturing Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology)  
2 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)  
3 국립금오공과대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)  
# Corresponding Author / E-mail: [woojinkim@kitech.re.kr](mailto:woojinkim@kitech.re.kr), TEL: +82-43-339-0532, ORCID: 0000-0003-0942-3598  
E-mail: [euntaek@kumoh.ac.kr](mailto:euntaek@kumoh.ac.kr), TEL: +82-54-478-7328, ORCID: 0000-0001-8291-5535

KEYWORDS: Polymer extrusion process (고분자 압출공정), Balloon catheter (풍선카테터), Blow moulding (블로우 성형)

Balloon catheters are a key technology in medical devices, essential for minimally invasive procedures. This study quantitatively analyzes how the orientation characteristics of polymer tubes, influenced by extrusion conditions, affect the mechanical properties and compliance of the final balloon—where compliance refers to the change in diameter under external pressure. Nylon 12 tubes, with a target outer diameter of 1.2 mm and an inner diameter of 1.0 mm, were extruded under six different orientation conditions by varying the screw flow rate and puller speed. The tubes were processed under identical forming conditions, allowing for a consistent evaluation of their mechanical properties. As orientation increased, elongation decreased while yield strength increased, and these trends continued in the balloon, significantly influencing compliance. To quantitatively measure orientation, we introduced the dimensionless Deborah number. We established a curve-fitted experimental model that links extrusion conditions, polymer tube properties, and balloon compliance. This model allows for the prediction of balloon performance based on extrusion-stage parameters, providing a practical framework for process optimization. Overall, this study offers an effective quantitative indicator for forecasting balloon catheter performance based on extrusion conditions and supports the systematic design of medical balloon products.

Manuscript received: June 4, 2025 / Revised: August 4, 2025 / Accepted: August 22, 2025

### NOMENCLATURE

$B$  = Dimensionless Parameter Characterizing Swell Ratio  
 $N_1$  = Piston-driven Normal Stress  
 $\tau$  = Shear Stress  
 $DDR$  = Draw Down Ratio  
 $V_p$  = Puller Withdrawal Velocity  
 $V_f$  = Release Velocity of Polymer Melts  
 $t_p$  = Observation Time

$v_{exit}$  = Average Velocity at the Die Exit  
 $L_f$  = Free Surface Length  
 $\lambda$  = Relaxation Time

### 1. 서론

#### 1.1 풍선 카테터

최소침습 중재 시술은 CT (Computerized Tomography), MRI

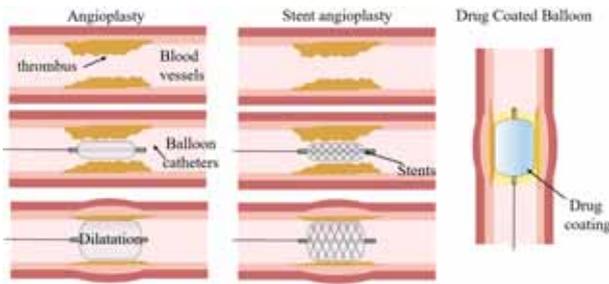


Fig. 1 PCI (Percutaneous Coronary Intervention) procedure

(Magnetic Resonance Imaging), 내시경(Endoscope)과 같은 의료 영상진단 기법을 활용하여 환자의 병변을 세부적으로 파악하고 외과적 수술을 최소화하여 환자의 수술 부담을 줄이는 기술이다. 이러한 최소침습 중재 기술은 긴 도관 형태의 의료기기인 카테터를 사용하여 진행된다. 카테터는 최소침습술을 통하여 인체 내에 삽입되며, 카테터의 원위부에 다양한 기능성 소자를 장착하거나 카테터 내강을 통해 약물을 투여함으로써 환자의 질환을 진단하거나 치료하는데 효과적으로 사용된다. 카테터 중에서도 대표적인 예로 풍선 카테터가 있다. 풍선 카테터는 Fig. 1과 같이 끝부분에 부착된 풍선 부위를 팽창시켜 좁아지거나 막힌 혈관을 확장하고 복원하거나 혈관 병변 부위에 금속 그물망 형태의 스텐트를 삽입하여 혈관 협착의 재발을 방지하는 데 사용된다. 이러한 스텐트 삽입 기술은 혈관 통로를 확보하는 데 효과적이다. 또한, 풍선 카테터는 체내의 협소하거나 복잡한 부위에 약물 전달력을 높이거나 재협착 방지 및 항염, 항증식 작용 유도를 위해 약물이 코팅된 형태의 DCB (Drug-coated Balloon) 구조로도 사용된다. 이와 같이 풍선 카테터는 최소침습 중재 기술의 발전과 함께 다양한 응용이 가능하며, 그 활용성과 관련 기술의 개발이 지속적으로 확대되고 있다[1-3].

## 1.2 연구 동향 및 필요성

압출 공정을 통해 성형된 고분자 튜브의 물성은 드로잉 (Drawing) 속도, 용융 온도, 금형 조건 등 다양한 공정 변수에 의해 영향을 받으며, 특히 드로잉 속도는 튜브의 연신율에 큰 변화를 일으킨다[4].

이러한 연신율의 변화는 풍선 성형 시 팽창 특성에 중요한 영향을 미치는 요소로 작용한다. E. Mabry et. al. (2008)은 드로잉 유속이 증가하면 튜브의 연신율이 감소하고, 이는 벽 두께의 불균일성과 스크래치와 같은 결함을 유발하여 최종 풍선의 성형 실패로 이어질 수 있음을 보고하였다[5]. F. Sadeghi et al. (2021)은 Pebax와 Nylon 12 소재의 고분자 튜브에서 기계적 물성이 풍선 성형 후에도 잔류한다는 사실을 확인하였다[6].

Fereydoon M. et al. (2013)은 Nylon 12 풍선의 팽창 방향에서 배향성이 증가할수록 기계적 강도가 향상됨을 검증하였다[7]. 또한, B.D. Grossman et al. (2006)은 동일한 소재와 공칭압력

(Nominal Pressure) 조건에서 제조된 NC (Non-compliant) 풍선 및 SC (Semi-compliant) 풍선 별 팽창 순응도(Compliance)의 변화를 비교 분석하였으며, Semi-compliant (SC) 풍선에서는 8-10%, Non-Compliant (NC) 풍선은 4-6%의 팽창 순응도의 증가가 일반적으로 나타났다[8]. 이러한 순응도 차이는 튜브의 분자 배향성이 풍선의 팽창 특성에 밀접한 영향을 미치는 것으로 확인되었고, 이를 통해 압출 공정에서 유도된 튜브의 배향성이 풍선 성형 후에도 유지됨을 간접적으로 평가할 수 있는 지표로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 선행 연구를 바탕으로 압출 공정에서 고분자 튜브의 배향성과 물성을 조절하여 최종 풍선의 기계적 특성과 팽창 순응도(Compliance)가 어떻게 변화하는지를 평가하고자 한다.

특히, 드로잉(Drawing) 속도, 용융 온도, 풀러 속도 등 압출 공정 변수에 따른 튜브의 연신율 및 기계적 물성 변화가 풍선 성형 후 최종 제품의 팽창 거동과 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

현재까지 일부 연구에서는 고분자 튜브의 특성이 풍선 성형 공정과 최종 성능에 미치는 영향을 다루었으나, 풍선으로 제조될 때 사용되는 튜브의 압출 공정 변수와 풍선 성능 간의 구체적인 상관관계를 규명한 연구는 부족하였다. 예를 들어, 연신율이 낮은 튜브는 풍선 성형 중 파열될 가능성이 높아지고, 금형의 균일성이 낮으면 최종 제품의 품질이 저하될 수 있다.

또한, 압출 공정에서 튜브의 배향성이 증가하면 연신율은 감소하지만 기계적 강도는 증가하며, 이러한 변화는 최종 풍선에 잔류하여 외력에 따른 팽창 순응도 등의 변형 정도를 결정하는데 영향을 있을 것으로 추측된다.

따라서 본 연구에서는 압출 공정의 기계적 물성 제어가 풍선 성형 공정 단계에서 최종 제품의 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 이를 통해 최적의 압출 조건을 도출하여 풍선 성능을 최적화할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 1.3 연구 목적 및 목표

본 연구의 목적은 압출 성형 공정에서 다양한 드로잉 조건에 따른 고분자 튜브의 연신율과 배향성을 체계적으로 분석하고, 이러한 튜브 물성이 최종 풍선 성형 공정에서 풍선의 기계적 특성과 컴플라이언스에 미치는 영향을 규명하는 것이다. 연구에서는 압출 성형 공정에서 드로잉 조건을 변화시켜 제작된 고분자 튜브의 물성 변화를 분석하였으며, 성형된 풍선의 기계적 강도와 팽창 거동을 비교 평가하였다.

특히, 벽 두께 변화에 따른 풍선의 인장 강도 및 직경 변화의 차이를 확인하여, 튜브의 물성을 제어함으로써 최종 풍선 성능을 효과적으로 조절할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구를 통해 최적의 압출 공정 조건을 설정함으로써 풍선 성형 공정의 효율성을 높이고, 불필요한 공정 단계를 줄여 생산성을 향상시킬 수 있는 가능성을 살펴보았다.

2. 설계 제작 및 해석

2.1 소재 선정

카테터의 핵심이 되는 튜브는 신체 내부 환경에서의 생체적 합성 및 내화학성, 생물학적 안정성을 보유해야 하며, 풍선 성형 공정 중 발생하는 고온, 압력, 스트레칭을 견딜 수 있는 강도와 내구성을 요구한다. Commodity Polymer는 가공성이 뛰어나지만 내구성과 기계적 강도가 낮아 고부 하 응용에는 부적합하다. High-performance Polymer는 우수한 강도와 화학적 안정성을 가지지만 가공성이 낮아 활용에 제약이 있다.

따라서 두 소재의 장점을 조화시킬 수 있는 엘라스토머 계열의 Engineering Polymer 후보군들이 내구성, 내충격성, 화학적 안정성, 가공성을 제공할 수 있음을 확인하였으며 본 연구의 요구를 충족하는 적합한 소재로 평가되었다[9]. 특히, ISO 10993-1 기준을 충족한 Polyamide (Nylon) 계열의 Nylon 12가 최종 선정되었다.

Nylon 12는 긴 사슬 구조와 반결정성 구조로 강도와 유연성의 균형이 뛰어나고, 낮은 수분 흡착율, 우수한 화학적 내성, 뛰어난 가공성을 특징으로 한다. 또한, 습기, 압력, 충격, 화학적 부식에 강해 의료 기기 및 고품질 제품 제작에 적합하다[10-13].

2.2 압출 금형 해석 및 선정

선정된 Nylon 12 소재를 토대로 압출 공정에서 사용될 금형을 제작하고자 하며, 압출 공정에서는 고분자의 유동특성과 점탄성을 고려하여 금형 설계가 이루어진다. 배럴 내부에서 용융되어 유속 방향으로 전단응력을 받아 분자 사슬의 배향이 이루어진다.

유속과 전단속도가 증가할수록 배향성과 결정성이 높아져 기계적 강도는 증가하지만 연신율은 감소한다.

용융된 고분자 소재가 금형부(Tie & Die)를 통과하며 탄성 복원력으로 인해 Fig. 2와 같은 Swell 현상이 발생한다[14,15]. 이는 금형 설계와 압출 공정 조건에 크게 영향을 받으며, 이를 수학적으로 설명하기 위해 Tanner 모델의 을 활용했으며 구성식은 식(1)과 같다.

$$B = \frac{D}{D_0} = \left[ 1 + 1 + \frac{1}{8} \left( \frac{N_1}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{1}{s}} \quad (1)$$

상기 구성식은 용융된 고분자 소재가 Die를 지날 때 생기는 Swell의 정도를 (B)로 나타내어 D는 Die의 용융 소재의 토출되는 금형의 직경,  $\tau$ 는 전단응력, s는 고분자 소재의 이완시간,  $N_1$ 은 피스톤에서 수직응력을 뜻한다. 용융된 고분자 소재가 Die를 통과하는 과정에서 발생하는 수직응력의 작용과, 그 응력이 해소되면서 최종적으로 토출될 때 소재가 원래의 형태로 어느 정도 회복된다는 사실이다.

이로 인해 실제로 토출된 결과물의 크기가 Die의 토출부 직경보다 커질 수 있습니다. 이는 고분자 소재의 탄성 복원력이 작용하는 것으로 압출 성형 공정에서 매우 중요한 현상이다.

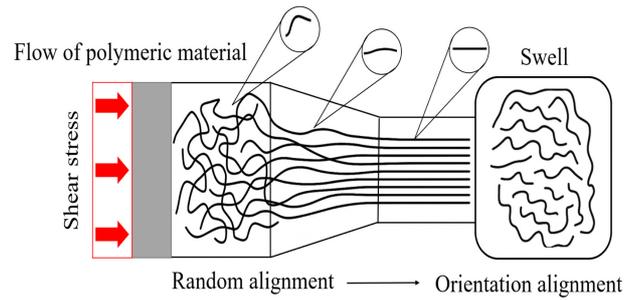


Fig. 2 Swell phenomenon in the extrusion process

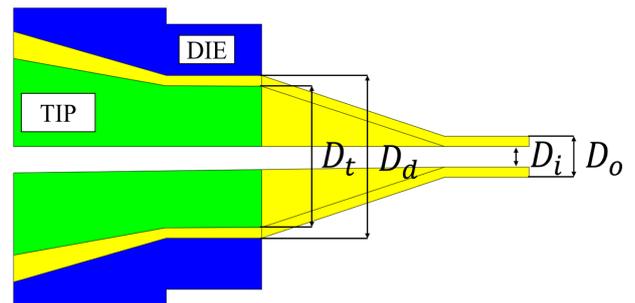


Fig. 3 Draw down ratio (DDR) schematic

Table 1 DDR recommendation for industrial plastic extrusion

Material	DDR
HDPE	1.15
LDPE	1.60
Polyurethane	1.3-2.0
P-PVC	1.15-2.0
U-PVC	1.15

Table 2 FEM specifications for numerical analysis

FEM specifics	Value [Unit]
Nodes	120305 [EA]
Elements	115040 [EA]
Flow rate	7.849E-08 [mm <sup>3</sup> /Sec]
Pulling speed	-0.1 [m/s]

$$DDR = \frac{D_t + D_d}{D_0 + D_i} = \frac{v_p}{v_f} \quad (2)$$

Fig. 3은 압출물과 Tip & Die 간의 단면적 비율인 DDR로, 제품의 단면적 변화에 직접적으로 영향을 미치며 이를 고려한 설계가 필수적이다.

구성 방정식(식(2))에 따르면,  $D_d$ 는 Die의 내경,  $D_t$ 는 Tip의 외경,  $D_0$ 는 제품의 외경,  $D_i$ 는 제품의 내경을 나타내며,  $v_p$ 는 풀러(Puller)에 의해 생성되는 인출 속도,  $v_f$ 는 용융된 고분자가 배출되는 속도를 의미한다. 이러한 변수들을 기반으로 압출 공정에서 제품이 변형되고 최종적으로 형성되는 과정을 예측할

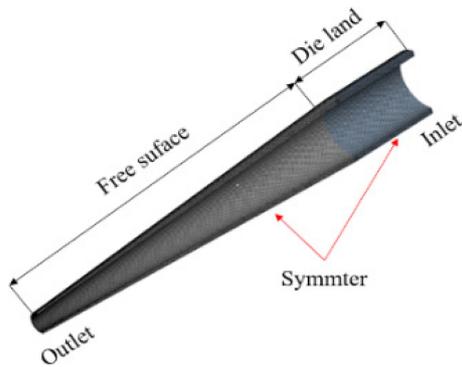


Fig. 4 Schematic diagram of the computational domain, mesh and boundary condition used in numerical analysis.

수 있다[16].

유변학적 특성을 고려한 ANSYS Polyflow를 이용한 유동 해석을 수행하였다. 이때 지배 방정식으로 비압축성 정상상태 Navier-Stokes 방정식을 적용하였으며, 질량 보존식은 식(3)과 같이 주어졌다. 여기서  $u_i$ 는  $i$  번째 속도 성분을 의미한다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

유동 해석 과정에서는 표면 장력, 관성력, 중력의 영향을 미미하다고 간주하였으며, 이와 같은 전제 상황 아래 용융 고분자 소재의 흐름을 설명하는 운동량 보존 방정식(식(4))은 다음과 같은 방식으로 서술될 수 있다.

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0 \tag{4}$$

여기서  $p$ 는 압력,  $\tau_{ij}$ 는 응력 텐서를 나타낸다. Generalized Newtonian Fluid 모델을 적용한 경우, 응력 텐서는 식(5)로 정의된다[17].

$$\tau_{ij} = n(\dot{\gamma}) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{5}$$

Fig. 4는 역압출 유동해석을 위한 계산영역과 경계조건을 나타내며 고분자 중공 튜브 치수를 기준으로 최종적으로 목표가 되는 중공튜브의 형상으로 대칭성을 고려하여 계산영역은 1/2로 정하여 해석을 진행하였다. 또한 용융물이 토출 되는 자유표면과 다이랜드(Die Land) 영역 사이에서 발생하는 변형을 분석하기 위해 자유 표면과 다이랜드 영역에 재격자화(Remeshing)를 적용하여 최적의 다이형상을 설계하였다.

폴리머 출구는 풀러(Puller) 속도를 반영해 법선 속도가 일정하게 유지되도록 설정했으며, 체적 유량은 목표 형상의 단면적과 풀러 속도의 곱으로 계산되었다.

폴리머는 260-270°C에서 용융 상태를 유지했으며, 다이 랜드 이후 자유 표면 구간에서는 대류 열전달계수 5 K/m를 적용하였다. 루멘 형상을 유지하기 위해 공기 유동 해석은 생략하고

Tip : 1.8mm Die : 2.0mm DDR: 1.72

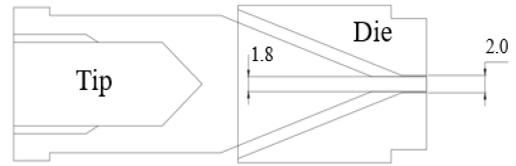


Fig. 5 Schematic diagram of the Tip & Die

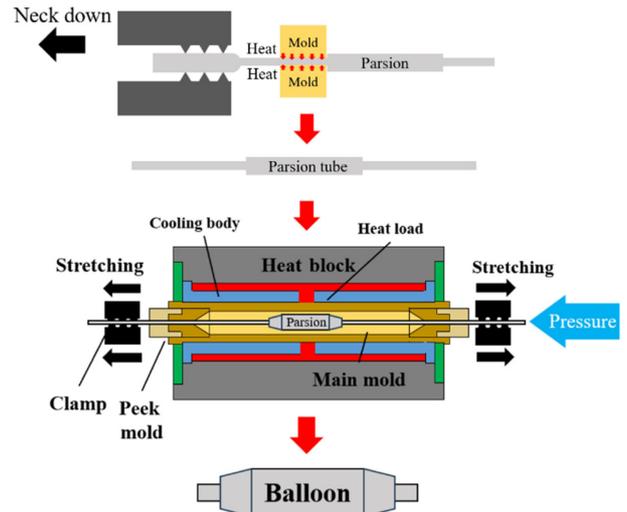


Fig. 6 Balloon forming process

자유 표면 내부 루멘 벽에 강제 대류 조건을 적용하였다.

해석 결과는 Fig. 4에 제시되었으며 수치해석 결과를 바탕으로 다양한 Tip & Die 모델을 설계 및 제작하였으며, DDR 비율 1.15-2를 기준으로 Tip 직경 1.8 mm, Die 직경 2.0 mm로 설계해 최적의 유동 및 성형 특성을 확보하였다. 최종 설계는 Fig. 5에 나타나 있다.

### 2.3 스트레칭 블로잉 성형 공정

Fig. 6을 보면 압출된 고분자 튜브는 먼저 넥킹(Necking) 공정을 거쳐 Parison 튜브로 변형된다. 이 과정에서 튜브의 중앙부가 의도적으로 얇게 가공되며, 이는 이후 블로잉 성형 과정에서 풍선이 형성될 영역을 사전에 조성하는 역할을 한다.

넥킹을 통해 가공된 Parison 튜브는 블로잉 성형 시 열과 압력을 보다 효과적으로 전달받을 수 있도록 준비되며, 금형 내에서 안정적으로 고정되어 변형을 예측하고 제어하는 데 중요한 역할을 한다.

이후 블로잉 성형(Blow Molding) 공정에서는 가열된 금형 내부에 Parison 튜브를 고정된 뒤, 클램프가 양쪽 끝을 잡아당기면서 인장 변형이 시작된다.

동시에 튜브 내부로 고압의 질소가 주입되면서 팽창이 이루어지고 가열된 금형과의 접촉을 통해 튜브가 최종적으로 원하는 풍선 형상으로 변형된다.

이 과정에서 고분자 튜브의 연신율이 충분히 확보되어야 하며,

그렇지 않으면 균일한 팽창이 어렵고 원하는 형태를 얻기 힘들어진다.

즉, 넥킹 공정을 통해 미리 형성된 구조적 변화가 블로잉 성형에서의 변형 거동을 결정하며, 전체 공정의 성공 여부에 직접적인 영향을 미친다[18,19].

본 연구에서는 최종적으로 외경 2.75 mm, 길이 20 mm의 의료용 풍선을 성형하기 위해 외경 1.2 mm 내경 1.0 mm의 고분자 튜브를 압출 성형하여 적용하였으며, Parison 부위 16-18 mm를 제외하고 넥킹하여 Parison Tube를 제작하였다. 이는 Blow up Ratio (BUR)를 고려한 것으로, 여기서 BUR은 압출된 튜브의 내경에 대한 최종 제조되는 풍선 외경의 비를 의미한다. 일반적으로 BUR이 2.5-5 정도 수준에서 제조가 되기 때문에 [20,21], 이를 고려한 튜브 사양을 선정하였으며, 완성된 Parison Tube는 직경 블로잉 성형을 통해 직경 2.75 mm, 길이 20 mm 풍선으로 성형이 된다.

### 3. 실험 설정 및 방법.

#### 3.1 실험 주요변수

##### 3.1.1 압출 성형 공정변수

본 연구에서 목표로 하는 풍선의 안정적인 성형을 위해서는 압출 공정 변수의 제어가 핵심이다.

튜브 압출 시에는 공정이 안정적으로 유지될 수 있는 최소한의 조건을 Condition 1으로 정의하고, 이후 스크류 유량 및 풀러 속도를 각각 배수로 증가시키는 방식으로 총 6단계의 조건을 설정하였다.

모든 조건에서 압출 직후의 냉각 공정은 동일하게 유지되었으며, 수냉 탱크를 이용하여 15°C의 냉각수를 순환시키는 방식으로 고정하였다.

이는 용융 온도 250-260°C 범위에서 사출된 고분자 튜브가 일관된 냉각 조건 하에 응고되도록 함으로써, 실험 간 조건 이외의 영향을 배제하고자 하였다.

배향성이 점진적으로 증가하도록 설계된 조건과 함께, 동시에 고분자의 유동 특성과 점탄성 거동의 시간 의존성을 정량적으로 평가하기 위해 재료의 이완시간과 외부하중이 작용하는 관찰시간의 척도의 비로 정의되는 무차원 수치인 Deborah Number (De)를 도입하여 공정 조건에 따른 물성 변화를 정량적으로 지표화 하고자 하였으며 구성식은 식(6)과 같다.

$$De = \frac{\lambda}{t_p} = \frac{\lambda v_{exit}}{L_f} \tag{6}$$

여기서  $t_p$ 는 관찰시간으로 압출공정에서는 다이 토출구에서의 평균속도  $v_{exit}$ 에 대한 자유영역의 길이  $L_f$ 로 나타낼 수 있고, 이완시간  $\lambda$ 은 Tip과 Die의 출구부 단면상의 평균 Shear Rate의 역수를 사용한다. 이러한 무차원수의 도입을 통해 실험 조건의 변동성을 손쉽게 파악하고자 하였으며 일련의 공정 값과 무차원수에 값은 Table 3에 상세히 나타내었다.

Table 3 Extrusion process parameters by conditions

TYPE	Flow rate [m <sup>3</sup> /s]	Puller speed [m/s]	Deborah number [De]
Condition 1	2.12E-7	0.06	0.06
Condition 2	4.24E-7	0.13	0.11
Condition 3	6.32E-7	0.21	0.16
Condition 4	8.38E-7	0.27	0.20
Condition 5	10.2E-7	0.35	0.23
Condition 6	12.1E-7	0.45	0.25

Table 4 Balloon foaming process parameters

Temperature [°C]	150
Forming time [s]	180
Pressure [bar]	7
Left-Right stretching [mm]	5
Left-Right stretching speed [mm/s]	5
Cooling time [s]	180
Cooling temperature [°C]	15

##### 3.1.2 풍선 성형 공정변수

압출 공정과 풍선 성형 공정 간의 연계성을 평가하기 위해 Table 4에 제시된 바와 같이 풍선 성형 공정의 변수로 온도 질소압력 스트레칭 길이 및 성형 시간 등의 조건을 모두 동일하게 설정하였다.

이를 통해 배향 조건이 상이한 다양한 튜브에 동일한 풍선 성형 조건을 적용하였다. 실험 설계는 튜브의 배향 차이만이 풍선의 최종 기계적 물성에 미치는 영향을 비교하고 분석할 수 있도록 하였으며 궁극적으로 압출 공정에서의 변수 변화가 풍선성형 공정 결과에 미치는 영향을 체계적으로 평가할 수 있게 하였다.

##### 3.1.3 X선 회절 시험

압출 성형 공정에서의 공정 변수 조절이 튜브의 배향성에 미치는 영향을 파악하기 위해 분자의 배향성이 결정구조와 연관 있음을 고려하여 X선 회절 시험을 진행하였다. 압출 공정에서 분자 사슬 구조는 공정 변수가 증가할수록 분자 간 얽힘이 증가하여 밀도가 높아지고 결정 구조가 다량 생성된다.

반대로 공정 변수가 낮아질수록 이러한 효과는 감소한다. 이를 통해 배향성이 낮은 조건과 상대적으로 높은 조건에서의 결정 함유량을 비교하고 압출 공정 조건 변화가 튜브 배향성에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

Fig. 7은 X선 회절 시험의 매커니즘에 대해 보여주며 X-ray Source에서 방출된 X선이 샘플에 투과되고 산란된 X선이 검출기에 작용하며 샘플의 결정구조를 파악되는 구조로 본 연구에서 WAXS (Wide-Angle X-ray Scattering)를 이용하였다.

상대적으로 큰 산란 각도에서 데이터를 수집하여 원자 간 거리, 결정격자구조 및 결정화 정도와 같은 미세 구조를 분석하는 데

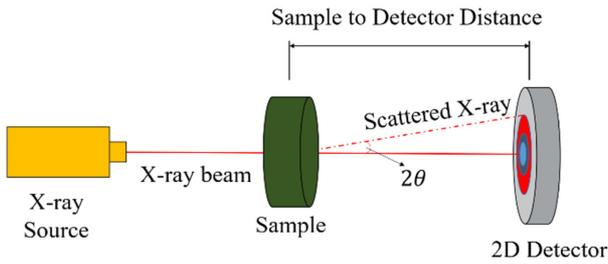


Fig. 7 Schematic of the X-ray diffraction experiment setup

사용되며 실험에 필요한 샘플과 검출기 사이 각도는 상대적으로 짧은 거리인 300 mm에서 2초간의 연속 촬영을 통해 압출 공정 변수와 고분자 튜브 간의 결정구조 함유량 변화를 파악하여 압출 공정이 튜브 물성에 핵심적인 요소인 배향성 변화에 대한 입증을 진행하고자 하였다[22].

### 3.2 측정 방법

#### 3.2.1 비표준 시편의 인장시험

비표준 인장 시편의 인장시험에서는 클램프의 기계적 표면 처리를 통해 시편의 슬립(Slip) 현상을 최소화하여 안정적이고 일관된 시험 데이터를 얻는 것이 중요하다.

이를 위해 클램프 표면을 사포로 처리하여 마찰력을 증가시켰고 위 방법은 인장시험 중 시편의 미끄러짐을 효과적으로 방지할 수 있었다[23]. 고분자 튜브는 115 mm 길이로 재단하고, 표점 거리는 10 mm로 설정하였다.

풍선 시편의 경우 얇은 필름 형태로 재단한 후, 가로 5 mm × 세로 5 mm 크기의 정사각형 시편을 제작하였다. 인장시험은 풍선의 Axial 방향과 Radial 방향 모두에서 수행하였으며, 이때 표점거리는 2.5 mm로 설정하였다[24].

이러한 표점거리는 풍선 필름의 얇고 연성 있는 특성을 고려하여 변형률을 정밀하게 측정할 수 있도록 설계되었다.

또한, 고분자 소재의 인장시험에서는 충격 하중으로 인한 데이터 변동을 최소화하기 위해 인장 속도를 50 mm/min으로 설정하였다. 이는 고분자 물질의 점탄성 특성을 반영한 충격하중에 대비한 최적의 속도로, 실험 결과의 재현성을 높이는 데 기여하였다[25].

#### 3.2.2 풍선 인력시험

Fig. 8처럼 성형된 풍선은 풍선 카테터로 제작하여 압력 시험을 진행하였다.

목표 직경에 도달하는 공칭응력(Nominal Pressure)과 풍선이 파괴될 때까지 증가하는 파열 압력(Burst Pressure, BP)을 평가하는 방식으로 이루어졌다.

이를 위해 1 atm씩 단계적으로 압력을 증가시키며, 풍선이 외력에 저항하는 정도를 직경 변화로 측정하였다[26].

직경 측정은 마이크로 미터기를 사용하였으며, 각 압력 단계에서 풍선의 직경 변화를 정량적으로 평가할 수 있었다.

이러한 측정 방법은 풍선의 물리적 특성과 성형 공정 조건

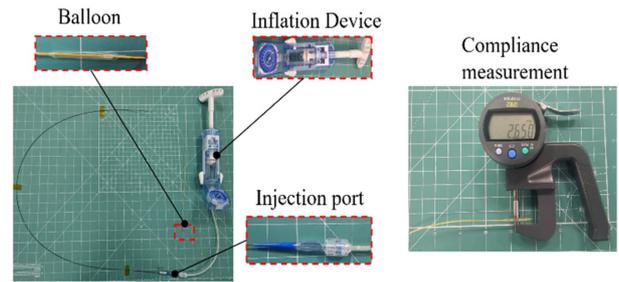


Fig. 8 Experimental setup for balloon catheter performance evaluation

간의 상관관계를 분석하는 데 중요한 데이터를 제공하였다. 이를 통해 압출 공정 변수 변화에 따른 풍선의 기계적 성질과 내구성을 체계적으로 평가할 수 있었으며, 최적의 공정 조건을 설정하는 데 기여할 수 있었다.

## 4. 실험결과

### 4.1 X 선 회절 시험

Condition 1에서 Condition 6으로 압출 공정 조건이 진행됨에 따라, Wide-Angle X-ray Scattering (WAXS) 분석 결과 전반적으로 결정 구조의 회절 강도가 증가하는 경향이 관찰되었다. 특히 약  $2\theta = 6.2^\circ$  부근에서 나타나는  $\alpha$ -형 결정 구조의(002) 회절 피크와,  $2\theta = 7.0^\circ$  부근에서 관찰되는  $\gamma$ -형 결정 구조의(020) 회절 피크 모두 조건이 증가할수록 뚜렷한 신호 증가가 확인되었다.

이는 압출 공정 중 유도되는 분자 배향성이 결정화에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 의미하며, 배향성이 증가할수록 결정화 정도가 전반적으로 향상됨을 시사한다.

또한  $\alpha$ -형 결정 구조의 경우, 고배향 조건일수록 더욱 선명하고 강한 피크를 나타내었으며, 이는 보다 조밀하고 규칙적인 분자 배열이 형성되었음을 나타낸다. 반면  $\gamma$ -형 결정 구조는 분자 배열이 비교적 느슨한 구조에 기인하며, 배향 증가와 함께 일정 수준의 증가를 보이긴 하나  $\alpha$ -형에 비해 상대적으로 그 강도 상승 폭이 작았다. 이러한 차이는 공정 조건 변화에 따라  $\alpha$ -형과  $\gamma$ -형 결정 사이의 상전이 또는 상공존 구조의 비율이 달라질 수 있음을 시사한다.

특히 고배향 조건에서는  $\gamma$ -형 결정 피크가  $\alpha$ -형 결정 피크 쪽으로 점차 이동(Shift)하는 경향이 일부 조건에서 관찰되었으며, 이는 결정화 과정에서 고분자 사슬의 방향성이 증가함에 따라  $\gamma$ -형 결정 구조가 보다 안정적인  $\alpha$ -형 구조로 재배열되거나, 결정 상들 간의 에너지 안정성 변화로 인해 상간 변환 혹은 재조정이 이루어졌을 가능성을 나타낸다. 이러한 결과는 압출 공정 중 유도된 배향성이 단순한 기계적 성능뿐 아니라 결정 구조의 미세 조정 및 상 전이에까지 영향을 미칠 수 있다는 점에서 학문적, 산업적으로 중요한 시사점을 제공한다.

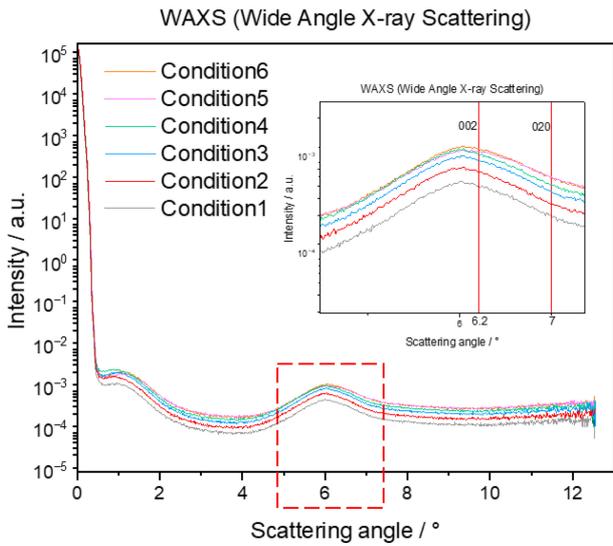


Fig. 9 The WAXD patterns of Nylon12 under different orientations of polymer tube

Table 5 Elongation and modulus of tubes by extrusion conditions

TYPE	Elongation ratio [%]	E [Mpa]
Condition 1	1755	0.87
Condition 2	1468	1.13
Condition 3	1147	1.19
Condition 4	843	1.22
Condition 5	546	1.42
Condition 6	322	1.64

4.2 고분자 튜브 인장시험 결과

압출 공정을 통해 성형된 고분자 튜브의 기계적 물성은 인장 시험 결과를 바탕으로 Fig.10의 Stress-Strain Curve를 통해 정성적으로, 그리고 Table 5에 제시된 연신율(Elongation at Break)과 탄성계수(Elastic Modulus)를 통해 정량적으로 분석되었다.

본 실험에서는 압출 조건의 변화에 따른 분자 배향성의 영향을 분석하기 위해, 배향성이 가장 낮은 조건인 Condition 1부터, 스크류 유량과 풀러 속도를 증가시키며 점진적으로 배향성을 향상시킨 Condition 6까지 총 6가지 공정 조건을 설정하였다.

실험 결과 분자 배향성이 증가할수록 연신율은 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타냈다.

Condition 1의 경우, 최대 연신율은 약 1,755%로 고분자 사슬 간 자유 운동성이 매우 높은 연질 재료의 특성을 보였으나, Condition 6에서는 연신율이 322%로 감소하여 높은 배향성 하에서의 연신 저항성이 크게 증가했음을 시사하였다.

이러한 경향은 고분자 사슬이 배향됨에 따라 재료 내부에서 연신 시 사슬 간 이동 여유가 줄어들고, 사슬 간 상호작용이 강화되며 결정화가 진행될 결과로 해석된다.

탄성계수(E)는 공정 조건이 증가함에 따라 0.87에서 1.64 MPa로 점진적인 상승을 보였다. 이는 배향성이 증가할수록 고분자 사슬

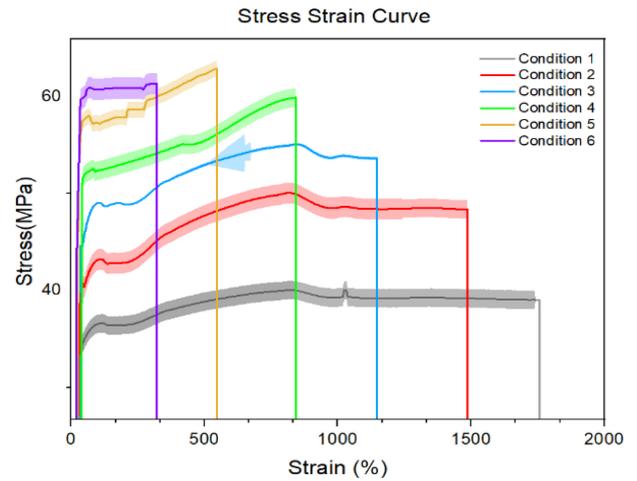


Fig. 10 Stress-Strain curves of Nylon 12 tubes with different orientation conditions

배열이 보다 정렬되고 결정 영역이 발달함에 따라 재료의 초기 탄성 응답이 강화된 것으로 이해된다. 높은 탄성계수는 특히 초기 응력 증가 구간에서의 강성 증가를 의미하며, 이는 풍선 성형 시 확장 저항성 및 형상 안정성과도 직접적인 연관을 가진다.

이러한 결과는 압출 공정 중 설정된 유동 조건이 고분자 사슬의 정렬 방향성과 결정화 수준에 영향을 주며, 결과적으로 고분자 튜브의 기계적 특성인 연신 및 탄성계수에 지대한 영향을 미친다는 점을 실험적으로 입증한 것이다. 즉, 압출 조건을 정밀하게 제어함으로써 최종 제품의 성능을 사전 예측하고 조절할 수 있는 기반을 마련할 수 있다.

4.3 풍선 인장시험 결과

본 연구에서는 배향성이 서로 다른 6종의 고분자 튜브를 풍선으로 제작한 후, 인장시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다. 시험은 성형된 풍선을 스트레칭 방향인 Axial 방향과 팽창압력에 따른 Radial 방향으로 각각 수행되었다.

이는 블로잉 성형 공정에서 풍선이 인장(Axial)과 팽창(Radial)이라는 상이한 물리적 하중을 동시에 받기에, 각 방향에서 유도되는 배향 정도와 그에 따른 기계적 특성을 정량적으로 파악하고자 설계되었으며 그 결과를 Fig. 11의 Stress-Strain Curve로 시각화하였다.

풍선은 압출 이후 넥킹(Necking) 공정을 통해 일정 수준 이상의 소성 변형이 선행된 상태에서 성형되기 때문에 고분자 튜브와 달리 초기 탄성 영역에서의 기계적 물성 평가에는 한계가 존재한다.

