

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 11
NOVEMBER 2024

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

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim

Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

Jihwan An
POSTECH

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

Duhwan Mun
Korea University

Jihong Hwang
Seoul National University of Science & Technology

Jonghan Jin
Korea Research Institute of Standards & Science

Maolin Jin
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

Dong Sung Kim
POSTECH

Yang Jin Kim
Pusan National University

Seung Hwan Ko
Seoul National University

Moonkyu Kwak
Kyungpook National University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Changwoo Lee
Konkuk University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Hyunseop Lee
Dong-A University

Jongkil Lee
Andong National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Chul Ki Song
Gyeongsang National University

Duck Hyun Wang
Kyungnam University

Sung Ho Yoon
Kumoh National Institute of Technology

Members of Editorial Board

Jangho Bae
Kyungsung University

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Young-Man Choi
Ajou University

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Bongchul Kang
Kookmin University

Hyun-Wook Kang
UNIST

Beomjoon Kim
University of Tokyo

Chang-Ju Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

Gap-Yong Kim
Iowa State University

Jae-Yeol Kim
Chosun University

Kee Joo Kim
Tongmyong University

Woo Kyun Kim
University of Cincinnati

Patrick Kwon
Michigan State University

Bong-Kee Lee
Chonnam National University

Donghun Lee
Soongsil University

Howon Lee
Seoul National University

Kwang-II Lee
Kyungil University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

Jungjae Park
Korea Research Institute of Standards & Science

Jung Whan Park
Yeungnam University

Simon Park
University of Calgary

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 11 / November 2024

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 November 1, 2024 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Byung-Kwon Min (President, KSPE)

Manuscript Editor Eunhee Park

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 / <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

- 817 차량 안전성 및 안정성 향상을 위한 유한요소해석 기반 스트럿 바의 굽힘 및 압축 성능 분석
배정빈, 김정진
- 827 축사 분뇨 처리 로봇의 효율적인 자율 작업을 위한 커버리지 최적 경로 계획
지준구, 이명규, 김원균
- 841 굴착 영역 지형 데이터에 기반한 굴착 경로 계획
임철환, 배장호, 박진우, 김선우, 홍대희
- 849 직접에너지적층 공정과 P21, H13 분말을 이용한 SKD61 모재에 대한 보수 공정에 관한 연구
윤빛나, 고민성, 강효정, 심도식
- 857 고속 고기동 비행체용 짐벌 시스템의 질량불균형 및 진동 감소를 위한 동조질량감쇠기(TMD) 활용 연구
김준수, 이동균, 이종국, 조현준, 정지인
- 865 CNN을 이용한 방전 표면에 따른 방전 가공 조건 예측
이지효, 김재연, 심대보, 김보현
- 875 선형 모터 모션 스테이지의 맞춤형 전류 제어
양경호, 안형준
- 881 나노미터 수준의 변위제어가 가능한 실시간 유·무선 재료시험기
박경석, 김필호, 오충석
- 889 초소형 위성용 전기 추력기 전원 및 가스 공급 장치의 소형 경량화 방안에 관한 연구
박진영
- 897 인공지능망을 활용한 재료 및 설계 변수에 따른 다공성 구조체의 탄성계수 예측
함민지, 문인용
- 905 MCNP 활용 듀얼에너지 포터블 X-ray개발
이경일
- 913 압전형 고속 조준 거울의 주파수 영역에서의 이력 특성 분석
정상원, 이효건, 정재우, 김재현, 임선빈, 박영진, 김원목, 임재현, 성기준, 임대희, 고민재, 박노철, 윤준영

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 11 / November 2024

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

CONTENTS

REGULAR

- 817 Bending and Compressive Performance of Strut Tower Braces based on Finite Element Analysis for Improvement of Vehicle Safety and Stability
Jeong Bin Bae and Jung Jin Kim
- 827 Optimized Coverage Path Planning for Efficient Autonomous Operation of a Barn Manure Handling Robot
Goo Jun Ji, Myeong Gyu Lee, and Won Gun Kim
- 841 Excavation Trajectory Planning based on Site Terrain Data
Chulwhan Im, Jangho Bae, Jinwoo Park, Seonwoo Kim, and Daehie Hong
- 849 Study on Repair of SKD 61 Using Directed Energy Deposition with H13 and P21 Powders
Bit-na Yun, Min-seong Ko, Hyo-jeong Kang, and Do-Sik Shim
- 857 A study of Tuned Mass Damper (TMD) Application for Mass Imbalance and Vibration Reduction in Gimbal Systems for High-speed Maneuverable Vehicles
Jun-Soo Kim, Dong-Kyun Lee, Jong-Kuk Lee, Hyeon-Jun Cho, and Ji-in Jung
- 865 Prediction of Machining Conditions from EDMed Surface Using CNN
Ji Hyo Lee, Jae Yeon Kim, Dae Bo Sim, and Bo Hyun Kim
- 875 Customized Current Control of a Linear Motor Motion Stage
Kyung Ho Yang and Hyeong-Joon Ahn
- 881 In-situ Wired and Wireless Material Testing System with Nanometer-level Displacement Control
Kyung Seok Park, Pill Ho Kim, and Chung-Seog Oh
- 889 Study on Miniaturization and Lightweight Method of Electric Thruster Power and Gas Supply Device for Micro Satellite
Jin Young Park
- 897 Prediction of Elastic Modulus in Porous Structures Considering Materials and Design Variables Using Artificial Neural Network
Min Ji Ham and In Yong Moon
- 905 Development of Dual Energy Poteobeul X-ray Using MCNP
Gyung-II Lee
- 913 Study on Hysteretic Characteristics of Piezoelectric Fast Steering Mirror in Frequency Response
Sang Won Jung, Hyo Geon Lee, Jae Woo Jung, Jae Hyun Kim, Seonbin Lim, Youngjin Park, Onemook Kim, Jaehyun Lim, Kijun Seong, Daehee Lee, Minjae Ko, No-Cheol Park, and Jun Young Yoon

차량 안전성 및 안정성 향상을 위한 유한요소해석 기반 스트럿 바의 굽힘 및 압축 성능 분석

Bending and Compressive Performance of Strut Tower Braces based on Finite Element Analysis for Improvement of Vehicle Safety and Stability

배정빈¹, 김정진^{1,#}
Jeong Bin Bae¹ and Jung Jin Kim^{1,#}

¹ 계명대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Keimyung University)
Corresponding Author / E-mail: kji4537@gmail.com, TEL: +82-53-580-5290
ORCID: 0000-0001-6948-6027

KEYWORDS: Strut tower brace (스트럿 바), Bending (굽힘), Compression (압축), Finite element analysis (유한요소해석)

A strut tower brace is one of the components that can improve the driving stability of a vehicle. This component has received steady attention for a long time due to its affordable price and easy installation. However, strut tower braces sold in the market have different structures. Moreover, most of them do not contain sufficient information related to safety or stability. Thus, this study aimed to analyze and compare structural behaviors of strut tower braces having various body shapes under bending and compressive scenarios. For this purpose, this study selected six representative models in the market and calculated structural behaviors (stress and deformation) using finite element analysis. Results revealed the body shape had a decisive effect not only on the durability of the strut tower brace, but also on the safety and stability of the vehicle. Among the six models tested, the model having a body shape with a single-axis form utilizing a wide rectangular cross-sectional showed the best bending and compressive performances. This study also confirmed that bending and compressive performances could be simultaneously improved depending on body shape.

Manuscript received: April 8, 2024 / Revised: August 29, 2024 / Accepted: September 30, 2024

1. 서론

스트럿 바(Strut Tower Brace)는 차량의 서스펜션 시스템 중 하나로, 차량의 안정성(Stability)을 향상시키는 부품이다. 굽힘 강성이 충분히 확보된 스트럿 바는 차체의 강성을 증가시켜 비틀림을 줄이는 역할을 한다. 이는 주행 시 발생하는 강한 좌우 흔들림이나 선회 시 발생하는 과도한 쏠림을 방지한다[1,2]. 이에 많은 제조사들은 주행 성능과 승차감이 중요시되는 고성능 및 고급 차량에 스트럿 바를 장착하여 판매하고 있다. 스트럿 바는 완성차 시장뿐만 아니라 애프터 마켓 및 튜닝 시장에서도 저렴한 가격과 쉬운 구조 변경(승인 미 필요)으로 인해 오랜 기간

많은 관심을 받아왔다. 최근 스트럿 바는 내연기관 대비 무거운 전기차의[3] 차체 강성을 높여 비틀림을 줄이기 위한 대안 중 하나로 많은 관심을 받고 있다.

스트럿 바에 대한 관심이 증가함에 따라, 현재 시중에는 다양한 제품들이 판매되고 있다. 다만, 판매되고 있는 대부분의 제품들은 강성 및 주행 성능 향상에 관한 정량적인 정보 및 근거 없이 판매되고 있는 상황이다. 스트럿 바에 대한 정량적인 정보는 차량의 안정성에 직접적인 연관 관계가 있어 매우 중요하다 [4,5]. 품질에 대한 명확한 규정과 법규 제정을 위해서는 스트럿 바에 대한 강도, 강성, 내구성, 내식성 등에 대한 정량적 평가가 제반[6]되어야 하나, 아직까지 해당 부분에 대한 연구는 많이

미비한 상황이다.

최근 몇몇 연구자에 의해 스트럿 바 관련 연구는 주로 소재 및 구조 변경에 중점을 두고 진행되고 있다. 소재 변경의 경우, Razak은 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)를 활용하여 스트럿 바의 강성을 유지하되 무게 절감 성능을 분석하였다[7]. 다만, 소재 변경은 장기간의 개발 기간 및 제작 단가의 상승으로 인해 단기적으로 적용 확대가 쉽지 않다는 한계점을 지닌다. 구조 변경은 적용 주기가 짧고 원가 상승의 최소화와 더불어 응력 집중을 획기적으로 줄이는 등 다양한 이점을 지니고 있다[8,9]. 이에 개발 기간 및 제작 단가의 확보를 위해 스트럿 바의 개선 설계는 구조 변경을 통해 이루어졌다. 한문식은 스트럿 바의 구조 설계를 통해 피로하중에 따른 수명과 내구성을 분석하였다[10]. 또한, Mironenko는 스트럿 바의 정중앙부 구조를 ‘V’ 자형 요소로 변경하여 충격에 따른 응력 변화를 분석하였다[11].

비록 이전 스트럿 바의 개선 설계 연구를 통해 차량의 안정성을 향상시켰지만, 현재 스트럿 바 장착에 따른 차량의 안전성(Safety) 문제가 제기되고 있는 상황이다. 압축 강성이 높은 스트럿 바는 차체 측면 충돌에 유연하게 반응하지 못하게 하여 충격을 완화하지 못한 상태로 힘을 반대편 엔진 마운트로 전달되게 한다. 이로 인해 직접적으로 힘을 받은 부위뿐만 아니라 반대쪽 펜더(Fender) 또한 동시에 파손될 수 있다. 이는 차량의 안전성과 직결되므로 스트럿 바는 과도한 압축에 유연하게 반응할 수 있도록 설계되어야 한다. 이에 따라, 스트럿 바는 굽힘 강성을 고려하여 차량의 안정성을 높일 뿐만 아니라 압축 강성을 고려하여 차량의 안전성 또한 높일 수 있는 설계가 필수적이다.

본 연구는 다양한 몸체 형상에 따른 스트럿 바의 굽힘과 압축을 고려한 구조적 거동을 상대적으로 분석하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 본 연구는 시중에서 판매 및 사용되고 있는 6가지 서로 다른 형상의 스트럿 바를 연구 모델로 선정하였고 이를 3차원 CAD 모델로 구현하였다. 그리고 유한요소해석 기반 스트럿 바의 굽힘과 압축 발생 시나리오를 구현하여 각 형상별 구조적 거동을 상대적으로 분석하였다.

2. 본론

2.1 연구 모델 선정

본 연구는 시중에 판매되는 6가지 서로 다른 형상의 스트럿 바를 연구 모델로 선정하였다. Fig. 1은 선정한 모델들의 3차원 CAD 모델 및 주요 치수를 나타낸다. 본 연구에서 선정한 모델들은 국내 및 해외 시장에서 활발히 판매 및 활용되고 있으며, 모두 일반 차량(사용자)을 타깃으로 하는 브랜드들의 대표 제품들이다. 이 모델들의 공통점은 굽힘 강성을 높이기 위하여 모두 위로 휘어지는 구조로 형성 되어있으며, 체결 부위 상단부에 결합해 있다. 또한, 아반떼 AD 차량에 장착가능한 모델로 체결 부위를 포함하여 가로길이는 1,352.3 mm이고 높이는 70.0 mm이다. 다만, 각 모델은 구성하는 축의 단면 형상과 축의 개수가 다르고,

Table 1 Initial volume and ratio for each model

Model	Initial volume [mm ³]	Volume ratio	Thickness [mm]
A	175,400	1.000	0.818
B	163,860	0.934	0.876
C	193,450	1.102	0.742
D	150,440	0.857	0.954
E	93,751	0.534	1.532
F	143,650	0.819	1.000

보장 정도 또한 차이가 있다. 이에 따라 해당 사항을 스트럿 바의 주요 구조로 판단하고, 이를 기준으로 각 모델을 평가했다.

첫 번째 모델(Model A)은 중공 원형 단면 형상의 축으로 형성되어 있으며, 몸체 중심에 트러스 형상의 판이 보강되어 있고 이중 축으로 구성되어 있는 구조이다. 두 번째 모델(Model B)은 중공 사각 단면 형상의 축으로 형성되어 있으며, 몸체 중심에 추가적인 보강 구조가 없고 이중 축으로 구성되어 있는 구조이다. 세 번째 모델(Model C)은 중공 원형 단면 형상의 축으로 형성되어 있으며, 몸체 중심에 추가적인 보강 구조가 없고 이중 축으로 구성되어 있는 구조이다. 네 번째 모델(Model D)은 중공 원형 단면 형상의 축으로 형성되어 있으며, 몸체 중심에 원형으로 타공된 플레이트가 길게 보강되어 있고 이중 축으로 구성되어 있는 구조이다. 다섯 번째 모델(Model E)은 하이브리드 구조로, 중공 원형 단면 형상의 이중 축으로 형성되어 있고 몸체 중심에 사각 단면 형상의 빔 형태로 변경되는 구조이다. 여섯 번째 모델(Model F)은 중공 사각형을 기반으로 옆면에 필렛이 된 단면 형상의 축으로 형성되어 있으며, 몸체 중심은 타공된 단일 축으로 구성되어 있는 구조이다.

본 연구는 스트럿 바 몸체의 형상에 따른 구조적 거동을 효과적으로 분석하기 위해 6가지 모델의 체결 부위를 동일하게 생성하였으며, 몸체의 부피는 143,650 mm³으로 동일하게 유지하였다. Table 1은 각 모델별 초기 부피 및 비율을 동일하게 생성하였을 때의 몸체 두께를 나타낸다.

2.2 유한요소해석 기반 구조적 거동 분석

본 연구는 유한요소해석 상용소프트웨어인 ANSYS 2022 R1의 Workbench를 사용하여 6가지 모델에 대한 구조적 거동을 분석하였다. 모든 모델은 세장비(Slenderness) 0.3 이하의 구조로 이루어져 있다. 본 연구는 슬리드 요소 대비 계산 효율성을 높이기 위해 4절점 2차원 쉘 요소를 활용하여 모델을 생성하였다[12]. 체결 부위는 1 mm 크기의 Quadrilateral Dominant 쉘 요소로 구성하였으며 두께는 1 mm로 설정하였다. 해당 두께는 내부 방향으로 커지도록 설정하였다. 몸체 부분은 1 mm 크기의 Quadrilateral Dominant 쉘 요소로 구성하였다. 두께는 각 모델별 설정한 두께를 부여하였으며, 해당 두께 또한 내부 방향으로 커지도록 설정하였다. 또한, 모델의 정확도를 보장하기 위해

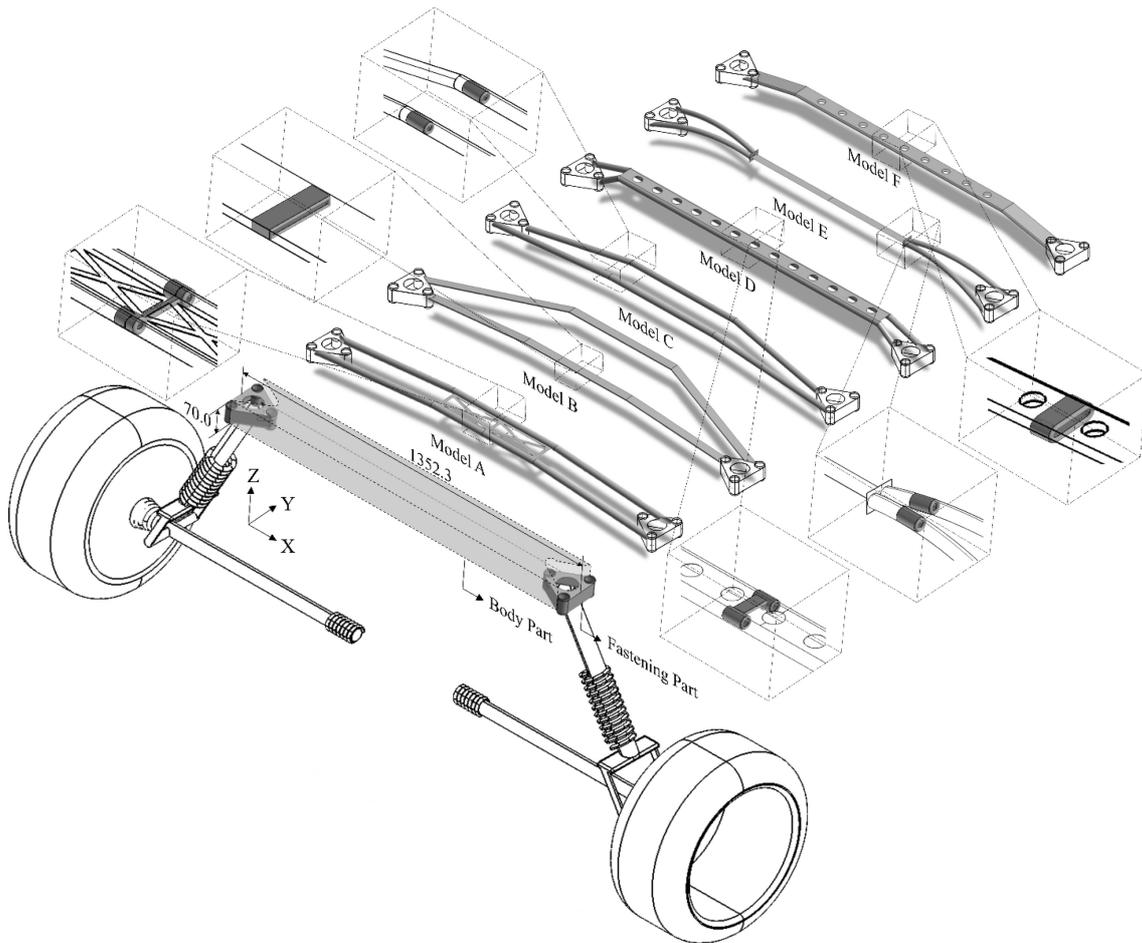


Fig. 1 Detailed specifications of the strut tower brace

Table 2 The total number of nodes and elements for each FE model, and the average Jacobian value and aspect ratio

Model	Node	Element	Jacobian value	Aspect ratio
A	742,027	246,616	0.981	1.063
B	714,326	237,900	0.980	1.033
C	649,837	216,345	0.967	1.122
D	806,982	269,050	0.975	1.056
E	513,093	170,402	0.962	1.085
F	657,908	218,644	0.970	1.049
Average	680,696	226,493	0.972	1.068

자코비안(Jacobian) 값과 가로세로비(Aspect Ratio)를 측정하여 요소의 품질(Mesh Quality)을 평가하였다[13,14]. Table 2 는 각 모델에 대한 유한요소모델의 총 절점수(평균 68 만 개) 및 요소수(평균 22 만 개)와 자코비안 값(평균 0.972) 및 가로세로비(평균 1.068)를 나타낸다.

각 요소에는 강철, 알루미늄, 구리, 마그네슘의 합금인 두랄루민의 물성치(Young’s Modulus: 76.00 GPa, Poisson’s Ratio:

0.33, Yield Strength: 300.00 MPa)를 부여하였다.

본 연구는 차량의 비틀림 상황을 스트럿 바의 굽힘 시나리오로, 차량의 측면 충돌 상황을 스트럿 바의 압축 발생 시나리오로 변환하여 각 형상별 구조적 거동을 상대적으로 분석하였다(Fig. 2). 해당 분석은 해석의 수렴성을 높이고 효율적인 계산 및 비용을 사용하기 위해 동적 상황을 정적 해석으로 변환하여 수행하였다[15].

스트럿 바의 굽힘은 차량의 비틀림 시 발생하며, 해당 비틀림으로 인해 스트럿 바는 반시계 방향으로 휨모멘트가 발생한다. 굽힘 발생 시나리오에서 스트럿 바의 구조적 거동은 스트럿 바의 높이(Z 축) 방향의 처짐(변형)량을 통해 상대 분석하였다. 이에 경계 조건으로는 한쪽 체결 부위를 완전히 고정(Fixed)하고 반대쪽 체결 부위에 Y축에 음의 방향으로 10,000 N·mm 크기의 모멘트를 부여했다. 10,000 N·mm의 모멘트는 각 스트럿 바의 굽힘 성능을 명확하게 구분할 수 있는 크기로, 모든 스트럿 바에 동일하게 부여되었다.

스트럿 바의 압축은 차량의 측면 충돌 시 발생하며, 해당 충돌로 인해 차량의 엔진 룸에서는 충돌 방향으로 침입이 발생된다. 이에 측면 충돌 상황은 압축 하중으로 변환하여 해석을 수행하였다. 압축 발생 시나리오에서 스트럿 바의 구조적 거동은

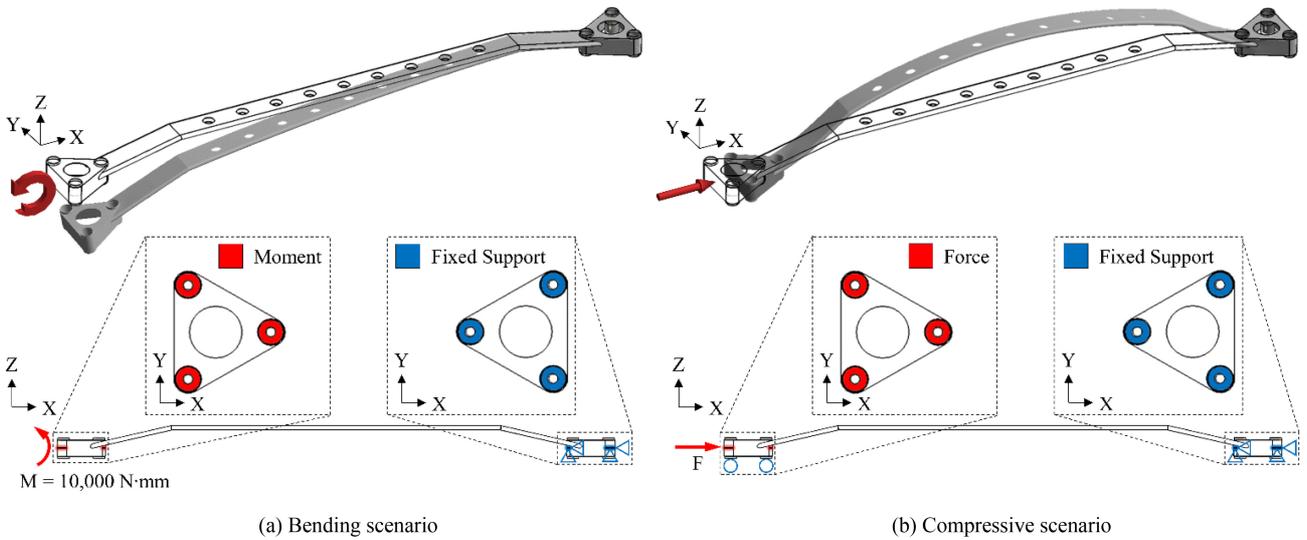


Fig. 2 Loading and boundary conditions for each scenario

변형률 에너지를 통해 스트럿 바의 유연성을 분석하였고, 항복 발생 하중을 통해 파손성을 분석하였다. 첫 번째로, 총 변형률 에너지는 해당 구조물이 에너지를 얼마나 흡수할 수 있는지를 나타내는 지표로써 더 큰 변형률 에너지는 해당 구조물이 더 많은 에너지를 흡수하며 하중에 더 유연한 것을 나타낸다. 이에 경계 조건으로는 한쪽 체결 부위를 완전히 고정(Fixed)하고 반대쪽 체결 부위에 스트럿 바의 가로(X 축) 방향으로 1,000 N 크기의 하중을 부여했다. 굽힘의 경우와 동일하게, 압축 하중의 1,000 N은 각 스트럿 바의 압축 성능들을 명확하게 구분가능한 크기로 모든 스트럿 바에 동일하게 부여되었다. 또한, 압축 방향의 변위는 제약하지 않으며 압축 방향의 수직 방향으로의 변위는 고정하기 위해 하중이 부여되는 체결 부위에 Y와 Z 축 방향으로의 변위는 구속하였다. 두 번째로, 더 낮은 항복 발생 하중은 해당 구조물이 더 빨리 소성 변형으로 전환되며 이는 파손으로 이어져 힘을 반대편으로 전달하지 않는 것을 나타낸다. 이에 경계 조건으로는 한 쪽 체결 부위를 완전히 고정(Fixed)하고 반대쪽 체결 부위에 스트럿 바의 가로(X 축) 방향으로 항복 응력(300.0 MPa) 발생시키는 하중을 부여했다. 또한, 유연성을 분석할 때와 동일하게 하중이 부여되는 체결 부위에 Y와 Z 축 방향으로 변위를 구속하였다.

해석은 개인용 PC (Intel i9-12900K, GPU: GEFORCE RTX 3080, RAM: 64GB)를 이용하여 수행하였으며, 평균 21.8 GB의 메모리를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 스트럿 바의 몸체 형상에 따른 굽힘과 압축에 대한 구조적 거동을 예측하였다. 이에 따라 먼저, 사용한 요소 종류와 크기에 대한 검증 및 이전 연구[7]와의 비교를 통해 연구 방법을 검증하여 결과의 타당성을 검토하였다. 이후, 연구의 목적인 스트럿

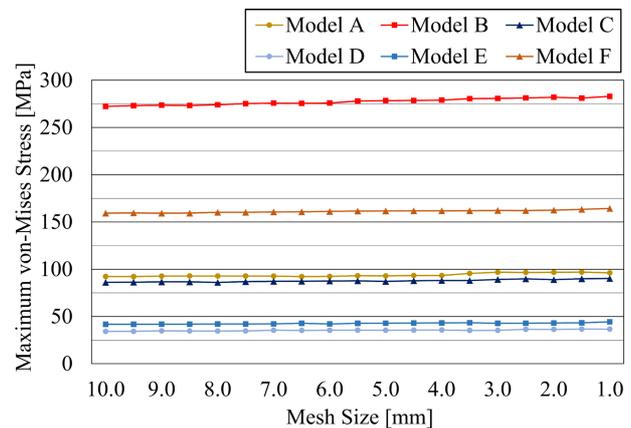


Fig. 3 Maximum von-Mises stress according to element size for each model

바의 구조적 거동을 효과적으로 분석하기 위해 굽힘 시나리오에서는 높이(Z 축) 방향 처짐량을, 압축 시나리오에서는 몸체 부위의 총 변형률 에너지 및 항복이 발생하는 최대 하중을 분석하였다.

먼저 사용한 요소에 대한 검증은 요소의 크기에 따른 수렴성 평가를 통해 수행하였다. Fig. 3는 요소의 크기를 10에서 1 mm 까지 0.5 mm씩 줄여가며 최대 응력 값을 나타낸다. 또한 요소의 크기가 작아질수록 최대 응력이 증가하는 경향을 보였다. 다만, 요소 크기에 따른 최대 응력의 차이가 3.0% 미만으로 매우 적었으며, 응력의 크기가 수렴하는 것을 확인하였다.

Fig. 4는 굽힘 발생 시 생성한 모델들의 응력 분포를 나타낸다. Model D를 제외한 모든 모델들의 최대 응력은 몸체와 체결 부위가 이어지는 연결부에서 발생하였으며, 이는 이전 연구[7]의 결과와 일치한다.