이에 본 연구에서는 탄성 영역 이후의 항복 구간에서 나타나는 평균 응력값과 최종 연신율을 주요 분석 지표로 설정하여 풍선의 기계적 특성을 비교 분석하였으며 그 결과는 Fig. 12에 제시하였다. 실험 결과 압출 공정에서의 유사하게 배향성이 증가할수록 풍선의 연신율은 감소하고 평균 항복강도는 증가하는 경향을 보였다. 예를 들어 Axial 방향에서 Condition 1의 연신율은 279.8%였으나 Condition 5에서는 142.1%로 감소하였고, Radial

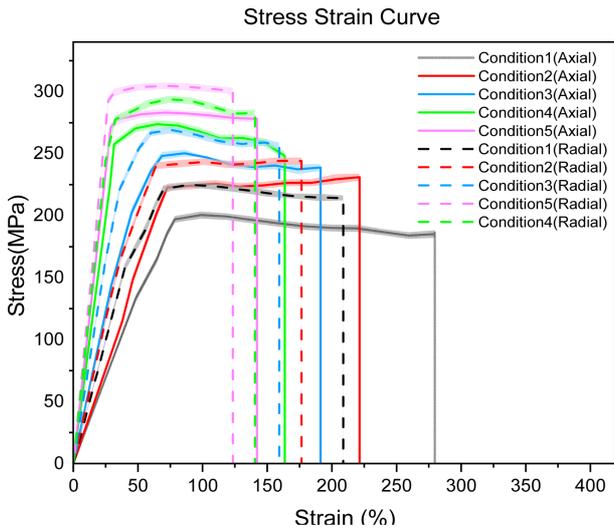
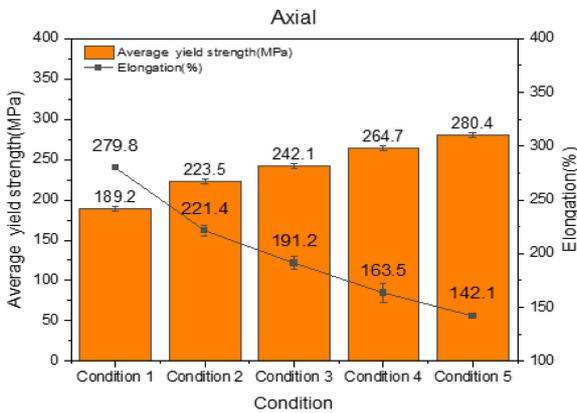
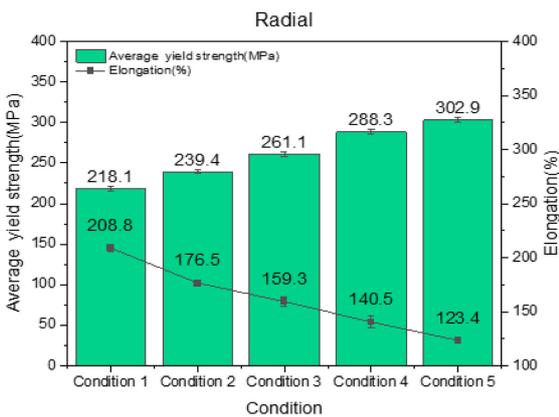


Fig. 11 Stress-Strain curves of balloons formed from oriented tubes in axial and radial directions



(a) Axial yield strength and elongation of balloons by orientation condition



(b) Radial yield strength and elongation of balloons by orientation condition

Fig. 12 Bar graph of average yield strength and elongation in balloons under different processing conditions

방향에서는 각 208.8%에서 123.4%로 감소하였다.

반면 평균 항복강도는 Axial 방향에서 Condition 1이 189.2 MPa,

Table 6 Elongation and modulus of balloon by extrusion conditions

TYPE	Elongation ratio [%]	Average yield strength [Mpa]
Condition 1 (Axial)	279.8	189.2
Condition 2 (Axial)	221.4	223.5
Condition 3 (Axial)	191.2	242.1
Condition 4 (Axial)	163.5	264.7
Condition 5 (Axial)	142.1	280.4
Condition 1 (Radial)	208.8	218.1
Condition 2 (Radial)	176.5	239.4
Condition 3 (Radial)	159.3	261.1
Condition 4 (Radial)	140.4	288.3
Condition 5 (Radial)	123.4	302.9

Condition 5가 280.4 MPa였으며, Radial 방향에서는 Condition 1이 218.1 MPa, Condition 5가 302.9 MPa로 측정되었다. 이러한 결과는 풍선 성형 시 Radial 방향으로 작용하는 내부 압력이 Axial 방향보다 크고, 이에 따라 분자 사슬의 정렬이 Radial 방향에서 더욱 뚜렷하게 유도된다는 점을 시사한다. 특히 Condition 5 이상의 고배향 조건에서는 Radial 방향에서의 분자 배열이 더욱 치밀해지며, 이는 결정화의 상승과 함께 기계적 응답이 더욱 경직되는 양상을 초래하였다. 그 결과, 높은 배향 조건에서는 초기 연신이 충분히 발생하지 못해 성형 수율이 낮아지는 현상도 일부 관찰되었으며, 이는 풍선 성형 시 배향성과 연신율 사이의 균형이 매우 중요함을 나타낸다.

따라서 풍선의 사용 중 압력 저항성, 팽창성, 치수 안정성을 모두 확보하기 위해서는 성형 방향별 기계적 물성을 정량적으로 이해하고, 압출 공정에서의 배향 조건을 정교하게 조절하는 것이 필수적임을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다.

#### 4.4 풍선 압력 시험 결과

Fig. 13에 나타난 실험 결과에 따르면 Condition 1부터 Condition 5까지 공칭 응력은 6-8 atm 사이에서 직경 2.75 mm에 도달하며, 이는 모든 조건에서 비슷한 경향을 보였다. 이는 초기 팽창 단계에서는 배향성 차이에 따른 직경 변화가 크지 않음을 의미한다.

반면, 파열압력에서는 조건에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났다.

Condition 1과 2에서는 직경의 차이는 있으나 파열 압력은 동일하게 나타났으며, Condition이 증가할수록 인장 강도는 증가하고 연신율은 감소하는 경향을 보였다.

이러한 변화는 풍선이 견디는 최대 압력이 증가하지만 팽창 가능한 직경은 감소하는 결과를 초래하며 앞서 인장시험에서 나타난 결과와 동일한 양상을 보여준다.

배향성이 높아질수록 풍선의 기계적 강도는 증가하지만 연신율이 감소하면서 팽창이 가능한 범위가 제한되는 것이다.

특히, Condition 5에서는 22 atm에서 파열되며 가장 높은 RBP를 기록했지만, 팽창 직경은 3.13 mm로 상대적으로 작았다.

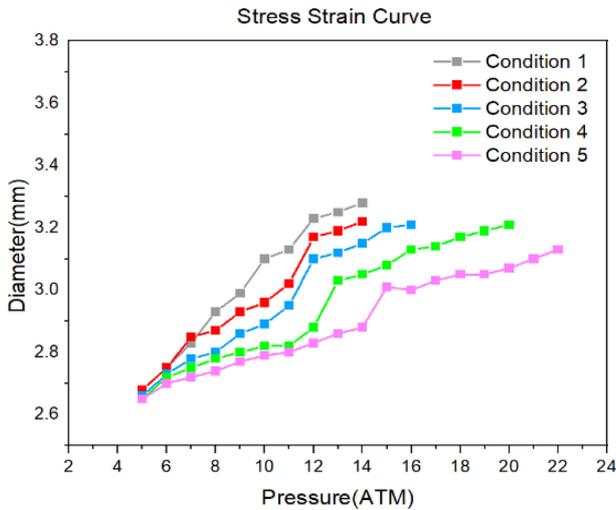


Fig. 13 Compliance of balloons different extrusion conditions

결론적으로, 압출 공정 조건 변화에 따른 풍선의 물성 변화는 인장시험 결과뿐만 아니라 실제 사용 환경에서도 유사한 경향을 보이며, 이는 최적의 배향 조건을 설정하는 것이 풍선의 성능을 극대화하는 데 중요한 요소임을 시사한다.

4.5 예측 모델 실험식

본 연구에서는, 앞선 연구를 통해 스크류 유량과 풀러 속도를 무차원 수치인 Deborah Number로 환산하여 공정 조건을 정량화하였다.

이를 기반으로 하여 고분자 튜브의 평균 항복강도와 최종 연신율을 각각 Deborah Number에 대응시켜 Fig. 14와 같이 곡선 피팅을 수행하였다. 이와 같은 분석은 압출 공정으로 형성된 고분자 튜브의 기계적 물성이 풍선 성형 이후에도 잔류한다는 실험적 사실을 기반으로 하며, 이에 따라 압출 공정에서 특정 Deborah Number 조건이 주어졌을 때 대응하는 튜브의 물성을 예측할 수 있을 뿐 아니라, 해당 튜브를 이용해 제조된 풍선의 기계적 특성 또한 정량적으로 예측할 수 있는 기반을 마련하였다. 도출된 실험식은 피팅(Fitting) 결과 포물선 형태를 띠는 비선형적 상승 곡선을 나타내었으며 이러한 점진적 증가 경향을 효과적으로 표현하기 위하여 지수함수(Exponential Function) 형태로 모델링 하였다.

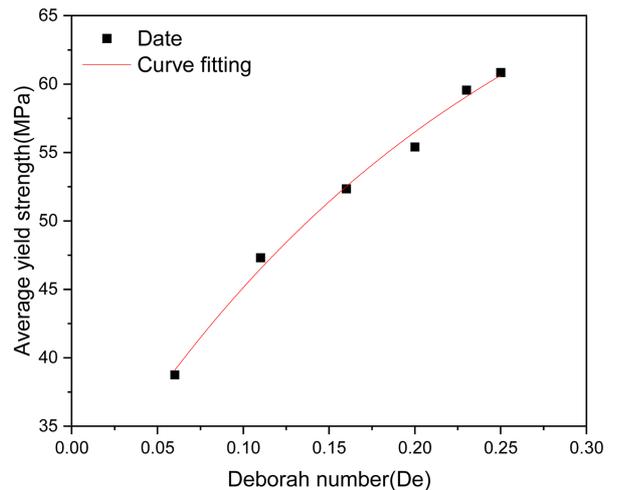
이때 종속 변수인 y는 연신율과 평균 항복강도, 독립변수 x는 De를 의미하며 함수 내 사용된 자연상수 e는 수학적으로 정의된 상수값 2.718을 적용하여 지수적이고 비례적인 함수의 형태로 나타내었다.

이와 같은 데이터를 기반으로 도출된 연신율 및 평균 항복강도에 대한 지수함수 형태의 실험식은 각각 식(7) 과 식(8)에 제시하였다.

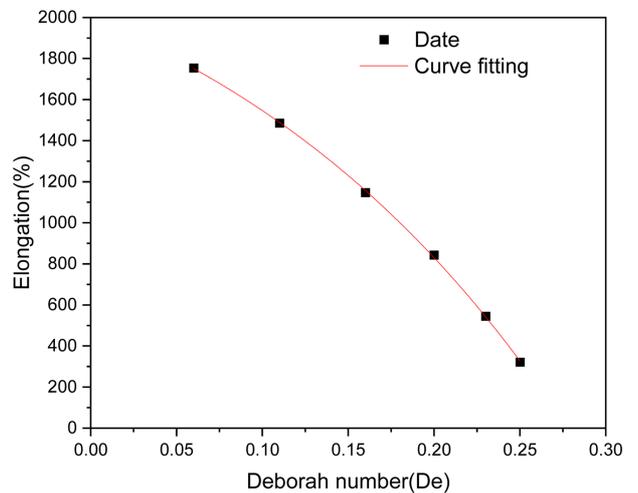
$$y = 2524.85 \times e^{-6.04x} \tag{7}$$

$$y = 286775.09 \times e^{0.02x} - 286588.07 \tag{8}$$

이러한 실험식을 기반으로 Fig. 15에 제시된 바와 같이 이 모델을 통해 압출 조건만으로도 고분자 튜브의 기계적 물성을 사전에



(a) Deborah number-based curve fitting of mean average yield strength in polymer tubing



(b) Deborah number-based curve fitting of elongation in polymer tubing

Fig. 14 Exponential curve fitting of mechanical properties of polymer tubing based on deborah number

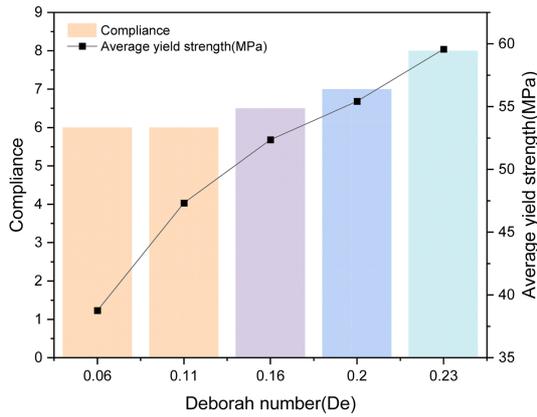
추정할 수 있고 해당 물성이 풍선에 잔류함을 고려 튜브 물성에 대응하는 풍선의 팽창 순응도를 간접적으로 예측할 수 있다.

본 모델은 공칭응력(Nominal Pressure) 기준으로 하여 대응하였으며 상세한 데이터는 Table 7에 나타내었다.

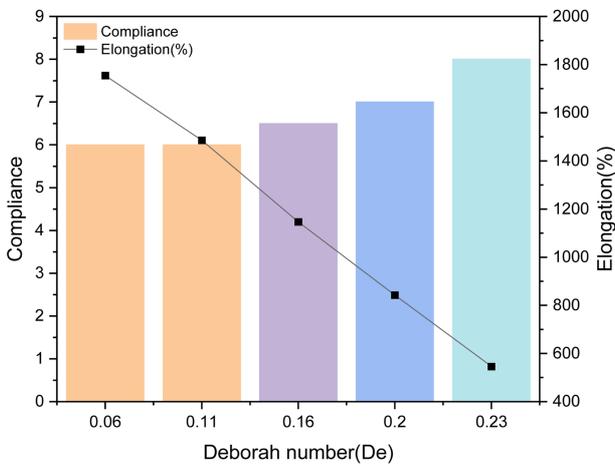
이를 통해 풍선의 성능을 정량적으로 평가하는 데 유용한 기반을 제공하며 결론적으로, 본 연구는 고분자 튜브의 압출 공정 조건이 최종 풍선 제품의 물성에 실질적인 영향을 미친다는 점을 실험적으로 입증하였다.

5. 결론

- (1) 본 연구에서는 고분자 튜브의 압출 공정 조건 변화가 풍선의 기계적 특성 및 컴플라이언스에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.



(a) Deborah number-based mean average yield strength response of np balloon-grade polymer tubes



(b) Deborah number-based elongation response of np balloon-grade polymer tubes

Fig. 15 Compliance-related average yield strength and elongation of balloon-grade polymer tubes by deborah number

Table 7 Mechanical properties of polymer tubes with balloon Compliance indicators by deborah number

Deborah number [De]	Average yield strength [MPa]	Elongation [%]	Nominal pressure [NP]
0.06	38.76	1755	6
0.11	47.32	1486	6
0.16	52.36	1147	6.5
0.2	55.42	843	7
0.23	59.42	546	8

Nylon 12를 기반으로 외경 1.2 mm, 내경 1.0 mm의 고분자 튜브를 다양한 드로잉 조건에서 압출하여 배향성이 상이한 6종의 시편을 제작하였고 이를 동일한 조건에서 블로우 성형하여 풍선을 제조하였다.

- (2) 압출 조건이 증가함에 따라 튜브의 연신율은 감소하고, 항복강도 및 탄성계수는 증가하였으며, 이러한 물성 변화는 풍선 성형 이후에도 일관되게 유지되었다.

특히 Condition 6의 경우 연신율이 약 400% 이하로 측정되며 풍선 성형에 실패하였고 이를 통해 풍선 성형이 가능한 고분자 튜브의 연신율 하한선은 약 400% 이상임을 확인할 수 있었다.

이는 압출 공정 조건이 과도하게 높을 경우 기계적 강성은 증가하더라도 풍선 성형이 불가능해질 수 있다는 제조적 한계를 시사한다.

- (3) 압출 공정 조건을 무차원 수치인 Deborah Number로 정량화하였으며, 이를 기반으로 평균 항복강도 및 연신율에 대해 각각 지수함수 형태의 예측 모델을 구축하였다.

이로써 압출 조건만으로도 고분자 튜브의 물성을 사전에 예측할 수 있으며 해당 물성이 풍선 성형 후에도 유지됨을 바탕으로 풍선의 팽창 순응도(Compliance)를 간접적으로 추정할 수 있게 되었다.

- (4) 본 연구는 고분자 튜브의 압출 공정 조건이 최종 풍선 제품의 물성에 실질적인 영향을 미친다는 점을 실험적으로 입증하였으며, Deborah Number 기반의 정량적 예측 모델을 통해 풍선 성능의 사전 예측 및 공정 최적화가 가능한 정량적 접근 방법을 제시하였다. 이는 향후 의료용 풍선 카테터의 설계 및 제조 공정에서 품질 예측 및 공정 제어의 일관성을 확보하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업 통상자원부의 소재부품기술개발사업(No. RS-2024-00442831)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Tan, K. H., Henderson, R. A., Sulke, N., Cooke, R. A., Karani, S., Sowton, E., (1994), Percutaneous transluminal coronary angioplasty in patients with prior coronary artery bypass grafting: Ten years' experience, *Catheterization and Cardiovascular Diagnosis*, 32(1), 11-17.
2. Baltayiannis, N., Michail, C., Lazaridis, G., Anagnostopoulos, D., Baka, S., Mpoukovinas, I., Karavasilis, V., Lampaki, S., Papaiwannou, A., Karavergou, A., (2015), Minimally invasive procedures, *Annals of Translational Medicine*, 3(4), 55.
3. Rattner, D. W., (1999), Future directions in innovative minimally invasive surgery, *The Lancet*, 353, S12-S15.
4. Sadeghi, F., Aji, A., Carreau, P. J., (2007), Analysis of row nucleated lamellar morphology of polypropylene obtained from the cast film process: Effect of melt rheology and process conditions, *Polymer Engineering & Science*, 47(7), 1170-1178.

5. Medical Device and Diagnostic Industry, Extruded tubing designed for balloon production. <https://www.mddionline.com/components/extruded-tubing-designed-for-balloon-production>
6. Sadeghi, F., Le, D., (2021), Characterization of polymeric biomedical balloon: Physical and mechanical properties, *Journal of Polymer Engineering*, 41(9), 799-807.
7. Sadeghi, F., Fereydoon, M., Aji, A., (2013), Rheological, mechanical and barrier properties of multilayer nylon/clay nanocomposite film, *Advances in Polymer Technology*, 32(S1), E53-E64.
8. Moscucci, M., Feldman, M. D., (2013), *Grossman & Baim's cardiac catheterization, angiography, and intervention: 8th Eds.*, Wolters Kluwer Health.
9. Med Device Online, An Introduction to polymeric materials for medical devices. <https://www.meddeviceonline.com/doc/an-introduction-to-polymeric-materials-for-medical-devices-0001>
10. Peacock, A., (2000), *Handbook of polyethylene: structures: properties, and applications*, Taylor & Francis.
11. Shakiba, M., Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Jouybar, S., Bigham, A., Zare, M., Abdouss, M., Moaref, R., Ramakrishna, S., (2021), Nylon—a material introduction and overview for biomedical applications, *Polymers for Advanced Technologies*, 32(9), 3368-3383.
12. Sperling, L. H., (2006), *Introduction to physical polymer science*, John Wiley & Sons.
13. ISO 10993-1, (2025), *Biological evaluation of medical devices, Part 1: Evaluation and testing within a risk management process*.
14. Polychronopoulos, N. D., Papathanasiou, T., (2015), A study on the effect of drawing on extrudate swell in film casting, *Applied Rheology*, 25(4), 1-7.
15. Tang, D., Marchesini, F. H., Cardon, L., D'hooge, D. R., (2020), The impact of upstream contraction flow on three-dimensional polymer extrudate swell from slit dies, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 282, 104337.
16. Yang, C., Zhang, D., Nie, M., Wang, Q., Guo, Y., (2022), Biaxial reinforcements for polyethylene medical-tubes via helical convergent flow, *Journal of Polymer Research*, 29(10), 443.
17. Polychronopoulos, N. D., Vlachopoulos, J., *Polymer processing and rheology*, in: *Functional polymers*, Springer, 1-47.
18. Fu, X., He, H., Wang, W., (2017), Numerical simulation of forming process conditions and wall thickness for balloon, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 808-818.
19. Elmer, K. M., Bean, M. J., Uretsky, B. F., Stephens, S. E., Jensen, H. K., Jensen, M. O., (2022), Customizable angioplasty balloon-forming machine: Towards precision medicine in coronary bifurcation lesion interventions, *Journal of Cardiovascular Translational Research*, 15(5), 1119-1128.
20. Simhambhatla, M. V., (2003), Balloon blowing process with metered volumetric inflation, US6620128B1.
21. Simpson J. A., Nelson S. A., Durcan, J. P., (2014), Catheter balloon and method for forming same, US8703260B2.
22. Ma, N., Liu, W., Ma, L., He, S., Liu, H., Zhang, Z., Sun, A., Huang, M., Zhu, C., (2020), Crystal transition and thermal behavior of Nylon 12, *e-Polymers*, 20(1), 346-352.
23. Spaggiari, A., Orlandini, S., (2024), Mechanical strength of additive manufactured and standard polymeric components joined through structural adhesives, *Polymers*, 16(21), 3036.
24. Geith, M. A., Eckmann, J. D., Haspinger, D. C., Agrafiotis, E., Maier, D., Szabo, P., Sommer, G., Schratzenstaller, T. G., Holzapfel, G. A., (2020), Experimental and mathematical characterization of coronary polyamide-12 balloon catheter membranes, *PLOS One*, 15(6), e0234340.
25. ISO 527-1, (2019), *Plastics—Determination of tensile properties, Part 1: General principles*.
26. Daver, F., Girard, P., Thibault, F., de Grandpre, C., DiRaddo, R., (2010), Enhancement of angioplasty balloon performance through annealing, *Proceedings of the 26th Polymer Processing Society Annual Meeting*, 07-10.

**Jin Su Lee**

M.S in the School of Mechanical Engineering Kyungpook National University and Korea Institute of Industrial Technology. His research interests include minimally invasive devices, polymer extrusion, and balloon forming.

E-mail: dlwlstn7@kitech.re.kr

**Gyu Man Kim**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is MEMS and its applications.

E-mail: gyuman.kim@knu.ac.kr

**Sungkwon Lee**

Technician in the Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are inspection & analysis of medical devices.

E-mail: wojinkim@kitech.re.kr

**Woojin Kim**

Principal Researcher in the Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are minimally invasive medical device and polymer extrusion.

E-mail: wojinkim@kitech.re.kr

**Euntaek Lee**

Assistant Professor in the Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests are heat transfer and fluid flow analysis.

E-mail: euntaek@kumoh.ac.kr

## 압출 분주 시스템을 이용한 텅스텐 평면 패턴의 잉크직접인쇄

# Direct Ink Writing of Tungsten Planar Patterns by Extrusion-based Dispensing System

이민형<sup>1</sup>, 최승현<sup>1</sup>, 유재욱<sup>1</sup>, 박지수<sup>1</sup>, 권혁천<sup>2</sup>, 이호창<sup>2</sup>, 오성욱<sup>2</sup>, 최승곤<sup>2</sup>, 최인구<sup>2</sup>, 이길용<sup>1,3,#</sup>  
Min-Hyeong Lee<sup>1</sup>, Seung-Hyeon Choi<sup>1</sup>, Jae-Wook Yu<sup>1</sup>, Ji-Su Park<sup>1</sup>, Hyuk-Chun Kwon<sup>2</sup>,  
Ho-Chang Lee<sup>2</sup>, Seong-Uk Oh<sup>2</sup>, Seung-Gon Choi<sup>2</sup>, In-Gu Choi<sup>2</sup>, and Gil-Yong Lee<sup>1,3,#</sup>

<sup>1</sup> 국립금오공과대학교 대학원 항공기계전자융합전공 (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology)

<sup>2</sup> (주)원익큐엔씨 (WONIK QnC Corporation.)

<sup>3</sup> 국립금오공과대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

# Corresponding Author / E-mail: [gylee@kumoh.ac.kr](mailto:gylee@kumoh.ac.kr), TEL: +82-54-478-7293

ORCID: 0000-0002-9507-746X

KEYWORDS: Planar pattern (평면 패턴), Direct ink writing (잉크직접인쇄), Extrusion-based dispensing (압출분주), Motion control (모션제어)

*We present an extrusion-based dispensing system designed for the planar patterning of tungsten ink through direct ink writing. This system achieves uniform ink deposition by precisely controlling the dispensing pressure and the motion of the substrate along predefined writing paths. To assess the impact of pressure on pattern geometry, we fabricated line patterns under various pressure conditions and analyzed their widths and thicknesses. To gain further control over pattern width, we employed an adjacent line overlapping strategy, where several lines, each approximately 200  $\mu\text{m}$  wide, were written with partial overlap. We quantitatively verified the relationship between the number of adjacent lines and the resulting pattern width. This method was also adapted to create planar patterns with complex geometries, including variable widths, curved paths, and discontinuous features. The resulting patterns demonstrated uniform quality and precision. These findings confirm that our proposed system provides a versatile solution for fabricating planar conductive patterns with intricate geometries, suitable for applications in printed electronics and interconnects.*

Manuscript received: June 12, 2025 / Revised: August 8, 2025 / Accepted: August 18, 2025

### 1. Introduction

The demand for precise and versatile patterning techniques has steadily increased with the rapid advancement of electronic, sensing, and energy devices [1-7]. As functional devices require increasingly tunable geometries, traditional fabrication techniques face limitations in terms of process complexity, material compatibility, and geometric flexibility [3,8-14]. Photolithography, while offering high resolution, relies on rigid processes and cleanroom environments, making it less suitable for cost-effective or scalable production [3,8,9,15]. Screen and

inkjet printing provide greater flexibility, yet each comes with trade-offs in terms of ink viscosity, resolution, and pattern precision [7,16,17]. To address these limitations, extrusion-based direct ink writing (DIW) has emerged as a promising alternative for printing high-viscosity, metal-rich pastes [4,18-21]. Unlike droplet-based methods, DIW enables continuous deposition with minimal clogging [5,10,22]. These characteristics are well suited for applications requiring thick, uniform, and durable conductive patterns, such as printed electronics, heaters, and interconnects [4,5,19,23].

Here, we introduce an extrusion-based dispensing system for the

planar patterning of tungsten ink. The system consists of a dispensing unit to regulate dispensing pressure ( $P$ ), an XY motion stage for the substrate motion, and a control PC to coordinate both dispensing and motion.  $P$  was varied to study its effect on pattern geometry, particularly width and thickness. Based on a line pattern of approximately 200  $\mu\text{m}$  in width, an adjacent line overlapping strategy was applied to modulate the overall pattern width by increasing the number of adjacent lines. This method was further extended to fabricate planar patterns with complex geometries, including variable widths, curved paths, and discontinuous features. The proposed method enables the straightforward fabrication of planar patterns with complex geometries, demonstrating its applicability to various planar electronic structures.

## 2. Experimental Setup

Fig. 1(a) shows a schematic of the extrusion-based dispensing system that was used in this study for DIW of planar patterns. Fig. 1(b) presents a photo of the experimental setup. It consists of a dispensing unit (ML-5000XII, Musashi Engineering) to regulate the  $P$ , a metallic nozzle with an inner diameter of 100  $\mu\text{m}$  for dispensing tungsten ink, and an XY motion stage (OSMS26-300, Sigma Koki) to control substrate motion. The PC controls stage motion and dispensing. The syringe contained tungsten ink (Winner Technology), which was then dispensed onto alumina substrates. The writing path was segmented with a spacing of 100  $\mu\text{m}$  between neighboring points, and the stage moved at a constant speed between these points. The average writing speed along the entire path was approximately 0.7 mm/s. This segmented approach is particularly advantageous in curves, where maintaining smooth motion is critical. Although momentary acceleration and deceleration may occur between neighboring points, their influence was negligible in our experiments. Further optimization of the writing motion will be studied in the future work. A camera provided real-time visual monitoring. The tungsten ink had a viscosity of approximately 50,000 mPa·s (as provided by the manufacturer), and all experiments were conducted at room temperature.

Figs. 2 shows the procedure for fabricating single lines using the extrusion-based dispensing setup shown in 1. As shown in Fig. 2(a), the process begins with the dispensing of tungsten ink through the nozzle. The motion stage then moves along a predefined writing path (Fig. 2(b)), and dispensing stops once it reaches the specified length (15 mm) (Fig. 2(c)). The fabricated line pattern is shown in Fig. 2(d).

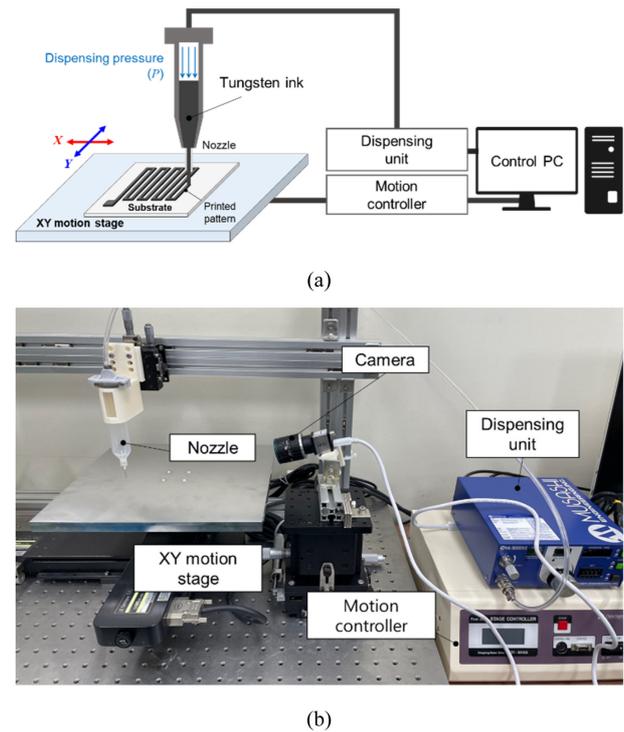


Fig. 1 (a) Schematic of the extrusion-based dispensing system and (b) Photo of the experimental setup

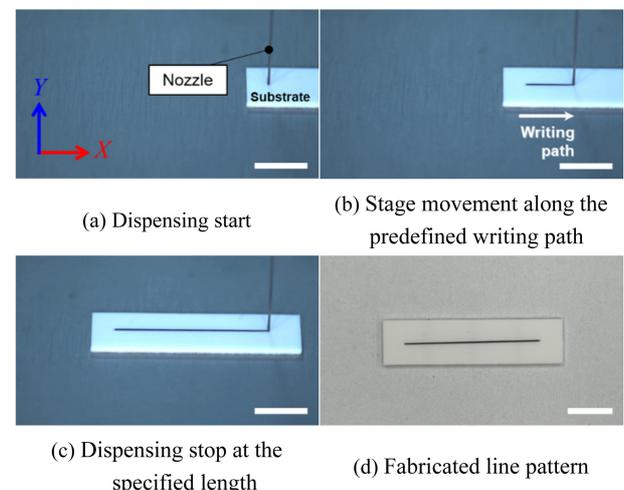


Fig. 2 Fabrication procedure of a line pattern using the extrusion-based dispensing setup. Scale bars are 5 mm in (a)-(d)

## 3. Results and Discussion

### 3.1 Effect of Dispensing Pressure on Pattern Quality

To investigate the effect of  $P$  on the geometry of the fabricated patterns, the width and height of line patterns were measured under varying  $P$  conditions: 300, 400, 500, and 600 kPa, as shown in Fig. 3(a). Higher  $P$  increased the ink flow rate, leading to wider and thicker line patterns. Fig. 3(b) presents optical microscope images

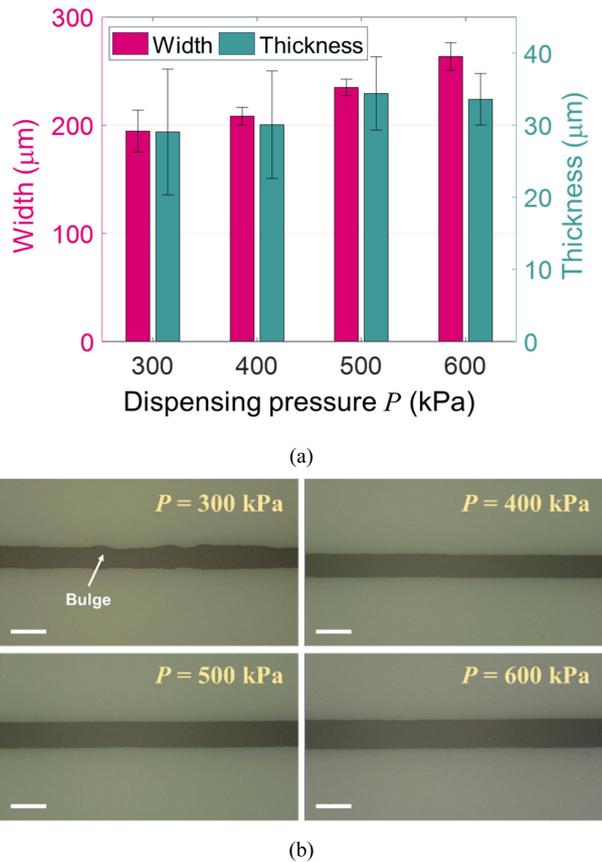


Fig. 3 (a) Width and height measurements of line patterns fabricated under varying dispensing pressures (300, 400, 500, and 600 kPa) and (b) Optical microscope images of line patterns fabricated under the same conditions as in (a). Scale bars are 300 μm in (b)

of line patterns fabricated under the same conditions, illustrating the influence of  $P$  on pattern quality. At 300 kPa, bulge defects were observed, likely due to insufficient ink flow relative to the writing speed [10,24]. At 400 kPa, uniform patterns with a width of approximately 200 μm were obtained. Despite using a nozzle with a 100 μm inner diameter, the ink spread laterally after extrusion, increasing the pattern width to approximately 200 μm. However, by adjusting parameters such as writing speed, nozzle height above the substrate, and  $P$ , it is expected that the pattern width can be further reduced. The influence of these parameters will be investigated in future work. Further increases in  $P$  resulted in wider patterns, but no noticeable change in pattern quality was observed. These results indicate that control of  $P$  is effective for adjusting pattern geometry. However, the achievable pattern width is constrained by the nozzle diameter and the rheological behavior of the ink [25,26], making it difficult to fabricate planar patterns wider than a line pattern. To overcome these limitations, we implemented an adjacent line overlapping strategy to modulate pattern width and fabricate planar patterns.

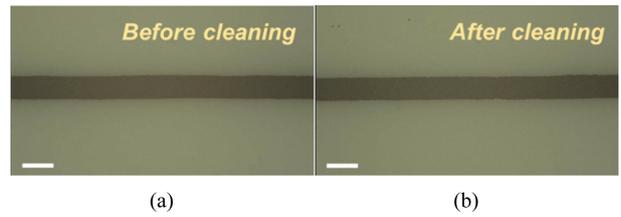


Fig. 4 Optical microscope images of the pattern (a) before and (b) after ultrasonic cleaning. Scale bars are 300 μm in (a) and (b)

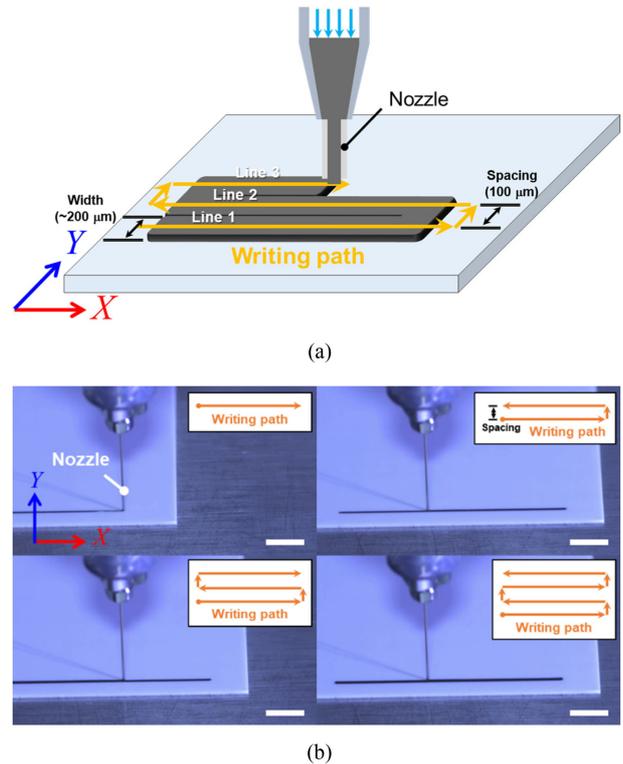


Fig. 5 (a) Schematic of the adjacent line overlapping strategy and (b) In-situ images capturing the fabrication of planar patterns with adjacent lines. Inset in (b): schematic of the writing path used in the fabrication process. Scale bars are 5 mm in (b)

### 3.2 Adhesion Test of Tungsten Patterns

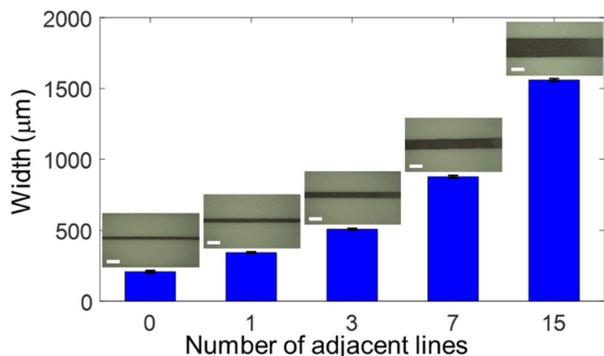
Additionally, to evaluate the adhesion of the patterns to the substrate, samples fabricated at 400 kPa were treated with ultrasonic cleaning at 40 kHz for 5 minutes. Figs. 4(a) and 4(b) show optical microscope images of the patterns before and after cleaning. No notable changes or defects were observed, indicating sufficient adhesion of the pattern to the substrate.