추가적으로, Model D는 몸체와 체결 부위가 이어지는 연결부에서도 상대적으로 높은 응력(18.0 MPa)이 발생하였지만 최대 응력(36.7 MPa)은 몸체의 보강판과 증공축이 만나는 위치에서 발생했다. 또한, 다른 모델들은 체결 부위와의 연결부에서

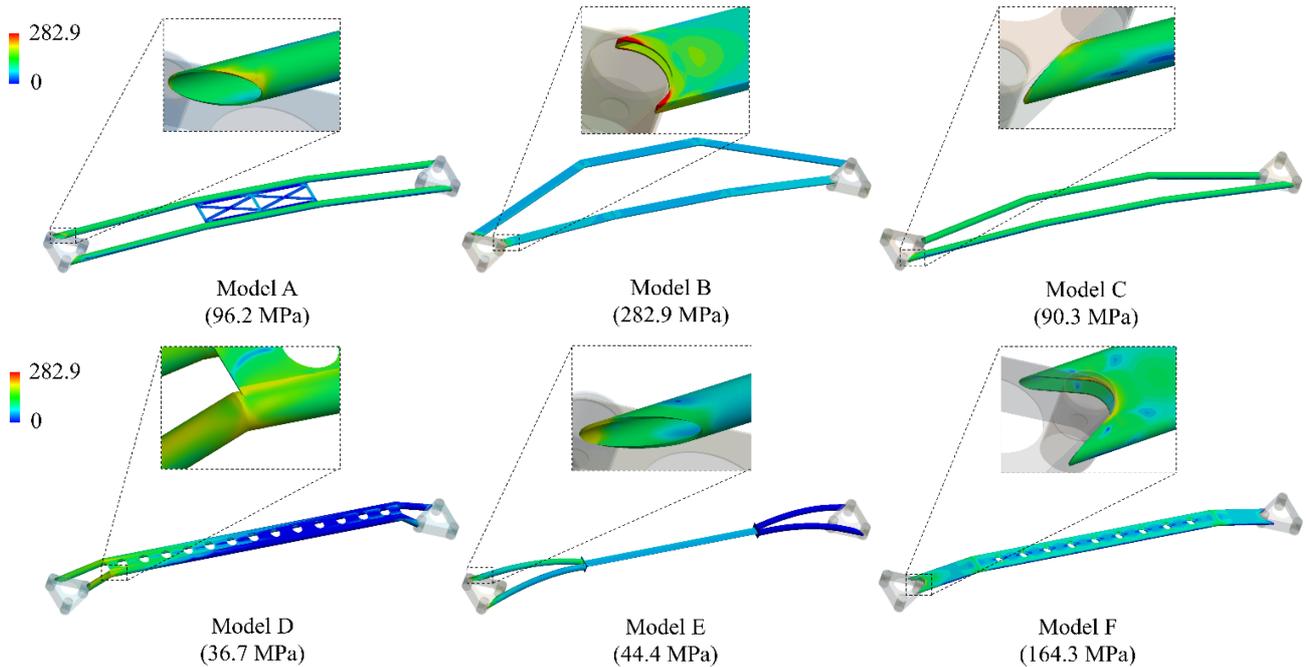


Fig. 4 von-Mises stress distribution of created models under bending scenario

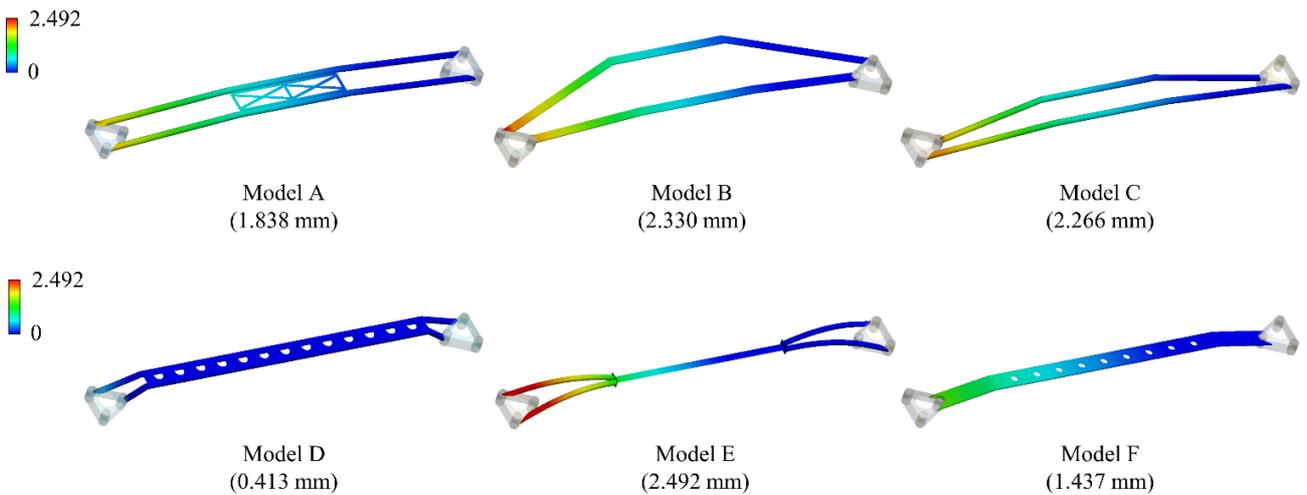


Fig. 5 Z-direction deformation of the created models under bending scenario

응력이 집중되어 발생한 것에 비해, Model D의 최대 응력은 다른 모델들에 비해 낮은 수치를 보였으며 응력 분포 역시 고르게 분산된 결과를 보였다. 이는 설계 시 보강재를 추가하지 않고도 구조 설계를 통해 최대 응력을 낮출 수 있고 응력 집중 현상을 완화할 수 있음을 의미한다.

3.1 스트럿 바의 굽힘 발생 시 구조적 거동 분석

본 연구는 굽힘 발생 시 몸체 형상에 따른 구조적 거동을 분석하였다. Fig. 5는 생성한 6개 모델들의 높이(Z축) 방향 처짐(변형)량을 나타낸다. 생성한 모델들은 각각 상이한 처짐량을 나타냈다. 이는 스트럿 바의 몸체 형상에 따라 스트럿 바의 굽힘 강성이 매우 상이하다는 것을 의미한다.

스트럿 바의 굽힘 발생 시 구조적 거동은 처짐량에 따라 정량적으로 분석했다. 먼저, Model C의 처짐량(2.266 mm)은 Model B의 처짐량(2.330 mm)에 비해 더 작은 결과를 나타냈다(Fig. 5). 이는 축을 구성하는 주요 단면의 형상 차이로 인해 발생했다. Model B와 C는 몸체 중심부에 보강 구조가 없는 이중축을 공통적인 특징으로 가지고 있으나, 주요 단면의 형상이 다르다. Model B의 주요 단면은 중공 원형 단면이고, Model C의 주요 단면은 중공 사각 단면으로 구성되어 있다. 이로 인해 주요 단면의 형상에 따라 Z축 기준의 단면 계수(Section Modulus)의 차이가 발생했다(Table 3). Model C의 단면계수는 286.0 mm³이며, 이는 Model B의 단면계수인 97.6 mm³보다 큰 수치를 나타낸다. 따라서 단면계수가 큰 Model C가 굽힘 발생 시 더 우수한 결과를

Table 3 Mass and section modulus of each model

Model	Mass [g]	Section Modulus [mm ³]
A	598.8	314.5
B	598.8	97.6
C	598.8	286.0
D	598.8	363.9
E	598.8	456.2
F	598.8	497.9

나타냈다. 이러한 결과는 스트럿 바를 구성하는 축의 주요 단면 형상이 단면계수의 차이를 발생시키며, 이러한 차이는 굽힘 강성에 중요한 영향을 준다는 것을 의미한다.

두 번째로, Model A의 처짐량(1.838 mm)과 Model D의 처짐량(0.413 mm)은 Model C의 처짐량(2.266 mm)에 비해 더 작은 결과를 나타냈다(Fig. 5). 이는 몸체 중심에 보강 구조 유무의 차이로 인해 발생했다. 해당 모델들은 축을 구성하고 있는 주요 단면의 형상과 이중 축을 공통적인 특징으로 가지고 있으나, 보강 구조에서 차이가 발생했다. Model A와 Model D는 몸체의 중심에 보강 구조가 있는 반면, Model C는 보강 구조가 없는 특징을 가지고 있다. 특히, Model D는 Model A보다 더 작은 처짐량을 보여 더 우수한 성능을 나타냈다. Model D는 보강 구조의 길이가 Model A에 비해 더 길게 형성되어 있어 굽힘 성능에 더 유리한 것을 알 수 있다. 또한, 몸체의 중심에 넓게 보강된 구조(A, D, F)가 중심이 보강되지 않은 모델(B, C, E)보다 낮은 처짐량을 나타냈다. 이러한 결과는 몸체의 중심이 보강된 구조가 차량의 안정성을 개선하는 데 더 효과적이라는 것을 의미한다.

추가적으로 생성한 모델 중 Model E가 가장 큰 처짐량인 2.492 mm를 나타냈다(Fig. 5). Model E는 원형 중공축과 빔 구조를 포함한 하이브리드 구조로, 원형 단면 형상의 단면계수는 456.2 mm³으로 상대적으로 높지만, 사각형 단면 형상을 기반으로 한 빔 구조의 단면계수는 9.7 mm³으로 생성한 모델 중 가장 낮은 수치를 나타낸다. 반면, 처짐량이 가장 작은 모델은 Model D로 0.413 mm의 처짐량을 발생하였으며 이는 가장 큰 처짐량의 16.6%에 해당한다. Model D는 원형 중공축을 기반으로 축 상단에 긴 타공판이 보강된 구조이다. 보강 구조가 축 상단에 추가되는 것은 도심을 기준으로 보강 구조가 최외곽에 추가되는 것이기에 단면계수 측면에서 우위를 확보할 수 있다. 이러한 결과를 통해, Model D는 굽힘 강성이 높아 차량의 비틀림에 강직하며, 이로 인해 해당 스트럿 바가 장착된 차량의 안정성(Stability)은 가장 우수할 것으로 예상된다. 또한, 앞서 언급한 응력 분포를 같이 고려하면 Model D는 차량의 선회 시 더 큰 하중을 견딜 수 있을 뿐만 아니라 내구성 또한 우수한 것을 의미한다. 이러한 결과는 스트럿 바의 주요 축이 굽힘 성능을 확보하는 데 매우 중요하지만, 몸체의 구조 및 보강 구조의 위치에 따라 굽힘 성능을 효과적으로 확보할 수 있음을 의미한다.

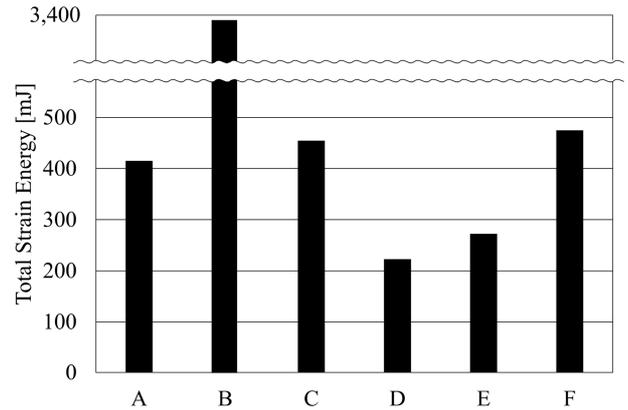


Fig. 6 Total strain energy of the created model

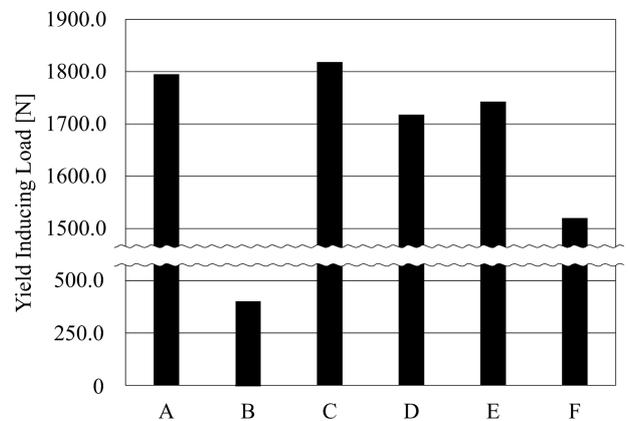


Fig. 7 Yield inducing load of the created model

3.2 스트럿 바의 압축 발생 시 구조적 거동 분석

본 연구는 압축 발생 시 몸체 형상에 따른 구조적 거동을 분석하였다. Fig. 6은 생성한 6개 모델들에 대한 몸체 부분의 총 변형률 에너지를 나타내고, Fig. 7은 생성한 모델들의 항복 발생(300.0 MPa) 시 하중을 나타낸다. 생성한 모델들은 각각 상이한 항복 발생 하중을 나타냈다. 이는 스트럿 바의 몸체 형상에 따라 스트럿 바의 압축 강성이 매우 상이하다는 것을 의미한다.

생성한 모델 중 Model B가 가장 큰 변형률 에너지인 3,378.20 mJ를 나타냈다. 반면, 변형률 에너지가 가장 작은 모델은 Model D로 222.89 mJ를 보였으며 이는 가장 큰 모델에 비해 1,515.6% 낮은 수치이다. 동일한 재료 내 변형률 에너지가 크다는 것은 형성되어 있는 구조가 충돌 하중에 대해 힘을 더 많이 흡수하는 것을 의미한다. 이러한 구조는 특정한 힘에 대해 에너지를 더 많이 흡수하므로 변형률 에너지가 클수록 이는 더 유연하게 반응하는 것을 의미한다. 또한, Model B는 측면 충격 발생 시 몸체 중심 부분이 넓어지며 힘을 흡수하는 데 유리한 것으로 나타났다.

생성한 모델 중 Model B가 가장 작은 항복 발생 하중인 418.6 N을 나타냈다. 반면, 항복 발생 하중이 가장 큰 모델은 Model C로 1,818.3 N을 보였으며 이는 가장 작은 모델에 비해

434.4% 높은 수치이다. 동일한 재료 내 항복 발생 하중이 작다는 것은 형성되어 있는 구조가 충돌 하중에 대해 더 빨리 소성 변형으로 전환되는 것을 의미한다. 이에 해당 구조는 특정한 힘에 대해 더 빨리 변형되고 파손되어 충격을 반대편으로 전달하지 않는 것을 의미한다.

앞선 결과들을 종합해보면 Model B와 F가 압축 발생 시 우수한 결과를 나타냈다. 두 모델은 공통적으로 축의 단면 형상이 가로(Y축) 방향으로 길이가 긴 사각형 단면을 기반으로 설계되었다. 특히, Model B는 중심에 보강이 없음과 더불어 가장 낮은 단면 계수(97.6 mm³)를 지니고 있어 이러한 힘 현상을 가장 유연하게 반응하는 것으로 나타낸다(Table 3).

반면, Model F는 가장 큰 단면 계수(497.9 mm³)를 지니고 있지만, 해당 시나리오에서 우수한 결과를 나타냈다. 이는 스트럿 바를 구성하고 있는 축의 개수에 기인한다. Model F는 다른 모델들과 다르게 더 넓은 면적을 가진 단일 축으로 설계되었다. 이는 넓은 단면적을 가진 단일 축이 단면계수가 크에도 불구하고, 단면계수가 작은 이중 축보다 압축 하중을 더 효과적으로 흡수하고 더 빨리 소성 변형으로 전환될 수 있음을 의미한다. 따라서, 압축 하중을 고려한 스트럿 바의 구조는 단면 형상의 단면계수에 대한 고려뿐만 아니라 단면의 넓이가 비교적 큰 단일 축을 통해 압축 성능을 효과적으로 확보할 수 있음을 의미한다. 이러한 결과를 통해, 해당 구조는 차량의 측면 충격에 유연하게 반응하는 것을 나타내며 이는 차량의 안전성(Safety)이 가장 우수할 것으로 예상된다. 또한, 이는 차량의 측면 충돌 시 작은 하중에도 유연하게 반응할 뿐만 아니라 오히려 파손되며 반대편 펜더에 충격을 전달하지 않기에 차량의 안전성 또한 우수할 것으로 예상된다.

3.3 스트럿 바의 굽힘과 압축을 고려한 구조적 거동 분석

본 연구는 굽힘과 압축 발생 시 몸체 형상에 따른 상대적인 구조적 거동을 동시에 고려하였다. 일체형 구조(Model F)는 굽힘과 압축 시나리오에서 모두 우수한 결과를 나타냈다. 각각의 시나리오에서 우수한 성능을 내는 모델과 그렇지 않은 모델의 가장 큰 차이점은 축의 개수이다. 특히, Model F는 단일 축을 기반으로 이중 축보다 넓은 단면 형상을 지니고 있다. 이로 인해, 사각형 단면 형상의 작은 단면계수를 보완하여 굽힘 성능을 높일 수 있다. 동시에 넓은 단면 형상의 단일 축은 많은 힘을 흡수하여 압축 성능을 높일 수 있다. 따라서, 가로로 넓은 사각 단면 형상을 활용하는 단일 축의 형태가 차량의 안정성 및 안전성 개선에 가장 효과적임을 의미한다.

추가적으로 굽힘과 압축 발생 시에는 결과의 우수한 순서가 다르게 나타났다. Model B는 굽힘에서 2번째로 취약한 결과를 나타냈지만 압축에서 가장 우수한 결과를 나타냈다. 이를 통해 굽힘과 압축 발생 시 스트럿 바의 성능은 상충관계(Trade-off)가 아니라고 볼 수 있다. 따라서, 이는 장착된 차량의 안정성과 안전성을 동시에 개선할 수 있는 스트럿 바의 설계가 가능하다는 것을 의미한다.

본 연구는 다음과 같은 한계점을 가진다. 첫째, 본 연구는 정적 해석을 기반으로 스트럿 바의 성능 비교를 하였다. 동적 상황에서 스트럿 바의 굽힘 및 압축 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 동적 해석이 필수적이다. 다만, 본 연구에서는 동일한 크기와 패턴의 하중을 부여하여 스트럿 바들의 성능을 상대 비교하고자 하였다. 둘째, 스트럿 바에 대표적으로 발생하는 굽힘과 압축 하중에 대해서만 구조적 거동을 상대적으로 평가하였다. 하지만, 스트럿 바에는 피로 등 다양한 하중이 발생할 수 있기에 여러 하중 조건 아래 분석이 요구된다. 셋째, 스트럿 바의 전체적인 구조를 고려하지 않고, 체결 부위는 모두 동일하게 설정하였다. 넷째, 차량에 스트럿 바를 장착하여 주행 안정성에 대한 분석은 수행하지 못하였다. 다만, 이전 연구[7]에서 스트럿 바 장착에 따라 서스펜션 시스템의 움직임을 감소시켜 차체의 전체 비틀림을 감소시킬 수 있다는 연구 결과를 보여주었다. 이 차체의 비틀림은 차량의 주행 안정성과 밀접한 상관관계가 있다[1,2]. 따라서, 본 연구에서 굽힘 강성이 높은 스트럿 바는 차량의 주행 안정성을 높일 수 있을 것이라 예상된다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 차량의 안정성과 안전성을 동시에 개선할 수 있는 스트럿 바의 설계 가능성을 명확히 보였다.

4. 결론

본 연구는 다양한 몸체 형상에 따른 스트럿 바의 굽힘과 압축에 대한 구조적 거동을 상대적으로 분석했다. 이를 위해 시중에서 판매 및 사용되고 있는 6가지 몸체 형상의 스트럿 바를 모델링 하였다. 이어 스트럿 바의 굽힘 및 압축 발생 시 구조적 거동을 분석하였다. 그 결과, 굽힘 발생 시 스트럿 바의 최대 응력은 일반적으로 몸체와 체결 부위 사이의 연결부에 집중되었다. 이에 구조 설계를 통해 집중된 응력을 고르게 분산시켰다. 또한, 스트럿 바의 몸체 형상에 따라 차량의 안정성(Stability)과 안전성(Safety)이 변화하는 것을 확인했다. 특히, 넓은 단면 형상을 활용하는 단일 축 형태의 구조가 가장 우수한 굽힘 및 압축 성능을 보였다. 더불어 굽힘과 압축을 동시에 고려한 스트럿 바의 성능은 상충관계가 아니므로, 차량의 안정성 및 안전성을 모두 고려한 스트럿 바의 개선 설계 가능성을 확인했다. 이로써 본 연구는 스트럿 바의 구조적 거동에 대한 이해를 높이고 차량의 안정성과 안전성을 향상시키는 데 기여할 수 있는 중요한 정보를 제공했다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평화원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0021513, 2024년 산업혁신기반구축사업).

REFERENCES

- Mohan, R., Hariram, V., Subramanian, M., Padmanabhan, S., (2017), Improvements in vehicle stiffness by adding internal reinforcements, *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 9(2), 72-76.
- Chen, W., Zuo, W., (2014), Component sensitivity analysis of conceptual vehicle body for lightweight design under static and dynamic stiffness demands, *International Journal of Vehicle Design*, 66(2), 107.
- Beddows, D. C. S., Harrison, R. M., (2021), PM₁₀ and PM_{2.5} emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles, *Atmospheric Environment*, 244, 117886.
- Jing, L., Wu, L., Li, X., Zhang, Y., (2017), Study on kinematic and compliance test of suspension, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 231(1), 012186.
- Lukoševičius, V., Makaras, R., Rutka, A., Keršys, R., Dargužis, A., Skvireckas, R., (2021), Investigation of vehicle stability with consideration of suspension performance, *Applied Sciences*, 11(20), 9778.
- Park, Y., Park, H. S., (1986), A study on improving the reliability of a finite elements model and stiffness damage detection by dynamic characteristics measurements, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 10(1), 157-163.
- Ab Razak, M. S., Othman, M. N., Sulaiman, S. N., Ramli, R., Sanada, Y., (2021), Composite optimization of automotive carbon fiber strut bar using hyperworks optistruct, *Journal of Physics: Conference Series*, 1793(1), 012072.
- Bendsoe, M. P., Guedes, J. M., Haber, R. B., Pedersen, P., Taylor, J. E., (1994), An Analytical model to predict optimal material properties in the context of optimal structural design, *Journal of Applied Mechanics*, 61(4), 930-937.
- Gardner, L., Ashraf, M., (2006), Structural design for non-linear metallic materials, *Engineering Structures*, 28(6), 926-934.
- Han, M., Cho, J., (2016), A study on fatigue durability through the structural analysis of strut bar, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 24(5), 504-511.
- Mironenko, R. Y., Balaev, E. Y., Blednova, Z. M., (2018), Engineering design of safe automobile front strut tower brace with predetermined destruction, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 327(3), 032039.
- Valeš, J., Stan, T.-C., (2017), FEM modelling of lateral-torsional buckling using shell and solid elements, *Procedia Engineering*, 190, 464-471.
- Bucki, M., Lobos, C., Payan, Y., Hitschfeld, N., (2011), Jacobian-based repair method for finite element meshes after registration, *Engineering with Computers*, 27(3), 285-297.
- Nemade, A., Shikalgar, A., (2020), The mesh quality significance in finite element analysis, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 17(2), 44-48.
- Kim, H.-G., Kim, E., Cho, M., (2013), Transformation of dynamic loads into equivalent static load based on the stress constraint conditions, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 26(2), 165-171.

APPENDIX

A1. 선정된 스트럿 바에 대한 도면 및 주요 치수

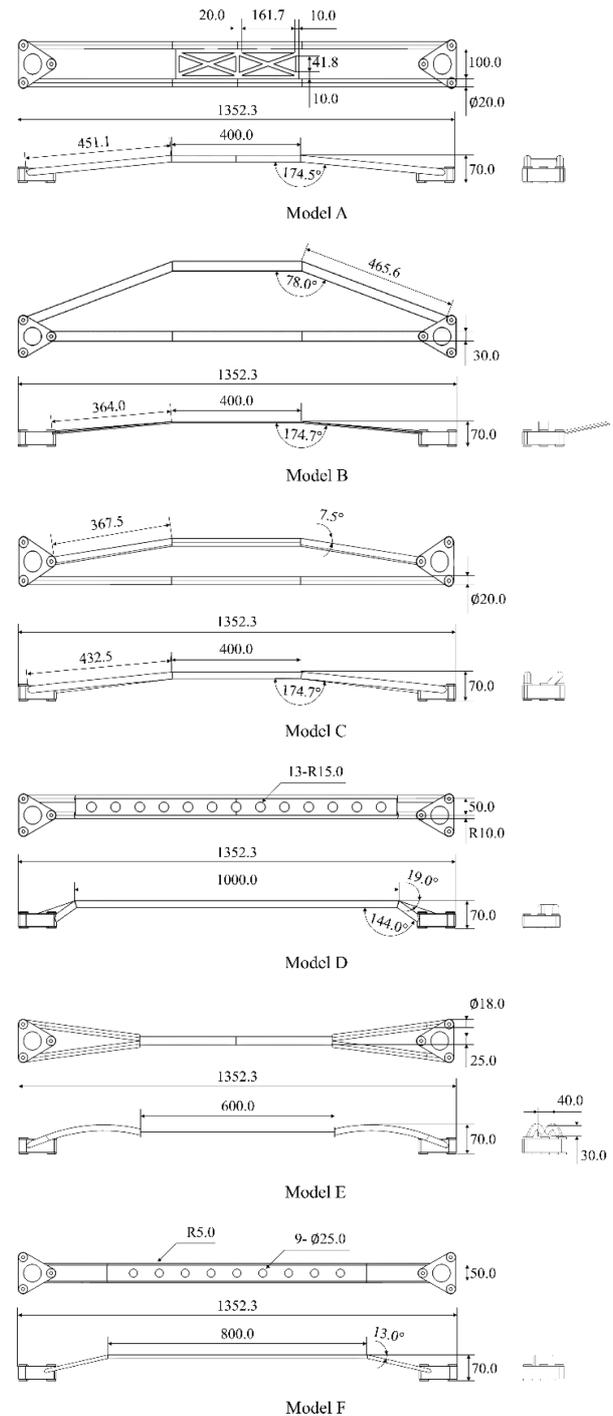


Fig. A1 Drawings with their major dimension for the 3D CAD models of the selected strut tower braces



Jeong Bin Bae

BS. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Keimyung University. His research interest is design optimization for vehicle safety.

E-mail: willy600301@gmail.com



Jung Jin Kim

Assistance Professor in the Department of Mechanical Engineering, Keimyung University. His research interest is mechanical engineering based on optimization and artificial neural network.

E-mail: kjj4537@gmail.com

축사 분뇨 처리 로봇의 효율적인 자율 작업을 위한 커버리지 최적 경로 계획

Optimized Coverage Path Planning for Efficient Autonomous Operation of a Barn Manure Handling Robot

지준구^{1,2}, 이명규², 김원균^{2,#}

Goo Jun Ji^{1,2}, Myeong Gyu Lee², and Won Gun Kim^{2,#}

¹ 한양대학교 대학원 전기공학과 (Electrical Engineering, Graduate School, Hanyang University)

² 한국생산기술연구원 (Korea Institute of Industrial Technology, KITECH)

Corresponding Author / E-mail: wgk@kitech.re.kr, TEL: +82-063-920-1296

ORCID: 0000-0003-2607-2128

KEYWORDS: Autonomous robot (자율주행 로봇), SLAM (동시적 위치추정 및 지도작성), Distance segmentation (거리 분할), Morphological segmentation (형태학적 분할), Voronoi segmentation (보로노이 분할), Coverage path planning (커버리지 경로 계획)

In the field of robotics and automation, path planning holds significant potential for optimizing field operations. These operations must cover the work area comprehensively and efficiently with minimal movement. To achieve these goals, coverage path planning (CPP) utilizing the Boustrophedon method is essential. However, in an experimental environment, CPP often results in missed work areas due to cumulative sensor errors and structural inconsistencies. This paper aimed to improve CPP by employing the Douglas-Peucker algorithm to simplify the work path and minimizing missed areas. Additionally, Edge Zone Path method was used to generate edge paths, enhancing safety of the trajectory. For experimental purposes, data were acquired from an actual barn. The work area was divided using three segmentation algorithms. Among these, the Voronoi Segmentation, which demonstrated superior performance, was used to extract the data. Experimental results indicated that the proposed optimized CPP improved path safety by maintaining a safe distance from obstacles during frequent turns. Additionally, the Coverage Ratio increased the coverage area of the autonomous robot by an average of 17% compared to the original CPP. These findings suggest that the proposed method can generate more efficient and safe work paths.

Manuscript received: May 31, 2024 / Revised: September 5, 2024 / Accepted: September 6, 2024

NOMENCLATURE

ε = Epsilon
DP = Douglas Peucker
CPP = Coverage Path Planning
W = Robot Width
L = Robot Length
 τ = Turning Radius
NoS = Number of Segments

SA = Segment Area
SP = Segment Perimeter
NoE = Number of Edges
Nm = Normalized
INm = Inverse Normalized
NEZP = Number of Edge Zone Passes
EZP = Edge Zone Path
DIT = Design Infield Track
NoT = Number of Turns

1. Introduction

최근 축산업 인구 고령화 현상이 지속됨에 따라 자동화 기술의 필요성이 커지고 있다. 이에 따라 축산업 분야에서는 급이 로봇, 분뇨 처리 로봇에 대한 자율주행 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 특히, 자율주행 연구 중 경로 생성은 자율주행 작업의 효율성을 높이는 중요한 연구 주제로 자리 잡고 있다. 효율적인 작업 경로는 작업 시간 및 에너지 소모를 줄일 수 있다[4]. 따라서 작업 경로 효율성을 개선하고 최적의 작업 경로를 생성하는 것은 필수적이다.