### 3.3 Planar Pattern Fabrication via Adjacent Line Overlapping

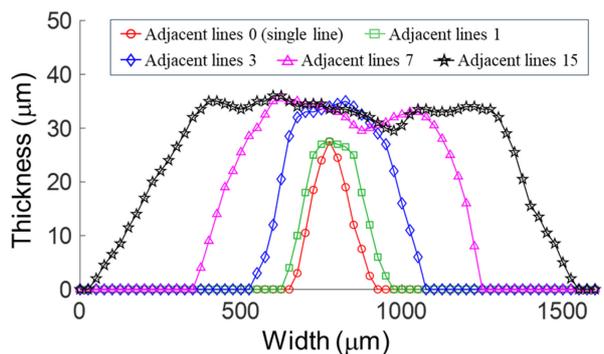
Fig. 5(a) schematically illustrates the adjacent line overlapping strategy used in this study. To fabricate planar patterns wider than a



(a)



(b)

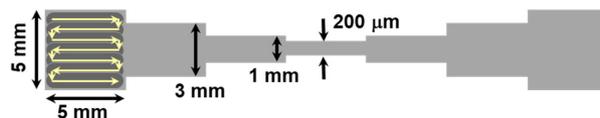


(c)

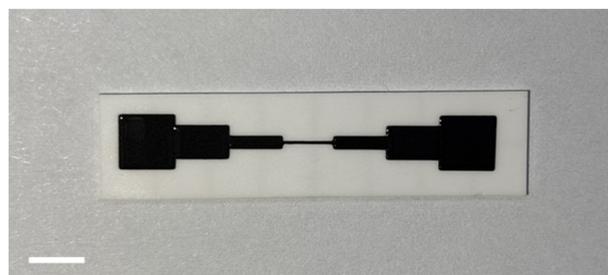
Fig. 6 (a) Planar patterns fabricated by sequentially overlapping 0 (single line), 1, 3, 7, and 15 adjacent lines, (b) Pattern widths as a function of the number of adjacent lines. Insets in (b): corresponding optical microscope images. Scale bars are 5 mm in (a), 1 mm in the insets of (b). (c) Thickness profile measurements of planar patterns fabricated with 0 (single line), 1, 3, 7, and 15 adjacent lines

single line, several lines were sequentially written with a uniform spacing of 100 μm. Each adjacent line, approximately 200 μm in width, was written to partially overlap the previous one, forming a planar pattern with increased width. Fig. 5(b) presents snapshot images showing the fabrication of planar patterns with a single line and up to three adjacent lines using the proposed strategy. During this process, the nozzle followed the writing path shown in the inset of Fig. 5(b).

Fig. 6(a) shows planar patterns fabricated using the adjacent line overlapping strategy with varying numbers of adjacent lines: 0



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Schematic diagram of a planar pattern with variable width and (b) Fabricated planar pattern with variable width. Scale bar is 5 mm in (b)

(single line), 1, 3, 7, and 15. As the number of adjacent lines increased, the overall pattern width also increased, demonstrating the effectiveness of the proposed strategy. Fig. 6(b) presents measured pattern widths and corresponding optical microscope images, confirming uniform pattern widths. Fig. 6(c) shows the thickness profiles of the same patterns, indicating how pattern thickness changes with varying numbers of adjacent lines. The thickness increased as more lines overlapped, due to increased material deposition. To further demonstrate the versatility of this approach, we applied it to fabricate planar patterns with variable widths and complex geometries.

### 3.4 Fabrication of Planar Patterns with Variable Width and Complex Geometries

To demonstrate the capability of the proposed system to fabricate patterns with variable widths, a planar pattern was designed. Fig. 7(a) shows a design in which the pattern width varies along its length. Fig. 7(b) presents the fabricated pattern based on this design, where the width was controlled by adjusting the number of adjacent lines. These results demonstrate that modulating the number of adjacent lines enables precise control of pattern width and provides a straightforward method for fabricating patterns with variable widths. To further demonstrate the applicability of the adjacent line overlapping strategy, planar patterns with more complex geometries were fabricated. Figs. 8(a)-8(c) show representative patterns, including a zigzag pattern, letter patterns, and an animal-shaped pattern. The corresponding reference images are shown as insets for comparison. These patterns include

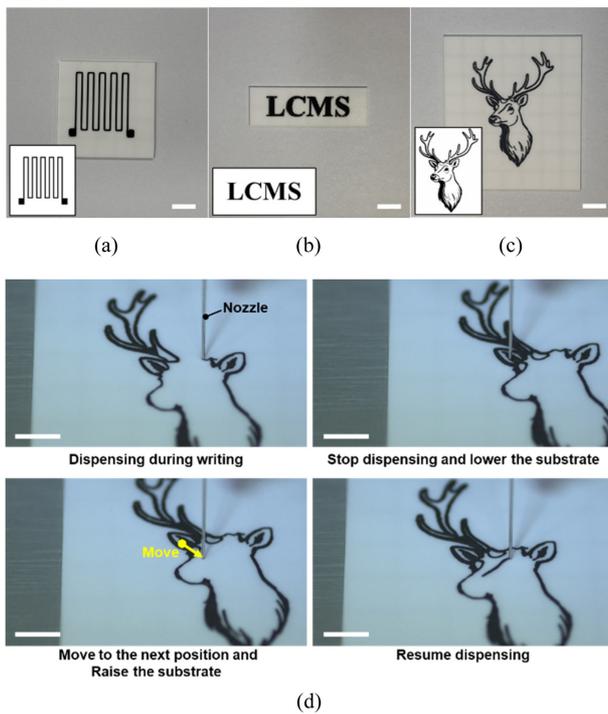


Fig. 8 Representative patterns using the adjacent line overlapping strategy: (a) a zigzag pattern, (b) a letter pattern, (c) an animal-shaped pattern, and (d) in-situ images of the dispensing sequence for the discontinuous features in (c). Insets in (a)-(c): corresponding reference images. Scale bars are 5 mm in (a)-(d)

complex geometries such as curved paths, directional changes, and discontinuous features.

Figs. 8(d) shows snapshot images of the in-situ dispensing sequence used to fabricate the discontinuous features in 8(c). Along the writing path, dispensing was stopped at each discontinuous feature. To prevent contact between the nozzle and the previously written pattern, the substrate was lowered by 1 mm under the control of the Z motion stage (OSMS40-5ZF, Sigma Koki). The nozzle was then moved to the next position, the substrate was returned to its original height, and dispensing was resumed. The high viscosity of the tungsten ink caused a slight delay in material extrusion through the nozzle after dispensing was resumed. To address this issue, a pause of 300 ms was applied before initiating nozzle movement. We note that no clogging was observed in our experiments for 3 hours. This controlled sequence enabled the fabrication of discontinuous features without nozzle interference. These results demonstrate that the proposed system enables planar pattern fabrication with complex geometries, including variable widths, curved paths, and discontinuous features.

#### 4. Conclusions

In summary, we introduced an extrusion-based dispensing system for the planar patterning of tungsten ink using direct ink writing. By precisely controlling the dispensing pressure ( $P$ ) and substrate motion, the system enabled uniform ink deposition along predefined writing paths. To investigate the effect of  $P$  on pattern geometry, line patterns were fabricated under varying pressure conditions, and their widths and thicknesses were measured. To expand the achievable pattern width, an adjacent line overlapping strategy was implemented, wherein several lines approximately 200  $\mu\text{m}$  in width were written with partial overlap. The relationship between the number of adjacent lines and the resulting pattern width was quantitatively verified. Using this approach, planar patterns with variable widths and complex geometries, such as curved paths and discontinuous features, were successfully fabricated. Discontinuous features were fabricated by lowering the substrate along the Z-axis to prevent nozzle interference. The fabricated patterns exhibited uniform quality and precision. These results demonstrate that the proposed system provides a versatile solution for fabricating planar conductive patterns with complex geometries, applicable to printed electronics and interconnects. While the system enables fabrication of patterns for such applications, the printed tungsten patterns in this study were not electrically conductive, as no sintering process was applied. Future work will focus on sintering of the pattern and evaluation of its electrical performance to verify its applicability to electronic devices. In addition, efforts will include improving pattern resolution, optimizing motion control for more complex geometries, and validating the method with other materials and substrates to broaden its applicability.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by WONIK QnC Corporation, the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2024-00459127), the grant funded by Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea) and the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) (Grant No. 20017462), the Brain Korea 21 FOUR Project (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology), and the Gyeongsangbuk-do RISE (Regional Innovation System & Education) project (Specialized Industry Scale-up unit).

## REFERENCES

- Han, X., Lin, X., Sun, Y., Huang, L., Huo, F., Xie, R., (2024), Advancements in flexible electronics fabrication: Film formation, patterning, and interface optimization for cutting-edge healthcare monitoring devices, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(41), 54976-55010.
- Abdullah, M. R., Peng, Z., Rajendren, V. B., Ahmad, F., Shah, S. S. A., Zia, A. W., Shehzad, K., (2025), Comprehensive review of 3D/4D printing of soft materials, methods and applications, *Applied Materials Today*, 43, 102667.
- Huang, Z., Shao, G., Li, L., (2023), Micro/nano functional devices fabricated by additive manufacturing, *Progress in Materials Science*, 131, 101020.
- Zeng, L., Ling, S., Du, D., He, H., Li, X., Zhang, C., (2023), Direct ink writing 3D printing for high-performance electrochemical energy storage devices: A minireview, *Advanced Science*, 10(32), 2303716.
- Hou, Z., Lu, H., Li, Y., Yang, L., Gao, Y., (2021), Direct ink writing of materials for electronics-related applications: A mini review, *Frontiers in Materials*, 8, 647229.
- Jo, H., Park, J. S., Lim, H. Y., Lee, G. Y., (2023), Laser sintered silver nanoparticles on the PDMS for a wearable strain sensor capable of detecting finger motion, *ACS Applied Nano Materials*, 6(24), 22998-23011.
- Lee, G. Y., Kim, M. S., Min, S. H., Kim, H. S., Kim, H. J., Keller, R., Ihn, J. B., Ahn, S. H., (2019), Highly sensitive solvent-free silver nanoparticle strain sensors with tunable sensitivity created using an aerodynamically focused nanoparticle printer, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(29), 26421-26432.
- Qiu, M., Du, W., Zhou, S., Cai, P., Luo, Y., Wang, X., Zhao, J., (2023), Recent progress in non-photolithographic patterning of polymer thin films, *Progress in Polymer Science*, 142, 101688.
- Huang, Q., Zhu, Y., (2019), Printing conductive nanomaterials for flexible and stretchable electronics: A review of materials, processes, and applications, *Advanced Materials Technologies*, 4(5), 1800546.
- van Hazendonk, L. S., Vonk, C. F., van Grondelle, W., Vonk, N. H., Friedrich, H., (2024), Towards a predictive understanding of direct ink writing of graphene-based inks, *Applied Materials Today*, 36, 102014.
- Fan, D., Lee, B., Coburn, C., Forrest, S. R., (2019), From 2D to 3D: Strain-and elongation-free topological transformations of optoelectronic circuits, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(10), 3968-3973.
- Lee, G. S., Lee, S. H., Lee, G. Y., (2023), Tunable mechanical properties of vectran liquid crystal polymer (LCP) short fiber-reinforced soft composite, *Fibers and Polymers*, 24(1), 207-220.
- Tuyboyov, O. V., Lee, G. S., Lee, G. Y., (2023), Multi-mode soft composite bending actuators based on glass fiber textiles interwoven with shape memory alloy wires: Development and use in the preparation of soft grippers, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10(5), 1263-1280.
- Lee, G. Y., Lee, S. Y., (2023), Design, fabrication, and control of a rotary manipulator driven by twisted shape memory alloy (SMA) wires, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(8), 665-673.
- Zhu, Y. M., Tang, J., Jin, X., Pan, T. R., Chang, Y., Yang, Z. G., (2020), Additive preparation of conductive circuit based on template transfer process using a reusable photoresist, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(6), 7679-7689.
- You, K., Wang, Z., Lin, J., Guo, X., Lin, L., Liu, Y., Huang, W., (2024), On-demand picoliter-level-droplet inkjet printing for micro fabrication and functional applications, *Small*, 20(46), 2402638.
- Wu, G., Wu, L., Zhang, H., Wang, X., Xiang, M., Teng, Y., Gao, L., (2024), Research progress of screen-printed flexible pressure sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 115512.
- Gupta, V. K., Kumar, N., (2024), Direct ink writing of copper-based highly conductive tracks on flexible substrate for electronic applications, *Materials Letters*, 372, 137008.
- Zhang, P., Sun, Q., Fang, S., Guo, H., Liu, K., Zhang, L., Wang, M., (2024), Fabrication of nano copper highly conductive and flexible printed electronics by direct ink writing, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(1), 1847-1860.
- Hossain, M. J., Tabatabaei, B. T., Kiki, M., Choi, J. W., (2025), Additive manufacturing of sensors: A comprehensive review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 12(1), 277-300.
- Romario, Y. S., Bhat, C., Ramezani, M., Jiang, C. P., (2025), Marine waste management of oyster shell waste as reinforcement for clay additive manufacturing components, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 12(1), 117-134.
- Park, Y. G., Yun, I., Chung, W. G., Park, W., Lee, D. H., Park, J. U., (2022), High-resolution 3D printing for electronics, *Advanced Science*, 9(8), 2104623.
- Zhao, Z., Liu, W., Liu, H., (2025), Flexible and durable direct ink writing 3D-printed conductive fabrics for smart wearables, *ACS Omega*, 10(14), 14138-14149.
- Jiang, Y., Wang, X., Plog, J., Yarin, A. L., Pan, Y., (2021), Electrowetting-assisted direct ink writing for low-viscosity liquids, *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 173-180.
- Lewis, J. A., (2006), Direct ink writing of 3D functional materials, *Advanced Functional Materials*, 16(17), 2193-2204.
- Abas, M., Salman, Q., Khan, A. M., Rahman, K., (2019), Direct ink writing of flexible electronic circuits and their characterization, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 1-11.



**Min-Hyeong Lee**

M. S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests are additive manufacturing, robotics, and vibration.  
E-mail: 20246060@kumoh.ac.kr



**Ho-Chang Lee**

Manager in Materials R&D Center, WONIK QnC Corporation. His research interests are ceramic materials and electronic applications  
E-mail: ceramic\_lhc@wonik.com



**Seung-Hyeon Choi**

M. S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Her research interests are additive manufacturing and robotics.  
E-mail: tmdgus0619@kumoh.ac.kr



**Seong-Uk Oh**

Manager in Materials R&D Center, WONIK QnC Corporation. His research interests are ceramic materials and electronic applications  
E-mail: dtr630@wonik.com



**Jae-Wook Yu**

M. S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests are additive manufacturing and robotics.  
E-mail: dbwodnr97@kumoh.ac.kr



**Seung-Gon Choi**

Manager in Materials R&D Center, WONIK QnC Corporation. His research interests are ceramic materials and electronic applications  
E-mail: seunggon@wonik.com



**Ji-Su Park**

M. S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Her research interests are additive manufacturing and machine vision.  
E-mail: bjs9156@kumoh.ac.kr



**In-Gu Choi**

Manager in Materials R&D Center, WONIK QnC Corporation. His research interests are ceramic materials and electronic applications  
E-mail: acecig90@wonik.com



**Hyuk-Chun Kwon**

Team leader in Materials R&D Center, WONIK QnC Corporation. His research interests are ceramic materials and electronic applications.  
E-mail: hckwon@wonik.com



**Gil-Yong Lee**

Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests are integrated manufacturing system, sensors/actuators, composites, vibration, control, and additive manufacturing.  
E-mail: gylee@kumoh.ac.kr



# 액화 천연가스 화물 펌프 내 유동 특성에 의한 인두서 최적설계

## Optimal Design of Inducer by Flow Characteristics in LNG Cargo Pump

송지훈<sup>1</sup>, 이동렬<sup>2,#</sup>  
Jihun Song<sup>1</sup> and Dong-Ryul Lee<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국항공우주산업(주) 헬기체계해석팀 (Rotorcraft System Analysis Team, Korea Aerospace Industries)

<sup>2</sup> 대구가톨릭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Daegu Catholic University)

# Corresponding Author / E-mail: dlee@cu.ac.kr, TEL: +82-53-850-2717, FAX: +82-53-850-2710

ORCID: 0000-0002-7555-2745

KEYWORDS: LNG pump (LNG 펌프), Inducer (인두서), CFD (전산유체역학), Suction and discharge performance (흡입 및 토출 성능), Pressure loss coefficient (압력손실계수), Pressure drop (압력강하)

*The study examined the flow characteristics within an LNG cargo pump, specifically focusing on how variations in the geometry of the inducer and inducer casing affect pump performance. LNG cargo pumps are essential for transferring LNG from carriers' storage tanks to onshore facilities. The inducer significantly influences the pump's suction performance, making it crucial for efficient LNG transfer. Given that the inducer often operates under challenging conditions, computational fluid dynamics (CFD) analysis was conducted on various geometric configurations. The analyses assessed velocity, pressure, efficiency, head, and pressure loss coefficient. Among the configurations studied, Case 4 exhibited the lowest efficiency and head, although the differences compared to other cases were minimal. Notably, Case 4 demonstrated more uniform pressure distributions and stable velocity profiles. Additionally, its pressure loss coefficients were 34.9% and 10.9% lower than those of Case 1 and Case 2, respectively, indicating enhanced flow stability and reduced energy loss. Overall, within the design parameters of this study, Case 4 emerged as the most optimized configuration for stable LNG transport.*

Manuscript received: June 16, 2025 / Revised: December 4, 2025 / Accepted: December 17, 2025

### 1. 서론

석유, 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG), 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 등과 같은 액체 상태의 화물을 탱크 내부로 적재 또는 육상 기지로 하역하기 위해 유체에 압력을 가해주는 기계를 Cargo 펌프라 한다. Cargo 펌프는 일반적인 펌프와 달리 전체가 액체에 잠긴 상태로 운전을 하고, 탱크 바닥으로부터 일정 간격 위에 수직으로 설치된다. 이때 탱크 내의 잔류 LNG를 최소화하는 것이 핵심적인 설계 기술 중 하나이다. 따라서, LNG를 최대한 많이 생산함과 동시에 캐비테이션을 회피하기 위한 수단으로 인두서가 장착된다. 적절한 인두서 설계는 1차적으로 흡입구에서 발생하는 캐비테이션을 소멸시켜 수두와 유량이 감소되는 것을 방지한다. 그러나, 인두서의

기하학적 형상 등이 유동 특성의 안정성에 미치는 영향에 대한 분석 연구는 부족한 실정이다. 이를 위해 형상 설계 변수를 활용하여 적절한 비교를 통한 데이터 제시가 요구된다.

LNG 탱크 바닥, 인두서의 입구 형상, 운전 속도에 따른 흡입 성능, 효율, 캐비테이션 등의 다양한 연구가 활발히 진행되었다. 국내에서는 LNG 펌프 흡입 케이싱 홈 형상에 따른 흡입 성능 변화에 관한 연구[1], 탱크 바닥이 LNG 카고 펌프의 성능 및 캐비테이션 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구[2], 입구 형상에 따른 인두서의 흡입 성능에 관한 연구[3], 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)를 활용한 육상용 LNG 고압 다단 펌프의 Eye 및 Inter-stage 실링 유닛 형상에 관한 연구[4], LNG 펌프용 극저온 볼 베어링의 단상 및 이상 열전달 특성에 대한 수치 해석적 연구[5], LNG 펌프의 누설 유량 최소화를

위한 래버린스 실 형상의 수치적 연구[6], 선박용 LNG 공급시스템의 피스톤 펌프 유동 특성에 대한 수치 해석적 연구[7], LNG HPSO 펌프 지지 베어링의 윤활 유량 모델에 따른 로터 다이내믹스 해석 연구[8], LNG 연료 펌프 Labyrinth Seal의 누설량 및 동특성 해석[9] 등 LNG Cargo 펌프에 관한 성능분석 및 유동 특성의 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 LNG Cargo 펌프의 인듀서 및 인듀서 케이싱의 형상을 설계 변수로 두어 펌프의 유동 특성을 3차원으로 수치적 해석을 하고 이에 따라 LNG Cargo 펌프의 인듀서 형상이 미치는 압력, 속도, 압력손실계수 등을 파악하여 손실 및 성능 특성 변화를 비교하여 정량적인 값의 차이를 살펴보고 인듀서의 최적 설계에 관한 자료를 제시하는 것이 연구의 목적이다.

2. 설계 및 수치해석

LNG Cargo 펌프의 성능을 나타내는 관계식은 아래의 식과 같다.

$$H = \left( \frac{p_{out}}{\rho g} \right) - \left( \frac{p_{in}}{\rho g} + \frac{v_{in}^2}{2g} \right) \tag{1}$$

$$\eta = \frac{\rho g H Q}{T \omega} \tag{2}$$

식(1)은 수두(Head, H)와 식(2)는 효율(Efficiency, η)을 나타내며, 양정과 압력 간의 관계를 설명한다. 식(1)과 식(2)에서 p, v, T, ω, Q는 각각 압력, 속도, 토크, 각속도, 유량을 나타낸다.

2.1 수치모델과 격자생성

3차원 형상인 임펠러, 디퓨저는 ANSYS BladeGen V.14.5, 인듀서는 CATIA V.5 프로그램을 사용하여 형상을 구현하였다. Fig. 1은 실제 Cargo 펌프의 인듀서와 임펠러가 조립된 사진이다. 본 연구에서 사용된 LNG Cargo 펌프는 Figs. 2와 3으로 형상을 나타내었다. Fig. 2는 인듀서와 임펠러이고 Fig. 3은 어셈블리한 형상이다. 인듀서 각도 변화와 그에 대한 반경을 포함하여 인듀서 케이싱의 형상을 변수로 수치해석을 수행하였다. 인듀서의 각도와 케이싱 입구 반경을 설계 변수로 선정한 주요 목적은 LNG Cargo 펌프의 흡입성능에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소를 평가하는데 있다. Table 1에서는 설계 변수를 수치적으로 정리하였으며, 인듀서 각도의 변화와 각도에 따른 인듀서 케이싱 입구 형상의 변화를 총 4가지 Case로 해석을 수행하였다. 형상별 격자에 대한 의존도 검토를 완료하였고, 각 형상에 대한 격자수는 약 24만-30만 개의 범위로 생성되었다.

2.2 수치해석 방법 및 경계조건

상용 CFD 코드인 ANSYS CFX V.14.5가 복잡한 회전 기계의 유동 특성 및 수렴성에 장점이 있는 Cargo 펌프의 수치 해석적 연구에 사용되었다. LNG Cargo 펌프 내 레이놀즈 수(Re)는



Fig. 1 Impeller and inducer of LNG cargo pump

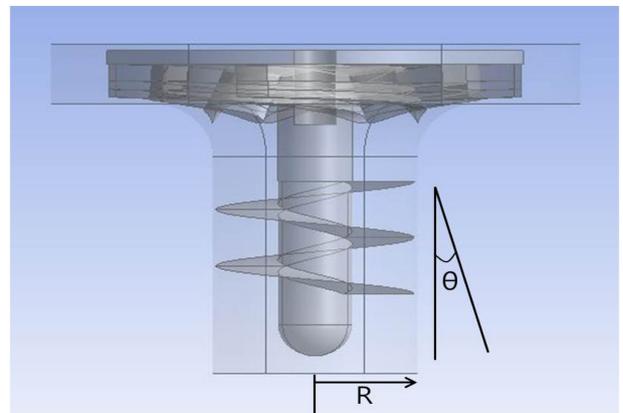


Fig. 2 3D Geometry of rotor in LNG cargo pump

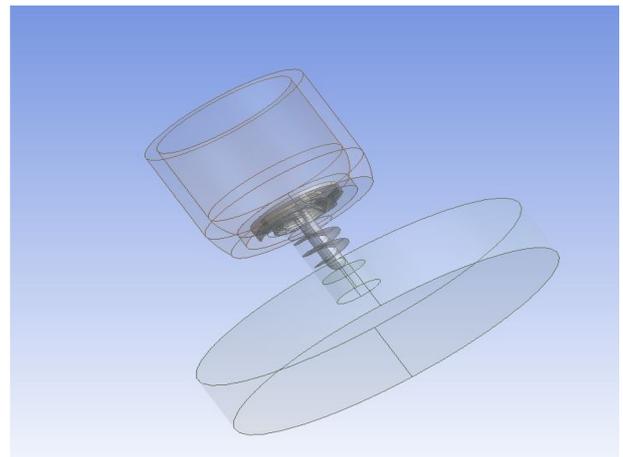


Fig. 3 3D Geometry of LNG cargo pump

6322.1로 계산되었다. 이를 바탕으로 벽면 난류를 효율적으로 계산하기 위해 Shear Stress Transport (SST) 난류 모델을 적용하였고, 작동 유체는 LNG 가스의 주성분인 액체 메탄의 물성을 활용하여 해석하였다.

Table 1 Design parameters of inducer and inducer casing

Inducer casing (R) [mm]	Inducer angle ( $\theta$ ) [ $^{\circ}$ ]
155	0 (Case 1)
130	5 (Case 2)
215	10 (Case 3)
120	-5 (Case 4)

경계조건은 펌프의 흡입부에 캐비테이션 방지를 위해 균일한 상태 1.5 bar의 압력을 부가하였고, 261 kg/s의 질량 유량을 출구 경계 조건으로 설정하였다. 임펠러 및 인두서의 회전 속도는 운전 속도인 1,780 RPM을 적용하였다. 영역 간 경계면은 General Grid Interface (GGI) 방식의 인터페이스를 활용하여 처리하였다. 이외의 모든 벽면은 단열조건으로 열전달을 고려하지 않았고, 마찰계수를 0으로 이상적인 벽면 유동을 가정하였다. 실제 Cargo 펌프의 작동 조건을 활용하여 형상별 특성을 수치적으로 검증하였으며, 수치해석 결과에 미미한 영향을 미치는 벽면 마찰계수 등은 가정하여 효율적 해석 결과를 도출할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 인두서 각도 변화 및 케이싱 반경을 주요 설계 변수로 설정하여 수치적으로 비교 해석하였고, 실제 Cargo 펌프 제작이 가능한 케이싱의 제작 범위를 고려하여, 구조적인 제약을 반영한 수치를 설계 변수로 설정하였다. 인두서의 각도는 인두서 내 속도 분포 및 압력 변화를 비교 분석하여 캐비테이션의 민감도를 평가하기 위한 독립적인 요인으로 설정하였다.

산업용 LNG Cargo 펌프에서는 성능 및 구조적 문제에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 캐비테이션은 설계 단계에서 필수적으로 고려되어야 할 인자 중 하나이다. 또한 선박용 펌프는 연속적으로 작동되는 특성으로 인해 효율 향상이 주요 설계 목표이다. 이 두가지 목적 함수들은 펌프 내부의 속도 및 압력 변화를 통해 효율적으로 예측 가능하다. 이러한 관점에서 최적 설계된 펌프는 공학적인 파급 효과를 야기한다.

3.1 속도 분포

인두서와 인두서 케이싱 형상에 따른 펌프 성능 변화를 알아보기 위해서 유동해석을 진행하였다. Figs. 4는 Z축 단면적을 기준으로 속도 스트림 라인을 나타내고, 5는 속도 벡터장을 나타내고 있다. 펌프내 유동을 직관적으로 이해할 수 있도록 도시하였으며, 펌프의 회전 운동에 의해 지배적인 유동이 발생한다. Case 4의 경우 다른 Case에 비해 많은 유동 속도가 인두서 입구 부분에 밀집되는 것을 볼 수 있다. Figs. 4와 5를 통해 각 형상의 각도 변경에 따라 전체적인 유동 패턴에 변화가 있는 것을 확인할 수 있으며, 속도장에서는 Case 4가 흡입되는 유량이

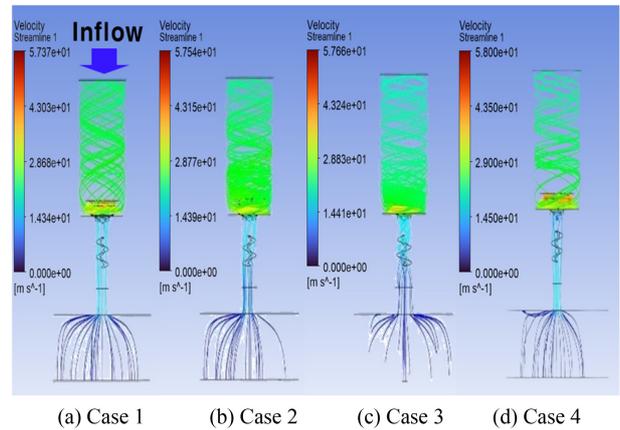


Fig. 4 Velocity streamlines in cargo pump

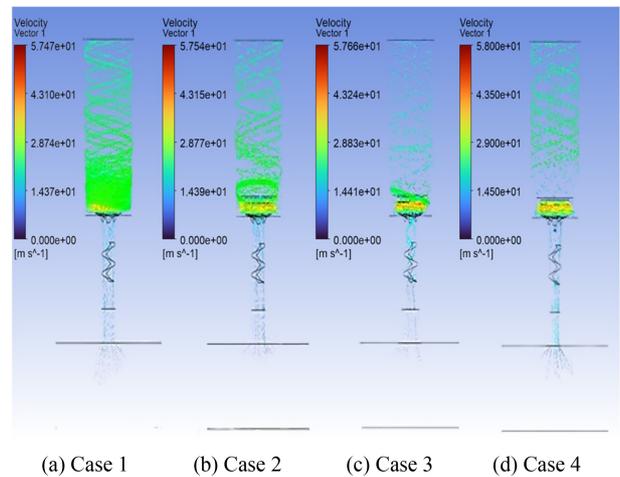


Fig. 5 Velocity vectors in cargo pump

Table 2 CFD results of efficiency and head

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Efficiency [%]	44.75	46.12	49.46	44.02
Head [m]	174.2	177.1	201.5	172.4

가장 높을 것으로 예상된다. 반면, Table 2에서는 펌프의 효율 및 수두 값이 Case 3인 경우에서 눈에 띄는 값을 확인할 수 있다. 전반적으로 비슷한 수치를 나타내고 있고 Case 3이 가장 높게 계산되어 유동성능이 가장 우수할 것이라고 예상된다.

Fig. 6은 Z축 방향에 대한 Cargo 펌프의 속도 분포를 보여준다. 그래프에서 -80 cm 지점에서 속도가 증가하는 부분은 인두서의 입구와 인접한 부분이고, 원점 근처의 위치에서는 임펠러 출구 부분으로 속도가 급격히 증가하는 것을 보여준다.

Case 1은 인두서 내에서의 속도가 점차적으로 증가하는 것을 보여주며, Cases 2와 3은 인두서의 각을 5°, 10°로 변화시킨 것이다. 인두서 케이싱의 내경이 점차 줄어들어 면적이 축소됨으로써 속도가 증가하는 것에 반면, Case 4는 인두서의 각을 -5°를 주어 케이싱의 면적이 증가되어 점차적으로 속도가 감소되는

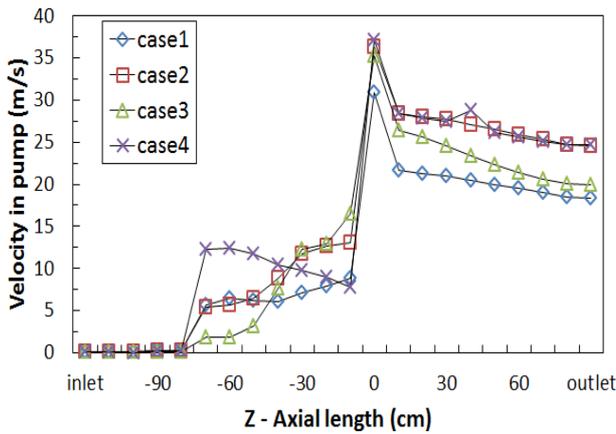


Fig. 6 Velocity LNG cargo pump on Z-axial length

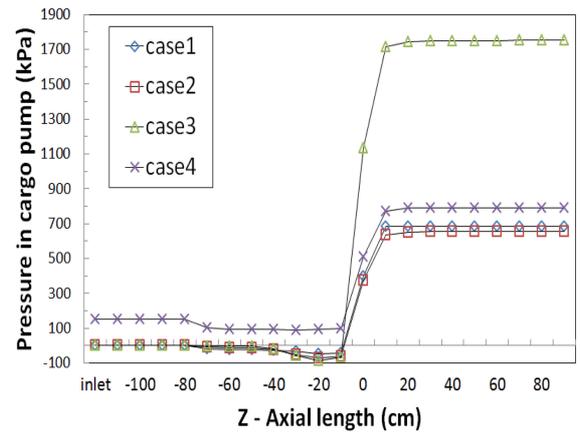


Fig. 8 Pressure in LNG cargo pump on Z-axial length

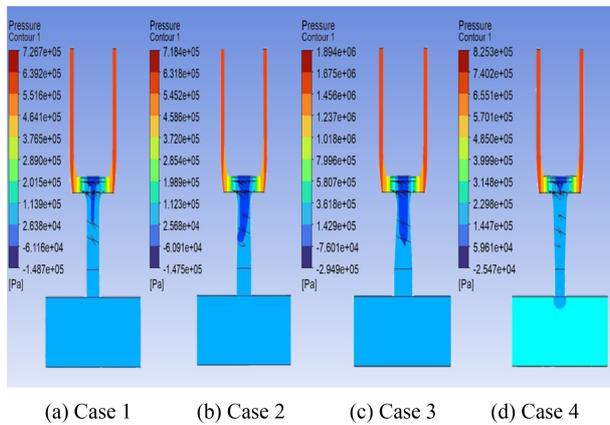


Fig. 7 Pressure distributions in cargo pump

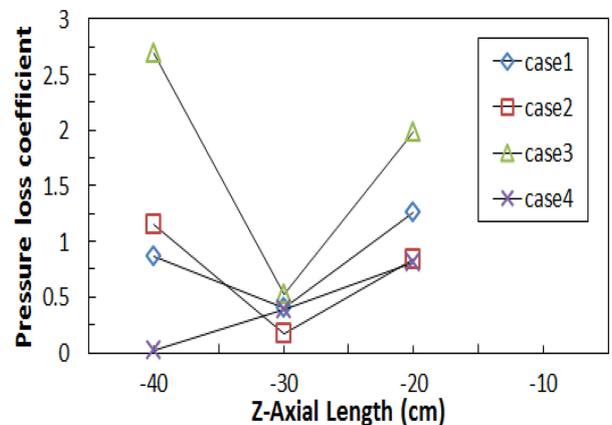


Fig. 9 Pressure loss coefficient on Z-axial length

것을 보이고 있다. -40~-10 cm에서 인두서 부분이며 Cases 2와 3은 비슷한 분포를 보여주고 있다. 이 두 가지 Case는 모두 인두서 내에서의 흡입 속도가 높을 것으로 예측된다.

3.2 압력 분포

Fig. 7에서는 펌프의 중심부의 단면의 유동 해석 결과를 보여주며, 펌프 내부의 압력 분포를 나타낸다. Cases 1-3을 보면 인두서의 각이 커지고 입구의 면적이 증가할수록 임펠러와 인두서의 중심부의 압력이 낮아지는 범위가 커지는 것을 볼 수 있다. 압력이 낮아지면서 흡입 속도는 증가하지만, 급격한 압력 강하로 인해 Cases 2와 3의 경우 캐비테이션 현상이 발생할 수 있을 것으로 예상되었다. 반면 Case 4는 압력이 낮은 범위가 상대적으로 좁은 것을 볼 수 있으며 인두서가 흡입하는 유량은 작지만 캐비테이션 현상이 적을 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 8은 Z축의 방향의 압력 분포를 보여준다. Cases 1-3은 인두서 부분은 비슷한 양상을 보여주며 다른 Case에 비해 Case 4는 높은 압력 분포가 발생하였다. 인두서 케이싱의 입구의 면적이 다른 Case보다 작기 때문에 압력이 높은 분포를 가진다.

-10 cm 부근에서 압력이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며,

Table 3 Average value of pressure loss coefficient for each case

Inducer design	$K_v$
Case 1	1.948
Case 2	1.407
Case 3	4.114
Case 4	1.268

이는 임펠러의 입구 영역에 해당하기 때문이다. Cases 1과 2는 비슷한 압력 분포를 가지고 Case 3은 다른 Case에 비해 높은 압력을 가지는 것을 볼 수 있다. Case 3은 입구의 면적이 크기 때문에 높은 압력이 발생한다는 것을 예측할 수 있다.

3.3 압력손실계수( $K_v$ )

압력 손실 계수는 펌프의 압력 손실과 캐비테이션 등을 파악할 수 있으며, Fig. 9의 인두서와 임펠러 부분에서 일정 간격 범위를 정해 압력강하와 평균 유속에 의한 압력 손실 계수를 나타낸 값이다. Cases 1과 2는 비슷한 양상을 나타내고, Case 3은 확연한 차이를 볼 수 있다. 반면에 Case 4는 압력손실계수가 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 3은 펌프 내부의 평균 유속으로 인듀서의 입구와 임펠러 출구의 압력 강하 값을 통해 계산한 압력 손실 계수 값이다. 각 Case들을 비교하였을 때 Case 3이 압력 손실이 가장 높게 나오는 것을 볼 수 있으며, Case 4의 압력 손실 계수를 수치적으로 비교하면 가장 낮은 수치를 볼 수 있어 Case 4는 다른 Case들에 비해 압력 손실 측면에서 더 우수한 높은 효율이 계산되었다.

4. 결론

본 연구에서는 선박용 LNG Cargo 펌프를 3차원으로 모델링하여 수치해석을 수행하였으며, 인듀서 각도 및 케이싱 입구 변화를 설계 변수로 펌프의 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 인듀서 각도와 반경을 케이싱 입구 형상을 결정짓는 설계 변수로 활용하였고, 수치적으로 펌프의 효율을 비교하였다. 이를 통해 설계 변수가 유동 안정성 및 효율 측면에 미치는 영향을 분석하여 향후 LNG Cargo 펌프 설계에 유의미한 데이터 제공이 가능할 것으로 사료된다.

- (1) 설계 변수에 따라 해석적으로 비교된 Cases에서 전반적으로 비슷한 속도 분포를 가지고 있는 것을 볼 수 있었다. 인듀서 부분에서 Case 4만 특징적으로 속도가 감소하였다. 이는 인듀서에서 급격한 압력강하가 적어 속도가 점차적으로 감소하는 것으로 사료된다.
- (2) Cargo 펌프 내부 단면의 유선과 속도 분포를 보면 입구 부분에 밀집된 유동 현상을 확인 가능하다. Case 4의 경우 입구 인근의 속도 값이 가장 높게 나타내고 있고 흡입되는 유속이 가장 높을 것으로 예상된다. 이때 높은 속도로 유입되는 유동을 고려하여 적절한 펌프 설계가 함께 이뤄져야 한다.
- (3) Case 3은 압력 증가가 가장 큰 양상을 보이고 있어 흡입량이 가장 많은 것으로 사료되지만, 임펠러와 인듀서 부분에서 압력 강하가 가장 크게 발생한다. 반면, Case 4는 압력 강하 부분이 적어 캐비테이션 현상이 적게 생기고 안정적으로 LNG를 흡입할 수 있는 것으로 예측된다. 따라서, Cargo 펌프의 활용 목적에 적절한 설계가 선택적으로 수행될 필요가 있다.
- (4) 압력 손실 계수를 계산하였을 때, Case 4는 Cases 1과 2보다 각각 34.9%와 10.9% 더 낮은 수치로 계산되었다. 이는 펌프에 의한 압력 손실 측면에서 Case 4가 Cases 1-3보다 더 우수한 유동 저항 성능을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 펌프 손실을 고려할 경우 효율적인 펌프로 고려될 수 있다.
- (5) 설계변수 범위 안에서 속도, 압력 및 압력 손실 계수를 비교하였을 때 Case 4가 캐비테이션 발생 가능성이 가장 낮은 안정적인 형상으로 수치적으로 확인할 수 있었다. 원활한 유동을 통해 압력 손실이 최소화되며, 펌프 내부 유동에 지배적인 성능 저하를 야기하는 캐비테이션 예방을 사전에 검토할 수 있는 형상으로 제시된다.