현재 다양한 분야에서 작업 경로 생성 알고리즘인 CPP (Coverage Path Planning) 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 축산업 분야에서는 CPP 알고리즘과 같은 경로 생성 연구가 상대적으로 부족한 실정이다. 현재 축산업에서 개발된 방식은 장애물과의 접촉 이후 방향을 전환하여 주행하는 방식으로 경로 생성을 진행하고 있지 않다[5,6]. 이러한 방식은 주행의 일관성이 없으며, 잦은 중복 작업을 초래한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 축산 분야에서 활용할 수 있는 CPP 기반 최적 작업 경로를 생성하고자 한다.

이를 위해, 본 논문에서는 한국농업기술진흥원에 설치되어 있는 축사시설에서 실험을 진행하였다. 알고리즘 개발 순서는 SLAM, 영역분할, 각 작업 영역에 대한 최적 CPP 알고리즘을 통한 작업 경로 생성 순으로 진행하였다. 먼저, 자율주행 로봇에 장착된 센서를 활용하여 축사 시설정보를 수집하였으며, 이를 SLAM을 통해 Point Cloud Map으로 변환하였다. 생성된 Point Cloud Map은 영역 분할을 위해 Grid Data로 변형시킨 후, OpenCV의 경계 검출 기능을 활용하여 축사시설의 경계 정보를 검출하였다[7]. 추출된 경계 정보 내부는 주행 가능 영역으로 지정하였으며, 이를 기반으로 영역 분할을 진행하였다. 영역분할은 축사시설의 외벽과 주행 가능 영역에 대한 정보를 이미지 형식으로 변환하여 활용하였다. 이를 활용하여, 세 가지 영역 분할 알고리즘(Distance Segmentation, Morphological Segmentation, Voronoi Segmentation)을 영역 분할 시간 Runtime, 분할된 영역의 개수 NoS (Number of Segments), 분할된 영역의 평균 넓이 SA (Segment Area), 분할된 영역의 평균 둘레 SP (Segment Perimeter), 그리고 분할된 영역의 가장자리의 개수 NoE (Number of Edges)를 취득 후, 이를 통해 결과를 비교하였으며, 결과적으로 Voronoi Segmentation 알고리즘이 본 논문에 활용하기에 가장 적합한 성능임을 확인하였다[8-11].

최적 CPP 알고리즘을 개발하기에 앞서 작업 영역 판별을 진행하였다. 작업 영역 판별은 분할된 각 영역의 이미지 정보를 바탕으로 로봇의 넓이 W (Robot Width)를 고려하여 작업이 필요 없는 영역을 소거하였다. 이를 통해 불필요한 작업 경로 생성을 방지할 수 있었다. 그러나, 이후 진행된 이미지를 Grid Data로 변형시키는 작업에서 측위 정보 및 센서의 노이즈로 인한 왜곡이 존재하여 기존 CPP 알고리즘을 활용하기에 어려움이 있었다. 이는 작업 경로 생성 시 비정형 패턴이 다수 발생하게

되는 문제점을 야기하기 때문이다. 작업 경로상에 존재하는 비정형 패턴은 작업의 효율성과 안전성을 저하시킨다. 따라서 본 논문에서는 DP (Douglas Peucker) 알고리즘을 작업 영역으로 판별된 Grid Data에 적용시켜, 허용 오차 ϵ (Epsilon) 이내의 불규칙한 성분을 제거하였다. DP CPP (Douglas Peucker Coverage Path Planning) 알고리즘으로 생성된 작업 경로는 기존 CPP 알고리즘을 활용한 작업 경로에 비해 단순하였으며, 이를 활용하여 일관성 있는 경로를 생성할 수 있었다. 또한, 작업 영역 내 경로의 효율성 지표인 Coverage Ratio가 평균적으로 증가한 것을 확인하였다.

기존 CPP 알고리즘은 선회 반경 τ (Turning Radius)에 대한 고려가 부족하다. 이는 작업 경로를 추종하는 과정에 제자리 선회와 같은 불필요한 동작을 유발할 수 있으며, 외벽과의 충돌 사고로 이어질 가능성이 존재한다. 본 논문에서는 이러한 위험요소를 줄이기 위해 τ 값을 고려하여 선회 구간 경로를 최적화하였다. 더불어, 주행 가능 영역 내부에 W 를 활용한 최소 회전 사각형을 구현하여 이를 기반으로 DP CPP 알고리즘을 구현하였다. 하지만 DP CPP 알고리즘은 기존 CPP 알고리즘을 활용하여 구현되었기 때문에, 작업 영역의 면적을 커버하는데 집중하는 특성이 있다[12]. 따라서 외벽 근처의 잦은 선회 구간에서 분뇨로 인한 미끄러짐 현상에 따른 충돌은 고려하지 않는다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 W , 가장자리 경로의 수 NEZP (Number of Edge Zone Passes)를 활용하여 가장자리 경로 EZP (Edge Zone Path)를 생성하였다. EZP는 Coverage Ratio를 증가시킬 뿐만 아니라, 잦은 선회 구간과 외벽 사이의 추가적인 간격을 확보하여 안전성도 향상시켰다. EZP에 DP 알고리즘을 적용한 경우(DP-EZP CPP)와 적용하지 않은 경우(NoN DP-EZP CPP)로 나누어 평가를 진행하였다. 두 가지 방법 모두 기존 CPP 및 DP CPP보다 Coverage Ratio가 증가하였으나, 둘 사이의 차이는 근소한 것을 확인하였다. 하지만 경로의 안전성 및 일관성 측면에서 선회 구간이 더 적게 생성되는 DP-EZP CPP가 우수한 것으로 확인하였으며, 최종적으로 최적 CPP는 DP-EZP CPP라는 결론을 얻었다. 이후, 생성된 각 영역을 연결하는 경로는 A* 알고리즘을 통해 연결하였다. 이를 통해 기존의 CPP의 문제점을 개선하여 효율적이고 안전성 있는 최적 작업경로를 생성하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 로봇의 제원 및 장착 센서를 설명한다. 3장에서는 실험 장소와 SLAM 활용 과정 및 결과를 다룬다. 4장에서는 주행 가능 영역 검출, 세 가지 영역분할 알고리즘에 대한 Runtime, NoS, SA, SP, NoE 적용 평가 및 결과에 대해 설명하였으며, DP 알고리즘에 대한 설명 및 적용 결과도 포함한다. 5장에서는 기존 CPP, DP CPP, Non DP-EZP CPP, DP-EZP CPP 알고리즘에 대해 설명하고 작업 경로 생성 결과를 보여준다. 이후, 최적 CPP 알고리즘인 DP-EZP CPP 알고리즘으로 구현된 작업 경로 사이의 연결을 위해 A* 알고리즘을 활용한 결과를 보여준다. 6장에서는 경로 생성 시간 Runtime, 생성된 경로의 길이 Length, 선회 구간의 개수 NoT

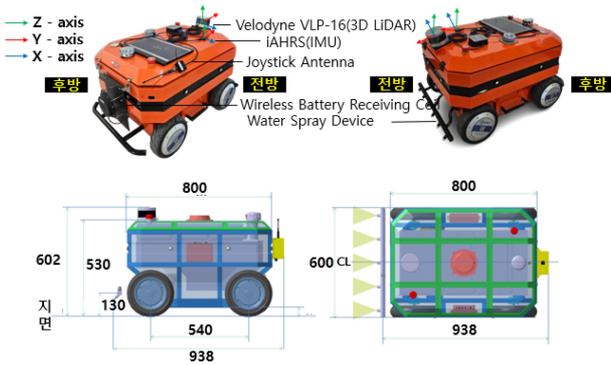


Fig. 1 Specifications and mounted sensors of the manure handling robot for barns

(Number of Turns), Coverage Ratio 적용 평가 및 최종적인 결과에 대해 설명한다. 7장에서는 최적 CPP 알고리즘 연구 및 향후 연구에 대해 제시한다.

2. Robot Description

Fig. 1은 실험에서 활용한 로봇에 대한 규격과 센서에 관한 자료를 보여준다. SLAM을 활용하기 위한 측위 정보를 취득하기 위해, 3차원 LiDAR인 Velodyne VLP-16 LiDAR 센서와 관성 측정 장치인 iAHRS IMU 센서를 장착하여 실험하였다. 로봇은 전방에 분뇨 및 소독 작업을 위한 분사 노즐이 장착되어 있어, 이를 사용하여 고압 물 분사 방식을 통해 작업을 진행하며, 스키드 제어 방식을 활용한다.

3. SLAM

3.1 HDL Graph SLAM

작업 경로 생성을 위한 사전 작업으로 ROS (Robot Operating System) 환경에서 Point Cloud Map을 제작하였다. 현재 위치추정 및 Mapping에 사용되고 있는 SLAM 알고리즘은 LOAM, A-LOAM, ICP, BLAM, HDL Graph SLAM 등 다양한 알고리즘이 사용되고 있다[13].

이 중, 본 논문에서는 ROS (Robot Operating System) 환경에서 사용 가능한 HDL Graph SLAM을 활용하였다[14]. HDL Graph SLAM은 센서 융합을 활용한 그래프 기반의 효율적인 접근 방식을 사용하며, FAST_GICP, FAST_VGICP와 같은 다양한 Scan Matching을 통해 Point Cloud Map 생성이 가능하다 [15]. 이를 활용하기 위해 로봇에 장착되어 있는 센서를 활용하였으며, 결과적으로 HDL Graph SLAM을 활용하여 Fig. 2와 같이 한국농업기술진흥원에 설치되어 있는 축사시설의 Point Cloud Map을 구현하였다. 그러나 축사 시설은 주거 시설과 달리 평탄하지 않은 바닥면을 가지고 있다. 이로 인해 데이터 취득 시

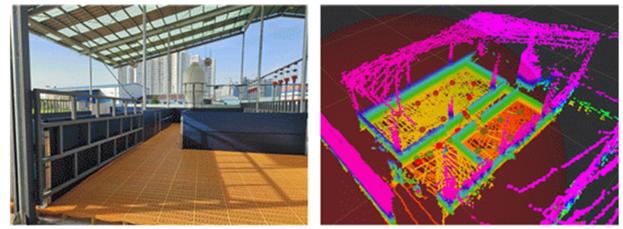


Fig. 2 Representation of a Point Cloud Map of a barn facility

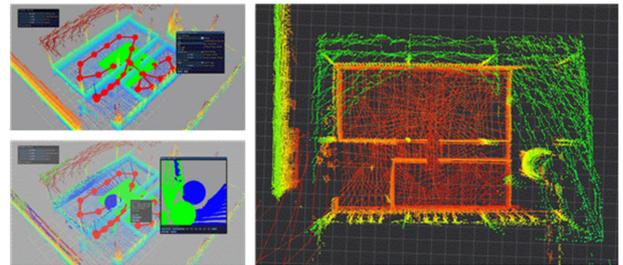


Fig. 3 Interactive SLAM based point cloud map

센서에 진동 현상이 발생하여 Point Cloud Map에 다수의 왜곡된 데이터가 생겼다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 3.2장에서 소개한 Interactive SLAM을 활용하여 Point Cloud Map을 보정하였다.

3.2 Interactive SLAM

Interactive SLAM은 3D LIDAR 기반의 Frame Work로 Point Cloud Data를 활용하여 사용자가 수동으로 손상된 주행 거리, 잘못된 루프 감지, 왜곡된 Map Data와 같은 Mapping 오류를 직관적으로 수정할 수 있다. 또한 ICP, GICP, NDT, NDTOMP와 같은 Point Cloud Matching 알고리즘들을 통해 오류 수정을 할 수 있다[16]. 본 논문에서는 Mapping 오류를 수정하기 위해 오차가 가장 적은 Point Cloud 결과물을 활용하였으며, Interactive SLAM을 활용하여 일정 구간의 데이터를 임계값 설정을 통해 보정하였다. Fig. 3은 Interactive SLAM을 활용한 결과이다.

4. Area Division

4.1 3D Map to 2D Map Conversion

작업 영역을 검출하기 위해 3차원 정보인 Point Cloud Map 데이터를 사용하였다. x축은 -1.2에서 11.6 m, y축은 -5.2에서 6.8 m, z축은 0.0에서 0.5 m로 설정하여 유효한 영역을 추출하였으며, 그 결과는 Fig. 4에 나타나 있다. 포인트 검출에는 K-D Tree 알고리즘을 적용하여, 각 포인트를 기준으로 반경 0.1 m 이내의 근처 포인트들을 찾아 표면 법선 벡터를 계산하였다[17].

이후, 각 포인트의 법선 벡터를 활용하여 Grid Data를 생성하였다.

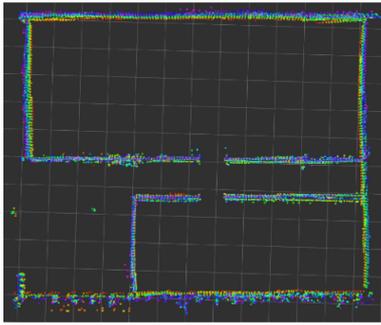


Fig. 4 Results of filtering the point cloud map by applying the K-D Tree algorithm



Fig. 6 Drivable area determination based on contour line detection using OpenCV

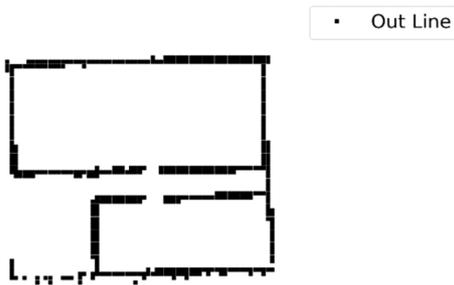


Fig. 5 Point cloud map of converted grid data & out line points

점유 Grid의 해상도는 0.2 m로 설정하고, 포인트의 좌표를 사용해 그리드 셀의 위치를 계산하였다. 계산 결과를 통해 특정 포인트의 x, y 좌표를 그리드 셀 위치로 변환하였다. 이후, 각 셀에 포함된 포인트 수를 추출하여 점유 상태 정보를 취득하였다. 셀에 포함된 점유 상태 포인트 수가 4 미만이면 해당 셀은 비어 있다고 간주하고, 포인트 수가 4 이상이면 점유된 셀로 표시하였다. Fig. 5는 점유된 셀을 Out Line 포인트로 나타낸 Grid Data 이미지이다.