REFERENCES

1. Yoon, J. H., Jang, H. J., Park, S. D., Kim, D. S., (2013), The research about suction performance of LNG pump on the groove shape of suction casing, Proceedings of the KSME Spring Conference, 327-329.
2. Chu, S. H., (2013), An experimental study on effect of the tank bottom on performance and cavitation characteristics of a LNG cargo pump, M.Sc. Thesis, Seoul National University.
3. Yoon, H. G., Yoo, I. S., Park, M. R., Yoon, E. S., (2010), A Study of suction performance of inducer with different inlet shapes, Proceedings of the 6th National Conference on Fluid Engineering.
4. Ha, Y. S., Lee, Y. B., (2021), Research on eye and inter-stage sealing unit geometry for on-shore high pressure multiple-stage LNG pump using CFD, Proceedings of the KSFM Summer Conference, 275-276.
5. Jung, J. Y., Shin, H. C., Shin, M. S., Kim, S. M., (2021), Numerical study of single-phase and two-phase heat transfer characteristics in cryogenic ball bearing for LNG pump, Proceedings of the KSFM Winter Conference, 334-336.
6. Kwak, Y. G., Kim, S. H., Cho, Y. J., Chang, K. S., Baek, H. C., (2022), Numerical study of labyrinth seal geometry for minimum of leakage flow in LNG pump, The KSFM Journal of Fluid Machinery, 25(4), 30-38.
7. Heo, S. G., Park, J. H., Kim, J. H., Jeon, B. H., Kim, H. J., Kim, J. H., Hong, J. H., (2014), Numerical study for flow characteristics of piston pump of LNG fuel system in marine, Proceedings of the KSFM Autumn Conference, 135-136.
8. Kwal, W. I., Lee, Y. D., Lee, Y. B., (2021), A study on the rotor dynamics analysis of LNG (Liquefied natural gas) hpso pump support bearings according to the lubrication flow model, Proceedings of the KSFM Summer Conference, 277-278.
9. Jang, H. J., Suh, J. H., (2021), Analysis of leakage and rotor dynamic coefficient of labyrinth seal of LNG fuel pump, Proceedings of the KSFM Summer Conference, 171-173.



**Jihun Song**

Research Engineer in the Rotorcraft System Analysis team, Korea Aerospace Industries (KAI). His research interest is Aeroacoustics, Aerodynamics, and Optimization for Rotorcraft and Turbo Machinery.  
E-mail: [jihun.song@koreaaero.com](mailto:jihun.song@koreaaero.com)



**Dong-Ryul Lee**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Daegu Catholic University. His research interest is Heat Transfer, Fluid Engineering, Electric Vehicle, and Advanced Air Mobility.  
E-mail: [dlee@cu.ac.kr](mailto:dlee@cu.ac.kr)

# 정전 대전된 입자의 이온중화기에 의한 대전량 저감에 대한 연구

## Study on the Reduction of Charge in Electrostatically Charged Particles Using a Neutralizer

김덕형<sup>1,2</sup>, 이성빈<sup>1,2</sup>, 김건호<sup>1,2</sup>, 고성현<sup>3</sup>, 박희성<sup>2,#</sup>  
Deokhyeong Kim<sup>1,2</sup>, Sungbin Lee<sup>1,2</sup>, Geonho Kim<sup>1,2</sup>, Seonghyun Ko<sup>3</sup>, and Heesung Park<sup>2,#</sup>

1 국립창원대학교 스마트제조융합협동과정 (Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University)

2 국립창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)

3 포스코홀딩스 미래기술연구원 친환경공정엔지니어링연구센터 (Eco Process Engineering Research Center, N.EX.T Hub, POSCO HOLDINGS)

# Corresponding Author / E-mail: heesungpark@changwon.ac.kr, TEL: +82-55-213-5471

ORCID: 0000-0003-4586-7794

KEYWORDS: Electrostatic elimination (정전기 제거), Electrostatic discharge (정전기 방전), Neutralizer (이온중화기), Particle (입자), Corona discharge (코로나 방전)

*This study examines the charge reduction characteristics of charged particles using a neutralizer to prevent accidents from electrostatic discharge and enhance process efficiency. The research measures the number of charges, elimination efficiency, and penetration rate under various voltage polarity conditions with a DC-type bipolar electrostatic eliminator. The results indicate that electrostatic neutralization is most effective under negative high voltage (-HV) conditions, while the mesh penetration rate increases and charge accumulation occurs under positive high voltage (+HV) conditions. Furthermore, partial charge neutralization is observed under both positive and negative high voltage ( $\pm$ HV) conditions due to the sequential emission of positive and negative ions. This study quantifies the mitigation of electrostatic charge using a neutralizer, offering insights for optimizing filtration systems and improving process stability. Future research will refine electrostatic control mechanisms by considering additional parameters such as particle size, material properties, and flow conditions.*

Manuscript received: July 16, 2025 / Revised: August 26, 2025 / Accepted: August 28, 2025

### 1. 서론

입자는 다른 입자, 반응기 벽 및 수송 파이프와의 물리적 접촉을 통해 정전기 전하를 생성할 수 있다는 것은 널리 알려져 있다. 정전기 대전은 입자 간 또는 입자와 표면 간의 상호작용으로 인해 다양한 산업 공정에서 발생하는 현상이다. 이러한 현상은 전기 집진기, 마찰 전기 나노발전기, 사이클론 집진기 및 입자 분리와 같은 응용에서 유용하게 활용되지만 혼합, 공압 수송, 체질, 유동화와 같은 산업 공정에서는 여러 문제를 초래한다. 정전기로 인해 입자가 응집되거나 벽에 부착되는 현상이 발생하며, 이는 공정 효율을 저하시킬 뿐 아니라 경우에 따라 화재 및 폭발 위험으로 이어질 수 있다. 이러한 정전기 방전은 작업자의 안전을 위협하고 심각한 경제적 손실을 초래한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 이온중화기(Neutralizer)를 활용하여 정전기를 제거할 수 있다. 이온중화기는 이온을 생성하여 입자 표면의 전하를 중화시킴으로써 정전기 축적을 방지한다. 이온중화기에 장착되는 정전기 제거 장치는 주로 전압 인가 방식과 방사선 조사 방식의 두 가지 방법으로 작동한다[1,2].

전압 인가 방식은 고전압을 전극에 가해 주변 공기를 이온화하는 방식이다. 고전압 전극은 공기 중에서 코로나 방전을 유도하여 양이온과 음이온을 생성하며, 생성된 이온이 입자 표면의 전하를 중화하여 정전기를 제거하는 방식이다.

방사선 조사 방식은 방사성 동위원소를 사용하여 공기를 직접 이온화하는 방식이다. 방사선은 공기 분자를 이온화하여 양이온과 음이온을 생성하며, 이를 통해 정전기를 중화한다. 이 방식은 전력 공급이 필요하지 않아 특정 환경에서 유용하지만

방사성 물질의 관리와 규제가 필요하다.

Kodama 등[3]은 사일로에서 정전기 방전으로 인한 분진 폭발을 방지하기 위해 사일로 내부의 적재 파이프 끝에 설치된 노즐형 이온중화기로 구성되며, 이는 절연 금속 노즐 내에 접지된 바늘 전극이 장착된다. 노즐을 통해 코로나 방전을 유도하며, 코로나 방전에 의해 생성된 공기 이온은 사일로에 들어가기 전에 정전하를 중성화하기 위해 파이프로 유입되며, 이를 통해 제거기의 개선이 시도되었고, 실제 크기의 공기압 분말 수송 시설을 사용하여 그 효과를 검토하였다. Zhou 등[4]은 대전된 폴리에틸렌 분말이 저장된 원통형 금속 사일로 내부의 전기장 분포를 연구하였으며, 수학적 모델링과 시뮬레이션을 통해 전기장 강도가 분말 대전량, 분포 등 다양한 조건에 따라 달라지는 것을 확인하였으며, 대전된 분말이 형성하는 전기장을 체계적으로 분석함으로써 사일로 설계와 안전 관리에 필요한 기초 0107 데이터를 제공한다. Jeong 등[5]은 코로나 방전 방식의 정전기 제거 장치에서 발생하는 전극핀의 오염 문제를 해결하기 위해 외부로 돌출된 전극핀을 제거하고, 이온 탱크 내부에 텅스텐 전극선을 사용하여 전극선의 오염을 최소화하며, 정전기 방지 대책에 대한 연구를 수행하였다. Huang 등[6]은 코로나 방전 결합 스크린 전극 집진기를 통해 방전 전극의 불균일한 분포로 인해 발생할 수 있는 전극 두께 문제를 해결하며, 4개의 나란히 놓인 스크린 전극을 장착하여 집진 영역을 확장하고 2차 입자 포집을 용이하게 하여 집진 효율을 향상시키며 다양한 변수가 방전 특성과 집진 효율에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Kim 등[7]은 코로나 방전기의 방전 특성을 이용하여 방전기 방향에 따른 전류 밀도 분포를 조사하기 위해 방전기 방향, 유속 유무를 실험 및 수치 해석적으로 연구하였으며, 유속이 존재할 때 이온이 유동을 따라 이동하는 것을 관찰하였다.

본 연구에서는 안정성을 높이고 비용 효율적일 뿐만 아니라 대규모 산업 공정에서도 적용이 가능하다는 장점이 있는 전압 인가 방식의 이온중화기를 활용하여 입자 표면의 전하를 저감시키는 효과를 평가하고자 한다. 인가 전압과 정전기 제거 효율, 입자 투과율(P) 간의 관계를 규명함으로써 정전기 제거의 근본적인 메커니즘을 분석하고, 이를 기반으로 정전기 방지 기술의 최적화 방안을 제안하고자 한다. 특히 실험 구성상의 차별점은 DC 양극성 이온중화기와 정전기 제거기를 결합하고 전압 극성(HV, +HV, -HV, ±HV)을 독립변수로 제어하여 입자 1개당 전하량과 메쉬 투과율(P)를 동시 정량 평가하였다.

## 2. 실험

Fig. 1는 정전기 제거 장치의 3차원과 단면을 제공한다. 전극의 직경 2.4 mm, 길이는 100 mm이며, 테프론 스탠드 내부 직경인 2.5 mm에 고정된다. Fig. 2(a)에 표시된 스테인리스 스틸로 제작된 금속 링은 테프론 스탠드의 방전 전극 쪽에 고정되어 있으며, 이는 전극의 코로나 방전을 향상시켰다. Fig. 2(b)는

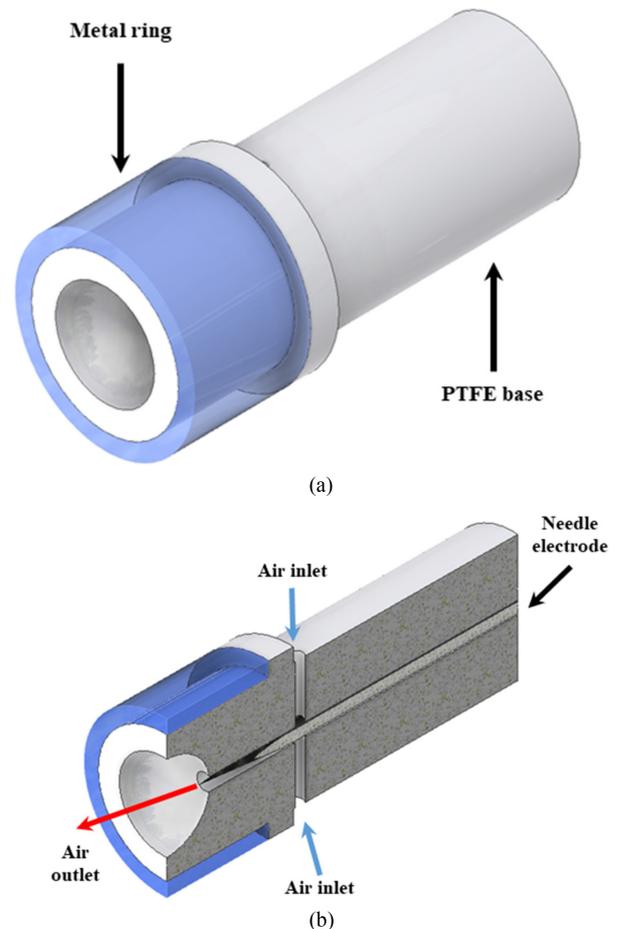


Fig. 1 Three-dimensional view of the neutralizer (a) Geometry and (b) Cross-section.

정전기 제거 장치의 단면도이며, 공기 유동 채널과 전극을 나타낸다. 실험에서 압축 공기는 정전기 제거기의 바깥 쪽에서 공급된 다음 공기가 정전기 제거 장치의 채널을 통과하여 전극 끝 근처의 구멍에서 방출된다.

Fig. 2(a)는 실험 시스템의 개략도를 나타낸다. 실험 설정은 DC 유형 양극성 이온 중화기, 노즐형 정전기 제거 장치, 두 개의 고전압 전원 공급 장치(KOREA SWETCHING, +10 kV/10 mA, -20 kV/20 mA), 공기 공급 시스템(ASB680 5H-T120W, AIRSSEN KOREA), 전기장 측정 시스템(FMX-004, SIMCO)으로 구성된다. 이온중화기는 직경 0.1 m, 길이 0.4 m의 내부 홀을 갖는 SUS 316L로 제작되었다. 메쉬망과 콜렉터의 입자 무게는 초정밀 저울(AX124, OHAUS Corp.)을 이용하여 측정하였다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 8개의 노즐형 정전기 제거 장치는 홀의 외부 벽에 엇갈린 배열로 장착되었다. 상단 4개 하단 4개의 정전기 제거 장치는 각각 원주 90° 간격으로 배치하였고, 상·하단은 반 간격만큼 위상 오프셋하여 서로 엇갈리게 배치하였다. 상단의 홀에 연결된 4개의 정전기 제거 장치와 하단의 홀에 연결된 4개의 정전기 제거 장치는 각각 양전하 및 음전하 고전압 정원 공급 장치에 연결되었다. Fig. 2(b)는 이온중화기의 내부 단면적을 나타내는 개략도이다. 이온중화기 상단에서 투입되는

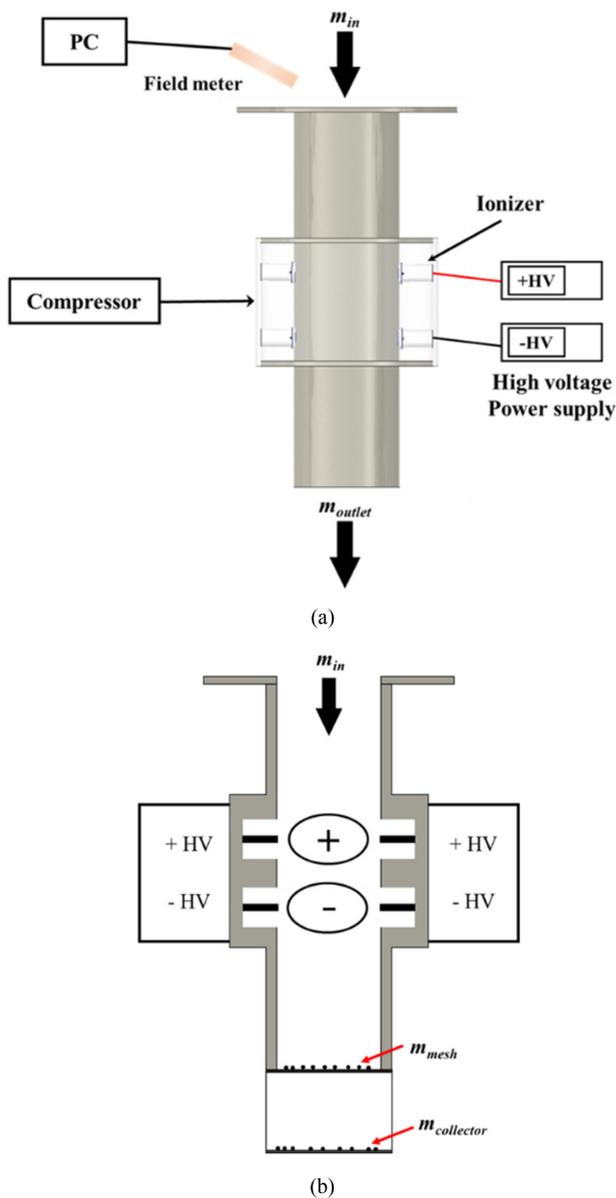


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system (a) Equipment and (b) Electrical mechanism

입자는 중력에 의해 아래로 떨어지며 이온중화기 중간에 위치하는 정전기 제거 장치에 의해 입자의 전하를 중화시키며, 메쉬망 위에 떨어지게 된다. 메쉬망을 통과한 입자는 콜렉터에 수집된다. 메쉬망의 소재는 SUS 316L에 325 mesh이며, 모든 실험에서 동일한 사양의 메쉬망을 사용하였다. 또한, 메쉬망은 접지에 연결하여 부유 전위를 방지하고 전하 측정, 전계 왜곡의 개입을 최소화하였다.

본 실험에서는 3 μm의 양극재 입자를 시험 분말로 사용하였다. 전압 극성의 단독 영향을 식별하기 위해 변수 수를 최소화한 단일 조건인 3 μm으로 설정하였다. 양극재 입자에 실린 순전하의 극성은 일반적으로 양수인데, 이는 금속 벽과 일함수가 낮은 반응기가 양극재 입자와 금속 접촉 중에 전자를 잃기 쉽게

때문이다. 그러나 입자의 전하 극성은 양극성 대전 현상이 존재하기 때문에 불균일하다. 따라서 본 연구는 입자의 초기 전하가 정전기 제거 장치의 정전기 제거에 미치는 영향을 조사하였다. 이 때, 단극성 및 양극성 대전 입자를 모두 고려하였다. 실험을 하기에 앞서 전기장 측정 시스템을 사용하여 입자의 초기 전하를 측정하고, 정밀 저울을 사용하여 입자의 질량을 측정하였다.

실험에 사용할 입자 1.5 g을 트레이에 올려두고 이온중화기 상단 입구 근처에 놓고 5초에 걸쳐 천천히 이온중화기에 투입하였다. 투입하는 위치와 시간은 재현성을 보장하기 위해 동일하게 유지하였다. 입자를 이온중화기에 투입하기 전 실험 조건에 따라 공기 공급 시스템의 유속을 일정하게 하기 위해 설정 후 5분의 안정화 시간을 가지며, 고전압 전원 공급 장치를 설정하였다. 대전된 입자는 이온중화기 내부의 정전기 제거 장치를 통과하는 동안 양전하 또는 음전하에 의해 중성화되었다. 중성화된 입자는 이온중화기 하단부에 설치된 메쉬망에 수집되며, 메쉬를 통과한 입자들은 케이싱 아래에 설치된 콜렉터에 수집되었다. 이렇게 수집된 입자들은 전기장 측정 시스템을 통해 전기장을 측정하였으며, 정밀 저울을 통하여 메쉬 위에 있는 입자 질량, 메쉬를 통과한 입자 질량을 측정하였다. 모든 실험에서 온도는 17°C, 상대 습도는 45로 유지되었다. 또한, 전압 극성의 영향만 평가하기 위해 환경 인자는 전 구간에서 고정하여 환경 변수에 따른 전하 교환 및 코로나 방전 거동의 변동을 배제하고 비교의 일관성 및 측정 재현성을 확보하였다.

식(1)는 전하량을 의미한다.  $\epsilon$ 는 진공 유전율로 전기적 상호작용의 세기를 결정하는 상수이며,  $r$ 는 측정 거리,  $E$ 는 해당 측정 위치에서의 전기장을 나타낸다.

식(2)는 전기장을 측정하는 필드미터가 갖는 유효 면적을 의미한다. 전기장의 영향을 원의 면적으로 가정하며,  $d_f$ 는 측정 거리를 나타낸다.

식(3)은 면적 당위당 존재하는 전하량을 의미한다. 전체 전하량  $\sigma$ 를 필드미터의 측정 면적  $A_f$ 로 나누며, 이는 일정 면적 내에 전하의 분포를 나타낸다.

식(4)는 개별 입자가 차지하는 면적을 의미한다. 입자 하나를 원형으로 가정하였다. 이 때, 사용되는  $d_p$ 는 입자 크기 평가 시 적용되는 측정 거리와 동일한 값으로 가정된다.

식(5)는 한 입자가 갖는 전하량을 의미한다. 단위 면적당 전하 밀도와 입자 면적의 곱으로 계산된다. 이는 입자 내 실제 분포하는 전하의 총량을 나타낸다.

식(6)은 한 입자에 해당하는 전자의 개수를 의미한다. 입자 한 개의 전하량  $q_p$ 를 기본 전하  $e$ 로 나누어 산출한다. 여기서  $e$ 는 전자 한 개가 가지는 기본 전하를 의미한다.

정전기 제거 효율  $\zeta$ 은 식(7)에 의해 계산된다. 정전기 제거 효율을 나타내며,  $q_{p0}$ 는 초기 전하량,  $q_{p1}$ 은 이온중화기에 투입되어 배출된 입자의 전하량을 나타낸다.

식(8)은 입자가 메쉬를 통과한 투과율( $P$ )을 의미하며,  $m_c$ 는 메쉬를 통과하고 콜렉터 위에 수집된 입자 질량을 나타내며,  $m_m$ 는 메쉬 위에 남은 입자 질량을 나타낸다.

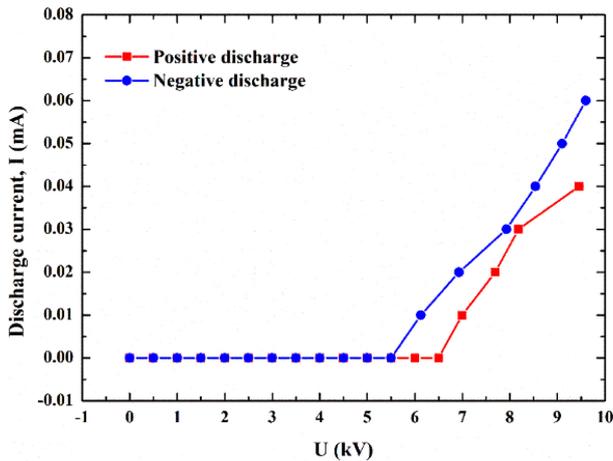


Fig. 3 Discharge current of the electrostatic eliminator under different applied voltage

$$q = 4\pi\epsilon l^2 E \tag{1}$$

$$A_F = \frac{\pi d_F^2}{4} \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{q}{A_F} \tag{3}$$

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \tag{4}$$

$$q_p = \sigma \times A_p \tag{5}$$

$$n = \frac{q_p}{e} \tag{6}$$

$$\xi = \frac{|q_{p1} - q_{p0}|}{q_{p0}} \times 100\% \tag{7}$$

$$P = \frac{m_c}{m_m + m_c} \times 100\% \tag{8}$$

### 3. 결과

Fig. 3은 유량이 4 LPM 일 때, 다양한 전압에서 정전기 제거 장치의 방전 전류를 조사하였다. Fig. 3에서 양전하의 경우, 6 kV보다 작을 때 방전 전류가 0.01 mA보다 낮은 전압 값을 나타내며, 음전하의 경우, 7 kV보다 작을 때 방전 전류가 0.01 mA보다 낮은 전압 값을 나타냈다. 또한, 전류계의 분해능이 0.01 mA이기 때문에 0.01 mA미만의 방전 전류는 인식할 수 없기에 방전 전류는 0.01 mA보다 낮을 때 0 mA로 설정되었다. 코로나 방전은 음전하가 6 kV에서 양전하보다 빠르게 발생하며, 동일한 전압에서 음전하가 양전하보다 높은 방전 전류가 관찰되었다. 또한, 인가 전압이 9.5 kV를 초과하면 불안정해지는 것으로

Table 1 Comparison of voltage-current data according to polarity at the same applied voltage

Case	Voltage [kV]	Current [mA]
1	0	0
2	+9.5	0.06
3	-9.5	0.03
4	+9.5/-9.5	0.02/0.03

Table 2 Comparison of potential difference, electric charge and number of charge data according to voltage polarity

Case	Potential difference [kV]	Electric charge [C]	Number of charges
1	0.26	7.23E-10	1.02E+04
2	0.41	1.14E-09	1.60E+04
3	0.08	2.23E-10	3.13E+03
4	0.14	3.89E-10	5.47E+03

나타내며, 전압의 지속적인 증가와 함께 스파크 방전이 발생하는 것으로 관찰된다. 인가 전압이 9.5 kV를 초과하는 조건에서는 방전 전류가 스파크를 통해 방출되기 때문에 정전기 제거가 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 스파크 방전을 고려하여 인가된 양전압과 음전압 모두 9.5 kV로 설정하였다.

Table 1은 동일한 인가 전압(9.5 kV)에서 전압 극성에 따른 각 실험 케이스별 전압과 방전 전류를 나타낸 것이다. 전압 크기는 장치 안전 범위에서 극성 간 비교가 가능하도록 단일 상한으로 설정하였다. Case 1은 Default를 의미하며, 인가 전압이 없었으므로 전압과 방전 전류 모두 0이 측정된다. Case 2는 +HV를 의미하며, 단극성의 양전압이 인가된 상태에서 인가 전압은 +9.5 kV, 방전 전류는 0.06 mA로 측정되었다. Case 3은 -HV를 의미하며, 단극성의 음전압이 인가된 상태에서 인가 전압은 -9.5 kV, 방전 전류는 0.03 mA로 측정되었다. Case 4는 ±HV를 의미하며, 양극성의 양전압, 음전압이 인가된 상태에서 인가 전압은 +9.5/-9.5 kV, 방전 전류는 0.02/0.03 mA로 측정되었다.

Table 2는 동일한 인가 전압에서 전압 극성에 따른 각 실험 케이스별 전기장(Potential Difference), 전하(Electric Charge), 전자 수(Number of Charges)를 나타낸다. 표에서 볼 수 있듯이, Case 1에서 초기 전위는 0.26 kV, 입자에 축적된 전하량은 7.23E-10 C이며, 입자 한 개의 전자 수는 1.02E+04로 측정되었다. 이는 무인가 상태의 잔류 대전을 의미하며, 전하는 자연 소산과 재결합에 의해 완만히 감소하므로 본 조건에서는 일부 전하가 잔류한다[8]. Case 2의 경우, Case 1과 비교하여 전위, 전하량, 전자 수가 증가하는 경향이 나타난다. 이는 양전압을 인가할 경우, 입자 주변의 양이온 및 전자의 이동이 촉진되면서 입자에 더 많은 양전하가 축적되기 때문이다. 이는 +HV를 인가할 때 전극 주위에서 코로나 방전이 발생하여 양이온이 생성되며 입자 표면에 충돌, 부착되어 입자의 총 전하량이 증가한다[9]. 반면, Case 3에서는 Case 1과 비교하여 전위, 전하량, 전자 수가

감소하는 경향이 나타난다. 이는 음전압 인가될 때, 자유 전자가 전기장에 의해 방출되거나 이동하면서 입자의 양전하가 제거되고, 전체적인 전하 축적이 제한되기 때문이다. -HV를 인가 시, 코로나 방전으로 생성된 전자 및 음이온이 입자 표면으로 이동, 부착되어 기존 양전하를 상쇄함으로써 측정 전하량이 감소한다 [10]. Case 4에서도 Case 1과 비교하여 전위, 전하량, 전자 수가 감소하는 경향이 나타난다. 이는 양극성 전압을 인가할 경우, 전기장의 방향이 순차적으로 변하면서 전하 축적이 제한되기 때문에 단극성 음전압을 인가할 때보다는 전하 감소가 크지 또한, 양극성 전압에서는 입자 표면의 전하 축적이 감소하지만, 단극성 음전압을 인가했을 때처럼 강하게 방출이 발생하지 않는다. ±HV 인가 시, 양이온, 음이온이 순차적으로 공급되어 직전 단계에 축적된 전하가 부분적으로 상쇄되므로 단극성 대비 남은 전하가 적다. 다만 양이온, 음이온의 발생량, 시간 분포의 비대칭으로 완전 중화에 이르지 못해 중간 수준의 잔류 전하가 유지된다[11].

Fig. 4는 식(6)을 사용하여 동일한 인가 전압에서 전압 극성에 따라 한 입자가 가진 전자의 개수 변화를 나타낸 것이다. 입자에 가해진 전압 극성은 Default, +HV, -HV, ±HV이다. 본 연구에서는 입자의 초기 전하 상태를 Default로 정의하였으며, 그 후 +HV를 인가하면 전극에서 발생된 코로나 방전에 의해 생성된 양이온이 입자에 충전되어 입자의 전하량이 57.7 % 증가하는 것이 관찰된다. -HV를 인가하면 전극에서 생성된 음이온이 입자에 충전되었지만, 전하가 상쇄되어 전하량은 69.2 % 감소하는 것이 관찰된다. ±HV를 인가하면 양이온과 음이온이 생성되며 전하량은 46.2 % 감소하는 것이 관찰된다. 이는 순차적으로 작용하는 양이온과 음이온이 입자에 충전되어 전하를 부분적으로 중화하는 과정이 발생했기 때문이다. 이러한 결과는 극성에 따른 이온 생성 및 수송의 비대칭 때문이며, +HV에서는 양이온이 우세하고 반대 부호 이온의 공급 경로가 상대적으로 제한되어 동일 부호 전하의 부착이 누적된다. 반면 ±HV에서는 극성이 순차적으로 인가되며 각 극성 인가 단계마다 반대 부호 이온이 유입되어 축적 전하가 상쇄되지만, 축적 전하에 따른 국소 전계 변화로 인해 완전 중화가 아닌 부분 중화가 관찰된다.

Fig. 5는 식(7)을 사용하여 동일한 전압 조건에서 전압 극성에 따라 정전기 제거 효율( $\xi$ )을 나타낸 것이다. 입자의 정전기 제거 특성을 조사하기 위해 Default 상태를 기준으로 설정하여 식(2)를 사용하여 정전기 제거 효율을 계산하였다. +HV에서 정전기 제거 효율( $\xi$ )은 0.58이며, 전압 극성 중 가장 낮은 정전기 제거 효율( $\xi$ )을 나타낸다. 이는 +HV 조건에서 입자가 양전하를 띠 가능성이 크며, 중화보다는 추가적인 전하 축적 가능성이 있다. -HV에서 정전기 제거 효율( $\xi$ )은 0.85이며, 전압 극성 중 가장 높은 정전기 제거 효율( $\xi$ )을 나타낸다. 이는 -HV 조건에서 음이온이 입자 표면에서 효과적으로 정전기를 중화하여 전압 극성 중에 가장 효과적으로 제거함을 나타낸다. ±HV에서 정전기 제거 효율은 0.69이며, -HV보다는 낮지만, +HV보다 높은

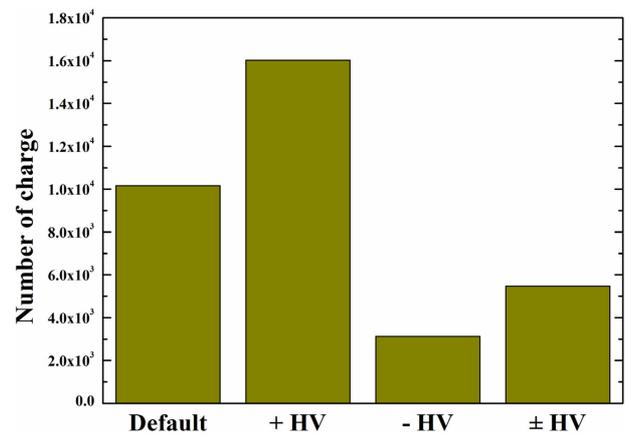


Fig. 4 Number of charge of bipolar discharge for different applied voltage

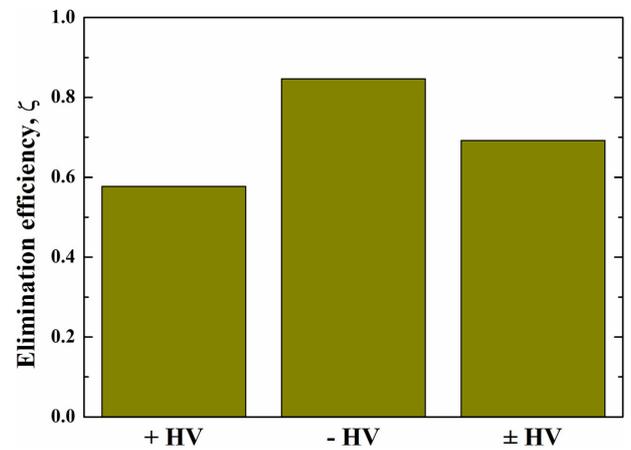


Fig. 5 Elimination efficiency of bipolar discharge for different applied voltage

정전기 제거 효율( $\xi$ )을 나타낸다. 이는 양이온과 음이온이 순차적으로 작용하여 중화가 진행되었기 때문이다.

Fig. 6은 식(8)을 사용하여 동일한 인가 전압에서 전압 극성에 따른 입자 투과율( $P$ )을 나타낸다. 전압을 인가하지 않은 Default 조건에서는 가장 낮은 3.46%의 투과율을 나타낸다. 이는 입자가 정전기적 영향을 받지 않고 중력만 작용하였을 때의 투과율( $P$ )이다. +HV 조건에서는 5.04%의 투과율( $P$ )이 나타난다. 이는 양이온이 입자에 충전되면서 입자와 필터 사이의 정전기적 반발력이 작용하여 입자가 덜 부착되고 더 많이 통과한다. -HV 조건에서는 5.07%의 투과율( $P$ )이 나타난다. 음이온이 입자에 충전되어 필터와의 정전기적 상호작용으로 이온화된 입자가 필터를 더 잘 통과할 수 있도록 영향을 미친다. ±HV 조건에서는 4.76%의 투과율( $P$ )이 나타난다. 이는 양이온과 음이온이 순차적으로 작용하면서 입자의 표면 전하가 변동하였으며, 입자와 필터의 정전기적 상호작용이 불안정해지면서 일부 입자는 필터에 부착되었지만, Default보다는 높은 투과율( $P$ )을 나타낸다.

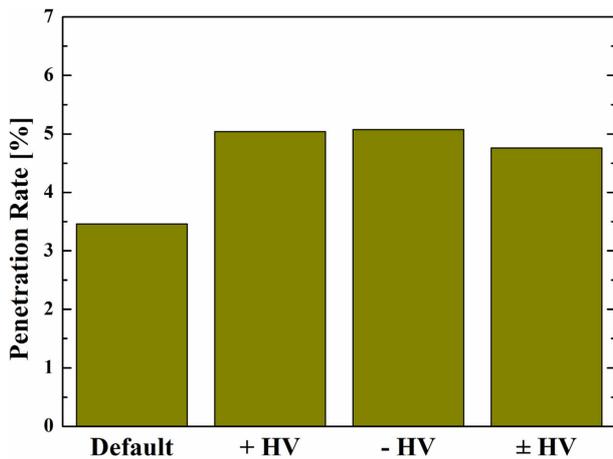


Fig. 6 Penetration rate of bipolar discharge for different applied voltage

#### 4. 결론

본 연구는 전압 인가 방식의 이온증화기를 활용하여 입자 표면의 전하를 저감하는 실험적 연구를 수행하였으며, 이를 위해 동일한 전압 조건에서 전압 극성에 따른 입자의 전하량 변화, 정전기 제거 효율( $\xi$ ) 및 입자 투과율( $P$ )을 분석하였다. 실험 결과, 전압 극성에 따라 입자의 전

하량이 증가하거나 감소하며, 특정 조건에서 정전기 제거 효과가 최적화됨을 확인하였다. 특히, -HV 조건에서 음이온을 이용한 정전기 제거 효과가 가장 높았으며, 필터 투과율( $P$ ) 또한 증가하는 경향이 나타난다. 반면, +HV 조건에서는 정전기 제거 효율( $\xi$ )이 낮고 전하 축적이 발생할 가능성이 큼을 확인하였다. ±HV 조건에서는 양이온과 음이온이 순차적으로 작용하여 부분적인 전하 중화가 발생하였다.

본 연구 결과는 이온증화기를 사용한 정전기 제거 및 입자의 거동 변화에 대한 정량적 분석을 제공하며, 이를 기반으로 정전기 제거 기술의 최적화 및 필터링 시스템의 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 입자 크기, 재질, 유동 환경 등의 추가적인 변수를 고려하여 보다 정밀한 정전기 제거 메커니즘을 규명할 것이다. 아울러 정전기 제거기 수를 확대하고 전원 mA 설정을 상향하여 이온 플럭스 범위를 확장한 조건에서 정전기 제거 효율( $\xi$ )과 입자 투과율( $P$ )의 분석할 계획이다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2025-2026년도 국립창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

연구수행에 큰 도움을 주신 포스코홀딩스 미래연구원 친환경 공정엔지니어링연구센터에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Goldman, M., Goldman, A., Sigmond, R., (1985), The corona discharge, its properties and specific uses, *Pure and Applied Chemistry*, 57(9), 1353-1362.
2. Sakata, S., (1990), Contamination-free ionizer for super clean room, *Proceedings of the 3rd International Aerosol Conference*, 817-820.
3. Kodama, T., Suzuki, T., Mogami, T., Watano, S., (2003), A new passive-type electrostatic eliminator used in a powder storage silo, *Powder Technology*, 135, 209-215.
4. Zhou, Q., Hu, J., Liang, C., Chen, X., Liu, D., Ma, J., (2019), Study on electric field distribution in cylindrical metal silo containing charged polyethylene powder, *Powder Technology*, 353, 145-155.
5. Jeong, J.-H., Woo, D. S., (2018), The development of the ionizer using clean room, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 19(1), 603-608.
6. Huang, H., Chen, W., Mi, J., Zhang, Y., Bi, N., Du, S., (2024), Study on the application of atomized corona discharge combined with screen electrode in dust collection, *Journal of Electrostatics*, 130, 103953.
7. Kim, S. H., Park, G. W., Choi, H. Y., Choi, C. Y., Park, S. H., Park, Y. G., Lee, D. G., Ha, M. Y., (2021), Experimental and numerical study on discharge characteristics of carbon brush type-corona discharger, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B*, 45(12), 681-689.
8. Ao, C. K., Jiang, Y., Zhang, L., Yan, C., Ma, J., Liu, C., Jiang, Y., Zhang, W., Soh, S., (2022), Balancing charge dissipation and generation: Mechanisms and strategies for achieving steady-state charge of contact electrification at interfaces of matter, *Journal of Materials Chemistry A*, 10(37), 19572-19605.
9. Intra, P., Tippayawong, N., (2009), Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review, *Journal of Electrostatics*, 67(4), 605-615.
10. Antoniu, A., Smaili, A., Vacar, I.-V., Plopeanu, M.-C., Dascalescu, L., (2012), Sinusoidal and triangular high-voltage neutralizers for accelerated discharge of nonwoven fibrous dielectrics, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(3), 857-863.
11. Ohsawa, A., (2013), 2-D electrohydrodynamic simulations towards zero offset voltage with corona ionisers, *Journal of Electrostatics*, 71(2), 116-124.

**Deokhyeong Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is optimized design and performance analysis in application area of gas turbine.  
E-mail: ejrgud28@changwon.ac.kr

**Sungbin Lee**

M.S. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is thermal fluid.  
E-mail: 20195070@gs.cwnu.ac.kr

**Geonho Kim**

M.S. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is optimized design and performance analysis in application area of gas turbine.  
E-mail: 20247103@gs.cwnu.ac.kr

**Seonghyun Ko**

Ph. D. in the AI & Robotics Convergence R&D Laboratories, Eco Process Engineering Research Center, POSCO HOLDINGS. His research interest is optimization of manufacturing process for secondary battery materials.  
E-mail: shkoh@posco-inc.com

**Heesung Park**

Professor in the Department of Industrial and Mechanical Engineering, Changwon National University. His research interest is thermos fluidic devices for sustainable energy systems.  
E-mail: heesungpark@changwon.ac.kr



# 레이저 변조에 따른 목재 상 레이저-유도 그래핀 성능 평가

## Performance Evaluation of Laser-induced Graphene on Wood under Laser Modulation

하형준<sup>1</sup>, 최형렬<sup>1</sup>, 김도정<sup>1</sup>, 김영진<sup>2</sup>, 남한구<sup>1,#</sup>  
Hyungjun Ha<sup>1</sup>, Hyeong Ryeol Choi<sup>1</sup>, Do-Jeong Kim<sup>1</sup>, Young-Jin Kim<sup>2</sup>, and Han Ku Nam<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 충남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)  
<sup>2</sup> KAIST 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, KAIST)  
# Corresponding Author / E-mail: hanku.nam@cnu.ac.kr, TEL: +82-2-821-5642  
ORCID: 0000-0003-3482-1600

KEYWORDS: Laser-induced graphene (레이저-유도 그래핀), Laser modulation (레이저 변조), Green electrodes (친환경 전극), Laser direct writing (레이저 직접 묘화)

*Laser-induced graphene (LIG) fabrication technology, introduced by the James Tour group at Rice University in 2014, has been extensively explored for various applications. These applications include physical sensors such as bending, temperature, and touch sensors; chemical sensors like gas and pH sensors; and energy storage devices, particularly micro-supercapacitors (MSCs). Additionally, theoretical studies utilizing molecular dynamics (MD) simulations have been conducted to investigate the LIG formation mechanism. However, the carbonization and graphitization of organic materials are complex and spatially non-uniform, making complete mechanistic interpretation difficult. Most existing research has primarily focused on chemical and materials science aspects, with practical process optimization using commercial laser systems largely limited to simple variations in laser power and scan speed. There is a lack of systematic studies addressing broader laser-parameter modulation. In this study, we systematically varied laser parameters—including power, scanning speed, pulse width, repetition rate, line spacing, and defocusing—and comprehensively evaluated the resulting electrical, physical, and chemical properties of LIG formed on wood substrates. The results provide insights into how graphene quality varies with laser processing conditions and demonstrate a versatile approach for controlling performance through laser modulation.*

Manuscript received: November 18, 2025 / Revised: December 16, 2025 / Accepted: December 18, 2025

### 1. 서론

그래핀은 단일 원자층 두께의 탄소 원자로 이루어진 2차원 구조체로, 높은 전기 전도도 및 열 전도도, 우수한 기계적 강도, 높은 광 투과율 등 기존 재료로는 대체하기 어려운 우수한 물성으로 인해 지금까지도 꾸준하게 차세대 소재로 주목받고 있다 [1]. 이러한 특성 덕분에 그래핀은 전자소자, 에너지 저장 장치, 센서, 복합소재 등 다양한 분야에서 핵심 소재로 활용될 잠재력을 지닌다 [2]. 그러나 그래핀의 실제 산업적 응용은 여전히 제한적이다. 그 이유는 대면적, 저비용, 균일한 그래핀 제조가 쉽지 않기 때문이다. 지금까지 화학 기상 증착, 기계적 박리, 에피택셜

성장 등의 공정이 개발되어 왔으나, 각각의 방법은 고품질·대면적·저비용 생산을 동시에 만족시키지 못하며, 환경적·경제적 측면에서도 지속 가능하지 않다는 한계를 가진다 [3-5]. 따라서, 공정 단순화와 친환경성을 동시에 달성할 수 있는 새로운 접근이 요구되고 있다.

이러한 배경 속에서 레이저 직접 묘화 기술은 복잡한 전, 후 처리 없이 그래핀을 직접 제조할 수 있는 새로운 대안으로 각광받고 있다. 레이저-유도 그래핀(Laser-induced Graphene, LIG) 제조 기술은 특정 파장의 레이저 빔을 재료 표면에 조사하여, 국소적인 광열 혹은 광화학 반응을 유도함으로써 탄소 재료를 그래핀 구조로 변환시키는 공정이다 [6]. 이 방법을 통해 대기압·

무용매 조건에서 포토마스크나 진공 챔버 없이 공정 제어를 통한 맞춤형 디자인으로 패터닝과 재료 합성이 동시에 가능하다는 우수한 장점을 가지고 있다. 또한, 레이저 직접 묘화 기술 기반의 LIG 전극 제조 기술은 기존 포토리소그래피 기반의 전극 제조 방식과 달리, 공정 단계 및 비용을 획기적으로 단축할 수 있으며, 실시간 친환경 제도가 가능하다는 장점을 가진다.

LIG는 유기 기반 재료(예: 폴리머, 목재, 종이, 천 등)에 레이저를 조사하여 직접 그래핀화를 통해 생성된 전극으로 2014년 Rice University의 Tour 그룹에서 폴리이미드 기판에 CO<sub>2</sub> 레이저를 조사해 그래핀을 형성한 기술을 개발한 이후로, 다양한 재료 확장 및 응용 기술 개발이 꾸준히 확산되고 있다[7]. LIG 제작 기술은 기존 그래핀 제조법과 달리, 간단하면서도 고속 대면적 가공이 가능하고, 레이저 파라미터 조절을 통해 물성 제어가 용이하며, 환경 친화적이고 산업 적용 가능성이 상대적으로 높다는 점에서 주목받고 있다. 또한 LIG는 레이저 직접 묘화를 통해 쉽고 빠르게 원하는 디자인으로 제작 가능한 친환경 전극임과 동시에 3차원 다공성 구조를 갖고 있다는 점에서, 전해질 침투와 이온 확산이 용이하여, 센서와 에너지 저장소자 모두에 적용 가능하다[8,9]. 이러한 특성은 인쇄 전자, 웨어러블 디바이스, IoT 센서 네트워크 등 차세대 융합 시스템의 핵심 요소로서의 적용 가능성이 높음을 의미한다[10]. 특히 고가의 재료나 복잡한 공정 장비가 필요하지 않아, 저비용, 고효율 공정으로 대량 생산이 가능하며, 탄소 중립적이고 지속가능한 제조 공정이라는 측면에서도 중요한 의미를 가진다[11]. 그럼에도 불구하고, 지금까지의 연구는 주로 재료적 특성이나 응용 중심으로 진행되어 왔으며, 공정 변수의 체계적인 이해와 품질 제어를 위한 기초 연구는 상대적으로 부족하다.

이에 본 연구에서는 LIG의 형성 과정에서 레이저 공정 조건이 그래핀의 구조적·전기적 특성에 미치는 영향을 명확히 규명하고자 하였다. 구체적으로 대표적인 LIG 생성 가능한 친환경 재료인 목재에 레이저 빔의 스캔 속도, 레이저 출력, 펄스폭, 반복률, 초점 거리에서의 디포커싱 정도, 선간 간격 거리를 조절하며 조사함으로써, 목재 상에 생성된 그래핀의 결정성, 다공성, 전기 전도도 분석을 통한 품질을 확인하고자 하였다. 이를 통해 레이저 매개변수 조절을 통한 맞춤형 그래핀 제조 가능성을 제시하고, LIG의 응용 확장을 위한 공정 측면에서의 기반을 마련하고자 하였다.

## 2. 실험 방법 및 공정

### 2.1 레이저 가공 시스템

본 실험을 진행하기 위해 Fig. 1과 같이 구축된 레이저 직접 묘화 시스템을 이용하였다. 근적외선 대역의(1,064 nm) 레이저 출력, 펄스폭, 반복률이 제어 가능한 나노초 레이저(JPT Laser, YDFLP-50-M8)가 사용되었다. 첫 번째 반파장판 및 편광 빔 스플리터(PBS)는 레이저 출력을 미세하게 조절하기 위해 사용되었고,

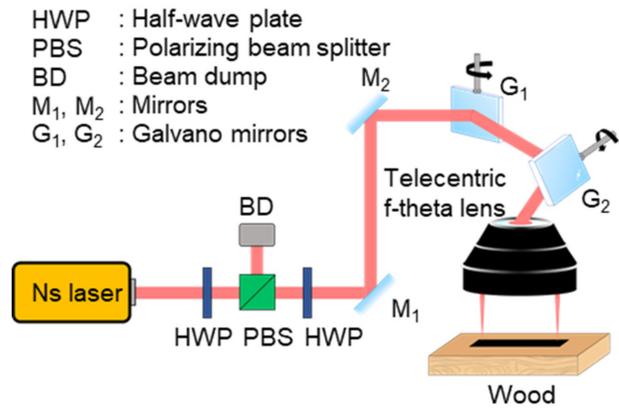


Fig. 1 Schematic diagram of laser-direct writing system

두 번째 반파장판은 편광을 제어하기 위해 사용되었다. 제어된 빔은 미러와 갈바노 미러, Telecentric f-THETA 렌즈를 통해 샘플에 도달할 수 있다. 컴퓨터에 의해 제어되는 갈바노 미러를 통해 우리가 원하는 형상의 디자인으로 레이저 패터닝이 가능하다. 목재는 대표적 하드우드로, 안정적인 그래핀 형성이 가능한 고무목이 사용되었으며, 근적외선 대역에서의 파장이 목재에 낮은 흡수율을 보인다는 점을 고려하여 적절한 파워(1-1.5 W)에 느린 속도(3-5 mm/s)로 테두리를 먼저 그려서 흡수율을 높이고, 내부를 채우는 방식으로 LIG를 제작하였다[12]. 1,064 nm 근적외선 파장에서 목재는 비교적 낮은 흡수율을 가지므로, 단일 라인 패터닝과 같이 레이저 빔이 한 번만 조사되는 조건에서는 국부 온도가 충분히 상승하지 않아 안정적인 LIG 형성이 어려울 수 있다. 특히 중첩 효과가 없는 단일 조사 조건에서는 열 누적이 제한되어 그래핀화에 필요한 임계 온도에 도달하지 못하고, 불완전한 탄화 또는 비전도성 탄소층이 형성되는 경향을 보인다. 이에 본 연구에서는 반복 조사에 의해 테두리 영역을 선행 탄화시켜 흡수율을 증가시킨 뒤, 내부 영역을 최적 조건에서 채우는 전략을 적용하였다. 모든 실험은 상온에서 진행되었다.

레이저의 조건에 따른 LIG의 면저항 수치를 최대한 비교하기 위해서 레이저 파워는 0.5-2 W까지 0.25 W 간격으로, 스캔 속도는 10-50 mm/s까지 10 mm/s 간격으로, 디포커싱은 초점 기준으로 0-1,000  $\mu\text{m}$ 까지 100  $\mu\text{m}$  간격으로, 선간 간격은 20  $\mu\text{m}$ 로 고정 후 총 350개의 조건으로 레이저 패터닝을 진행하였다. 해당 실험을 바탕으로 1,000  $\mu\text{m}$  디포커싱 조건에서 상대적으로 안정적으로 생성됨을 확인하였다. 다음으로 디포커싱 정도에 따라 빔 사이즈가 달라짐을 고려하여 빔이 겹치는 정도에 따른 LIG의 켈리터를 비교하기 위해 10-50  $\mu\text{m}$ 까지 10  $\mu\text{m}$ 간격으로 0, 400, 700, 1,000  $\mu\text{m}$ 의 디포커싱 조건으로 0.5-1.25 W까지 0.25 W 간격으로, 스캔 속도는 10-30 mm/s까지 10 mm/s 간격으로 총 240개의 다른 조건으로 레이저 패터닝을 진행하였다. 마지막으로 최적 조건(1.0 W 파워, 10 mm/s 스캔 속도, 1,000  $\mu\text{m}$  디포커싱, 20  $\mu\text{m}$  선간 간격)에서 레이저 가동 범위 안에서 펄스폭을 고정 후 반복률을 변조, 반복률을 고정 후 펄스폭을 변조하여 펄스폭과 반복률 변화에 따른 가공 양상을 비교하였다.

Table 1 The sheet resistance value of LIG under various combinations of laser power and scan speed

Power [W]	Speed [mm/s]				
	10	20	30	40	50
0.5	52.15	433.7	10.28K	6.263K	157.4K
0.75	110.7	88.12	1.387K	484.6	68.79K
1	17.55	268.4	124.6	-	-
1.25	223.3	244	432.5	399.8K	-
1.5	201.6	-	-	-	-
1.75	1.407K	347.3	239.7	-	-
2	531.9K	-	-	-	-

∴ Not conductive

### 2.2 레이저-유도 LIG 분석

제작된 모든 LIG 전극은 소스 측정 장치(Keysight, B2912A)와 4점 탐침 측정기(MS Tech, M4P-302)를 통해 면저항을 측정하였다. 면저항은 변동 정도에 따라 3-5회씩 측정 후 평균값을 사용하였다. 다음으로 공초점 현미경(Keyence, VK-X3000)을 이용하여 LIG 전극 평균 거칠기를 평가 및 3차원 구조를 확인하였다. 또한 분석은 50배 대물렌즈가 장착된 HORIBA LabRAM ARAMIS 라만 분광기를 사용하여 라만 스펙트럼을 분석하였다. 분석에서는 633 nm 파장의 레이저 광원과 1,200 line/mm Grating을 사용하였고, G, D, 2D 라만 피크를 포착하기 위해 각각 5초씩 5회 데이터를 축적하였다. 마지막으로 주사전자현미경(COXEM, EM-30)을 통해 최적 샘플의 표면 형상 및 다공성 구조를 확인하였다.

## 3. 결과 및 논의

### 3.1 레이저 파워, 속도에 따른 LIG 품질 비교

1,064 nm 파장, 100 ns 펄스폭, 100 kHz의 반복률, 1,000 μm 디포커싱, 20 μm 선간 간격의 조건에서 레이저 파워 및 스캔 속도를 변조하며 제작한 목재 상 LIG 전극의 면저항 수치는 Table 1과 같다. 표와 같이 스캔 속도는 10-50 mm/s까지, 레이저 파워는 0.5-2.0 W까지 변조하며 형성 과정을 모니터링하였다. 실험 결과 1.0 W, 10 mm/s 조건에서 17.55 Ω/sq.의 낮은 면저항 수치를 가진 최적의 LIG 조건을 확보할 수 있었다. LIG는 레이저 조사로 인한 국소적 탄화 및 흑연화를 통해 sp<sup>3</sup> 결합을 가진 비정질 탄소가 sp<sup>2</sup> 결합 중심의 그래핀 네트워크로 재배열되며 형성된다[13]. 이 과정에서 발생하는 CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> 등의 기체가 방출되는 과정에서 기공 구조를 형성하고, 결과적으로 높은 비표면적과 전기 전도도를 동시에 확보할 수 있다[14]. 극초단 펄스 레이저와 달리 나노초 레이저 조사에서는 열에 의한 확산과 재배열이 지배적으로 작용하는데, 광자 에너지에 의해 생성된

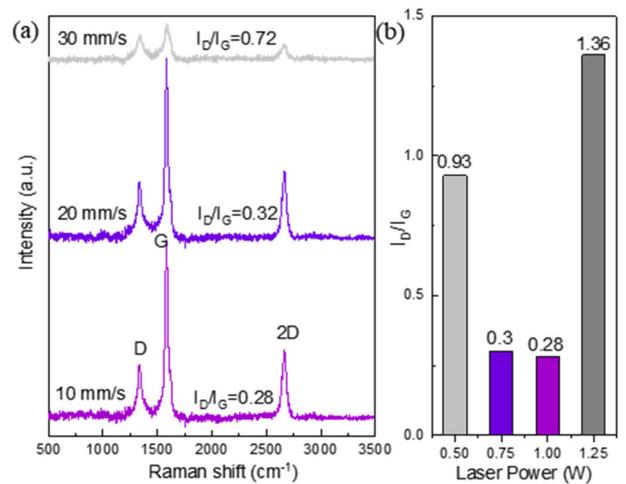


Fig. 2 (a) Raman spectra of LIG samples fabricated at various laser scan speeds and (b) Evolution of the I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ratio with respect to laser power

고온 및 고압의 영역에서 탄소 구조가 재배열되며, 비정질 상태의 탄소가 sp<sup>2</sup> 혼성화를 통해 부분적으로 결정화 되어 그래핀 유사층을 형성하게 된다[15]. 이 과정에서 온도가 낮은 경우에 분해된 탄소층이 그래핀 유사층으로 재조립하기에 충분한 에너지가 공급되지 않아 전기 전도도가 상대적으로 떨어진다. 반면 온도가 너무 높으면 재조립된 그래핀이 다시 분해된다. 표에서와 같이 스캔 속도가 너무 빠른 경우에 에너지를 충분히 공급할 수 없기 때문에 생성된 탄소 전극의 전기 전도도가 떨어짐을 보이고, 반대로 파워가 너무 높아도 재분해되어 전기 전도도가 상대적으로 떨어진다.

Figs. 2(a)는 1 W, 10-30 mm/s 조건에서의 라만 스펙트럼을 보여주며, 2(b)는 10 mm/s, 0.5-1.25 W 조건에서의 I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> 비율을 보여준다. 라만 분광법은 탄소 기반 재료의 결정성, 결합 정도, sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> 구조비, 층수 등을 비파괴적으로 분석하는 대표적인 방법으로 주로 D, G, 2D 피크가 관찰된다. D 피크는 sp<sup>2</sup> 결합 내 결합 또는 경계에 의해 활성화되며, G 피크는 sp<sup>2</sup> 결합된 탄소의 E<sub>2g</sub> 진동 모드로 그래핀/흑연 구조의 기본 골격 구조에 따라 활성화되고, 2D 피크는 G 밴드의 2차 모드로 층수, 결정성 등과 연관이 있다. 그래핀의 품질을 이야기할 때 주로 D 밴드와 G 밴드의 세기 비율, 즉 I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> 비율로 평가하는데 이는 결합의 양과 결정성 정도를 정량적으로 평가하는 지표이다. 그림과 같이 최적의 조건에서 I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> 비율이 0.28로 가장 낮으며, 최적 조건에서 멀어질수록 I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> 비율이 점점 커짐으로써, 면저항 수치가 낮은 조건일수록 양질의 그래핀이 생성됨을 알 수 있다.

Fig. 3는 최적 조건에서 생성된 LIG 전극의 공초점 현미경 측정 결과를 보여준다. 다공성 구조가 생성됨에 따라 3차원 평균 면적 거칠기 S<sub>a\_LIG</sub>가 18.3 μm 로 관측되어 기존 목재의 면적 거칠기 S<sub>a\_wood</sub> = 4.08 μm 대비 약 4배 이상 상승하였다. 흥미로운 점은 에너지가 적게 공급되어 LIG가 생성되지 않는 조건들은 일반적으로 S<sub>a</sub> 값이 최적 조건 대비 낮으며, 과한 에너지 공급에

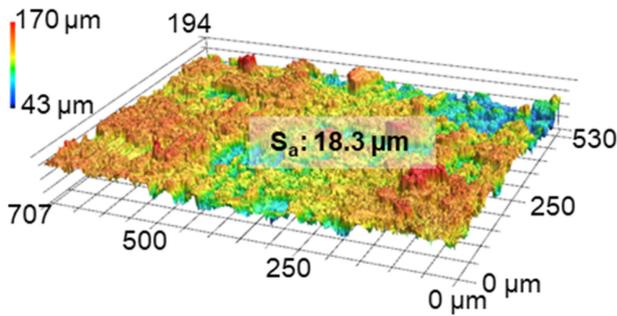


Fig. 3 Confocal microscopy image of LIG electrode

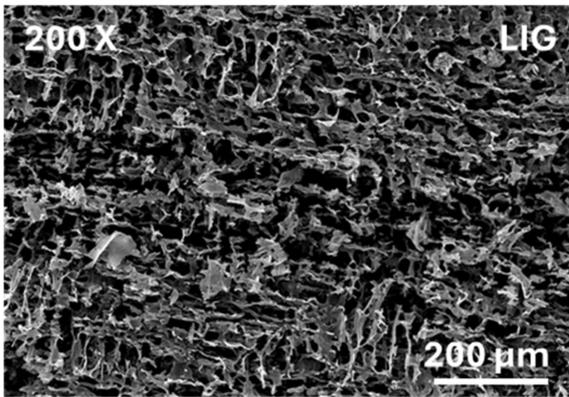


Fig. 4 SEM image of LIG electrode

의해 면저항 수치가 높은 조건들은 과도한 어블레이션으로 인한 열적 데미지 등으로 인해 불균일한 구조를 보임과 동시에  $S_a$  값은 급속도로 상승한다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이, 근적외선 나노초 레이저를 이용해 최적 조건인 1 W의 출력, 10 mm/s의 스캔 속도로 제작된 LIG 전극의 SEM 이미지는 전극 표면의 다공성 미세 구조를 보여준다. 900°C를 초과하는 고온 영역에서 목재는 열분해를 거쳐 탄화 및 부분적인 흑연화 과정을 거치며, 이때 그래핀 시트의 측면 성장이 점진적으로 진행된다. 이와 동시에 원자 배열이 보다 정렬되면서 층간 간격이 감소하고, 닫힌 미세 기공이 형성되기 시작한다. 이 과정에서 나노초 레이저의 상대적으로 긴 펄스폭으로 인해 국소적 열 누적이 발생하며, 이는 리그닌, 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스 등 유기 성분의 단계적 분해와 가스 방출(CO, H<sub>2</sub> 등)을 촉진한다. 이러한 열적 분해와 휘발성 성분의 빠른 탈출(Out Gassing)은 기존 목질 미세구조가 그래핀 기반 다공성 프레임워크로 전환되는 과정을 유도하며, 결과적으로 이 과정에서 3차원 다공성 네트워크가 표면 전체에 균일하게 분포하게 된다.

목재는 동일한 수종이라 하더라도 생육 환경(기후, 토양 조성, 성장 속도), 수확 시기(계절 및 생육 연도), 그리고 절단 위치(심재, 변재, 방사 방향 등)에 따라 미세 구조와 화학 조성이 다소 상이하다. 이러한 비균질성은 레이저 조사 시 열전도도, 흡수율, 수분 함량 등에 영향을 주어, LIG 형성 과정에서의 탄화 및

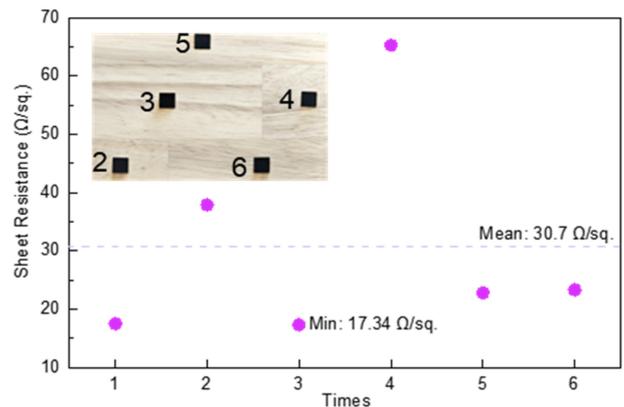


Fig. 5 Comparison of sheet resistance values obtained under identical laser processing conditions on different wood substrates

흑연화 반응의 국소적 차이를 유발할 수 있다. 그럼에도 불구하고 목재 상 LIG 기반 친환경 일렉트로닉스 구현을 위해서는 특정 수준 이상의 품질이 보장되어야 활용이 가능하다. 이에 동일한 레이저 조건(최적 조건)에서 서로 다른 고목목 시편들을 대상으로 LIG를 제작하여 비교하였으며, 시편 간 면저항 값은 일부 차이를 보였으나 Fig. 5와 같이 평균 30.7 Ω/sq.로 측정되어 전반적으로 준수한 전도성을 나타냈다. 또한 최적 조건에서 측정된 최소 면저항(17.34 Ω/sq.)은 선행 목질계 재료 기반 LIG 연구에서 보고된 면저항 범위(3-306 Ω/sq.)에 포함되며, 해당 문헌에서 정리된 레이저 기반 LIG 전극의 평균 면저항이 약 61 Ω/sq.임을 고려할 때 본 연구의 결과는 비교적 낮은 수준의 면저항을 달성한 것으로 판단된다[16]. 따라서 Fig. 5에서 관찰된 시편 간 분산은 목재 기판의 고유한 비균질성(조직 방향, 밀도, 기공 구조 등)에 기인한 변동으로 해석되며, 측정된 면저항 값들이 선행 연구의 보고 범위 내에 포함됨을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 문헌 기반 보고 범위 내에서 재현성 있게 전기 전도도가 확보되는 경우를 준수한 품질로 정의하였으며, 이에 따라 본 연구에서 형성된 LIG 전극은 전반적으로 준수한 품질 범주에 해당한다. 이를 통해 나무의 물리, 화학적 변동성이 존재함에도 불구하고, 제시된 레이저 공정이 기판의 비균질성에 대해 높은 재현성과 공정 안정성을 확보하고 있음을 확인하였다. 또한, 동일한 목재 조각 내에서도 조직 방향, 밀도, 기공 구조 등의 미세한 차이에 따라 레이저 에너지의 흡수 및 탄화 반응이 균일하게 진행되지 않기 때문에, 면저항 값이 완전히 동일하게 나타나기는 어렵다. 그럼에도 불구하고, 얻어진 결과를 통해 천연 유기물의 한계인 재료적 다양성을 감안하여도 안정적으로 준수한 품질의 LIG를 구현할 수 있음을 보여준다.

### 3.2 디포커싱에 따른 LIG 품질 비교

긴 펄스폭 혹은 연속파 레이저를 활용하여 LIG를 제작할 때 디포커싱 전략으로 패턴링을 해야 잘 생성된다는 내용은 다양한 논문들을 통해 소개되었다. 특히 Bedewy 그룹에서는 폴리이미드

Table 2 Change in Laser Spot Diameter ( $\mu\text{m}$ ) as a Function of Defocusing Distance (mm)

Defocus [ $\mu\text{m}$ ]	$d(z)$ [ $\mu\text{m}$ ]
0	26.7
100	27.4
200	29.4
300	32.4
400	36.1
500	40.5
600	45.2
700	50.3
800	55.5
900	60.9
1000	66.5

필름을 기울인 상태로 레이저를 조사하였을 때 위치에 따라 커팅부터 다공성 형태, 나노섬유, 비정질카본 등 플루언스 의존성에 대한 논의를 한 연구를 소개한 바 있다[17]. 그러나 해당 연구에서도 특정 파워 조건 몇 가지만 비교하였을 뿐 미세하게 레이저 파워와 스캔 속도를 변조하며 진행하지 않았다. 이에 본 연구에서는 초점을 기준으로 100  $\mu\text{m}$ 간격으로 총 1,000  $\mu\text{m}$ 까지 디포커싱하며 각 조건에서 레이저 파워 및 스캔 속도를 변조하여 제작한 LIG의 면저항을 측정하고 특정 조건들에 대해 라만 분광을 통해 그래핀 품질을 확인하였다. 레이저에서 발진된 가우시안 빔의 사이즈  $D$ 는 스펙 상으로 7 mm, 파장  $\lambda$ 는 1064 nm,  $f$ -theta 렌즈의 초점거리  $f$ 는 115 mm이다. 이 때 빔 쿨리티  $M^2$ 는 1.2로 가정하였다. 해당 조건을 바탕으로 집속된 초점에서의 빔 사이즈는 식(1)에 의해 계산될 수 있으며 약 26.7  $\mu\text{m}$ 이다.

$$d_0 \approx \frac{4M^2\lambda f}{\pi D} \tag{1}$$

다음으로 디포커싱 거리에서의 빔 크기를 알기 위해서는 Rayleigh 길이를 알아야 하며, 식(2)에 의해 계산될 수 있다. 여기에서  $w_0$ 는 빔의 반지름으로 13.35  $\mu\text{m}$ 이다. Rayleigh 길이를 위에 주어진 수치로 계산하면 약 438.5  $\mu\text{m}$ 가 된다.

$$Z_r = \frac{\pi w_0^2}{M^2\lambda} \left( w_0 = \frac{d_0}{2} \right) \tag{2}$$

마지막으로 디포커싱 거리에서의 빔 크기는 식(3)에 의해 계산이 된다. 여기서  $z$ 는 디포커싱 거리이며, 디포커싱 정도에 따른 빔 사이즈는 Table 2와 같다.

$$w(z) = w_0 \sqrt{\left( \frac{z}{z_R} \right)^2 + 1} \quad (d(z) = 2w(z)) \tag{3}$$

레이저 파워는 0.5-2.0 W까지 0.25 W 간격으로, 스캔속도는

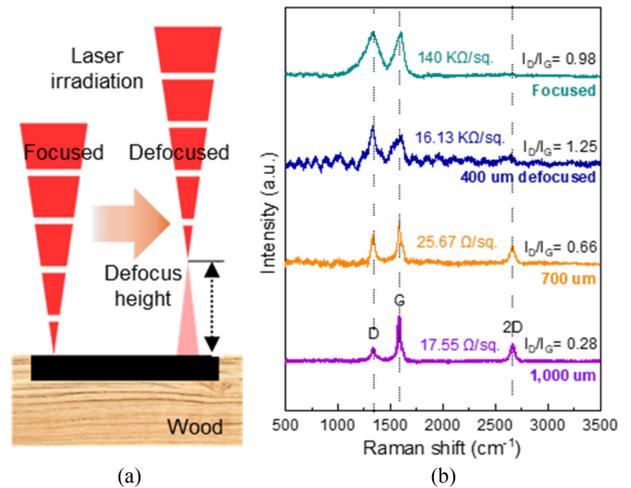


Fig. 6 (a) Schematic of the laser patterning process based on controlled defocusing and (b) Raman spectra and sheet resistance values of LIG samples fabricated at different degrees of defocusing

10-50 mm/s까지 10 mm/s 간격으로 진행하였으며, 선간 간격은 20  $\mu\text{m}$ 으로 고정하고 Fig. 6(a)와 같이 초점부터 100  $\mu\text{m}$  간격으로 디포커싱하며 레이저 패터닝을 진행하였다. 초점 위치에서는 대부분의 조건에서 높은 면저항 수치를 보이거나, 전기 전도도가 측정되지 않았으며, 디포커싱 되는 정도가 깊어질수록 전도도가 측정되는 범위가 많아지기 시작했다. 그리고 1,000  $\mu\text{m}$  조건에서 최적의 전기 전도도를 가진 LIG 전극을 획득할 수 있었다. Table 2의 이론식 계산에 의한 빔 사이즈를 고려하였을 때 1,000  $\mu\text{m}$  디포커싱에서는 20  $\mu\text{m}$  간격으로 레이저 패터닝 시 약 같은 위치를 3.3회 정도 지나가는 반면 초점에서는 1.3회 정도 지나간다. 이는 나노초 레이저 공정에서 디포커싱은 단순히 초점 위치를 벗어나는 것이 아니라, 빔 지름을 확장시켜 동일한 선간 간격 조건에서 중첩 계수를 증가시키는 효과를 갖는다. 즉, 단일 라인 패터닝과 같이 중첩 효과가 제한된 조건에서는 1,064 nm 근적외선 파장에서 목재의 낮은 흡수율로 인해 표면 온도가 그래핀화에 필요한 수준까지 충분히 상승하기 어렵고, 그 결과 안정적인 LIG 형성이 제한될 수 있다. 반면, 디포커싱 조건에서는 빔 지름이 확장되면서 동일 면적 내에서 인접 스캔 라인 간 중첩이 증가하고, 이에 따라 동일 지점이 다수의 펄스에 의해 반복적으로 가열되어 국부적인 열 체류시간과 누적 열량이 증가한다. 나노초 스케일에서는 레이저-물질 상호작용이 광열 거동에 의해 지배되므로, 이러한 반복적 중첩 조사는 단일 조사 대비 열분해 및 탈수소 및 탈산소 반응을 보다 완만하고 지속적으로 진행시키며, 결과적으로  $sp^2$  결합 재배열과 그래핀 유사 구조의 성장을 촉진한다. 또한 디포커싱에 의해 단위 면적당 피크 플루언스가 완화되면서 폭발적 기화나 비산과 같은 과도한 어블레이션 성분이 감소하고, 보다 균일한 열적 처리 조건이 형성되어,  $sp^2$  구조의 연속성과 전기 전도도가 함께 향상되는 경향을 보인다. 이러한 결과는 Fig. 6(b)의 라만 스펙트럼에서도

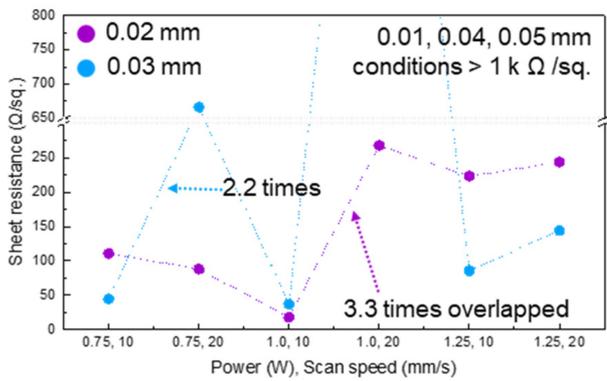


Fig. 7 Effect of line-spacing on the sheet resistance of LIG

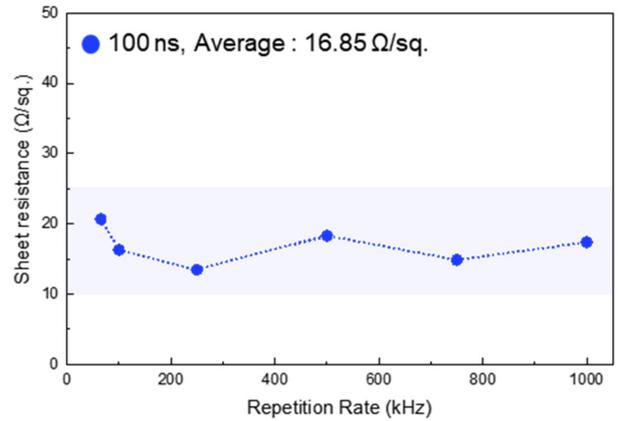


Fig. 8 Sheet resistance values of LIG as a function of repetition rate

볼 수 있다. 1 W, 10 mm/s 조건에서 초점에서 디포커싱될수록 면저항도 낮아지며,  $I_D/I_G$  비율도 낮아짐을 관찰할 수 있다. 결과적으로, 나노초 레이저 기반 LIG 제작 공정에서는 디포커싱에 따른 중첩 증가가 과도한 국부적 열 충격 없이 그래핀화 효율을 높이는 핵심 인자로 작용한다고 할 수 있다.

3.3 선간 간격에 따른 LIG 품질 비교

선간 간격에 따른 LIG 품질 차이를 확인하기 위해 0.5-1.25 W (0.25 W 간격), 10-30 mm/s (10 mm/s 간격) 조건에서 0, 400, 700, 1,000 μm의 디포커싱 조건에서 10 μm 간격으로 10-50 μm까지의 선간 간격으로 레이저 패터닝을 진행하였다. 이 실험 조건 비교에서도 디포커싱될수록 LIG가 안정적으로 생성되며 면저항 수치가 낮아지는 경향을 보였다. 1,000 μm 디포커싱 조건에서 빔 사이즈가 약 66.5 μm임을 고려하였을 때 선간 간격이 10, 20, 30, 40, 50 μm일 때 각각 6.7, 3.3, 2.2, 1.7, 1.3 회 정도로 같은 위치를 지나감을 알 수 있다. 10 μm의 선간 간격 조건에서는 면저항 값이 대부분 kΩ 이상의 수치를 보였으며, 40, 50 μm 선간 간격 조건에서는 MΩ 이상의 매우 높은 면저항이 측정되거나, 면저항이 측정되지 않았다. 선간 간격은 인접 스캔 라인 간의 에너지 중첩도를 결정하는 핵심 인자로서, 열적 누적 및 국부적 열이력에 직접적인 영향을 미친다. 일반적으로 빔 지름에 대한 선간 간격의 비율이 커질수록, 동일 면적 내에서 한 지점에 더 많은 펄스가 조사되고, 이는 열의 잔류 시간 증가를 유도하여, 결과적으로 표면 온도가 그래핀화 임계온도(일반적으로 2000 K 이상)에 도달할 가능성이 높아진다. 그러나 중첩이 지나치게 높을 경우, 에너지 공급이 과도해지면서 재배열된 방향족 탄소 네트워크가 다시 재분해된다[18]. 즉, LIG 형성은 레이저 흡수 후의 열 분해 및  $sp^2$  재배열 과정에 의해 진행되며, 적절한 중첩을 유도할 경우 열 손실을 최소화함과 동시에 다중 펄스에 의한 잔류 온도 상승을 통해 그래핀화 반응을 촉진시킬 수 있다[19].

Fig. 7 그림과 같이 20 μm에서 가장 낮은 면저항의 LIG가 잘 생성되었는데, 이는 해당 조건이 가장 적절한 에너지 중첩과 열 확산의 균형 상태를 만들 수 있음을 의미한다. 즉, 20 μm 간격에서는 빔 간 열 중첩으로 인해 충분한 열적 체류시간이 확보되어

$sp^2$  결합의 성장이 효율적으로 진행되었으며, 동시에 과도한 열 집중이 방지되어  $sp^3$  결합 형성이나 재분해 과정이 억제된 것으로 보인다. 반면, 10 μm 간격에서는 중첩이 과도하여 부분적인 과열 및 재분해 현상이 발생하고, 40-50 μm 간격에서는 중첩이 부족하여 표면 온도가 그래핀화 임계점에 도달하지 못해 불완전한 탄화 영역이 형성된 것으로 해석된다.

3.4 펄스폭, 반복률에 따른 LIG 품질 비교

Fig. 8은 1 W, 10 mm/s 조건에서 펄스폭을 100 ns로 고정된 상태에서 반복률을 65에서 1,000 kHz까지 변화시켰을 때에도 LIG의 면저항 수치가 큰 차이를 보이지 않음을 보인다. 이 현상은 반복률 변화에 따른 펄스 간 시간 간격 및 열 누적 특성이 달라짐에도 불구하고, 전체적인 평균 열 에너지 제공이 유사하게 유지되었기 때문으로 해석된다. 레이저 평균 출력은 펄스당 에너지와 반복률의 곱으로, 평균 출력이 일정할 경우 반복률이 증가할수록 펄스 당 에너지는 반비례하여 감소하게 된다. 즉, 반복률이 높을수록 개별 펄스는 약하지만 더 자주 조사되고, 낮을수록 펄스 하나의 에너지는 크지만 조사 간격이 길어진다. 100 ns 펄스의 경우, 나노초 영역에서는 여전히 광열 거동이 지배적이므로, 이러한 펄스 에너지 분포의 차이보다는 표면의 시간 평균 온도와 누적 열량이 LIG 형성에 더 큰 영향을 준다. 65 kHz 조건에서는 개별 펄스의 에너지가 높아 순간적인 피크 온도 상승이 크지만, 다음 펄스가 도달하기 전까지 충분한 냉각 시간이 존재하여 온도가 부분적으로 회복된다. 반면 1,000 kHz에서는 펄스당 에너지가 낮더라도 조사 간격이 매우 짧기 때문에 열이 완전히 확산되지 못하고 누적되어, 결과적으로 평균 표면 온도는 비슷한 수준으로 유지된다.