4.2 Drivable Area Detection

Fig. 3의 이미지와 같이 본 논문에서 실험을 진행하고 있는 축사시설 내부에는 장애물이 존재하지 않는다. 따라서 내부 장애물에 대한 필터링 과정을 진행하지 않고, 축사시설에 대한 정보만 활용하여 주행 가능 영역을 판별하였다. 우선, 축사시설 내부 객체의 가장자리 좌표 4개를 추출하였다. 이 좌표들을 활용하여 OpenCV 경계 검출 기능을 통해 주행가능 영역의 경계 좌표를 검출하였다. 그 결과는 Fig. 6에서 확인할 수 있다. Fig. 6에서 Out Line은 외벽에 대한 좌표 정보를 나타내고, Inner Line 경계 좌표 내부 영역은 주행가능 영역을 의미한다. 결과적으로, Grid Data를 활용하여 주행 영역을 감지할 수 있는 알고리즘을 구현하였다.

이후, 4.3의 영역 분할 알고리즘에 활용하기 위해 Fig. 7과 같이 주행가능영역인 주행가능 영역인 Inner Line 포인트 내부는 흰색 영역, 외벽인 Out Line 포인트의 경우 검은색 영역, 그 외의 불필요한 영역은 회색 영역으로 설정하여 이미지화를 진행하였다.

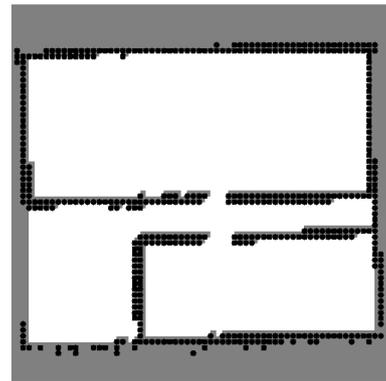


Fig. 7 Drivable areas in white, obstacles in black, and other areas in gray

4.3 Comparison of Area Partitioning Algorithms

현재 다양한 영역 분할 알고리즘들이 개발되어 있다. 그러나 가상환경에서의 영역 분할 실험은 많이 존재하지만, 축사 시설과 같은 실제 환경에서의 영역 분할 알고리즘 비교 연구는 부족한 실정이다[9-11]. 따라서 본 논문에서는 축사 시설의 데이터를 활용하여 자주 사용되는 세 가지 영역 분할 알고리즘에 대한 결과를 평가하고, 이를 통해 가장 적합한 알고리즘을 확인하여 최적 CPP에 활용하고자 한다. 세 가지 영역분할 알고리즘은 앞서 구현된 Fig. 7 이미지를 활용하여 진행하였으며, 각각의 알고리즘에 대한 설명 및 구현 결과는 다음과 같다.

A. Distance Segmentation

Distance Segmentation 알고리즘은 초기 이미지의 픽셀 간 거리 변환 데이터를 기반으로 한다. 이 알고리즘은 주행 가능한 영역인 흰색 픽셀과 가장 인접한 외벽인 검은색 픽셀 간의 거리를 측정하는 과정을 포함한다. 이 과정을 수행하기 위해 Fig. 7을 활용하였다. 변환된 거릿값 중 가장 큰 로컬 최댓값은 주행 가능한 영역의 중심에 위치하며, 좁은 영역이나 입구에서는 내부의 로컬 최댓값보다 작게 나타난다.

이 알고리즘은 거리 데이터를 활용하여 영역을 분할하므로, 임계값을 설정하여 영역 중심 정보를 추출해야 한다. 임계값을 적용하면 거리 데이터가 내림차순으로 정렬되고, 주행 가능 영역 중심의 크기가 증가한다. 임계값이 외벽 또는 입구에서의

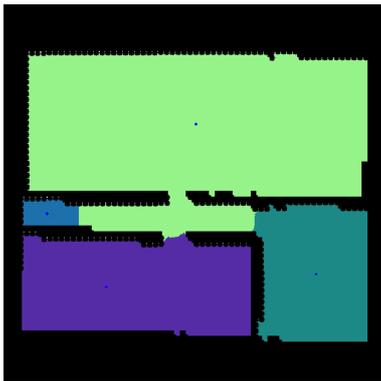


Fig. 8 Distance segmentation is the result of area division

로컬 최댓값과 일치하면 주행 가능 영역 중심 수가 감소하기 시작하는데, 이는 인접한 주행 가능 영역 중심이 입구를 통해 병합되기 때문이다.

따라서, 주행 가능 영역의 중심 수가 최대가 되는 임계값을 선택하는 것이 필요하다. 최종적으로 결정된 각 영역의 중심에는 고유한 레이블을 부여하고, 나머지 공간은 레이블 없이 처리한다. 이러한 결과는 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 7의 이미지를 분석한 결과, 임계값 설정에 따라 영역이 분리되는 과정이 다름을 확인하였다. 다양한 임계값을 설정하여 Distance Segmentation 알고리즘을 적용한 결과, 4개의 세그먼트로 분할이 가능하였으나, SA 161.56 m², SP 59.22 m², NoE 8로 값이 높게 나타났다. 이러한 결과는 본 연구의 목적에 부합하지 않다고 판단하였다. 이는 각 작업 영역이 명확하게 구분되지 않음을 의미하며, 본 연구의 목적에 부합하지 않는 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 더 세밀한 영역 분할이 필요하므로, 세분화가 충분하지 않은 Distance Segmentation은 적합하지 않은 것으로 결론지었다. 비록 이 알고리즘이 다른 알고리즘보다 구현 속도가 빠르다는 이점이 있지만, 본 연구에서는 정확한 분할이 더 중요한 요소이기 때문에 연구 목적에 맞지 않다고 판단하였다.

B. Morphological Segmentation

Morphological Segmentation 알고리즘은 단순성을 주요 특징으로 한다. 이 알고리즘을 활용하기 위해 Fig. 7의 이미지를 Grid Data로 변환한 픽셀값을 사용한다. 초기에는 외벽과 같은 장애물을 주행 불가능한 영역으로 레이블을 지정한다. 이 과정에서 흰색 픽셀은 주행 가능 영역, 검은색 픽셀은 외벽으로 나타난다. Morphological Segmentation을 통해 각 픽셀에 반복적으로 레이블 작업을 수행한다.

이후, 주행 불가능 영역과 주행 가능 영역에 대한 구성 요소를 분석하여 주행 가능 영역이 분리되었는지 확인한다. 분리된 영역이 일정 크기, 즉 설정된 기준과 부합하면 모든 셀이 개별 영역으로 레이블 지정되고, 다른 영역과 분리되어 추출된다. 이 절차는 모든 영역의 셀이 제거될 때까지 반복된다. 이후, 레이블이 지정된 영역은 다른 영역과 레이블이 없는 공간으로 확장되어,

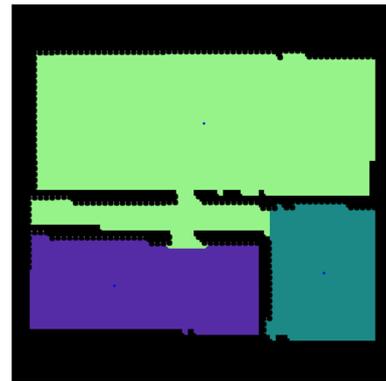


Fig. 9 Morphological segmentation is the result of area division

모든 주행 가능한 셀이 레이블로 지정된다.

결과적으로, 주행 가능한 셀과 주행 불가능한 셀을 기준으로 영역 분할이 이루어졌으며, 그 결과는 Fig. 9에 제시되어 있다. 실제 이미지 결과를 분석한 결과, 3개의 세그먼트로 분할하는 것이 가능했지만, SA 215.41 m², SP 67.99 m², NoE 6.25로 높은 값을 보였다. NoE 값은 Distance Segmentation보다 낮았지만, 다른 모든 지표에서는 전반적으로 기대에 미치지 못하였다. 이러한 결과는 4.4절에서 언급한 작업 판별 과정에서 각 작업 영역이 명확하게 구분되지 않는 문제를 초래한다. 따라서, 본 연구에서는 더욱 세밀한 영역 분할이 필요하다고 판단하여, Morphological Segmentation은 본 연구에 적용하기에 적합하지 않다고 판단하였다.

C. Voronoi Segmentation

Voronoi Segmentation 알고리즘은 Voronoi 다이어그램을 기반으로 분할을 진행한다. 먼저, Fig. 7을 활용한 Grid Data를 일정한 크기의 격자로 나누는 것으로 시작한다. 이 격자를 활용하여 각 셀에 대해 외벽 또는 주행 가능한 공간 정보를 토대로 Voronoi 다이어그램을 생성한다. 이후, 검출된 외벽 셀 간의 거리를 계산하여 Voronoi 경계를 설정하고, 이 경계를 활용하여 불필요한 세부 경계를 제거한다.

이를 통해 전체적인 Voronoi 다이어그램이 단순화된다. 다음으로, 외벽에서 검출된 가장 가까운 픽셀을 가진 점을 중요한 점으로 간주하고, 이 점들을 활용하여 주행 가능 영역을 분할하는 기준으로 설정한다. 이 점들을 활용하여 각각 연결하는 선들을 생성하고, 이 선을 통해 영역을 분할한다. 이 선들 중 사이각이 작은 각도를 갖는 것들은 모두 제거된다. 큰 각도를 갖는 선은 주로 주행 가능 영역의 입구 쪽에 표현된다.

하지만 이러한 분할 영역 중 일부는 너무 작아서 개별적으로 의미 있는 공간으로 간주하기 어려웠다. 이 문제를 해결하기 위해 휴리스틱을 적용하여 작은 영역을 큰 영역에 결합하였다. 휴리스틱 방법을 통해 영역 병합을 진행한 결과, Fig. 10에 제시된 바와 같이 최종적으로 6개의 세그먼트로 세분화된 이미지를 얻을 수 있었다. 이 결과는 세 가지 알고리즘 중 가장

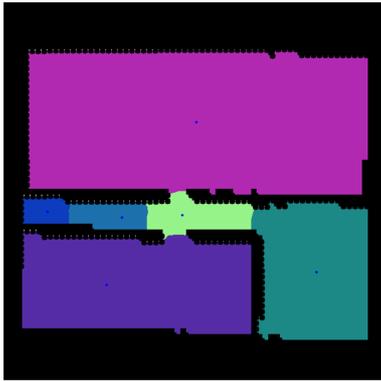


Fig. 10 Voronoi Segmentation is the result of area division

Table 1 This is a table comparing the performance of three region division algorithms

	Distance	Morphological	Voronoi
Runtime[s]	2.07	5.91	15.04
NoS	4	3	6
SA [m ²]	161.56	215.41	107.70
SP [m]	59.22	67.99	36.78
NoE	8	6.25	4

세밀하고 명확하게 영역을 분할한 것으로, 본 연구에서 요구하는 바에 가장 적합한 형태임을 보여주었다. 구체적으로, SA 107.70 m², SP 36.78 m, NoE 4로, 다른 알고리즘에 우수한 성능을 보여주었다.

이러한 결과는 4.4절에서 설명한 작업 판별 과정에서 각 작업 영역이 명확히 구분되어야 하는 사항을 충족시키는 것으로, 본 연구에 활용하기에 가장 적합한 영역 분할 알고리즘임을 확인할 수 있었다.

4.4 Comparison and Analysis

다음 Table 1은 세 가지 알고리즘을 비교 분석한 결과이다. 비교 항목은 Runtime, NoS, SA, SP, NoE이다. 분석 결과, Distance Segmentation 방식이 가장 짧은 Runtime을 보였다. 그러나 NoS, SA, SP, NoE를 통한 정밀한 영역 분할 결과는 Voronoi Segmentation 방식이 가장 우수하였다.

Distance Segmentation 알고리즘은 경로 생성 시간에서 가장 효율적이었지만, 분할된 영역의 개수와 정밀도에서는 한계가 있었다. 반면, Morphological Segmentation 알고리즘은 단순한 구현과 빠른 처리 속도를 제공했으나, 분할된 영역의 정밀도와 정확성에서 부족했다. Voronoi Segmentation 알고리즘은 전체적으로 가장 정밀한 영역 분할을 수행했으며, 각 지표에서 균형 잡힌 성능을 나타냈다.

정확한 비교를 위해 각 요소에 가중치를 적용하여 각 알고리즘의 효율성에 대해 판단하였다. 이 중, 가장 중요하게 고려된 요소는 NoS와 NoE로 분할된 영역의 단순화 정도와 세분화 정도를 판단할 수 있기 때문이다. 따라서 NoS 가중치 w_{NoS} 와 NoE

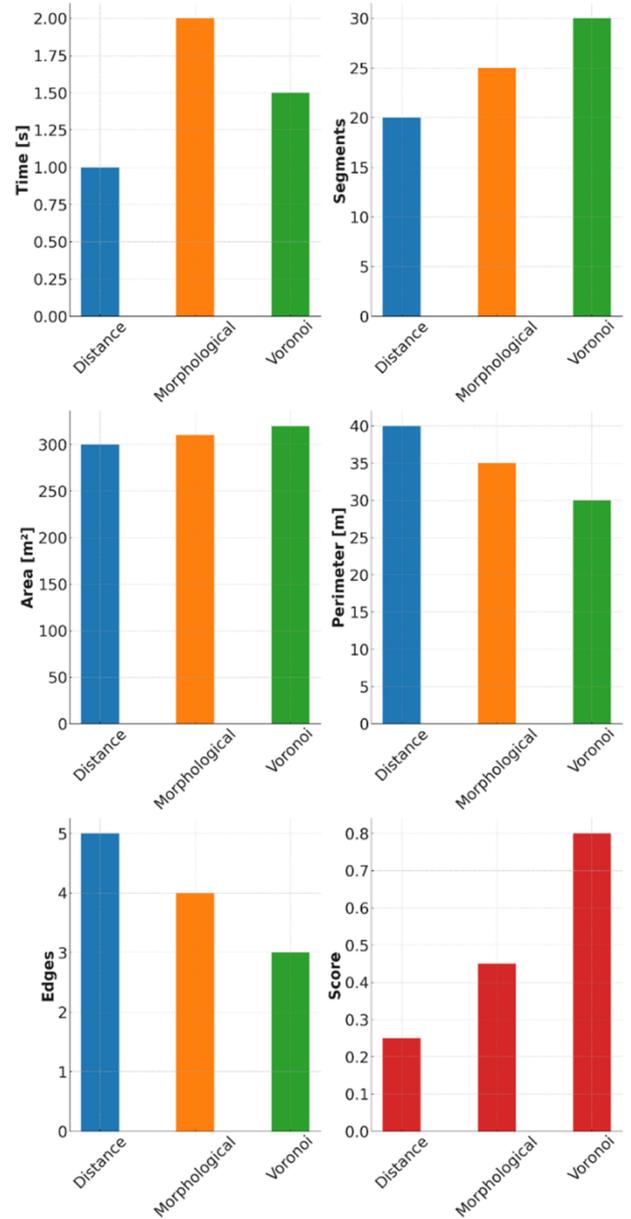


Fig. 11 Graph of segmentation for three methods evaluation results

가중치 w_{NoE} 는 0.3으로 설정하였다. 이외에 SA와 SP의 경우 면적의 넓이 및 둘레를 통해 영역의 세분화 정도를 추측할 수 있지만, 단순화 정도를 파악하지 못함으로 SA 가중치 w_{SA} 와 SP 가중치 w_{SP} 는 0.15로 설정하였다. Runtime 가중치 w_{Run} 는 0.1로 설정하였다. Runtime, SA, SP, NoE의 경우 수치가 낮을수록 영역분할 효율성이 증가함으로 식(2)을 통해 역 정규화 과정 INm (Inverse Normalized)을 진행하였다.

이에 반해 NoS의 경우 수치가 높을수록 영역 분할 효율성이 증가함으로 식(1)을 통해 정규화 과정 Nm (Normalized) 값을 도출하였다. 이후, 역정규화 수치를 정규화 수치를 정해진 가중치와 곱하고 최종적으로 모든 값을 합산한 수치인 Score로 영역 분할의 효율성으로 표현하였다.

Fig. 11은 앞서 설명한 수식을 통해 최종적인 결과를 도출한

것이며, Voronoi Segmentation의 최종적인 All Score 수치가 0.9로 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문은 Voronoi Segmentation 과정을 통해 취득된 영역분할 데이터를 활용하였다.

$$Nm = \frac{Original\ Value - Min\ Value}{Max\ Value - Min\ Value} \quad (1)$$

$$INm = 1 - \frac{Original\ Value - Min}{Max\ Value - Min\ Value} \quad (2)$$

$$Runtime\ Score = (w_{Run} \times INm\ runtime) \quad (3)$$

$$Nos\ Score = (w_{NoS} \times Nm\ NoS) \quad (4)$$

$$SA\ Score = (w_{SA} \times INm\ SA) \quad (5)$$

$$SP\ Score = (w_{SP} \times INm\ SP) \quad (6)$$

$$NoE\ Score = (w_{NoE} \times INm\ NoE) \quad (7)$$

$$All\ Score = (3) + (4) + \dots + (7) \quad (8)$$

4.5 Workspace Filtering

본 절에서는 구현된 영역 분할 정보를 바탕으로 작업이 필요 없는 영역을 필터링하였다. 이를 위해 각 분할 영역의 면적을 측정하고, 이를 W와 비교하였다. 각 분할 영역의 가로 및 세로 길이를 추출하여 면적을 계산한 후, W의 2배와 비교하였다. 만약 분할된 영역의 면적이 W의 2배보다 작을 경우, 해당 영역을 제거하도록 알고리즘을 구현하였다. 이 알고리즘을 통해 불필요한 영역이 Fig. 12와 같이 소거되었다. 최종적으로, 작업이 필요한 영역의 경계 좌표를 추출하였다. 이를 통해, 불필요한 영역을 효과적으로 필터링함으로써, 후속 작업의 효율성을 높일 수 있었다.

4.6 Douglas-Peucker (DP) Algorithm

경계 좌표 검출 시 실시간 센서 데이터의 노이즈로 인해 다수의 왜곡된 경계 좌표 데이터가 검출되었다. 영역 분할 방식을 활용하는 다양한 알고리즘들은 이러한 왜곡요소를 충분히 고려하지 않으며, 이로 인해 경로 생성 과정에서 짧은 시간 내에 제어 변동성이 큰 경로 좌표가 생성되는 문제가 발생한다. 이는 주행의 일관성과 안전성에 부정적인 영향을 미친다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 경계 좌표의 기존 곡선 특성을 유지하면서 경계 좌표를 단순화할 수 있는 DP 알고리즘을 활용하였다[16]. Fig. 13과 같이 DP 알고리즘은 경계 좌표의 각 점과 기준선 사이의 거리를 측정하여 최대 수직 거리를 갖는 점을 찾아내고, 이 점과 기준선 간의 거리가 ε보다 작으면 해당 점을 제거한다. 이 과정을 끝점 사이에 점이 없을 때까지 반복한다.

아래의 수식은 DP 알고리즘과 관련된 수식을 설명한 것이다. 식 (9)에서 주어진 것은 시작 곡선 p이며 이는 n개의 점으로 이루어진

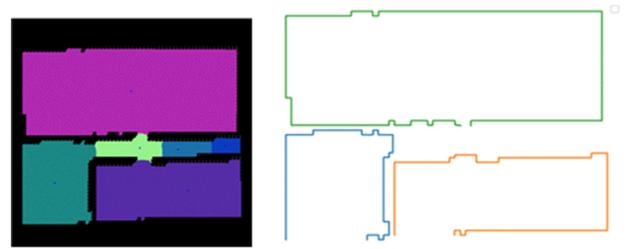


Fig. 12 As a result of dividing the work area, three areas were detected

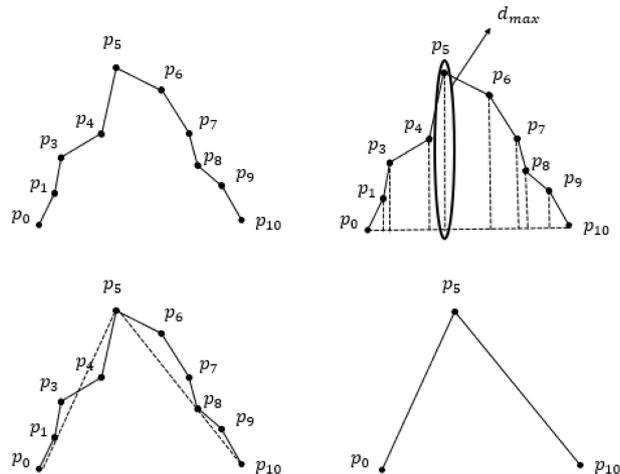


Fig. 13 A simple image of the douglas-peucker algorithm shows that unnecessary coordinates in p have disappeared.

정렬된 집합으로 D의 첫 번째 근사치 선분을 로 표현하였다. 식 (10)과 같이 모든 n-2개의 내부 점을 확인하고, p0와 pn를 잇는 점선과 Pi 사이의 가장 먼 점을 d_max 수치로 산출하였다. 만약 d_max가 허용 오차인 ε 이내에 있다면, 허용 오차 내의 점들을 제거하는 단순화 작업을 진행하였다.

결과적으로 DP 알고리즘을 통해 작업 영역의 경계 좌표 중 일부를 선택하고, 미리 정의된 ε 내에 있는 점들을 소거하여 단순화된 경계 좌표를 추출하였다.

$$D = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}) \quad (9)$$

$$d_{max} = \max_{i=2 \dots n-1} d(p_i, \overline{p_1 p_n}) \quad (10)$$

$$d_{max} \leq \epsilon(1.0) \quad (11)$$

$$D_1 = (p_0, p_5, p_{10}) \quad (12)$$

Fig. 14는 검출된 경계 좌표에 DP 알고리즘을 적용한 모습을 보여준다. 이를 통해 경로 생성을 위한 경계 좌표의 왜곡된 부분을 선형 구조로 단순화하였으며, 경로 생성 시 발생할 수 있는 비정형 패턴을 감소시켰다. DP 알고리즘을 적용한 결과와 적용하지 않은 작업 경로 생성 결과는 Fig. 20에서 확인할 수 있다.

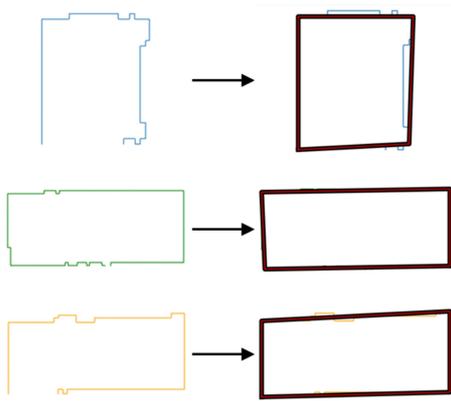


Fig. 14 Results of applying douglas-peucker algorithm to three areas

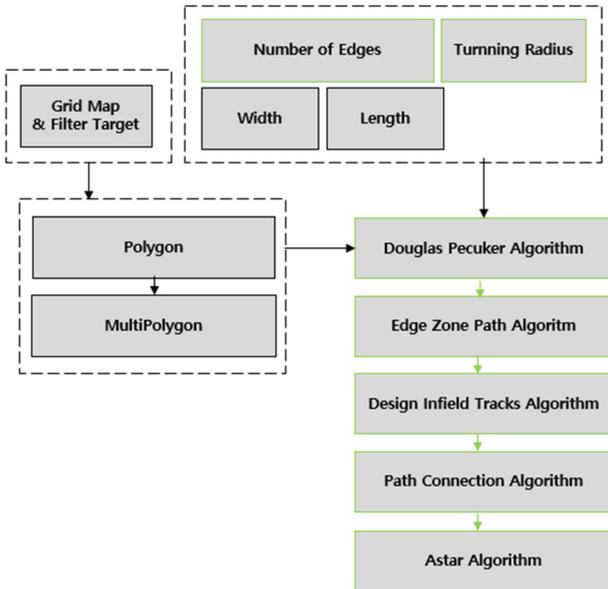


Fig. 15 Architecture for path planning, explaining the overall path creation sequence

5. Coverage Path Planning

5.1 Coverage Path Planning Architecture

Fig. 15는 작업 경로 생성 알고리즘의 개략도를 나타낸다. 4.4절에서 처리된 결과물을 활용하여 경로 생성을 진행하였다. 구현된 결과물을 데이터 처리에 용이한 폴리곤(Polygon) 형태로 변환하였으며, 장애물이 존재할 수 있는 상황에 대비하여 멀티폴리곤(MultiPolygon) 형태로도 변환하였다.

경로 생성을 위한 주요 파라미터는 다음과 같다. NEZP 값은 1로 설정하였으며, τ 의 설정 값은 0.1 m로 설정하였다. W의 설정 값은 0.6 m이며, 로봇의 길이 L (Robot Length)의 설정 값은 0.8 m로 설정하여 경로 생성을 진행하였다.

경로 생성 과정 중 EZP는 파라미터 값을 모두 활용하여 효율적인 가장자리 경로를 생성하였다. 이후, DIT (Design Infield

Tracks)는 가장자리 경로의 내부 작업 경로를 생성하는 과정으로 W를 활용하였다. 생성된 경로는 Path Connection 과정을 통해 연결하였으며 τ 를 활용하여 완만한 선회 경로를 생성하였다. 이를 통해 작업을 위한 최적 경로가 생성되었다. 이후, 각 영역의 작업 경로는 A*알고리즘을 통해 연결하였다.

결과적으로 기존 CPP 알고리즘 방식과 달리 DP, EZP, DIT를 통해 더 안전성과 효율성 있는 최적의 CPP 알고리즘을 개발하였다. 구체적인 알고리즘의 상세 내용은 5.2-5.4장에서 설명하였다.

5.2 Edge Zone Path (EZP) Algorithm

본 논문에서 제안하는 EZP는 생성하여 주행의 안전성을 확보하고 작업의 효율성을 높이는 경로 생성 과정이다. 기존 CPP 알고리즘은 주행의 안전성을 고려하지 않고, Coverage Ratio에만 중점을 두고 있다.

그러나 축사 시설 환경에서는 분노로 인한 미끄러짐 현상이나 계절에 따른 지면 변화 등 다양한 변수가 발생한다. 이러한 상황으로 인해 로봇은 외벽과의 충돌 현상이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 가장자리 경로 EZP를 도입하였으며 구현은 다음과 같다.

4.4절에서 처리된 결과물인 x, y 좌표를 식(13)와 같이 Polygon 형식으로 변환하여 데이터를 활용하였으며, 이를 통해 각 변의 정보를 취득하였다. 이후, 각 변에 대한 정보를 L_i 로 지정하고 로봇의 폭 W 만큼 평행한 오프셋 경로를 식(14)과 같이 구현하였다. 수식에 사용되는 벡터 \hat{n}_i 는 변 L_i 에 대한 각 변의 수직인 단위 벡터이다. 구현된 각 변의 평행한 오프셋 경로는 식(15)의 수식과 같이 결합하여 가장자리 경로를 형성하였다.

$$Polygon = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \tag{13}$$

$$L_i^{offset} = L_i + W \times \hat{n}_i \tag{14}$$

$$Edge\ Zon\ Path = \bigcup_{i=1}^n L_i^{offset} \tag{15}$$

기존의 CPP 알고리즘과 달리, 본 논문에서 제안하는 가장자리 경로 생성은 주행의 안전성을 확보하는 데 중요한 역할을 한다. Fig. 16은 이러한 가장자리 경로 생성의 결과를 보여준다. 최종 결과인 Fig. 20을 확인하면, 잦은 선회 구간이 EZP로 인해 기존보다 외벽과의 간격을 확보하여 내부에 생성되어 안전성을 확보하는 모습을 확인할 수 있다.

또한 기존 CPP 알고리즘을 통한 작업 경로 생성 결과보다 작업 영역 내 경로의 효율성 지표인 Coverage Ratio 수치가 증가한 모습을 보여주었으며, 이를 통해 작업의 효율성이 증가한 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 결과는 6장에서 확인할 수 있다.