이 두 메커니즘이 서로 상쇄되면서, 표면의 열적 평형상태와 탄화 반응 조건이 유사해지고, 이에 따라  $sp^2$  구조 형성과 전기 전도도도 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 나노초 레이저 기반 LIG 형성에서 펄스 에너지와 반복률의 조합보다 단위 면적당 전달되는 열 에너지의 평균 양과 열적 체류 시간이 더 중요한 인자임을 의미한다. 다시 말해서, 동일 평균 출력 조건에서는

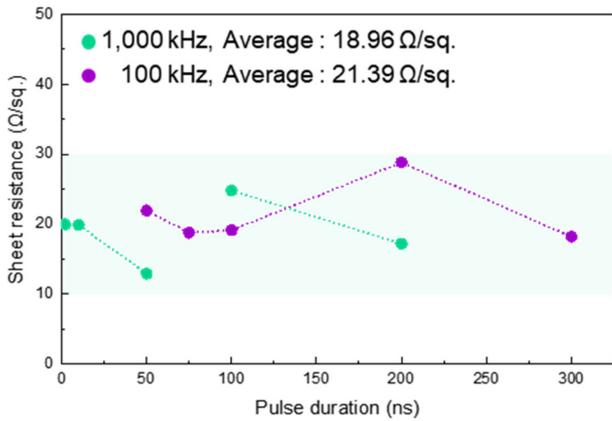


Fig. 9 Sheet resistance Values of LIG as a function of pulse duration at 100 and 1,000 kHz repetition rates

반복률 변화가 수십 kHz에서 수 MHz 범위에 이르더라도, 광열 누적 거동이 유사하게 유지되어 그래핀화 효율과 면저항의 차이가 미미하게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 1 W, 10 mm/s 조건에서 레이저 허용 범위를 고려하여, 100 kHz의 반복률에서 50-300 ns로 펄스폭 변조 및 1,000 kHz 반복률에서 2-200 ns로 펄스폭을 변조하여 LIG를 제작하고, 면저항 수치를 비교하였다. 이 역시 면저항 수치가 크게 차이 나지 않았는데 이는 펄스폭 변화가 피크 파워에는 영향을 미치지 않지만, 동일한 평균 출력 조건에서는 펄스당 에너지가 일정하기 때문에, 레이저 조사부에 가해지는 총 열 에너지는 거의 동일하게 유지되었기 때문인 것으로 판단된다. 펄스폭이 짧을수록 피크 파워가 높아 순간적인 기화가 더 잘 되지만, 나노초 레이저 영역에서는 여전히 광열 거동이 지배적이므로, 짧은 펄스에서도 물질 제거보다는 열분해와 sp<sup>2</sup> 재배열 과정이 주요하게 작용한다. 반대로 펄스폭이 길어지면 피크 플루언스는 낮아지지만, 에너지의 시간적 분포가 넓어져 열 축적 효과가 강화된다. 이러한 상반된 효과가 서로 보상되어, 결과적으로 평균 출력이 일정한 조건에서는 펄스폭 변화에 따른 그래핀화 정도와 면저항이 큰 차이를 보이지 않은 것으로 해석된다. 다시 말해서 나노초 레이저 기반 LIG 형성 과정에서 그래핀화의 핵심 인자는 피크 파워보다는 단위 면적당 전달되는 열 에너지의 평균 양 및 누적 정도임을 알 수 있으며, 극초단 펄스 범위(펨토-피코초)가 아닌 펄스폭 변화가 상대적으로 제한된 범위에서는 그래핀 생성 품질에 미치는 영향이 상대적으로 미미함을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 나노초 레이저를 이용하여 목재 기판 상에 레이저 유도 그래핀(LIG) 전극을 제작하고, 다양한 레이저 공정 변수(레이저 파워, 스캔 속도, 디포커싱, 선간 간격, 펄스폭, 반복률)가 그래핀의 전기적 및 구조적 품질에 미치는 영향을 체계적으로

분석하였다. 실험 및 이론적 고찰 결과, LIG 형성은 나노초 레이저의 광열 지배 영역에서 주로 열 분해와 sp<sup>2</sup> 결합 재배열에 의해 진행되며, 따라서 단위 면적당 전달되는 열 에너지의 평균 양과 열 축적이 주요한 공정 인자로 작용함을 확인하였다. 빔이 디포커싱 될수록 빔 지름이 확장되어 인접 스캔 라인 간의 중첩이 높아지고, 이에 따라 국부적 체류시간과 열 안정성이 향상되어 보다 균일한 sp<sup>2</sup> 탄소 네트워크가 형성되었다. 특히, 선간 간격 20 μm 조건에서 가장 낮고 안정적인 면저항이 측정되었으며, 이는 그래핀화 임계온도에 도달하기 위한 적절한 중첩도와 열 확산의 균형이 최적으로 형성된 결과로 해석된다. 또한, 펄스 폭과 반복률을 변조하였을 때 평균 출력이 일정한 경우 면저항 변화가 크게 없었는데, 이는 개별 펄스 에너지의 분포 차이보다 평균 광열 에너지와 열 누적 효과가 지배적이기 때문이다. 종합적으로, 본 연구는 나노초 레이저 기반 LIG 형성에서 그래핀화 효율을 결정하는 핵심 요인은 피크 파워가 아닌 평균 열 에너지와 중첩 기반의 열 누적 정도임을 실험적으로 검증하였으며, 이러한 결과는 향후 친환경 전극 및 에너지 소자용 LIG 제조 공정의 최적화 설계에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 대전광역시의 재원으로 대전RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(No. 2025-RISE-06-012).

REFERENCES

1. Geim, A. K., (2009), Graphene: Status and prospects, Science, 324(5934), 1530-1534.
2. Aftab, S., Koyyada, G., Mukhtar, M., Kabir, F., Nazir, G., Memon, S. A., Aslam, M., Assiri, M. A., Kim, J. H., (2024), Laser-induced graphene for advanced sensing: comprehensive review of applications, ACS Sensors, 9(9), 4536-4554.
3. Du, W., Jiang, X., Zhu, L., (2013), From graphite to graphene: direct liquid-phase exfoliation of graphite to produce single- and few-layered pristine graphene, Journal of Materials Chemistry A, 1(36), 10592-10606.
4. Muñoz, R., Gómez-Aleixandre, C., (2013), Review of CVD synthesis of graphene, Chemical Vapor Deposition, 19(10-12), 297-322.
5. Tetlow, H., Boer, J. P. d., Ford, I. J., Vvedensky, D. D., Coraux, J., Kantorovich, L., (2014), Growth of epitaxial graphene: Theory and experiment, Physics Reports, 542(3), 195-295.
6. Ye, R., James, D. K., Tour, J. M., (2018), Laser-induced graphene, Accounts of Chemical Research, 51(7), 1609-1620.

7. Lin, J., Peng, Z., Liu, Y., Ruiz-Zepeda, F., Ye, R., Samuel, E. L., Yacaman, M. J., Yakobson, B. I., Tour, J. M., (2014), Laser-induced porous graphene films from commercial polymers, *Nature communications*, 5(1), 5714.
8. Kim, Y.-R., Nam, H. K., Lee, Y., Yang, D., Le, T. S. D., Kim, S.-W., Park, S., Kim, Y.-J., (2024), Green supercapacitor patterned by synthesizing MnO/laser-induced-graphene hetero-nanostructures on wood via femtosecond laser pulses, *Biochar*, 6, 36.
9. Wang, M., Nam, H. K., Yang, D., Lee, Y., Lu, Y., Kim, S.-W., Yu, L., Kim, Y.-J., (2024), Green smart multifunctional wooden roofs enabled by single-step hydrophobic laser-induced graphene fabrication, *Carbon*, 228, 119373.
10. Jing, T., Nam, H. K., Yang, D., Lee, Y., Gao, R., Yoo, H., Kwon, S., Kim, S. W., Yu, L., Kim, Y. J., (2024), In situ transfer of laser-induced graphene electronics for multifunctional smart windows, *Small Science*, 4(9), 2400010.
11. Yang, D., Nam, H. K., Lee, Y., Kwon, S., Lee, J., Yoon, H., Kim, Y. J., (2025), Laser-induced graphene smart textiles for future space suits and telescopes, *Advanced Functional Materials*, 35(1), 2411257.
12. Nam, H. K., Le, T. S. D., Yang, D., Kim, B., Lee, Y., Hwang, J. S., Kim, Y. R., Yoon, H., Kim, S. W., Kim, Y. J., (2023), Smart wooden home enabled by direct-written laser-induced graphene, *Advanced Materials Technologies*, 8(9), 2201952.
13. Beckham, J. L., Li, J. T., Stanford, M. G., Chen, W., McHugh, E. A., Advincula, P. A., Wyss, K. M., Chyan, Y., Boldman, W. L., Rack, P. D., (2021), High-resolution laser-induced graphene from photoresist, *ACS Nano*, 15(5), 8976-8983.
14. Loh, G., Baillargeat, D., (2013), Graphitization of amorphous carbon and its transformation pathways, *Journal of Applied Physics*, 114(3).
15. Zhu, J., Huang, X., Song, W., (2021), Physical and chemical sensors on the basis of laser-induced graphene: Mechanisms, applications, and perspectives, *ACS Nano*, 15(12), 18708-18741.
16. Nam, H. K., Choi, J., Jing, T., Yang, D., Lee, Y., Kim, Y. R., Le, T. S. D., Kim, B., Yu, L., Kim, S. W., (2024), Laser-induced graphene formation on recycled woods for green smart furniture, *EcoMat*, 6(4), e12447.
17. Abdulhafez, M., Tomaraei, G. N., Bedewy, M., (2021), Fluence-dependent morphological transitions in laser-induced graphene electrodes on polyimide substrates for flexible devices, *ACS Applied Nano Materials*, 4(3), 2973-2986.
18. Vashisth, A., Kowalik, M., Geringer, J. C., Ashraf, C., Van Duin, A. C., Green, M. J., (2020), Reaxff simulations of laser-induced graphene (LIG) formation for multifunctional polymer nanocomposites, *ACS Applied Nano Materials*, 3(2), 1881-1890.
19. Dong, Y., Rismiller, S. C., Lin, J., (2016), Molecular dynamic simulation of layered graphene clusters formation from polyimides under extreme conditions, *Carbon*, 104, 47-55.



#### Hyungjun Ha

B.E candidate in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interests are laser-induced graphene, wearable electronics.

E-mail: hamax8161@o.cnu.ac.kr



#### Hyeong Ryeol Choi

B.E candidate in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interests are laser direct writing technology, laser surface treatment.

E-mail: hyeongryeolchoi@o.cnu.ac.kr



#### Do-Jeong Kim

B.E-M.Sc. integrated student in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is laser-induced graphene powder applications, flexible electronics.

E-mail: dojeong.kim@o.cnu.ac.kr



#### Young-Jin Kim

Associate professor in the Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST). His research interest is ultrafast photonics and its applications in high-precision metrology, surface topography, bio-medical diagnosis, space LIDARs and nano/micro material processing.

E-mail: yj.kim@kaist.ac.kr



#### Han Ku Nam

Assistant professor in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is micro/nano-scale material processing, laser-induced graphene, secondary battery anode fabrication.

E-mail: hanku.nam@cnu.ac.kr

## 창간

(사)한국정밀공학회에서 발행한 한국정밀기계학회지는 1984년 6월에 창간되었다. 이후 1985년 12월, 학술지명을 한국정밀공학회지로 변경하였다.

## 목적 및 연구 범위

한국정밀공학회지는 정밀공학 및 제조와 관련된 독창적 연구 논문을 게재하는 것을 목표로 한다. 구체적으로는 모든 학문분야나 산업분야에서 독창적인 아이디어의 실험적인 구현과정 및 제조과정에서의 반복정도, 신뢰성, 운동정밀도 및 측정정밀도에 영향을 미칠 수 있는 각 종 현상에 대하여, 기계공학적 또는 다학제적 접근방식으로 창의적인 실험, 해석 및 모델링 예측 등 한층 심화된 연구로 궁극적으로는 기계 및 생산공정의 정밀도향상에 기여하는 데 초점을 맞춘다, 연구범위로는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 분야 등 정밀공학 관련분야를 포함하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

## 금액

### 구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

### 게재료

- 기본면수 8면: 200,000원, 8면 초과 시 1면 당 30,000원으로 가산
- 용역 또는 지원금(Acknowledgement)으로 작성된 논문은 게재료의 50% 가산
- 게재료는 게재 확정 된 논문으로서, 용역 또는 지원금(Acknowledgement)으로 작성된 논문에만 한하여 청구
- 청구 후 15일 이내에 납부

## 연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

전화 02-518-2928 / 팩스 02-518-2937 / paper@kspe.or.kr / <https://www.kspe.or.kr>

한국정밀공학회지 논문투고 및 심사: <https://www.editorialmanager.com/jkspe/>

한국정밀공학회지 저널: <https://jkspe.or.kr/>

# 한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

## 논문투고 및 게재규정

### 제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다)의 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 논문의 투고 및 게재에 대한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

### 제2조 (투고자)

투고논문의 교신저자 및 제1저자는 학회 회원이어야 한다. 단, 편집장이 특별히 인정하는 자는 예외로 할 수 있다.

### 제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

- ① 투고논문의 책임은 저자(들)에게 있다.
- ② 투고논문에 대하여 모든 저자들은 '(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정'을 준수하여야 한다. 학술활동 윤리규정을 위반할 경우 편집장은 논문의 게재를 불허 또는 취소할 수 있으며, 규정에 따라 징계할 수 있다.

### 제4조 (연구범위)

논문의 연구범위는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적응제조시스템, 녹색생산기술 등 정밀공학 관련분야로 하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

### 제5조 (투고 구분)

학회지에 투고되는 논문은 아래와 같이 구분하며, 기본면수는 8면 이내로 하되 내용에 따라 초과할 수 있다.

- ① 일반논문: 학술성 또는 실용성이나 응용성이 우수한 논문
- ② 특집논문: 별도로 규정된 특집논문 규정에 따라 작성된 논문
- ③ 기타투고: 전망, 해설, 강좌, 기타 원고 등

### 제6조 (접수)

- ① 논문은 수시로 접수하며 접수일은 학회에 접수절차가 완료된 일자로 한다.
- ② 논문은 학회에서 규정한 원고작성양식(Template)에 따라 작성한 후 등록 제출한다.
- ③ 이 규정과 '논문집필요령'에 위배되는 원고는 접수하지 않을 수 있다.
- ④ 접수된 원고는 반환하지 않는다.

### 제7조 (심사 및 게재 결정)

- ① 논문의 게재여부는 학회지 편집장이 결정한다.
- ② 논문의 심사는 학회지 편집장, 편집인, 또는 편집위원이 추천한 2인의 심사위원에 의해 진행되며 심사 및 게재여부 판정 절차는 논문심사규정에 따른다.

### 제8조 (저작권)

- ① 논문내용에 대한 책임은 저자(들)에게 있다.
- ② 저자(들)는 제출된 논문의 저작권을 학회에 양도하여야 하며, 이를 위해 교신저자는 '한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서(Research Ethics and Copyright Transfer Agreement)'를 제출하여야 한다.
- ③ 게재된 논문 및 기타 투고물의 저작권은 학회에 있으며, 학회의 승인 없이 무단으로 복제할 수 없다.
- ④ 저자(들)는 자신(들)의 다른 연구물에 학회지에 게재된 논문 및 기타투고물의 일부를 사용할 수 있으나, 그 내용의 출처로 게재 논문을 인용해야 한다.

### 제9조 (자료공개)

학회는 논문 및 기타 투고물을 인쇄물과 온라인 출판물 등의 형태로 공개할 수 있다.

### 제10조 (원고작성요령)

- ① 학회에 투고하는 원고의 작성방법 및 편집은 별도로 규정된 '논문집필요령'에 따른다.
- ② 편집위원회는 채택된 원고에 대하여 용어, 문자, 맞춤법 등을 '논문집필요령'에 부합되도록 수정할 수 있다.

### 제11조(게재료)

저자는 학회지에 게재된 논문에 대하여 소정의 게재료를 납부하여야 한다. 규정면수를 초과한 논문의 경우 초과 면에 대한 게재료를 납부하여야 한다. 게재료는 이사회에서 결정한다.

## 논문집필요령

1. 논문원고를 투고할 때는 한국정밀공학회지 양식에 맞춰 <https://www.editorialmanager.com/jkspe/>로 온라인 투고한다.
2. 논문의 구성은 다음 순서로 함을 원칙으로 한다.
  - (1) 제목, (2) 영문제목, (3) 저자명, (4) 영문저자명, (5) 소속(국·영문 병기) 및 교신저자 정보, (6) Keywords,
  - (7) 초록, (8) 투고일자, (9) 서론, (10) 본론(이론해석, 실험방법, 결과, 토론, 고찰), (11) 결론, (12) 후기,
  - (13) 참고문헌, (14) 부록 기타, (15) 모든 저자의 소속·직위 등의 정보
3. 논문 원고는 한글 또는 영문 전용 및 한글과 영문 혼용, 한글과 한자 혼용으로 작성하고 용어의 의미가 난해할 경우는 ( ) 안에 원어를 병기하도록 한다.
4. 논문의 제목은 10 단어 이내로 간결하게 표시해야 하고 Keywords는 영문(괄호 안에 국문)으로 6 단어 이내로 작성한다.
5. 논문이 한글 혹은 한자 혼용일 때는 한글로 제목을 표시한 다음 영문으로 제목을 작성한다. 이어서 저자명을 국·영문 병기로 작성한다. 다음에 초록과 Keywords를 삽입하여야 하며 초록은 영문 200 단어 이내로 작성한다. 초록에는 도표, 참고문헌 표시가 있어서는 안되며 한문단(Paragraph)으로 서술한다.
6. 표 및 그림은 영문(Table 1, Fig. 1...)으로 하고 번호순에 따라 본문중에 그 위치를 표시하고 설명을 병기해야 한다.
7. 숫자는 아라비아 숫자를 사용하며 수량단위는 SI 단위 사용을 원칙으로 한다.
8. 인용 및 참고문헌의 색인번호를 본문의 인용처에 반드시 기입하고, 인용순서대로 다음과 같이 표시 한다.
  - (1) 본문 중 인용 시: 대표저자의 성씨 뒤에 대괄호를 사용하여 일련번호를 쓴다.  
예) Hong [1]은, Chandran [3]에 의하여
  - (2) 참고문헌 표기 시 영문으로 작성한다.  
단행본일 경우: 저자, (년도), 제목, 출판사.  
정기간행물인 경우: 저자, (년도), 제목, 저널명, 권(호수), 페이지.  
예) Hong, K. D., (2022), A method to investigate mechanical properties, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(1), 1-18.
9. 부록은 본문 전체 서식과 동일

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다) 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 투고된 논문의 심사와 관련된 사항을 규정함을 목적으로 한다.

## 제2조 (투고 및 접수)

- ① 학회지에 투고하고자 하는 자는 별도로 규정된 학회의 투고 규정에 따라 작성된 논문을 학회의 논문제출시스템을 이용하여 투고하며 학회는 이를 접수한다.
- ② ①항의 규정에도 불구하고, 학회지 편집장이 인정하는 경우에 한하여 기타의 방법으로 논문 투고 및 접수를 진행할 수 있다.
- ③ 학회의 연구 분야와 관련된 주제의 논문 접수를 원칙으로 한다. 투고된 논문이 학회의 연구 분야와 관련이 없거나 논문의 기본 요건이 갖추어져 있지 않은 경우 편집장은 논문의 접수를 거절할 수 있다. 연구 분야는 별도로 규정된 '논문투고 및 게재규정'과 '논문집필요령'에 따른다.

## 제3조 (심사위원 선정)

- ① 학회지 편집장은 접수된 논문의 분야를 고려하여 해당분야 학회지 편집인에게 심사 배정하며, 학회지 편집인은 부문별로 선정된 학회지 편집위원 중 1인을 심사주관 편집위원으로 위촉한다.
- ② 심사주관 편집위원은 접수된 논문의 심사에 적절하다고 판단되는 심사위원을 선정하여 편집장에게 추천한다.
- ③ 심사위원의 수는 논문 1편당 2인으로 하되 제3심사위원이 위촉될 수 있고, 이 경우를 포함하여 논문 1편당 최대 3인으로 한다. 심사위원으로는 논문저자와 소속이 다른 위원을 위촉함을 원칙으로 한다.
- ④ 편집장은 추천 받은 위원에게 논문심사 수락여부를 확인하기 위한 이메일을 송부한다. 추천 받은 위원 중 심사거부 의사를 표시한 위원이 있는 경우 편집위원에게 심사위원 재추천을 요청한다.

## 제4조 (심사 방법)

- ① 심사위원은 논문의 종합평가 후 객관적인 근거를 들어 심사결과를 기술해야 하며, 필요 시 수정요구를 명확하게 해야 한다.
- ② 심사결과는 '채택가(Accept)', '수정 후 채택(Accept Subject to Minor Revisions)', '수정 후 재심(Re-Review after Major Revisions)', '채택불가(Reject)' 중 선택한다.

## 제5조 (심사 기간)

- ① 학회지의 편집위원은 편집위원 위촉일로부터 7일 이내에 심사위원을 선정하고, 논문심사를 의뢰 받은 심사위원은 제1차 심사의 경우 심사수락일로부터 14일 이내, 제2차 심사인 경우 7일 이내에 심사를 완료하여야 한다.
- ② 편집인 및 편집위원의 판정은 심사결과 접수일로부터 7일 이내에 완료하여야 한다.
- ③ 심사위촉 후 14일이 지나도록 심사수락을 하지 않는 경우에는 다른 심사위원으로 변경할 수 있다.
- ④ 심사위원의 심사수락 후 1개월이 지나도록 심사가 완료되지 않은 경우에는 편집인 또는 편집위원이 심사위촉을 철회할 수 있다.
- ⑤ 상기의 규정에도 불구하고 논문접수일로부터 3개월이 소요된 시점까지 심사결과가 접수되지 않은 경우 다음과 같이 시행할 수 있다.
  1. 심사위원 중 1인의 심사결과가 접수되지 않은 경우: 해당논문의 편집위원이 3개월 소요 시점으로부터 7일 이내에 심사한다.
  2. 심사위원 2인의 심사결과가 모두 접수되지 않은 경우: 해당논문의 편집인 및 편집위원이 3개월 소요 시점으로부터 7일 이내에 심사한다. 단, 편집인이 편집위원을 겸한 경우 편집인 1인의 심사만으로 심사절차를 진행한다.

## 제6조 (저자수정기한)

- ① 저자는 학회지 편집장의 심사결과 판정에 따른 논문수정요구를 반영한 수정 논문을 접수일로부터 수정 후 재심일 경우 30일 이내, 수정 후 채택일 경우 14일 이내에 재제출하여야 한다.
- ② 수정논문 접수가 제출 마감일로부터 60일 이상 지체될 경우 편집위원회는 논문을 철회할 수 있으며, 저자가 그 이후 계속 심사를 받기 원할 경우 다시 투고 하여야 한다.

## 제7조 (게재 판정)

- ① 논문게재여부는 심사위원 2인의 심사결과를 검토하여 해당논문의 학회지 편집인 및 편집위원의 종합평가를 받아 학회지 편집장이 최종 결정한다.
- ② 심사위원 2인 이상이 '채택불가' 판정 한 논문은 학회지에 게재 할 수 없다.

## 제8조 (특집논문심사)

- ① 학회지 편집장은 특집논문을 주관할 책임편집인을 학회 임원의 추천을 받아 위촉한다.
- ② 책임편집인이 학회 이사 또는 부문화장인 경우, 책임편집인의 주관으로 접수된 논문에 대해 2인의 심사위원을 선정하여 심사하며 게재의 판정은 이 규정 제7조에 따른다. 책임편집인이 학회 이사 또는 부문화장이 아닌 경우, 편집위원회에서 논문심사를 담당할 편집인을 선정하여 논문 심사를 주관하도록 한다.

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제9조 (비밀유지)

- ① 심사위원은 누구에게도 밝히지 아니한다.
- ② 저자의 이름은 심사위원에게 밝힐 수 있다.
- ③ 심사내용은 저자 이외에는 밝히지 아니한다.

## 제10조 (이의제기)

- ① 저자가 심사 결과에 대하여 이의를 제기할 경우, 심사위원과 저자 간의 의견 교환은 편집인을 통해서 한다. 심사위원과 저자가 의견교환을 하고자 할 때, 편집인의 중개로 서로 의견을 교환할 수 있다.
- ② 저자의 재심요구는 원칙적으로 받아들이지 않는다.

## 제11조 (심사료)

필요 시 편집인, 편집위원에게는 소정의 편집비를, 심사위원에게는 소정의 심사료를 지급할 수 있다.

# (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: <https://jkspe.or.kr/policy/ethics.php>
- 규정에서 정의되지 않은 사안은 한국학술단체총연합회의 연구윤리지침을 따르되, 구체적인 판정은 (사)한국정밀공학회 편집위원회의 결정에 따른다.

## 제 1 장 총칙

### 제1조(목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다)와 관련된 학술활동이 인간의 존엄성과 가치를 침해하거나 사회 공동의 이익을 손상하지 않는 높은 윤리적 수준을 유지하기 위하여, 우리 학회 구성원들이 지켜야 할 윤리적 기준을 제시, 학문 및 사회 발전에 건강하게 기여함에 그 목적이 있다.

### 제2조(윤리규정 적용범위)

- ① 이 규정은 학회가 발간하는 모든 학술지 및 학술대회, 심포지엄, 워크샵, 포럼 등 학술활동 전반에 적용한다.
- ② 본 규정은 위 학술활동과 관련된 저자, 심사위원, 편집위원, 사무국 실무자에게 모두 적용한다.
- ③ 기타 위에 정하여 지지 않은 범위는 교육부 및 산하기관의 각급 규정을 준용할 수 있다.

### 제3조(부정행위의 범위)

당 규정에서 제시하는 부정행위는 학회와 관련된 학술활동과 논문 및 발표 등에서 행하여진 위조·변조·표절·부당한 논문저자 표시 행위·이중게재 등을 말하며 다음 각 호와 같다.

- ① '위조'는 존재하지 않는 데이터 또는 연구결과 등을 허위로 만들어 내는 행위를 말한다.
- ② '변조'는 연구 재료·장비·과정 등을 인위적으로 조작하거나 데이터를 임의로 변형·삭제함으로써 연구 내용 또는 결과를 왜곡하는 행위를 말한다.
- ③ '표절'이라 함은 타인의 아이디어, 연구내용·결과 등을 정당한 승인 또는 인용 없이 도용하는 행위를 말한다.
- ④ '부당한 논문저자 표시'는 연구내용 또는 결과에 대하여 과학적·기술적 공헌 또는 기여를 한 사람에게 정당한 이유 없이 논문저자 자격을 부여하지 않거나, 과학적·기술적 공헌 또는 기여를 하지 않은 자에게 감사의 표시 또는 예우 등을 이유로 논문저자 자격을 부여하는 행위를 말한다.
- ⑤ '이중게재란 2개 이상의 학술지에 동일한 내용을 게재하는 행위를 말한다.
- ⑥ 본인 또는 타인의 부정행위의 의혹에 대한 조사를 고의로 방해하거나 제보자에게 위해를 가하는 행위
- ⑦ 과학기술계에서 통상적으로 용인되는 범위를 심각하게 벗어난 행위 등
- ⑧ 기타 위 규정된 부정행위 외에도 우리 학회 자체적으로 조사 또는 예방이 필요하다고 판단되는 행위

## 제 2 장 저자

### 제4조(저자의 정직성)

- ① 저자는 각자가 수행하는 연구에 있어서 정직하여야 한다. 여기서 정직은 아이디어의 도출, 실험에 대한 설계, 실험과 결과의 분석, 연구비 지원, 연구결과와 출판, 연구 참여자들에 대한 공정한 보상 등 연구과정의 전반에 관한 정직을 말한다.
- ② 연구자는 연구에 있어서의 표절, 사기, 조작, 위조 및 변조 등을 심각한 범죄행위로 간주하고, 이러한 부정이 발생하지 않도록 최선을 다하여야 한다.
- ③ 저자는 자신의 이익과 타인 또는 타 기관의 이익이 상충하거나, 상충할 가능성이 있을 경우 이를 공표하고 적절히 대응하여야 한다.

### 제5조(저자의 기준)

논문의 저자가 되기 위해서는 아래 4개의 기준을 모두 충족하여야 한다.

이 기준은 제1저자, 교신저자를 포함한 모든 종류의 저자를 대상으로 한다.

- ① 연구 논문의 구상, 설계, 데이터의 획득과 분석, 해석에 실제로 기여한 자.
- ② 논문의 초안을 작성하거나 논문의 중요한 내용을 학술적으로 개선한 자.
- ③ 출판될 최종 원고를 승인한 자.
- ④ 논문 내용의 정확성과 진실성에 대한 의문이 있을 경우 적절히 대응하는 것에 대한 책임이 있음을 동의한 자.

### 제6조(저자의 준수사항)

- ① 투고한 논문의 연구 수행과정에서 저자는 인권존중, 생명윤리 준수 및 환경보호 등의 보편성을 확보하여야 한다.
- ② 저자는 투고한 논문에서 연구내용과 그 중요성에 대하여 정확하게 기술하여야 하고, 연구결과를 왜곡하지 말아야 한다.
- ③ 투고논문은 학술적으로 충분한 가치가 있는 결과와 그것을 뒷받침할 수 있는 논거를 포괄적으로 포함하고 있어야 한다. 이미 발표된 논문과 유사한 결론을 주장하는 논문의 경우에는 새로운 논거에 충분한 학술적인 가치가 있어야만 한다.
- ④ 공개된 학술자료를 인용할 경우에는 그 출처를 명백하게 밝혀야 한다. 공개되지 않은 논문이나 연구계획서, 또는 개인적인 접촉을 통해서 얻은 자료의 경우에는 그 정보를 제공한 연구자의 동의를 받은 후에 인용하여야 한다.
- ⑤ 다른 연구자의 연구결과를 참고문헌의 인용 없이 논문의 전부 혹은 일부로 사용하는 것은 표절에 해당하므로 허용되지 않는다.
- ⑥ 저자가 다른 학술지에 투고 혹은 게재하였거나 투고할 예정인 논문을 학회 발행 학술지에 이중으로 투고하는 행위는 부정행위로서 허용되지 않는다. 학술대회나 세미나 등에서 이미 발표한 내용을 학술지 규정에 맞추어 논문으로 작성하여 투고하는 것은 일반적으로 허용되지만, 해당 발표내용에 중요한 연구결과가 추가되어야함을 원칙으로 한다.

## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- 연구 수행과정에서 중요한 기여를 한 모든 연구자는 공저자가 되어야 하며, 논문의 대표저자는 저자명단에 대해 모든 공저자에게 동의를 얻어야 한다. 행정적, 재정적 지원과 같은 학술외적인 지원이나 연구자료 제공 혹은 단순한 학술적 조언 등에 대해서는 '후기'를 통해서 그 내용을 표기한다.
- 연구에 학술적으로 기여하지 않았거나 기여도가 현저히 떨어지는 자를 학문 외적인 이유로 공저자로 기재하는 것은 학문의 권위를 실추시키는 부도덕한 행위이다.
- 저작권 등과 관련하여 관계자의 승인이 필요한 경우 저자는 논문을 투고하기 이전에 승인을 얻어야 하며, 논문의 출판으로 말미암아 영향을 받을 수 있는 계약 및 소유권의 분쟁이 발생하지 않을 것임을 확인하여야 한다.

### 제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

#### 제7조(편집위원 준수사항)

- 편집위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문에 대한 판정업무를 정해진 규정에 따라 공정하고 객관적으로 수행하여야 한다.
- 편집위원은 투고된 논문에 대한 심사위원의 심사결과를 바탕으로 일관된 기준으로 논문의 재심 여부나 게재 여부를 결정하여야 한다.
- 투고논문의 연구분야에 대한 편집위원의 지식이 부족하여 심사결과를 판정하는데 곤란함이 있다고 판단될 경우에는 해당 분야에 전문적인 지식을 가진 자로부터 자문을 받을 수 있다.
- 편집위원은 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 학술지가 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당 논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
- 편집위원은 저자와 심사위원의 비윤리적인 행위를 감시할 의무를 가지며, 윤리적으로 부적절한 행위가 발견될 경우 이를 지체 없이 편집장에게 보고하여 조사와 함께 필요에 따라 적절한 징계가 이루어질 수 있도록 하여야 한다.
- 편집위원은 투고된 논문이 자신과 직접적인 이해관계가 있는 논문일 경우, 편집인에게 보고하여 다른 편집위원이 해당 논문을 담당하게 하여야 한다.
- 편집위원이 담당 업무를 신속하게 처리하지 못할 사유가 발생할 경우 학회 사무국 혹은 해당 편집인에게 보고하는 것이 바람직하다.
- 투고논문이나 심사과정에서 비윤리적인 행위가 적발되거나 비윤리적 행위에 대한 탄원이 있을 경우 편집인은 그 사안의 비중을 판단하여 필요할 경우 관련분야 편집위원들로 조사위원회를 구성하여야 하며, 편집위원회는 조사위원회에서 작성된 보고서를 바탕으로 해당 행위자에 대한 징계를 결정하고, 기 게재된 논문이 관련되었을 경우 해당 논문의 게재를 소급하여 취소할 수 있다.

#### 제8조(심사위원 준수사항)

- 심사위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문을 일관된 기준으로 공정하고 객관적으로 심사하여야 한다. 완벽하게 검증되지 않은 개인의 학술적 신념이나 가정에 근거한 심사는 배제하여야 한다.
- 심사위원은 심사논문에 대한 비밀을 보장하기 위해 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 논문집이 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
- 심사위원은 전문 지식인으로서의 저자의 인격을 존중하여야 한다. 개인적이고 주관적인 평가나 불쾌한 표현을 자제하고 학문적으로 겸손한 자세에서 객관적인 심사의견서를 작성하도록 노력하여야 한다. 심사논문에 대한 자신의 판단과 보완이 필요하다고 생각되는 내용을 그 이유와 함께 상세하게 명시하여야 한다.
- 심사위원의 개인적인 목적을 위하여 저자에게 추가 자료나 해명을 요구하는 것을 금지한다.
- 이미 다른 학술지에 공개된 논문의 내용과 유사한 내용이 심사논문에 인용 없이 포함되었을 경우에는 편집위원에게 그 사실을 상세하게 알려주어야 한다.
- 심사 의뢰된 논문과 직접적인 이해관계가 있거나 자신의 전공분야가 투고된 논문을 심사하기에 적합하지 않다고 판단되면 담당 편집위원에게 지체 없이 그 사실을 통보하여 다른 심사위원을 선정할 수 있도록 하여야 한다. 아울러, 기한 내에 심사를 마치지 못할 사유가 있을 경우 편집위원에게 이를 통보한다.

### 제 4 장 검증 절차와 기준

#### 제9조(윤리위원회)

- 우리 학회는 학술활동 윤리 위반 및 의심사례 발생 시 윤리위원회(이하 '위원회'라 한다)를 구성, 그 진위를 조사할 수 있다.
- 위원회 구성 및 직무
  - 위원회는 위원장 1명과 위원 5명으로 구성한다.
  - 위원장은 학술담당 부회장이 하며, 위원은 이사회에서 선출, 회장이 임명한다.
  - 위원장과 위원의 임기는 1년으로 1월 1일부터 12월 31일까지로 하며, 연임이 가능하다.
  - 위원장은 위원회를 대표하고 학회의 윤리에 관한 업무를 총괄한다.

#### 제10조(윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

- 연구윤리 수립 및 추진
- 연구 부정행위의 예방과 방지
- 연구 부정행위 심의 및 의결
- 부정행위자에 대한 제재내용 결정 및 이사회에 결과보고
- 기타 연구 윤리의 개선 및 증진에 관한 사항

## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

### 제11조(윤리위원회 소집 및 의결)

- ① 위원회는 위원장이 필요에 따라 소집하며, 위원 과반수의 출석으로 개최하고 출석위원 2/3의 찬성으로 의결한다.
- ② 의결된 내용은 부정행위 의심자(피제소자)에게 통보하고 15일 이내에 서면으로 소명 의견을 받아야 한다.
- ③ 위원회에서는 부정행위 의심자로부터 받은 소명자료를 검토하거나 필요 시 의견을 청취하여 최종 의결토록 한다.
- ④ 의결된 내용은 이사회에 보고하여 최종 결정한다.
- ⑤ 위원장이 필요하다고 판정할 경우, 외부 인사나 위원이 아닌 자의 의견을 청취할 수 있다.
- ⑥ 위원회에서 참가자 발표내용 및 회의내용은 비공개를 원칙으로 한다.

### 제12조(연구 부정행위의 제보)

- ① 연구 부정행위의 제보는 육하원칙에 따라 관련 자료를 첨부하여 서면으로 제출하여야 한다. 단, 익명제보라 하더라도 제보의 육하원칙이 명백한 제보의 경우, 위원회에서 조사개시에 대한 검토를 할 수 있다.
- ② 학회는 제보자가 부정행위 신고를 이유로 불이익, 차별, 부당한 압력 또는 위해 등을 받지 않도록 노력한다.
- ③ 제보자의 신원에 관한 사항은 정보공개 대상이 되지 않으며, 신원이 노출되지 않도록 최선의 조치를 취한다.
- ④ 제보자가 부정행위의 신고 이후에 진행되는 조사 절차 및 일정 등에 대하여 알고자 할 경우 학회는 이에 성실히 응하여야 한다.
- ⑤ 제보 내용이 허위인 줄 알았거나 알 수 있었음에도 불구하고 이를 신고한 제보자는 보호 대상에 포함되지 않는다.

### 제13조(연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

- ① 연구 부정행위가 확인된 저자에게는 위원회 결정에 따라 부정행위의 경중을 고려하여 다음의 제재를 선택하여 가할 수 있다.
  1. 해당 발표연구물에 대한 학회 간행물에 게재취소
  2. 5년간 학회 발행 학술지에 투고금지
  3. 5년간 학회 학술대회 발표금지
  4. 해당 논문이 이미 출판된 경우에는 해당 학술지에 게재 취소를 공지하고, 부정행위자 소속기관에 부정행위 내용 통보
  5. 학회 회원자격 박탈
- ② 제보자가 고의로 허위제보를 하였을 경우 위원회의 결정에 따라 연구 부정행위자 수준과 동일한 제재를 가할 수 있다.

### 제14조(피조사자 권리 보호)

- ① 피조사자는 제보 또는 학회 및 관련기관의 인지에 의하여 부정행위의 조사 대상이 된 자 또는 조사 수행 과정에서 부정행위에 가담 한 것으로 추정되어 조사의 대상이 된 자를 말하며, 조사과정에서의 참고인이나 증인은 이에 포함되지 아니한다.
- ② 학회는 검증과정에서 피조사자의 명예나 권리가 부당하게 침해되지 않도록 주의하여야 한다. 또한 결과가 확정되기 이전까지는 이의 제기 및 변론의 기회가 동등하게 주어져야 하며, 관련절차를 사전에 알려주어야 한다.
- ③ 부정행위에 대한 의혹은 판정 결과가 확정되기 전까지 외부에 공개되어서는 아니 된다. 다만, 공공의 복리 등 사회 통념에 중대한 위협사항이 발생할 경우는 해당되지 아니한다.
- ④ 피조사자는 부정행위 조사·처리절차 및 처리일정 등에 대해 학회에 알려줄 것을 요구할 수 있으며, 학회는 이에 성실히 응하여야 한다.

### 제15조(조사의 기록과 정보의 공개)

- ① 위원회는 조사 과정의 모든 기록을 음성, 영상, 또는 문서의 형태로 작성한 조사결과 보고서를 반드시 5년 이상 보관하여야 한다.
- ② 조사결과 보고서 및 조사위원 명단은 판정이 끝난 이후에 공개할 수 있다.
- ③ 조사위원·증인·참고인·자문에 참여한 자의 명단 등에 대해서는 당사자에게 불이익을 줄 가능성이 있을 경우 공개하지 않을 수 있다.

### 제16조(조사결과의 보고)

- ① 위원회는 조사의 결과와 내용을 조사의 종료 및 판정 후, 접수일 기준 6개월 경과 이전에 심의 내용을 확정하여 이사회에 보고한다.
- ② 결과보고서에는 다음 각 호의 사항이 반드시 포함되어야 한다.
  1. 제보의 내용
  2. 조사의 대상이 된 부정행위
  3. 조사위원회의 조사위원 명단
  4. 해당 연구에서의 피조사자의 역할과 부정행위의 사실 여부
  5. 관련 증거 및 증인
  6. 제보자와 피조사자의 이익제기 또는 변론 내용과 그에 대한 처리결과
- ③ 연구 부정행위에 대한 최종결정이 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안 된다.

# 한국정밀공학회지(JKSPE) 연구윤리 및 저작권 동의서

논문 제목(국문):

논문 제목(영문):

저자명(전체):

소속:

\*책임저자 ORCID:

저자(들)는 위 논문이 한국정밀공학회지에 게재되기를 희망하며 아래와 같은 사항들에 대하여 확인하고 동의합니다.

- 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
- 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판 물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 받았습니니다.
- 저자(들)는 위 논문의 작성과 연구에 실질적인 기여를 하였으며, 위 논문의 작성과 내용에 대한 책임이 있습니다.
- 저자(들)는 위 논문에 대한 인쇄 및 전자 출판물의 일부를 저자(들)의 연구결과 보고 및 논문게재/발표에 수정 후 재사용/출간하고자 할 때에는 무료로 사용할 수 있습니다. 이 경우 이 같은 사실과 타당한 이유를 한국정밀공학회에 알려야 하고, 위 논문을 해당 연구결과 보고 및 논문/발표자료에 정확히 인용하며 적절한 저작권을 명시하여야 합니다.
- 저자(들)는 위 논문이 과거에 어떠한 학술지에도 출판된 적이 없으며, 현재 다른 학술지에 게재를 목적으로 제출되었거나 제출할 계획이 없습니다.
- 저자(들)는 한국정밀공학회의 윤리규정에 있는 한국정밀공학회의 학술활동 윤리규정을 준수합니다. 또한, 중복 출판이나 표절 예방을 위해 CrossRef 확인에 동의합니다.
- 책임저자는 위 논문의 공동저자들이 1항-6항의 사실들을 인식하고 있으며, 위 6가지 사항들에 대하여 동의합니다.
- 한국정밀공학회는 저자(들)가 위 7가지 사항에 동의하지 않았을 경우, 위 논문의 출판을 지연시키거나 중지시킬 수 있는 권리를 가집니다.
- 전체 저자들은 위 논문의 저작권과 일체 권리 양도에 관한 권한을 책임저자에게 일임하며, 책임저자는 전체 저자들을 대표하여 저작권을 양도합니다.

\*책임 저자: 논문심사과정에서 교신저자의 역할을 수행함과 아울러 논문의 학술지 게재 시 저자들을 대표하여 저작권에 대한 일체의 책임을 담당하는 저자

성명 \_\_\_\_\_

서명 \_\_\_\_\_

날짜 \_\_\_\_\_

전자 문서에 디지털 서명을 하시면 자필 서명과 동일한 효력이 인정됩니다. 자필 또는 디지털 서명 중 원하시는 방식으로 서명해주시기 바랍니다.

본 연구윤리 및 저작권 동의서에 서명하여 한국정밀공학회에 제출하지 않는 경우, 해당 논문은 출판될 수 없습니다.

# (사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

## 설립목적

이 법인은 사회일반의 이익에 기여하기 위하여 공익법인의 설립운영에 관한 법률의 규정에 따라 정밀공학에 관한 학문 및 기술의 체계화를 도모하여 국가 산업 발전에 기여함을 목적으로 한다.

## 회원(사) 구성

1. 특별회원: 정밀공학 분야와 관련 있는 단체로서 본회의 목적에 찬조하는 자
2. 찬조회원: 개인 또는 단체로서 본회의 목적에 찬조하는 자
3. 정 회 원: 정밀공학에 관하여 학식과 경험이 있는자

## 관련정부기관과의 관계

1. 교육과학기술부 산하: 사단법인 설립 허가
2. 한국과학기술단체총연합회: 정회원
3. 특허청: 학술단체 지정 받음
4. 한국연구재단, 한국과학기술단체총연합회: 연구 활동 지원

## 주요활동현황

1. 논문 발표회(학술대회): 연 2회(춘·추계) - 1,600여 편 발표
2. 기술세미나(부문별) 개최: 생산현장과 학술적인 교류 촉진, 미래 산업의 방향 제시
3. 산학연 협동 체계 구축: 기술세미나 개최 및 학술대회
4. JSPE(일본정밀공학회) & TSPE(대만정밀공학회)와 협정
5. ASPE(미국정밀공학회)교류: 학술사업 공동 개최
6. PRESM, ASPEN, ISMTII, ICPT 등 국제학술대회 유치 및 개최
7. 싱가포르, 베트남 과학기술 교류

## 발간자료

1. 한국정밀공학회지(논문집 발간): JKSPe 연 12회
2. 국제학회지(논문집 발간): IJPEM 연 12회 / IJPEM-GT 연 6회
3. 기술세미나(부문별) Proceeding 발간: 연 5-7회
4. 국제학술대회 Proceeding 발간
5. 춘·추계 학술대회 논문집 발간: 연 2회
6. 국제표준도서번호(ISBN) 또는 국제표준연속간행물번호(ISSN) 부여

## 발행규정

1. 한국정밀공학회지(JKSPe)는 월간으로, 매월 1일 발행: SCOPUS, KCI 등재지
2. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing은 월간으로, 매월 1일 발행: SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
3. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology는 격월간으로, 1월, 3월, 5월 (특집호), 7월호, 9월호, 11월 1일 발행: SCIE, KCI 등재지
4. 발행목적: 정밀공학에 관한 학술논문 및 학회 소식 등의 제공, 정밀공학 기술의 체계화를 도모하여 국가 산업 발전에 기여

## 부문위원회 활동

부문은 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술의 10개 부문이 있으며, 부문별 기술 세미나를 개최

## 특별회원사 가입

구 분	회비(연)	비고
다이아몬드	300만원 이상	
플래티늄	200만원	학회 발간물 증정
골드	100만원	국내 학술행사 무료등록 등
패밀리	100만원 이하	

# (사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

## 한국정밀공학회상

### 정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

### 학술상

- 정밀공학 분야에서 창의성을 발휘하여 연구를 계속한 자로서 탁월한 업적을 이룩한 자 중에서 선정

### 생산기술상, 정밀기술상

- 정밀공학에 관련된 산업분야에서 독창적인 의의를 가지는 제품을 제작한 자 또는 기업체, 연구단체

### 공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

### Best Editor Award

- 학회 학술지의 발전에 공헌한 편집인(Editor), 편집위원(Member of Editorial Board)

### JKSPE, IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST Contribution Award

- JKSP, IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology의 출판에 탁월한 공헌을 한 심사위원(Reviewer)

### JKSPE, IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST Award

- JKSP, IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology에 발표된 논문 중 가장 탁월한 가치의 논문 저자

### KSPE Young Researcher Award

- 각 부문 젊은 연구자의 활동을 격려의 목적으로 해당 분야의 연구 업적이 탁월하고 유망한 젊은 연구자

## 특별상

### 가헌학술상

- 가헌신도재단의 지원으로 가헌학술상을 설정
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 정밀공학 분야의 탁월한 논문저자 또는 정밀공학 분야 발전에 기여가 현저한 자

### 현승공학상

- 현승교육문화재단의 지원으로 현승공학상을 설정
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 정밀기계공학 분야의 탁월한 논문저자 또는 정밀기계공학 분야 발전에 기여가 현저한 자

### 유정백합학술상

- 학회 초대 2대 회장인 유정 이봉진 회원이 기증한 기금을 바탕으로 유정백합학술상을 제정 및 시행
- FA, CNC, 제어 등을 비롯한 정밀공학 분야에서 탁월한 업적으로 학문발전에 기여한 자

### 백암논문상

- 백암 함인영 회원이 기증한 기금을 바탕으로 백암논문상을 제정 및 시행
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 생산공학 분야의 논문저자 중 최우수 논문저자로 하며 해당 논문발표 시 만 40세 이하인 자

## Year of Launching

Journal of Korea Society for Precision Engineering was launched by the Korea Society for Precision Engineering in June of 1984. The name was changed to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering in December of 1985.

## Aims and Scope

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE) is devoted to publishing original research articles with high ethical standard on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on articles related to improving the precision of machines and manufacturing processes through implementation of creative solutions that stem from advanced research using novel experimental methods, predictive modeling techniques, and rigorous analyses based on mechanical engineering or multidisciplinary approach. The expected outcomes of the knowledge disseminated from JKSPe are enhanced reliability, better motion precision, higher measurement accuracy, and sufficient reliability of precision systems. The various topics covered by JKSPe include: Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology.

## Fee

### Subscription Fee:

This print copy of the journal is provided free of charge to the members of KSPE.

### Publication Fee:

1. Basic fee (up to eight pages): 200,000 won; additional pages: 30,000 won per page.
2. Manuscripts contributed as a result of funded research will be charged an extra 50%.
3. Publication fee is charged only for the papers contain 'Acknowledgement' that represent supports of academic research project by th fund of government, institutes or university, etc.
4. Publication fee should be paid within 15 days of the receipt of the publication fee invoice.

## Contact Us

[04508] 12F, SKY1004 Bldg., 50-1 Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul, Republic of Korea  
TEL +82-2-518-2928 / FAX +82-2-518-2937 / paper@kspe.or.kr / <https://www.kspe.or.kr>  
Submission to Journal of Korean Society for Precision Engineering: <https://www.editorialmanager.com/jkspe/>  
Search for Journal of Korean Society for Precision Engineering: <https://jkspe.or.kr/>

# Rules for Submitting and Publishing Papers

## Article 1 Purpose

The rules are designed to specify matters related to the submission and publication of papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Journal") of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society").

## Article 2 Submitter

The corresponding author and the first author of the submitted paper must be members of the Society. With special permission by the Editor-in-Chief, however, the person can be treated as the exceptional case.

## Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

- A. The Authors are responsible for the submitted paper.
- B. With regard to their submitted paper, all its authors must comply with 'Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering'. When any of the authors violates Code of Ethics for Academic Activities, the Editor-in-Chief may disallow or cancel the publication of the paper and impose disciplinary actions as specified.

## Article 4 Scope of Research

The scope of research for the paper shall cover areas of precision engineering such as Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology, and the paper must not have been published in any other publication.

## Article 5 Categorization of Submissions

The paper submitted to the Journal falls into one of the categories below, and should be within eight pages, which may be exceeded if need be.

- A. Ordinary paper: The paper that shows excellent scholarship, practicality, and applicability.
- B. Special paper: The paper that is written in accordance with a special provision for special papers.
- C. Other submissions: Forecast, explications, lectures, and other writings.

## Article 6 Submission

- A. The Paper is accepted anytime and submission date is the day submission is completed at the Society.
- B. The paper must be written in compliance of the template specified by the Society to be registered and submitted.
- C. The paper that is found not to comply with 'Rules for Submitting and Publishing Papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering' and 'Guidelines for Manuscript Writing' may not be accepted.
- D. The submitted paper shall not be returned.

## Article 7 Review and Decision to Publish Paper

- A. The Editor-in-Chief shall decide whether to publish the paper or not.
- B. The review of the paper is conducted by two reviewers recommended by the Editor-in-Chief, and the review and the decision over its publication shall comply with 'Rules for Reviewing Papers for Journal of the Korean Society for Precision Engineering Paper Review Rules'.

## Article 8 Copyright

- A. The authors shall be responsible for the content of the paper.
- B. The author(s) must transfer the copyright for the submitted paper to the Society, and for this purpose, the corresponding author(s) must submit 'Research Ethics and Copyright Transfer Agreement'.
- C. The copyright for the submitted paper or other submissions shall lie with the Society and may not be reproduced without authorization from the Society.
- D. The author(s) may use part of their paper or other submissions published in the Journal in their other research, provided the published paper is referenced as its source.

## Article 9 Disclosure of Materials

The Society may disclose a paper or other submissions in print or as online publications.

## Article 10 Manual of Style

- A. Writing and editing the paper to be submitted to the Society must comply with 'Guidelines for Manuscript Writing' provided separately.
- B. Editorial Board may edit the selected paper so that terms, characters, and orthography may comply with 'Guidelines for Manuscript Writing'.

## Article 11 Publication Fees

The author must pay the specified fee for the paper published in the Journal. For the paper that exceeds the specified number of pages, the author must pay the fee for those extra pages. The fee for extra pages shall be decided by the board of directors.

## Guidelines for Manuscript Writing

1. Manuscripts should be written according to the format of the Journal (<https://www.kspe.or.kr>) and should be submitted online (<https://www.editorialmanager.com/jkspe/>).
2. The manuscript should be organized in the following order: (1) The title in Korean, (2) The title in English, (3) Author names in Korean, (4) Author names in English, (5) Affiliations in Korean and English, and information of corresponding author, (6) Keywords, (7) Abstract, (8) Date of submission, (9) Introduction, (10) Main body (Theory, Experimental, Results, Discussion) (11) Conclusion, (12) Acknowledgements, (13) References, (14) Appendices, (15) Position format
3. A manuscript may be written in Korean or English. If necessary, the original terminology may be provided in parentheses to avoid confusion.
4. The manuscript title must be expressed concisely, preferably in ten words or less, and Keywords must be written in English, with Korean translations in parentheses, and numbering six words or less.
5. The abstract must be written in English and not exceed 200 words. Figures and tables shall not be included in the abstract.
6. Figures and tables shall be numbered in order in the main text, and captions should be written in English. Captions shall be labeled beginning "Fig. 1" for figures and "Table 1" for tables.
7. Arabic numbers and SI units shall be used in principle.
8. References shall be numbered in order of quotation.
  - (1) Citation in the main text: First author's last name with reference number in square brackets. e.g.) Hong [1]
  - (2) References shall be written in English at the end of the main body with the following formats.
    - Books: Author names, (Year of publication), Book title, Publisher.
    - Periodic Articles: Author names, (Year of publication), Paper title, Journal name, Vol.(No.), Cited pages.  
e.g.) Hong, K. D., Kim, C. S., (2022), A method to investigate mechanical properties, John Wiley & Sons.  
Hong, K. D., (2022), A method to investigate mechanical properties, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(1), 1-18.
9. Appendices shall be formatted in the same way as main body text.

## Author's Check List

1. Are the affiliations of all authors indicated with the correct symbols?
2. Does the manuscript adhere to the style set forth in the template?
3. Are Korean and English titles written in ten words or less?
4. Are keywords written in English with Korean in parentheses, in six words or less?
5. Are all symbols listed with correct nomenclature and proper description?
6. Are all figures containing abscissas and ordinates labeled with the correct symbols and units?
7. Does the manuscript use Arabic numbers and SI units?
8. Is the English abstract within 200 words?
9. Are the captions of tables and figures in English, corresponding to the format?
10. Are appendices formatted in the same way as main body text?
11. Is the manuscript written according to the guidelines of the journal?

# Rules for Reviewing Papers

## Article 1 Purpose

The Rules are designed to specify matters related to the review of papers submitted to Journal of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Journal") of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society").

## Article 2 Submission and Reception

- A. The person who wants to submit the paper to the Journal shall use the Society's paper submission system to submit the paper that has been written in compliance with the Society's rules for submitting papers, which the Society shall receive.
- B. Notwithstanding the provision of A., the paper may be submitted and received in other ways so long as the Editor-in-Chief approves it.
- C. The Society shall basically receive papers that are related to the Society's areas of research. The Editor-in-Chief may refuse to receive the submitted paper, if it is not related to the Society's areas of research or has not fulfilled the requirements. Areas of research are specified in 'Rules for Submitting and Publishing Papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering' and 'Guidelines for Manuscript Writing'.

## Article 3 Selection of Reviewers

- A. The Editor-in-Chief shall consider the areas for the submitted paper and assign its review to the Editor in the relevant area, and the Editor shall assign the Editorial Board Member in the given area as the review supervising Editorial Board Member.
- B. The review supervising the Editorial Board Member shall select and recommend to the Editor-in-Chief who he or she deems fit for the review of the submitted paper.
- C. The paper shall have two reviewers while the third reviewer may be appointed, in which case, the paper shall have the maximum of three reviewers. Reviewers shall basically belong to the different institution than the authors of the paper belong to.
- D. The Editor-in-Chief shall send the email to the recommended reviewer to confirm the acceptance of the reviewing duty. In case any of the recommended reviewers refuses to serve as the reviewer, the Editor-in-Chief shall ask the relevant The Editorial Board Member to recommend some other candidate.

## Article 4 Review Procedure

- A. Following the comprehensive review of the paper, the reviewer shall record results of the review supported with objective grounds and make the clear request for revision, if necessary.
- B. For the review, the reviewer must choose 'Accept', 'Accept Subject to Minor Revisions', 'Re-Review after Major Revisions', or 'Reject'.

## Article 5 Review Period

- A. The Editorial Board Member for the Journal must select reviewers within seven days from the appointment of the Editorial Board Member, and the reviewers who are asked to review a paper must complete the review within 14 days from their acceptance of the reviewer's duty for the primary review and within seven days for the secondary review.
- B. The ruling by the Editor and the Editorial Board Member must be completed within seven days from the reception of review results.
- C. In case the reviewer candidate fails to accept the reviewer's duty for more than fourteen days from the request, the candidate may be replaced with another reviewer.
- D. If review results fail to arrive for more than three months from the reception of the paper in contravention of the above provision, the following may be put into action.
  - ① If one of the reviewers has failed to deliver review results: The Editorial Board Member for the specific paper shall review it within seven days from the expiry of the three months.
  - ② If all of the reviewers have failed to deliver review results: The Editor and the Editorial Board Member for the specific paper shall review it within seven days from the expiry of the three months. If the Editor is the same person as the Editorial Board Member, the Editor alone may perform the review procedures.

## Article 6 Deadline for Author's Revision

- A. The author must resubmit the revised paper that reflects requests for revisions in accordance with the Editor-in-Chief decision based on review results within thirty days for 'Re-Review after Major Revisions' or within fourteen days for 'Accept Subject to Minor Revisions'.
- B. In case a revised paper fails to be submitted for more than thirty days from the submission deadline, the Editorial Board may cancel its publication, and if the author wants a review to continue, he or she must resubmit the paper.

# Rules for Reviewing Papers

## **Article 7 Decision over Publication**

- A. The Editor-in-Chief shall make a final decision on whether to publish a paper or not by reviewing the results of the review by two reviewers and considering the comprehensive evaluation by the editing director and the Editor for the paper.
- B. A paper that has been ruled as 'Reject' by two or more reviewers cannot be published in the Journal.

## **Article 8 Review of Special Papers**

- A. The Editor-in-Chief shall appoint a Special Editor for supervising the special paper, with recommendations from the officers of the Society.
- B. In case a Special Editor is the Director or the Division Chairman of the Society, the Special Editor shall supervise the selection of two reviewers for the review of the submitted paper and decide whether to publish it solely based on the review results. In case the Special Editor is not the Director or the Division Chairman of the Society, the Board of Editing Directors shall select the Editor for supervising the review of paper.

## **Article 9 Confidentiality**

- A. The reviewer shall not disclose his or her assumed status to anyone else.
- B. The name of the author may be disclosed to the reviewer.
- C. Review results shall not be disclosed to anyone but the author.

## **Article 10 Objection**

- A. If the author raises an objection to the review results, the exchange of views between the reviewer and the author shall proceed through the Editor. When the reviewer and the author want to exchange their views, they can do so through the mediation of the Editor.
- B. The author's request for the re-review shall not basically be accepted.

## **Article 11 Review Fee**

If necessary, the specified editing fee may be paid to the Editor and the Editorial Board Member, while the specified review fee may be paid to the reviewer.

# Code of Ethics for Academic Activities

- Full Text of Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering: <https://jkspe.or.kr/policy/ethics.php>
- For the policies on the research and publication ethics not stated in this instructions, International standards for editors and authors (<http://publicationethics.org/international-standards-editors-and-authors>) can be applied.

## Chapter 1

### Overall

### Rules

#### Article 1 Purpose

This regulation aims to establish the ethical standard for the members of this institute to comply with and to contribute to the healthy development of academics and society in order for our academic activities related with the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society") to not infringe the dignity and value of human beings and maintain a high ethical standard that does not damage the benefits of public society.

#### Article 2 Application Area of Code of Ethics

- A. The code applies to the overall academic activities including all academic journals, academic conferences, symposiums, workshops, forums, etc. published and held by the Society.
- B. The code applies to all authors, reviewers, Editorial Board Members (hereinafter referred to as "EBM", and hands-on-workers in the service bureau related with the above academic activities.
- C. Other items not set forth above may comply with this article, each level of regulations of Ministry of Education and its annex institutions.

#### Article 3 Scope of Misconduct

Misconduct suggested in this code include forging, falsification, plagiarism, and false indication of the author of the paper in academic activities, papers and presentations related with the society, and are as follows:

- A. 'Forging' is the act of creating false data or non-existent research results.
- B. 'Falsification' is the act of perverting research content or results by artificially modifying research ingredients, equipment or processes, or arbitrarily modifying and deleting data.
- C. 'Plagiarism' is the act of appropriating others' ideas, research contents or results without proper approval or quotation.
- D. 'False indication of the author of the paper' is the act of not granting the qualification as an author of the paper without a reasonable cause to a person who contributed scientifically or technically on a research content or result, or granting qualification of an author of the paper to a person who did not contribute scientifically or technically to express gratitude or show respect.
- E. 'Duplicate publication' is the act of publishing the same content to two or more academic journals.
- F. Activity of intentionally interfering investigation on the doubts of one's own or other's misconduct, or disturbing the informant.
- G. Activity that seriously deviates from the scope commonly accepted in the science and technology sector.
- H. Activity other than the misconduct set forth above that needs to be independently investigated or prevented by the Society.

## Chapter 2

### Author

#### Article 4 Honesty of Author

- A. The author shall be honest in research carried out by an individual. Here, honesty refers to honesty in overall research processes including derivation of ideas, designing experiments, analyses of experiments and results, research funds, publishing research results, and fair compensation to research participants.
- B. The researcher shall consider plagiarism, fraud, manipulation and falsification during research as serious criminal activities, and endeavor to prevent these misconducts.
- C. The author shall announce and properly respond in case of contradiction or the possibility of contradiction of benefits of one's own and others or other institutions.

#### Article 5 Authorship

It is recommended for every author including the first and corresponding author that authorship be based on the following 4 criteria:

- A. Substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; AND
- B. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content; AND
- C. Final approval of the version to be published; AND
- D. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

# Code of Ethics for Academic Activities

## Article 6 Compliance of Authors

- A. During the research implementation process of the submitted paper, the author shall respect human rights, comply with life ethics, and obtain universality such as environment protection.
- B. In the submitted paper, the author shall accurately illustrate the research content and its importance without perverting the research result.
- C. The submitted paper shall comprehensively include an academically valuable result and its basis of argument. If the paper asserts for a conclusion similar to an already announced paper, it should be academically valuable for a new basis of argument.
- D. If citing a public academic data, its source must be clearly stated. For data obtained from an undisclosed paper, research plan or personal contact, it should be cited after consent from the researcher who provided the information.
- E. Using the whole or part of another researcher's research result without citing the reference corresponds to plagiarism and is not allowed.
- F. The activity of duplicate publication by an author in the journal issued by the society where the paper is already published or planning to publish in other academic journal is considered misconduct and not allowed. Submitting content already presented in academic conferences or seminars by rewriting in a paper according to the academic journal standard is generally accepted, but it must additionally have an important research result for the relevant presentation.
- G. All researchers who made important contributions to research implementation shall become co-authors, and the representative author of the paper must have consents from all co-authors. For outside academic support such as administrative and financial support, provision of research data or simple academic advice shall be indicated in the 'Acknowledgement' for its content.
- H. Indicating a person who did not make academic contribution to research or falls short of contribution based on causes outside academics is unethical conduct that defames the dignity of academics.
- I. In relation to copyrights, if approval of a person in charge is needed, the author must be granted approval before submission of the paper, and confirm that there will be no dispute of contract or ownership that may be affected by the publication of said paper.

## Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

### Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

- A. The EBM shall fairly and objectively execute the revision process of the paper according to the set regulation without prejudice on the author's gender, age, race, affiliated institution or personal acquaintanceship with the author.
- B. The EBM shall determine whether to reconsider or publish the paper based on the consistent standard of the review results for the submitted paper.
- C. If it is determined that due to the lack of EBM's knowledge in the research area of the submitted paper, there may be difficulty in judging the result, the EBM may be advised by a person with professional knowledge in the relevant area.
- D. The EBM shall not disclose or make use of the information acquired in the review process to others. Before the publication in the journal, it is not even allowed to cite the content of the relevant paper without the consent of the author.
- E. The EBM has the responsibility to monitor any unethical activity of the author and reviewers, and when ethically inadequate behavior is discovered; the EBM shall investigate and give proper sanction as required by immediately reporting to the Editor-in-Chief.
- F. If the submitted paper has direct interest with the EBM, it should be reported to the Editor so that the relevant paper can be examined by another EBM.
- G. In case of reasons that prevent the EBM to promptly process the duty, it is advised to report to the editorial office of the society or the Editor.
- H. In case of discovering any unethical activity from a submitted paper or reviewing process, or in case of deprecation on unethical activities, the Editor shall determine the importance of the case, and organize an Investigation Committee with EBM in the relevant area if needed. The Editorial Board determines the level of sanction to the relevant person based on the report by the Investigation Committee, and if the already published paper is related, the publication of the relevant paper may be retracted and cancelled.

### Article 8 Compliance of Reviewers

- A. The reviewer shall fairly and objectively perform reviewing duty for examining the paper according to the set regulation without the prejudice on the author's gender, age, race, affiliated institution or personal acquaintanceship with the author. Personal academic beliefs that have not been completed, verified or under judgment based on assumption must be eliminated.
- B. The reviewer, in order to assure the secrecy of reviewing the paper, must not disclose or make use of information acquired in the process of reviewing to others. Before the publication of the paper, it is not allowed to even cite the content of the relevant paper without the consent of the author.

## Code of Ethics for Academic Activities

- C. The reviewer must respect the personality of the author as a professional. The reviewer shall endeavor to write the objective reviewer's opinion in an academically modest way by eliminating personal and subjective evaluations and offensive expressions. The reviewer shall state in details the review comments and basis for the comments of the paper under review.
- D. It is prohibited to request for additional information or explanation to the author for the reviewer's personal purpose.
- E. If the similar content to the paper disclosed in other academic journal has been included in the paper without citation, the EBM should be notified in detail.
- F. If the reviewer is in direct interest with the requested paper or it is determined that the reviewer's own professional area is not suitable for examining the submitted paper, the reviewer should immediately notify the EBM in charge so that other reviewers may be appointed. Also, in case of reason for not being able to finish the review within the deadline, it needs to be notified to the EBM.

### Chapter 4 Verification Process and Standard

#### Article 9 Ethics Committee

- A. In case of breach of ethics and suspected cases during academic activities, the society may organize an Ethics Committee (hereinafter referred to as "Committee") to investigate the truth.
- B. Organization and Duties of Committee
  - ① The Committee shall be composed of one chairman and five members.
  - ② The Vice-President in charge of academic affairs shall be the chairman, and members shall be selected from the board of directors, and appointed by the chairman.
  - ③ The chairman and members shall take office for 1 year from January 1 to December 31 and can be reelected.
  - ④ The chairman shall represent the Committee and take charge of overall duties for ethics of society.

#### Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

- A. Establish and promote research ethics.
- B. Prevent and discourage research misconduct.
- C. Deliberate and vote on research misconduct.
- D. Determine sanctions for wrongdoers and report the result to the board of directors.
- E. Improve and enhance other research ethics.

#### Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

- A. The Committee shall be convened by the chairperson as needed, held in attendance of the majority of members, and resolved by over two-thirds of registered members' agreements.
- B. The decision shall be notified to the suspected person (accused) of misconduct, and the explanatory opinion shall be received in writing within 15 days.
- C. The Committee shall review an explanatory opinion from the suspected person of misconduct, and hear an opinion if needed before making the final decision.
- D. The decision shall be reported to the board of directors for the final decision.
- E. If the chairman deems it necessary, opinions by a person other than external personnel or members can be heard.
- F. Presented content by participants and details of the Committee shall be undisclosed in principle.

#### Article 12 Reporting Research Misconduct

- A. Research misconduct may be reported in writing with related documents attached according to the five W's and one H. However, even if anonymously reported, if it is clear based on the five W's and one H, the Committee may review the initiation of investigation.
- B. The Society shall endeavor not to give any disadvantage, discrimination, unreasonable pressure or damage to the informant for reporting misconduct.
- C. The identity of the informant shall not be subject to disclosure, and the best measures shall be taken to prevent identity disclosure.
- D. In case the informant wishes to know the investigation schedule and procedure after reporting misconduct, the Society shall respond sincerely.
- E. The informant who made the report although it was known or it could be known that the information given is false shall not be subject to protection.

# Code of Ethics for Academic Activities

## **Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions**

- A. The author whose research misconduct has been confirmed shall be imposed with sanction by selecting from the following considering the severity of the misconduct according to the decision made by the Committee:
- ① Cancel publication of relevant research subject to the Society publication
  - ② Prohibit submission of paper to the journal issued by the Society for five years
  - ③ Prohibit presentation in the Society academic conference for five years
  - ④ If the relevant paper has already been published, notify cancellation of publication in the relevant academic journal, and notify the misconduct to the affiliated institution of the wrongdoer
  - ⑤ Cancel membership to the Society
- B. If the informant intentionally made a false report, the sanction equivalent to the research misconduct may be given according to the decision of the Committee.

## **Article 14 Protection of Rights of Examinee**

- A. The examinee refers to a person who has become the subject of investigation for misconduct due to the report or cognition by the Society or related institution, or a person who has become the subject of investigation by suspecting of taking part in misconduct during the investigation process. The examinee shall not include testifiers or witnesses.
- B. The Society shall be careful not to violate the dignity or rights of an examinee during the verification process. Also, until the confirmation of the results, the examinee shall have an equal opportunity for objection or defense, and shall be notified in advance of the related procedure.
- C. The suspicion on misconduct shall not be disclosed to the public until the judgment has been confirmed. However, this does not include cases where serious risk may be present to public welfare or social norms.
- D. The examinee may request for investigation and processing procedure as well the processing schedule for misconduct to the Society, and said the Society shall respond sincerely.

## **Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation**

- A. The Committee shall store the investigation report of the entire investigation process obtained in the form of voice, video or written document for at least 5 years.
- B. The report of investigation and list of investigators may be disclosed after judgment has been made.
- C. If the list of investigators, witnesses, testifiers, or consultants has the possibility to cause disadvantage to the concerned personnel, it may not be disclosed.

## **Article 16 Report of Investigation Result**

- A. The Committee shall report the confirmation of the examined content to the board of directors within 6 months of the submission date after completion and judgment of the investigation.
- B. The report of the result must include each of the following items:
- ① Content of information
  - ② Misconduct subject to investigation
  - ③ List of investigators of Investigation Committee
  - ④ The role of the examinee in the relevant research and validity of misconduct
  - ⑤ Related evidence and witnesses
  - ⑥ Objection or defense by informant and examinee, and its processing result
- C. Until the final judgment on the research misconduct, it must not be disclosed to the public.

# JKSPE Copyright Transfer Agreement

---

**Manuscript Title (KOR):**

**Manuscript Title (ENG):**

**Manuscript Authors (all):**

**Affiliation:**

**Corresponding author's ORCID:**

---

**Please read this form carefully before signing:**

1. The submitting/corresponding authors (hereafter referred to as "authors") warrant that the copyright shall be transferred to the Korean Society for Precision Engineering (KSPE) when the manuscript is accepted, and the KSPE will own the exclusive rights.
2. Authors certify that they have not impinged upon the rights or copyrights of other researchers, and have attained legal copyright to display items from the original copyright owners.
3. Authors certify that they have indeed contributed to the outcomes and writing of their manuscript and are responsible for the contents therein.
4. Authors may use or reproduce part of the published work in an annual report, magazine or another journal. In this case, they should inform the KSPE of the reproduction and cite the work with proper citation information.
5. Authors have never published the same work in any other journal and are not planning to do so.
6. Authors certify that they will abide by the ethics regulations of the KSPE related to academic activities. Authors also agree to CrossRef verification of the manuscript for prevention of duplicate publication and plagiarism.
7. The corresponding author is aware of the items 1-6 and agrees to them.
8. The KSPE will have the right to delay or cancel the publication if authors do not adhere to the above statements.
9. Corresponding author has the full authority to sign the Statement of Copyright Transfer form on behalf of all the co-authors.

**Name** \_\_\_\_\_

**Signature** \_\_\_\_\_

**Date** \_\_\_\_\_

A digital signature affixed on an electronic document shall have the same effect as a handwritten signature by the Korean Digital Signature Act. Please select a preferred method to sign this agreement.

This article will not be published unless Copyright Transfer Agreement has been signed and received by KSPE.

---

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE) Editorial Office  
12F, SKY1004 bldg., 50-1, Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul 04508, Republic of Korea  
Fax: +82-2-518-2937; Phone: +82-2-518-2928; E-mail: paper@kspe.or.kr

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 27 · Number 1 · January 2026

## REGULAR PAPERS

**Parameter Influence and Optimization Strategy for Femtosecond Laser Drilling of Nickel-Based Single-Crystal Superalloys**

Y. Tu · Z. Li · Z. Wen · P. He · Y. Dai 1

**A Novel Deep Error Tracing Approach Based on Stream-of-Variation Theory for Multi-Axis Flexible Machining Center at Micro-Stroke**

Z. Li · H. Tang · Y. Zheng 27

**A Preliminary Step Towards Intelligent, Layer-by-Layer Self-Correction of Stringing Defect in Fused Filament Fabrication Using Limited Data**

R.J. Krishnamurthy · B. Crawford · A.S. Milani 47

**Enhancing Surface Quality in 7075 Aluminum Alloy Deep Holes Through Two-Dimensional Ultrasonic Elliptical Vibration Boring**

Y. Ye · G. Hu · J. Tong · Z. Liu 63

**Experimental Investigation of Ultrasonic Vibration-Assisted High-Speed Grinding for Bearing Ring Raceway**

X. Lv · X. Zhang 81

**A Mechanistic Model for Enhanced Material Removal and Residual Stress Mitigation in Ultrasonic-Assisted Grinding of Large-Diameter Aluminum Alloy Spherical Mirrors**

W. Fu · L. Luo · H. Zhang · Xi. Zhang · Y. Zhai 103

**Optimization Research on Roundness Error Extraction Method Based on Data Transformation and Quickhull Convex Hull Algorithm**

D. Liu · H. Li · Y. Li · J. Niu 123

**Stretchable Tri-Axis Sensor for Tires: Investigating Pressure, RPM, Camber, Slip, and Deformation Effects**

M.J. Hossain · J.-W. Choi 141

**External Force Estimation for a Two-wheeled Mobile Robot Using a Deep Learning-calibrated Sensor System**

W. Lee · S. An · J. Kim · T. Seo 159

**Injury Severity in Crossroad Car-to-Car Accidents Considering Pathway of Automated Vehicles**

M. Kim · Y. Shin · J. Jeong 171

**Adaptive Tool Path Mapping and Planning Method for Non-Uniform Machining Allowances of Large-Scale Thin-Walled Cabin Brackets**

J.-w. Ma · H.-t. Yan · Y. Wang · Y.-w. Song · L.-y. Li · Y.-p. Wang · Z.-y. Jia 185

**Elastic Stress Analysis of Complex Piping Junctions: Solution for Elbow–Straight Pipe Configurations Under Internal Pressure**

D.-J. Kim · J.-H. Hwang · S.-H. Park · S.-P. Hong 205

**Predicting Warhead Fragment Dispersion Using Stepwise Machine Learning Regression**

K.S. Lee · K.-S. Kim · S. Kim 225

**Effect of Ultrasonic Surface Rolling Parameters on Titanium Alloy Surface Integrity: A Numerical and Experimental Study of Residual Stress, Hardness, and Roughness**

K. Zheng · Y. Li · X. Zhao · G. Mou 241

**Reliability-based Robust Design Optimization of Non-contact Piezoelectric Energy Harvester Based on Rotational Mechanism**

M. Choi · C. Han · J. Doh 259

**Mechanical, Thermal, Viscoelastic, and Electrical Performance Evaluation of Graphene Nanoplatelets/Polylactic Acid (GNP/PLA) Nanocomposites**

V.U. Siddiqui · S.M. Sapuan · M.K.A. Mohd Ariffin · M.R. Hassan 277

**Study on Conductive Model of Porous Ceramic-Based Composite Solid Electrolyte Particles for Dry Electrolytic Chemical Polishing (DECP)**

B. Xiao · J. Yi · K. Pei · H. Deng 297

**3D Printable high-strength aramid nanofiber reinforced composites via vat photopolymerization**

S. Lee · H. Kwon · H.-T. Lee 317

**Machine Learning Driven Prediction and GUI Based Optimization of Quasi-Static Mechanical Properties in SLM Fabricated Ti6Al4V Alloy**

M.M. Butt · S. Rashid · M.u. Haq · A. Mustafa · A. Iqbal · H. Laieghi · V. KVVSSN · M.U. Salamci · E. Salvati · H. Kızıl 329

## REVIEW PAPERS

**Modeling of Residual Stress and Microstructure Evolution in Machining: A Review**

M. Zhao · X. Yang · S. Qiu · B. Qian · G. Liu · S.Y. Liang 349

**Recent Advancements in Filtration Technique for Engineering Surface Topography using High-Definition Metrology**

Y. Shao · Z. Xu · S. Du · J. Lu 403

Further articles can be found at [link.springer.com](http://link.springer.com)

Abstracted/Indexed in *BFI List*, *Baidu*, *CLOCKSS*, *CNKI*, *CNPIEC*, *Dimensions*, *EBSCO Discovery Service*, *Google Scholar*, *INSPEC*, *Japanese Science and Technology Agency (JST)*, *Journal Citation Reports/Science Edition*, *Korea Citation Index (KCI)*, *Naver*, *Norwegian Register for Scientific Journals and Series*, *OCLC WorldCat Discovery Service*, *Portico*, *ProQuest-ExLibris Primo*, *ProQuest-ExLibris Summon*, *SCImago*, *SCOPUS*, *Science Citation Index Expanded (SCIE)*, *TD Net Discovery Service*, *UGC-CARE List (India)*, *WTI AG*, *Wanfang*

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at [www.springer.com/12541](http://www.springer.com/12541)

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 13 · Number 1 · January 2026

## REGULAR PAPERS

**The Grinding Efficiency and Surface Roughness Study of WC-10Co-4Cr Coating on the Spherical Plain Bearings Based on the Trajectory Analysis**

Z. Jiang · C. Jiang · G. Pu · L. Wang · Y. Zhang · Y. Hao · X. Hong 1

**One-Step Process for Fabricating Superhydrophobic Surfaces on Metals and Ceramics**

T.-H. Dinh · D.-M. Chun 13

**Analysis for Influence of Wire Feeding Angle on Laser Energy Absorption and Deposited Layer Forming Behaviors During Wire Laser Additive Manufacturing**

Y. Ai · Y. Wang · Y. Zhang · P. Yuan 29

**High-Quality Surface Preparation of Inconel 718 Nickel-Based Superalloy Considering Chemical Mechanical Polishing**

Z. Dai · J. Zhou · X. Wang · T. Zhao · L. Guo · Q. Yu 49

**Micro/nanostructure-Based Surface Modification After Electropolishing of TiAl6V4 Manufactured by Selective Laser Melting Process: Superhydrophilic, Superhydrophobic, SLIPS**

E.-J. Lee · K.-K. Lee · D.-G. Ahn · J.-W. Lee 65

**Femtosecond Laser Surface Textured Micro-Crosshatch Patterns for Tribological Enhancement of Gray Cast Iron**

D.N. Basha · G.L. Samuel · R. Bathe 77

## REVIEW PAPER

**Towards Sustainability: Critical Insights into Solid-State Joining Processes for Developing Lightweight Hybrid Structures**

S. Kumar · S. Gao · C. Wu · A. Kar · S. Basak 89

## REGULAR PAPERS

**Comparative Life Cycle Assessment of Different Pre-treatment Scenarios for Diamond Coating Deposition on WC-Co Through HF-CVD**

E. Mingione · M. Gianvincenzi · M. Marconi · G. Rubino 117

**Applications of Environmentally Friendly Metal Oxides as PEM Fuel Cell Cathode Catalysts**

O. Baytar · Ö. Şahin · A. Akdag · G. Canpolat · A. Ekinici 147

**Systematic Design Improvement of Spinning Disk-Based Triboelectric Nanogenerators for Enhancing Electrical Output**

D. Seo · S. Kim · J. Kong · W. Lee · J. Chung 167

**Enhanced Performance of Triboelectric Nanogenerator Based on TiO<sub>2</sub> Nanoparticle/Nylon 66 Composite Nanofibers**

C.-J. Moon · G.-J. Choi · S.-H. Sohn · S.-J. Kim · I.-K. Park 181

**A Fast NMPC Energy Management Scheme for Fuel Cell Electric Vehicles based on Driving Pattern Classification**

X. Liu · J. Gao · S. Hou · R. Lin · H. Chen 195

**Crashworthiness Analysis of Front Impact Beam with Various Sectional Shapes for Lightweight Electric Vehicles**

M.-G. Jo · T.-W. Lee · Y.-S. Lee · J.-S. Park · J.-W. Wee 211

**Flexible, Patternable Graphene/CNT-Coated Heaters with Nylon/Clay Lamination and Strong Adhesion**

W. Lim · J. Huh · M. Abdyrahymowa · A. Khadka · H. Gao · B. Joshi · A. Aldalbahy · G. Periyasami · S.S. Yoon 233

## SHORT COMMUNICATION

**Prediction of the Bead Shape in a Directed Energy Deposition Process Using Machine Learning with Limited Point Data**

K.-K. Lee · J. Kim · S.K. Moon · D.-G. Ahn 245

## REVIEW PAPERS

**A Systematic Review of Prognostics and Health Management in Mobility Batteries**

P. Kumar · M. Tanveer · K. Park · I. Raouf · H.S. Kim 257

**Functionally Graded Metallic Materials Via Additive Manufacturing: Research Progress on Processing, Challenges, and Applications**

R. Jain · B. Sahoo · S. Jain · M. Mohan · M. Choudhary · H. Lee · S.K. Dewangan · S. Samal · B. Ahn · Y. Jeon 281

## REVIEW

**A Survey of Robotic Grippers Based on Task-Based Hand Motions and Mechanical Dexterity**

J. Choi · J. Won · M. Lee · W. Lee · T. Seo 329

## CORRECTIONS

**Correction: Functionally Graded Metallic Materials Via Additive Manufacturing: Research Progress on Processing, Challenges, and Applications**

R. Jain · B. Sahoo · S. Jain · M. Mohan · M. Choudhary · H. Lee · S.K. Dewangan · S. Samal · B. Ahn · Y. Jeon 355

**Correction: Stability Enhancement of Reformate-Fueled, Low-Temperature Solid Oxide Fuel Cell with Nickel Thin-Film Anode by Water Bubbling**

S. Ji · W. Kim · S. Han · S. Jeong · T. Park 357

Further articles can be found at [link.springer.com](http://link.springer.com)

Abstracted/Indexed in Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, EI Compendex, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency (JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang

Instructions for authors for *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* are available at [www.springer.com/40684](http://www.springer.com/40684)

# **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology**

**Volume 4 · Number 1 · January 2026**

## REGULAR PAPERS

**A Sensor Location-based Diagnosis Method for Temperature  
Uniformity of Hotplate with Convolution Neural Network**

Jinwoo Lee · Daeil Kwon 1

## REVIEW

**Inclusive AI and Low-cost Robotics for Sustainable Smart  
Systems: Bridging the Global Technological Divide**

Hyunsu Lee · Sung-Hoon Ahn 11

**Defect Detection and Optimization for Additive Manufacturing  
Powered by Artificial Intelligence: A Review**

Noah Miller · TaeHeon Sung · Haseung Chung 27

# 2025년 제9차 이사회 회의록

◎ 일 자 : 2025년 12월 12일(금), 16:00, 학회 회의실

◎ 장 소 : DN솔루션즈 연구개발센터 1층 강당 및 온라인

◎ 참석자 : 안성훈, 이상원, 오정석, 김규만, 김동성, 김보현, 김태곤, 이창우, 김양진, 김효영, 손정우, 윤희택, 김충수, 송용남, 안상훈, 윤주성, 이지혜, 정영훈, 주기남, 한민우, 이동윤, 이주연, 남정수, 조정대, 최영재, 강현욱, 곽문규, 김산하, 김해진, 안형준, 오기용, 이동훈, 이윤석, 이현택, 정훈의, 천두만, 김현준, 박용재, 이봉기, 허세곤, 박형욱, 이동진, 홍성태, 김건희, 이재열, 이경창  
재적 117명 중 64명(위임18명) 참석

## I. 주요보고사항

- 12월 주요일정 및 2026년 이사회, 평의원회, 정기총회 일정 보고
- 2026년 임원활동 겸직허가 공문 요청
- 주무관청(과천과학관) 임원 변경(취임) 신고
- 2026년 대표이사 및 임원 변경 등기 진행
- 외부포상 수상자 보고
  - 1) 연구재단 제29회 젊은과학자상 장진아(POSTECH) 사업이사
  - 2) 산업부 산업기술진흥 유공자 포상-장관표창: 이상원(성균관대학교) 수석부회장
- 회원현황(2025.12.12)보고: \*총회원수: 3,367명
- 2025년 11월말, 수입 지출 현황 보고
- 2025년 공익법인 기부금 지정 수입 및 지출현황 보고
- 2026 각 저널 편집진 구성 및 신임 편집인 위촉 승인
- 국제학술지 IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST 옥스포드 OA출판 계약체결
- 윤리위원회 개최 결과 보고
- [정밀가공 부문위원회] 연마기술연구회 제9차 기술교류회 개최 결과 보고
- [정밀측정 부문위원회] 제3회 정밀측정 튜토리얼 개최 결과 보고
- [ASPEN위원회] ASPEN2025 개최결과 보고

## II. 승인 및 의결사항

- 신입회원 인준(안)
  - 황유현 (한국전자기술연구원) 외 38명, 학생회원: 강병규 (단국대학교) 외 52명
- 특별회원사 신규가입
  - 1) 다이아몬드그룹: 현대자동차(주)
  - 2) 패밀리그룹: 라온엑스솔루션즈(주), 더싸인, (주)에임즈, 라이트리(주), 참테크
- 특별회계 [교유목적사업 적립금] 장기성예금 갱신 및 신규적립(안)
- 2026년 추계학술대회 개최일자 변경(안)
- 2026년 부문회장 위촉(안)

	부문명	2026부문회장 (2025회장)	소속	이사 직위
(1)	정밀가공	*이현섭(김건희)	동아대학교	사업이사
(2)	정밀측정	이현욱	한국철도기술연구원	사업이사
(3)	로봇제어자동화	주백석	금오공과대학교	사업이사
(4)	스마트생산시스템	*윤주성(이동윤)	경남대학교	사업이사
(5)	설계및재료	*김석민(박형욱)	중앙대학교	편집이사
(6)	공작기계	이강재	DN솔루션즈	대외협력이사
(7)	나노마이크로기술	*박인규(조정대)	KAIST	편집이사
(8)	바이오헬스	강현욱	UNIST	사업이사
(9)	적층제조시스템	전용호	아주대학교	사업이사
(10)	녹색생산기술	안지환	POSTECH	국제이사

- 2026년 부문활동비 예산(안) 개정

# 2026년 사단법인 한국정밀공학회 임원

## 회장

이상원(성균관대학교)

## 수석부회장

오정석(한국기계연구원)

## 부회장

김규만(경북대학교) 안형준(송실대학교) 김호찬(국립경국대학교) 류상문(주)DN솔루션즈 박상후(부산대학교)  
 성대운(현대자동차(주)) 이영수(삼성전자) 이인환(충북대학교) 최영재(한국생산기술연구원)

## 감사

이동원(전남대학교) 현승민(한국기계연구원)

## 총무이사

곽문규(경북대학교) 김남근(서강대학교) 김보현(송실대학교) 문두환(고려대학교)

## 재무이사

고승환(서울대학교) 김양진(부산대학교) 김태곤(한국생산기술연구원) 이창우(건국대학교)

## 편집이사

강봉철(국민대학교) 강현욱(UNIST) 김동립(한양대학교) 김산하(KAIST) 김석민(중앙대학교)  
 김영진(KAIST) 김해진(연세대학교) 김효영(한국공학대학교) 박근(서울과학기술대학교) 박영민(UNIST)  
 박인규(KAIST) 손정우(국립금오공과대학교) 안지환(POSTECH) 오기용(한양대학교) 윤준영(연세대학교)  
 윤현준(송실대학교) 윤희택(KAIST) 이광일(경일대학교) 이동훈(송실대학교) 이윤석(서울대학교)  
 이현택(인하대학교) 이호원(서울대학교) 정구현(울산대학교) 정훈의(UNIST) 주백석(국립금오공과대학교)  
 진종한(주)미터랩) 천두만(울산대학교) 추원식(경상국립대학교)

## 사업이사

강윤정(제주대학교) 강태준(인하대학교) 권지연(동국대학교) 김무림(한국로봇융합연구원) 김종백(연세대학교)  
 김진호(영남대학교) 김충수(Eloi Materials (EML)) 김현준(경북대학교) 박석희(부산대학교) 박용재(강원대학교)  
 박준(한국광기술원) 서진호(국립부경대학교) 송용남(고려대학교) 신현정(KAIST) 안상훈(한국기계연구원)  
 윤주성(경남대학교) 이문구(아주대학교) 이봉기(전남대학교) 이원균(충남대학교) 이지혜(한국기계연구원)  
 이현섭(동아대학교) 이현욱(한국철도기술연구원) 임지석(영남대학교) 장진아(POSTECH) 정영훈(경북대학교)  
 정재일(국민대학교) 조영삼(원광대학교) 주기남(조선대학교) 최정욱(중앙대학교) 한민우(동국대학교)

## 기획홍보이사

류시형(전북대학교) 이동윤(한국생산기술연구원) 이주연(서울과학기술대학교) 허세곤(한국기계연구원) 김동성(POSTECH)

## 국제이사

김미소(KAIST) 김명범(한양대학교) 김창주(한국기계연구원) 남정수(한국생산기술연구원) 노준석(POSTECH)  
 맹상진(홍익대학교) 박형욱(UNIST) 송지현(단국대학교) 이동진(건국대학교) 전용호(아주대학교)  
 조영태(국립창원대학교) 차석원(서울대학교) 홍성태(울산대학교)

## 대의협력이사

권석진(한국철도기술연구원) 김건희(국립한밭대학교) 김민찬(주)DN솔루션즈) 김종혁(위아공작기계(주)) 송시한(주)와이지(원)  
 심창섭(한국산업기술기획연구원) 이강재(주)DN솔루션즈) 이재열(한국로봇융합연구원) 장원석(한국기계연구원) 조영환(LIG넥스원(주))  
 조정대(한국기계연구원) 최정오(LG전자) 한국현(주)삼영기계)

## 특별회원사

### 다이아몬드

신도리코(주) (주)DN솔루션즈 LIG넥스원(주) (주)스맥 위아공작기계(주)  
 (주)이수페타시스 (주)케이씨텍 한국화낙(주) 현대자동차(주) 화천기공(주)

### 골드

(주)마리알로 (주)어드벤처코리아 (주)에이스나노캠 (주)엔도로보틱스 지앤피테크놀로지(주)  
 (주)프로토텍 핵사곤

### 실버

(주)심팩 (주)와이지-원 (주)웨이퍼펍 (주)하이솔라 한국공작기계산업협회

### 패밀리

LPKF Korea QED Technologies (주)넥스페이스 더싸인 디케이에스에이(주)  
 라온엑스솔루션즈(주) 라이트런(주) 리파인(주) (주)매이드 맥스트레이딩  
 (주)미디어스트리트 (주)벡터바이오 (주)브루커코리아(주) 세움트로닉스 (주)팀솔루션  
 (주)아이엠에스코리아 (주)앨리텍 에이비씨무역 (주)에이엠코리아 (주)에임즈  
 (주)위즈윌텍 (주)유니오텍 (주)인사이드테크 (주)제이엔텍 참테크  
 (주)큐빅테크 (주)크렐로 (주)테스트원 (주)티앤알바이오랩 하비스탕스(주)  
 (주)하스피 (주)한국대베소프트

## Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

강봉철  
국민대학교

강성목  
대구가톨릭대학교

강현욱  
UNIST

고승환  
서울대학교

곽문규  
경북대학교

김남근  
서강대학교

김동성  
POSTECH

김무림  
한국로봇융합연구원

김산하  
KAIST

김양진  
부산대학교

김창주  
한국기계연구원

김효영  
한국공학대학교

문두환  
고려대학교

박민수  
서울과학기술대학교

박정재  
(주)미터랩

박형욱  
UNIST

손정우  
국립금오공과대학교

안지환  
POSTECH

이광일  
경일대학교

이창우  
건국대학교

이창환  
서울과학기술대학교

이현섭  
동아대학교

이현욱  
한국철도기술연구원

전용호  
아주대학교

정구현  
울산대학교

조영학  
서울과학기술대학교

주백석  
국립금오공과대학교

진종한  
(주)미터랩

천두만  
울산대학교

추원식  
경상국립대학교

황지홍  
서울과학기술대학교

## Members of Editorial Board

맹상진  
홍익대학교

박석희  
부산대학교

안다훈  
서울과학기술대학교

안상훈  
한국기계연구원

윤해성  
한국항공대학교

윤헌준  
송실대학교

이봉기  
전남대학교

이원균  
충남대학교

이현택  
인하대학교

이호원  
서울대학교

장진아  
POSTECH

주기남  
조선대학교

최동휘  
경희대학교

최영만  
아주대학교

최정욱  
중앙대학교

최진승  
건국대학교

한민우  
동국대학교

허세곤  
한국기계연구원

김갑용  
Iowa State University

김범준  
University of Tokyo

김우균  
University of Cincinnati

민상기  
University of Wisconsin-Madison

Simon Park  
University of Calgary

Patrick Kwon  
San Diego State University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 1/January 2026

ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

월간 · 제43권 제1호 [통권 제418호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2025년 12월 25일

발행일 2026년 1월 1일

발행인 이상원

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

[04508] 서울 중구 종림로 50-1(만리동 1가 51-1 SKY1004빌딩) 12층 / FAX (02)518-2937 / http://www.kspe.or.kr

사무국장 김영심 / (02)518-0722 / kspe@kspe.or.kr

JKSPE(한국정밀공학회지), IJPEM-ST 김소진 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpem.st@kspe.or.kr

IJPEM(GT) 정혜림 / (02)518-0723 / ijpem@kspe.or.kr

국내학술대회(춘·추계) / (02)393-0725 / conf@kspe.or.kr

국제학술대회(PRESM) 김영심 / (02)6925-0710 / presm@kspe.or.kr

회계 김상원 / (02)393-0724 / account@kspe.or.kr

# 한국정밀공학회지(JKSPE)

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING



## Indexed in SCOPUS, KCI

SCOPUS 등재지(2017~), KCI 등재지(2001~)  
1984년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행  
ISSN 1225-9071(Print) / 2287-8769(Online)

### INTRODUCTION

1. 분기마다 특정 주제에 따른 특집논문 구성
2. 국내·국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 일반 투고 논문

### PUBLICATION FEE

	국문 투고	영문 투고
기본 8페이지	200,000원	면제
1페이지 추가	30,000원	면제
후기(사사) 추가	총 금액의 50% 증가	면제

\* 국내외 학술대회 발표 논문, 후기(사사)가 없을 경우 게재료 면제

### ADVERTISEMENT

관련 기업 및 연구기관의 연구성 또는 제품 홍보, 각 공과대학 도서관·연구소·관련 산업체에 배포

학회지 광고 게재 비용		특별광고료(연 6회 이상)		광고 필름	비고사항
뒷표지	750,000원	6회	정가의 30%	A4(210x297 mm) 제작	* 앞쪽은 광고가 불가능합니다. * 특별회원사: 칼라광고 연간 무료제공 (최대 3회)
칼라광고	500,000원	12회	정가의 50%		
흑백광고	250,000원				
홈페이지 배너	월 100,000원				

### TOPICAL ISSUE

TOPIC	
2022: 재료성형 공정에서의 고효율 금형 기술	
2023: 스마트/디지털 헬스케어 기술	
2024: 가공된 기능성 재료 기술	
2025: 레이저를 이용한 가공 기술	

# IJPEM-ST

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-SMARTTECHNOLOGY



## 2023 New Journal

2023년 창간, 연간 2회, 1월·7월 1일 발행  
ISSN 2951-4614(Print) / 2951-6382(Online)

### INTRODUCTION

1. Full Open Access
2. Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

### AIMS AND SCOPE

- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality
- Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- Autonomous Things

### WEBSITE

www.ijpem-st.org

# IJPEM

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



2024 Impact Factor: 3.6

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지  
2000년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행  
ISSN 2234-7593(Print) / 2005-4602(Online)

## INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

## AIMS AND SCOPE

- Precision Manufacturing Processes
- Measurements and Control
- Robotics and Automation
- Manufacturing System
- Design and Materials
- Machine Tools
- Nano/Micro Technology
- Bio Health
- Additive Manufacturing

## SPECIAL ISSUE

- TOPIC**
- 2023: Robots for Manufacturing Processes and Systems
  - 2024: Semi Conductor Manufacturing
  - 2025: IJPEM 25th Anniversary Special Issue
  - 2026: Humanoid Robots and Physical AI and for Manufacturing

# IJPEM-GT

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY



2024 Impact Factor: 5.6

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지  
2014년 창간, 연간 6회, 홀수월 1일 발행  
ISSN 2288-6206(Print) / 2198-0810(Online)

## INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

## AIMS AND SCOPE

- Energy Saving and Waste Reduction in Manufacturing Processes
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- Design and Manufacturing of Green Products
- Materials for Green Manufacturing
- Management and Policy for Sustainable Manufacturing

## SPECIAL ISSUE

- TOPIC**
- 2016: Hybrid Manufacturing
  - 2017: 4D Printing
  - 2018: Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution
  - 2019: Energy Harvesting
  - 2020: Green Smart Manufacturing
  - 2021: Soft and Green Manufacturing and Applications
  - 2022: Green Manufacturing Coping with Climate Change and Pandemics
  - 2023: NetZero, Achievable by Manufacturing?
  - 2024: Advanced Manufacturing for ESG
  - 2025: Autonomous Manufacturing with Green Technology
  - 2026: Autonomous Manufacturing for Sustainable Industry

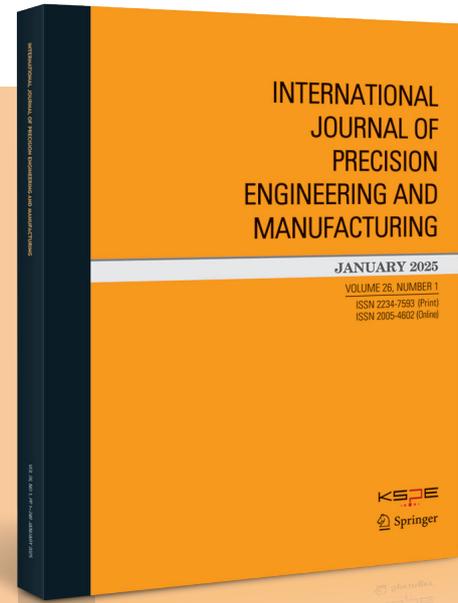
# INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING

## About IJPEM

IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 26 years and aims to disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to the international precision and manufacturing engineering community. The journal is indexed in SCIE (Impact factor 3.6) and downloaded more than 148,000 times a year around the world

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

## Humanoid Robots and Physical AI for Manufacturing



The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- Embodied AI for factory-level decision making and control
- Humanoid robots for precision manipulation and tool use
- AI-based learning from human demonstrations in industrial tasks
- Perception and action integration in complex factory environments
- Dexterous manipulation with vision and tactile feedback for contact-rich tasks
- Safe and adaptive human-humanoid collaboration
- Integrating physical AI with digital twin, mixed reality, and large language model (LLM)
- Applications of physical AI in flexible and modular manufacturing systems
- Design, modeling, and control of anthropomorphic mechanisms
- Deployment strategies of humanoid robots in legacy factory systems
- Case studies and real-world demonstrations of humanoid systems in production

## Guest editors

Jongeun Choi  
*(Yonsei University, Korea)*  
Huitaek Yun  
*(KAIST, Korea)*  
Jingang Yi  
*(Rutgers University, USA)*

## Submission Procedures

Deadline for Submission Date:  
**February 28, 2026**  
Publication Date:  
**September 1, 2026**  
Volume, Number:  
**Vol. 27, No. 9**

# INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY

Impact Factor: **5.6** by JCR in 2024

## About IJPEM-GT

IJPEM-GT is co-published by the Korean Society for Precision Engineering and Springer Nature. The journal is published bimonthly, and JCR 2024 impact factor is 5.6, which ranks it top 12% (22/182) journal in the category of Engineering-Mechanical and top 22.5% (16/71) journal in the category of Engineering-Manufacturing.



Topics of the Special Issue cover novel research contributions of “Green” precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

## Autonomous Manufacturing for Sustainable Industry

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- Cyber-Physical Production Systems for Sustainable Manufacturing
- Green Robotics and Intelligent Control in Smart Manufacturing
- Sensing, Monitoring and Diagnostics for Green Manufacturing
- Integration of AI in Manufacturing

## I Guest editors:

Prof. **Martin B.-G. Jun**  
(Purdue University, USA)

Prof. **Young Tae Cho**  
(Changwon National University, Korea)

Prof. **Sanha Kim**  
(KAIST, Korea)

Prof. **Seok Kim**  
(Yonsei University, Korea)

## I Submission Procedures

Deadline for Submission Date:  
**November 30, 2025**

Publication Date:  
**May 1, 2026**

Volume, Number:  
**Vol. 13, No. 3**

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

## SMART TECHNOLOGY



IJPEM-Smart Technology (hereinafter 'IJPEM-ST') is a new-launched academic journal which will be published by the Korean Society for Precision Engineering (KSPE).

Submit an IJPEM-ST  
<http://submit.ijpem-st.org>

## Aims and Scope

Under the great wave of the 4<sup>th</sup> industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)** is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. **The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:**

- ✓ Big Data Analytics and Informatics
- ✓ Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- ✓ Prognostics and Health Management (PHM)
- ✓ Industrial Internet of Things (IIOT)
- ✓ Industrial Artificial Intelligence
- ✓ Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- ✓ Augmented, Virtual and Extended Reality
- ✓ Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- ✓ Autonomous Things

### IJPEM-ST covers various kinds of papers:

Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

#### • Publication Date (Scheduled)

**Vol. 4 No. 1 January 1, 2026**  
**Vol. 4 No. 2 July 1, 2026**

#### • Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

**Sang Won Lee** / Sungkyunkwan University, Korea

### Co-Editors-in-Chief

**Jay Lee** / University of Maryland, USA

**Jun Ni** / University of Michigan, USA / Shanghai Jiao Tong University, China

### Senior Editor

**Dong Yoon Lee** / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

### Editors

**Hyeong-Joon Ahn** / Soongsil University, Korea

**Hae-Jin Choi** / Chung-Ang University, Korea

**Chih-Hsing Chu** / National Tsing Hua University, Taiwan

**Martin B.-G. Jun** / Purdue University, USA

**Yangjin Kim** / Pusan National University, Korea

**Seungchul Lee** / POSTECH, Korea

**Sangkee Min** / University of Wisconsin-Madison, USA

**Seung-Ki Moon** / Nanyang Technological University, Singapore

**Duhwan Mun** / Korea University, Korea

**Simon Park** / University of Calgary, Canada

### Editorial Board

**Seung-Kyum Choi** / Georgia Institute of Technology, USA

**Baeksuk Chu** / Kumoh National Institute of Technology, Korea

**Haseung Chung** / Michigan State University, USA

**Youngkuk Jeong** / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

**Yongho Jeon** / Ajou University, Korea

**Jay-I. Jeong** / Kookmin University, Korea

**Hyungjung Kim** / Seoul National University, Korea

**Jihyun Lee** / University of Calgary, Canada

**Wonkyun Lee** / Chungnam National University, Korea

**Kyoungmin Min** / Yonsei University, Korea

**David Rosen** / Agency for Science, Technology and Research, Singapore

**Jung Woo Sohn** / Kumoh National Institute of Technology, Korea

**Joo-Sung Yoon** / Kyungnam University, Korea

# Introducing the New JKSP E Submission System

Journal of the Korean Society for Precision Engineering

Indexed in SCOPUS, KCI



Editor-in-Chief: Bo Hyun Kim

Frequency: Monthly

ISSN: 1225-9071(Print) / 2287-8769(Online)

Submission to JKSP E: <https://www.editorialmanager.com/jkspe/>

Search for JKSP E articles: <http://jkspe.kspe.or.kr/>

## Introduction of Journal

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSP E) is devoted to publishing original research articles with high ethical standard on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on articles related to improving the precision of machines and manufacturing processes through implementation of creative solutions that stem from advanced research using novel experimental methods, predictive modeling techniques, and rigorous analyses based on mechanical engineering or multidisciplinary approach. The expected outcomes of the knowledge disseminated from JKSP E are enhanced reliability, better motion precision, higher measurement accuracy, and sufficient reliability of precision systems.

## Aims and Scope

The Journal of the Korean Society for Precision Engineering is devoted to publishing original research articles on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on various fields including:

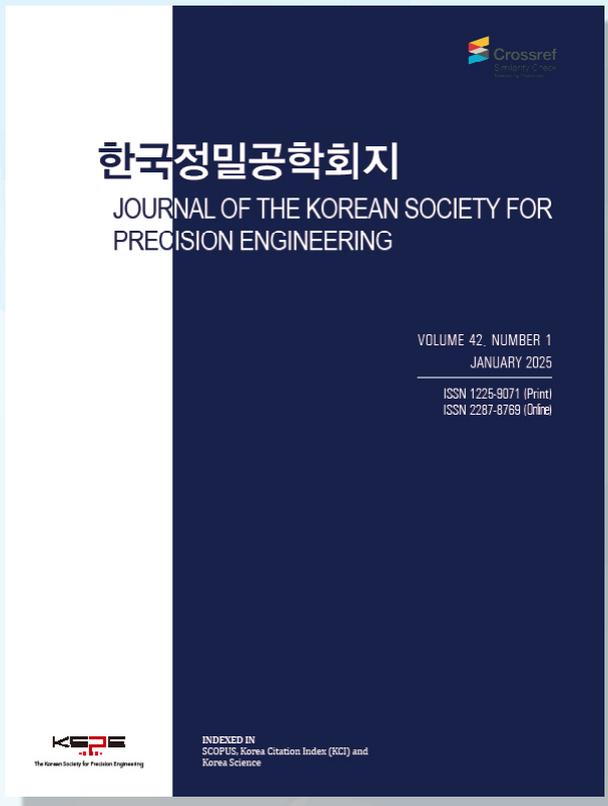
- Precision Manufacturing Processes
- Precision Measurements
- Robotics, Control and Automation
- Smart Manufacturing System
- Design and Materials
- Machine Tools
- Nano/Micro Technology
- Bio Health
- Additive Manufacturing
- Green Manufacturing Technology

## Award

- JKSP E Award
- Best Editor Award
- Contribution Award

The article processing charge (APC) will be waived for full papers presented at the conference that are written in English and do not include acknowledgment statements.

Email: [paper@kspe.or.kr](mailto:paper@kspe.or.kr) | Tel: +82-2-518-2928



## SCOPUS, KCI 등재 학술지

학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

### Scope

- Precision Manufacturing Processes
- Precision Measurements
- Robotics, Control and Automation
- Smart Manufacturing System
- Design and Materials
- Machine Tools
- Nano/Micro Technology
- Bio Health
- Additive Manufacturing
- Green Manufacturing Technology

학술대회 Full Paper  
논문을 투고 시 게재료가  
면제됩니다.

논문 본문을 영문으로  
작성하여 투고 시, 게  
재료가 청구되지 않습  
니다.

ISSN 1225-9071(Print) / 2287-8769(Online)

## Editorial Board

### • Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim (Soongsil University)

### • Editors

Jihwan An (POSTECH)  
 Younghak Cho (Seoul National University of Science & Technology)  
 Baeksuk Chu (Kumoh National Institute of Technology)  
 Won-Shik Chu (Gyeongsang National University)  
 Doo-Man Chun (University of Ulsan)  
 Koo Hyun Chung (University of Ulsan)  
 Jihong Hwang (Seoul National University of Science & Technology)  
 Yongho Jeon (Ajou University)  
 Jonghan Jin (Meter-Lab. Inc.)  
 Maolin Jin (Korea Institute of Robotics & Technology Convergence)  
 Bongchul Kang (Kookmin University)  
 Sung-Mook Kang (Daegu Catholic University)  
 Hyun-Wook Kang (UNIST)  
 Yang Jin Kim (Pusan National University)  
 Hyo-Young Kim (Korea Polytechnic University)  
 Sanha Kim (KAIST)

Namkeun Kim (Sogang University)  
 Chang-Ju Kim (Korea Institute of Machinery & Materials)  
 Dong Sung Kim (POSTECH)  
 Seung Hwan Ko (Seoul National University)  
 Moonkyu Kwak (Kyungpook National University)  
 Hyunseop Lee ("Dong-A University)  
 HyunWook Lee (Korea Railroad Research Institute)  
 Changwoo Lee (Konkuk University)  
 Chang-Whan Lee (Seoul National University of Science & Technology)  
 Kwang-Il Lee (Kyungil University)  
 Duhwan Mun (Korea University)  
 Jungjae Park (Meter-Lab. Inc.)  
 Hyung Wook Park (UNIST)  
 MinSoo Park (Seoul National University of Science & Technology)  
 Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology)

## AWARDS

### JKSPE Awards

– 한국정밀공학회지에 발표된 논문 중 가장  
탁월한 가치의 논문저자에게 포상

## INDEXED IN

- SCOPUS
- Korea Citation Index (KCI)
- Korea Science

## Submission to JKSPE Search for JKSPE

- <https://www.editorialmanager.com/jkspe/>
- <http://jkspe.kspe.or.kr>



+82-518-2928(T)  
+82-518-2937(F)



paper@kspe.or.kr  
<http://www.kspe.or.kr>



12F, SKY1004 Bldg., 50-1  
Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,  
04508, Republic of Korea



**SIMPAC  
프레스 BU**

국내 No.1 프레스 메이커  
기계식·유압식·  
서보 프레스 생산



**SIMPAC홀딩스  
ENG BU**

철강 유통·가공 분야의  
신형 강자  
조선·강관·특수  
용도강 생산



**SIMPAC인더스트리  
산업기계 BU**

글로벌 고무 및  
PVC 제품 메이커들의 든든한  
파트너  
산업기계 및 감속기 생산



**SIMPAC케이디에이  
(KDA)**

글로벌 완성차 브랜드의  
정밀 가공 파트너  
고품질 동력 전달 부품 생산



**SIMPAC  
메탈 BU**

국내 Top-tier  
합금철 메이커  
페로망간·실리콘망간·  
합금철 생산,  
롤(roll) 가공·제조



**SIMPAC인더스트리  
페로실리콘(FeSi) BU**

국내 유일의 고순도  
FeSi 제조 공장  
고순도 FeSi 생산



**SIMPAC  
트레이딩 BU**

원자재 전문 트레이딩 하우스  
비철금속, 광석, 스크랩 등  
산업 원자재



**SIMPAC아플리에**

고객 경험을 확장하는  
B2C 플랫폼  
글로벌 라이프스타일  
브랜드 유통·개발



**SIMPAC홀딩스  
리스텍비즈  
(RISTecBiz) BU**

세계 최고 수준의  
리사이클링 기업  
고순도 산화아연 생산



**SIMPAC글로벌·  
글로벌 동부**

스크랩 업계 대표 기업  
철강·스크랩 리사이클링

# Synergy for Impact

SIMPAC그룹은 제조 기업의 경쟁력을 바탕으로 산업 역량을 수직·수평으로 확장하며 지속 성장해 왔습니다.

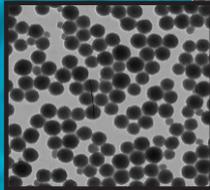
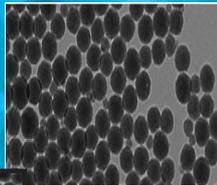
프레스, 합금철, 산업기계, 자원순환, B2C 플랫폼까지, 각 계열사의 전문성과 유기적인 연결을 바탕으로

고객 중심의 솔루션을 제공하며 그룹 전체의 시너지를 만들어 냅니다.

Your Partner in  
Success  
Since 1999

**ACE**  
nanochem

(주)에이스나노켄



让我们做到最好!

LET'S BE

THE BEST!

## Colloidal silica ( $\text{SiO}_2$ 나노 입자) 연구 & 제조

- 반도체 CMP Slurry 국산화, 상용화 성공, 연마입자 제조
- 콜로이달 실리카 입자 제어 Nano technology
- 반도체 CMP Slurry & Si-Wafer CMP Slurry
- 기업부설 CMP 연구소, 정밀 연마 입자 개발



# 2026 한국정밀공학회 춘계학술대회

## KSPE 2026 SPRING CONFERENCE

2026. 5. 14. Wed. - 5. 16. Fri.  
제주 신화월드 (제주 서귀포시)



200단어 초록 마감  
2026. 3. 10.  
Mon

초록채택 통지  
2026. 3. 21.  
Fri

사전등록마감  
2026. 3. 31.  
Mon



### 논문모집분야

- 정밀가공 Precision Manufacturing Processes
- 정밀측정 Precision Measurements
- 로봇제어자동화 Robotics, Control and Automation
- 스마트생산시스템 Smart Manufacturing System
- 설계및재료 Design and Materials
- 공작기계 Machine Tools
- 나노마이크로기술 Nano/Micro Technology
- 바이오헬스 Bio Health
- 적층제조시스템 Additive Manufacturing
- 녹색생산기술 Green Manufacturing Technology

# PRESM 2026

June 28 Sun – July 3 Fri, 2026

Marina Bay Sands EXPO, Singapore

## Topics & Scope

1. Manufacturing Processes
2. Machine Tools & Systems
3. Automation, Measurement & Control
4. Materials & Design
5. Micro/Nano Technology
6. Bio & Health
7. New and Renewable Energy
8. Sustainable Technology

## Important Dates

Deadline for Abstract Submission of Regular Session:  
**February 2 (Mon), 2026**

Deadline for Acceptance Notification: (Mail from the PRESM Secretariat)  
**March 31 (Tue), 2026**

Deadline for Early Registration/ Presenter Registration:  
**May 1 (Fri), 2026**

Full Paper Submission (Optional):  
**May 1 (Fri), 2026**

## Participating Journals

- 1 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing (IJPEM)  
\*SCIE, SCOPUS / Impact Factor 3.6 (2024), Q1
- 2 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology (IJPEM-GT)  
\*SCIE, SCOPUS / Impact Factor 5.6 (2024), Q1
- 3 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)
- 4 Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE)  
\*SCOPUS



### Organizer

 Korean Society for Precision Engineering (KSPE, Korea)

### Co-Organizers

 The Japan Society for Precision Engineering (JSPE, Japan)

 Taiwan Society for Precision Engineering (TSPE, Taiwan)

### Supported by

 Singapore Exhibition & Convention Bureau

한국정밀공학회

Korean Society for Precision Engineering

# 2026년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

**2026** KSPE 2026  
Spring  
Conference  
**춘계학술대회**

2026. 5.13(수)-15(금)  
제주 신화월드 (제주특별자치도 서귀포시)

KSPE 신한 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

International Conference on  
*PR*ecision *EN*gineering and *SU*stainable *MA*nufacturing

**PRESM 2026**

June 28 Sun - July 3 Fri, 2026  
Marina Bay Sands EXPO, Singapore

KSPE 신한 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회

**2026** KSPE 2026  
Autumn  
Conference  
**추계학술대회**

2026. 11.11(수)-13(금)  
창원 CECO (경상남도 창원시)

KSPE 신한 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering



# Start New Sindoh

2D를 넘어 3D 전문 기업으로  
신도리코가 새로운 미래를 열어갑니다