5.3 Design Infield Tracks (DIT) Algorithm

가장자리 경로 생성 이후, 내부 경로 생성 DIT는 가장자리 경로 내부에 경로를 생성하는 알고리즘이다. 생성 방식은 가장

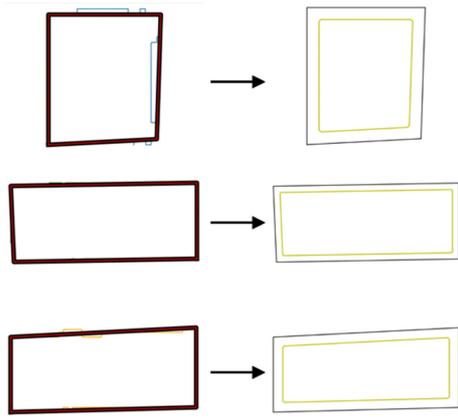


Fig. 16 Edge zone path is an edge path that ensures safety from frequent turning sections



Fig. 17 Detecting the longest axis by repeatedly rotating as much as θ using minrect

자리 경로 내부를 둘러싸는 최소 회전 사각형 MinRect를 구현하는 것이다. MinRect는 5.2의 방식으로 구현되었다. 5.3의 식(14)에 5.2에서 취득한 EZP 정보를 대입하여, 사각형을 구현할 수 있는 좌표를 탐색하고 식(16)와 같이 추출하였다. 이를 활용한 결과는 Fig. 18에서 가장자리 경로의 내부 사각형으로 확인할 수 있다. 이렇게 얻어진 MinRect의 각 변은 가장자리 경로 내의 내부 경로 생성을 위한 주요 축으로 활용되었다. 이후, 식(19)을 활용하여 구현된 MinRect를 θ 에 따라 회전시키며 가장자리 경로 내에 생성할 수 있는 가장 긴 변의 도형을 구현하였다. 구현 결과는 Fig. 18에서 확인할 수 있다.

$$MinRect = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)\} \quad (16)$$

$$d_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (17)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_2)^2} \quad (18)$$

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) & \text{if } d_1 > d_2 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3}\right) & \text{if } d_1 > d_2 \end{cases} \quad (19)$$

구현 결과, Fig. 17과 같이 d_1 이 가장 긴 축인 경우, 식(20)를 통해 x축 성분 x_n 과 y축 성분 y_{wd} 을 활용하여 P_x 경로를 생성하였다. 여기서 y축 성분 y_{wd} 는 로봇의 폭 W 를 활용하여 계산된다. 반면, d_2 가 가장 긴 축이라면 식(21)를 통해 y축 성분 y_n 과 x축 성분 x_{wd} 을 활용하여 P_y 경로를 생성하였다. 이때

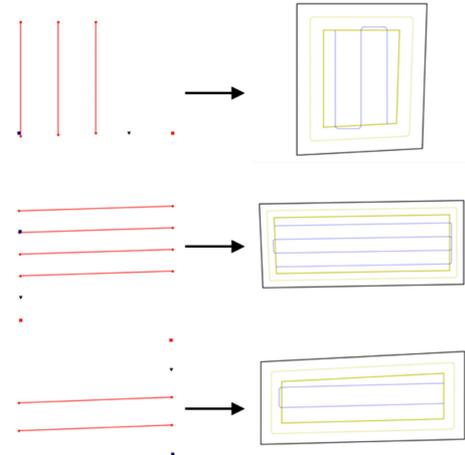


Fig. 18 Create a path within the edge zone path as a result of the design infield path

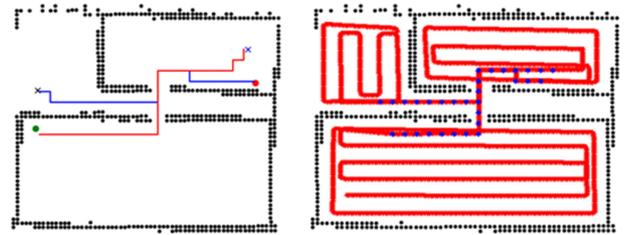


Fig. 19 A* is used to connect the coverage paths in each area to create the final working coverage path

x축 성분 x_{wd} 는 로봇의 폭 W 를 기준으로 계산된다.

이후, 식(22)를 통해 두 점의 중간 점인 P_z 을 추출하였다. 다음으로, 식(23)에 세 점 P_x, P_y, P_z 을 활용하였으며, τ 를 설정하여 완만한 선회 반경으로 조정하였다. 결과적으로 선회 반경을 고려한 가장자리 경로의 내부 작업 경로를 생성하였다. 최종적인 적용 결과는 Fig. 18에서 확인할 수 있다.

기존의 CPP 알고리즘에서는 비일관성 된 작업 경로가 생성되는 경향이 있었지만, 이 과정을 통해 일관성 있는 작업 경로를 생성하여 작업의 일관성 및 효율성을 향상시킬 수 있었다. 비교 결과는 Fig. 20에서 확인할 수 있다.

$$P_x = \{(x_n, y_{wd})\} \quad (20)$$

$$P_y = \{(x_{wd}, y_n)\} \quad (21)$$

$$P_z = \left(\frac{x_n + x_{wd}}{2}, \frac{y_{wd} + y_n}{2}\right) \quad (22)$$

$$Inner L_{connect} = LineString([P_x, P_y, P_z], \tau) \quad (23)$$

5.4 Path Connection Algorithm

5.3의 결과를 통해 생성된 가장자리 경로와 가장자리 경로의 내부 작업 경로를 연결해 주기 위해 Path Connection 작업을 진행하였다. 식은 5.3의 식과 동일하며, 가장자리 경로의 끝점 P_e 와

내부 경로의 시작점 P_s 을 활용하였다. 이 두 점의 중간 점인 P_m 을 추출하였다. 식(26)에 세 점 P_e , P_s , P_m 을 활용하여 가장자리 경로와 가장자리 내부의 작업 경로를 연결해주는 연결 경로를 생성하였다. 이후, 생성된 경로는 τ 를 설정하여 완만한 선회 반경으로 조정하였다. 최종적인 결과는 Fig. 20 (d) DP-EZP CPP 알고리즘의 결과를 통해 확인할 수 있다.

결과적으로 최종적인 작업 영역의 각 경로는 가장자리 경로에서 가장자리 내부의 작업 경로에 원활하게 진입할 수 있는 경로를 생성하였다. 이를 통해 분할된 영역에 대한 작업을 위한 최적화된 CPP 알고리즘을 생성하였다.

$$P_e = (x_e, y_e) \quad (24)$$

$$P_m = \left(\frac{x_e + x_s}{2}, \frac{y_e + y_s}{2} \right) \quad (25)$$

$$L_{connect} = LoneString([P_e, P_m, P_s] \tau) \quad (26)$$

5.5 Astar Algorithm

각 영역에 생성된 커버리지 작업 경로는 영역 사이를 연결해주는 주행 경로가 생성되어 있지 않다. 따라서 출발지점부터 목표 지점까지 이동할 수 있는 최적 경로를 생성하기 위해 A* 알고리즘을 활용하여 경로들을 연결하였다. A* 알고리즘에 사용된 값은 로봇의 폭(W)과 길이(L)를 반영하여 로봇에 맞춘 최적 경로를 구현하였다. 그러나 기본적인 A* 알고리즘을 사용하여 커버리지 작업 경로와 연결할 때 부적합한 경로가 생성되는 문제가 발생하였다.

이 문제를 해결하기 위해 A* 알고리즘에서 생성된 경로의 양쪽 끝부분 좌표를 일정 부분 소거하였다. 이후 남아 있는 좌표를 보간법을 활용하여 로봇이 주행하기에 적합한 형태로 경로를 생성하였다. 이를 통해 각 영역의 작업 경로들을 효과적으로 연결하였다.

Fig. 19는 A* 알고리즘을 통해 경로를 보여주며, 이를 통해 영역마다 문제없이 주행할 수 있는 효율적인 경로가 생성되었음을 확인할 수 있다.

6. Comparison of Generated Coverage Path

본 논문에서는 기존 CPP 알고리즘, DP 알고리즘을 적용한 DP CPP, DP 알고리즘을 적용하지 않고 EZP만 적용한 Non-DP EZP CPP, DP 알고리즘과 EZP를 모두 활용한 DP-EZP CPP를 비교하였다. 비교 항목은 각 영역에 대한 경로 생성 시간 Runtime, 생성된 경로의 길이 Length, Coverage Ratio이다. 각 알고리즘의 비교 항목에 가중치를 곱하여 각각의 Score를 산출하였다. 산출된 Score는 모두 합산하여 All Score 값으로 변환하였으며, 이를 통해 최종적인 최적 CPP 알고리즘을 비교하였다.

Fig. 20에서 볼 수 있듯이, 기존 CPP 알고리즘은 정형화된

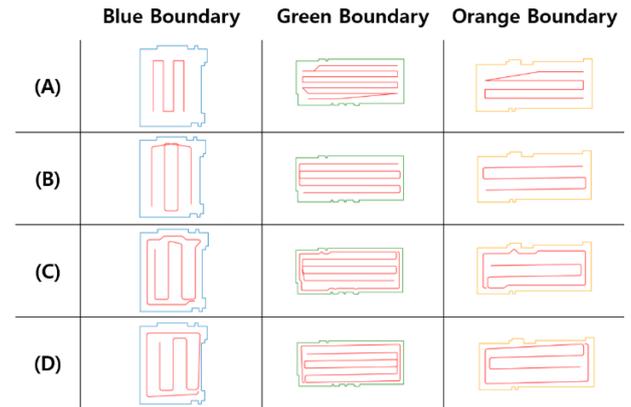


Fig. 20 Coverage path result: (A) Original CPP (B) DP CPP (C) Non DP-EZP CPP, (D) DP-EZP CPP

패턴을 제공하지 않았으며, 누락된 작업 영역이 존재하는 것을 확인하였다. DP CPP 알고리즘의 경우, 잦은 선회 구간이 외벽 근처에 생성되어 분노와 같은 환경적 요소 때문에 외벽과의 충돌 현상이 발생할 가능성이 있었다. 또한, Coverage Ratio가 충분하지 않은 것으로 확인하였다.

Non DP-EZP CPP 알고리즘의 경우, Coverage Ratio가 DP-EZP CPP 알고리즘과 유사하였지만, 선회 구간의 수가 NoT (Number of Turns) 증가했을 뿐만 아니라 급격한 선회 구간도 발생하였다. 따라서 이는 작업 경로로 활용하기에 어려움이 있을 것으로 판단된다. 반면, DP-EZP CPP 알고리즘은 정형화된 패턴의 경로를 제공하며, 선회 구간에서 외벽과의 충돌을 줄일 수 있는 가장자리 경로를 통해 안전성을 확보하였다. 또한, 잦은 선회 구간이 외벽과의 거리를 유지하면서 배치되어 로봇의 안전한 주행을 보장하였다.

이러한 결과는 DP-EZP CPP 알고리즘이 주행 경로의 일관성과 효율성을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다.

Fig. 21에서 Figs. 23은 20의 비교 결과를 나타낸 이미지이다. 4.3절에서 사용된 평가 방식과 유사한 방식으로 경로 생성 결과를 비교하였다. Blue, Green, Orange Boundary의 경로 생성 결과를 경로 생성 시간 Runtime, 작업 경로 길이 Path Length, NoT, Coverage Ratio 총 4개의 평가지표로 분류하여 비교하였다.

최종적인 평가는 All Score를 통해 성능을 평가하였다. 본 논문에서는 Coverage Ratio의 수치가 증가할수록 성능이 향상되므로 식(1)을 통해 정규화 작업을 진행하였다. 반면, Runtime, Path Length, NoT의 경우, 수치가 작을수록 성능이 향상되므로 식(2)을 통해 역으로 정규화하여 각 Score에 적용하였다.

Runtime의 가중치 w_r 와 Path Length의 가중치 w_l 는 작업 경로의 생성시간 및 길이에 대한 효율성을 고려하여 0.1로 설정하였다. NoT의 가중치 w_n 는 작업의 안전성을 고려하여 0.15로 설정하였다. Coverage Ratio의 가중치 w_c 는 할당된 작업 영역을 빠짐없이 커버할 수 있는 비율이 높을수록 좋은 성능을 나타내므로 0.65로 설정하였다. 본 논문에서는 일관성, 효율성, 그리고 안전성에 중점을 두었으며, 그 중 가장 중요한 요소로 Coverage

Table 2 The path creation evaluation results of blue boundary

Blue	Original CPP	DP CPP	Non DP-EZP CPP	DP-EZP CPP
Runtime [s]	0.07	0.37	2.51	2.47
Length [m]	15.24	16.67	17.81	17.24
NoT	6	6	14	10
Coverage [%]	79.365	67.3	96.913	98.748

Ratio를 설정하여 가장 높은 가중치를 설정하였다.

식(33)을 통해 취득된 정보와 설정 값을 기반으로 최종적으로 모든 값을 합산한 수치 Score를 산출하여 경로 생성 결과를 비교하였다.

$$Nm = \frac{Original\ Value - Min\ Value}{Max\ Value - Min\ Value} \quad (27)$$

$$INm = 1 - \frac{Original\ Value - Min}{Max\ Value - Min\ Value} \quad (28)$$

$$Runtime\ Score = (w_t \times Inm\ Time) \quad (29)$$

$$Length\ Score = (W_L \times INm\ Length) \quad (30)$$

$$NoT\ Score = (w_N \times INm\ Not) \quad (31)$$

$$Coverage\ Score = (w_c \times Nm\ Coverage) \quad (32)$$

$$All\ Score = (29) + (30) + (31) + (32) \quad (33)$$

Table 2는 Blue Boundary에 대한 비교 결과를 나타낸 표이다. Original CPP의 Runtime, Length, NoT의 성능이 가장 우수하였으나, Coverage Ratio가 Non DP-EZP CPP, DP-EZP CPP에 비해 현저히 낮은 것을 확인하였다.

Fig. 21는 Blue Boundary에 대한 비교 정보를 표현한 Table 2를 활용하여 그래프로 표현한 것이다. Score 결과가 Original CPP는 0.599, DP CPP는 0.282, Non DP-EZP CPP는 0.612, DP-EZP CPP는 0.748로 나타났다. Original CPP는 Runtime, Path Length, NoT에서 가장 우수한 성능을 보였으나, Coverage Ratio가 충분하지 않았으며, 결과적으로 누락된 작업 영역이 발생하였다. 따라서 본 논문에서는 Coverage Ratio가 가장 높은 Non DP-EZP CPP와 DP-EZP CPP 알고리즘의 결과값을 중점적으로 비교하였으며, 이 중 NoT가 작은 DP-EZP CPP 알고리즘이 가장 최적화된 작업 경로 생성 결과를 임을 확인하였다.

Table 3는 Green Boundary에 대한 비교 결과를 나타낸 표이다. Original CPP의 Runtime, Length의 성능이 가장 우수하였으며 NoT로 인한 안전성은 DP CPP가 가장 우수하였다. 하지만 두 경우 모두 Coverage Ratio가 Non DP-EZP CPP, DP-EZP CPP에 비해 낮은 것을 확인하였다.

Fig. 22는 Green Boundary에 대한 비교 정보를 표현한 Table 3을 활용하여 그래프로 표현한 것이다. Score 결과가 Original CPP는 0.275, DP CPP는 0.619, Non DP-EZP CPP는 0.627, DP-EZP CPP는 0.764로 나타났다. Original CPP는 Runtime, Path

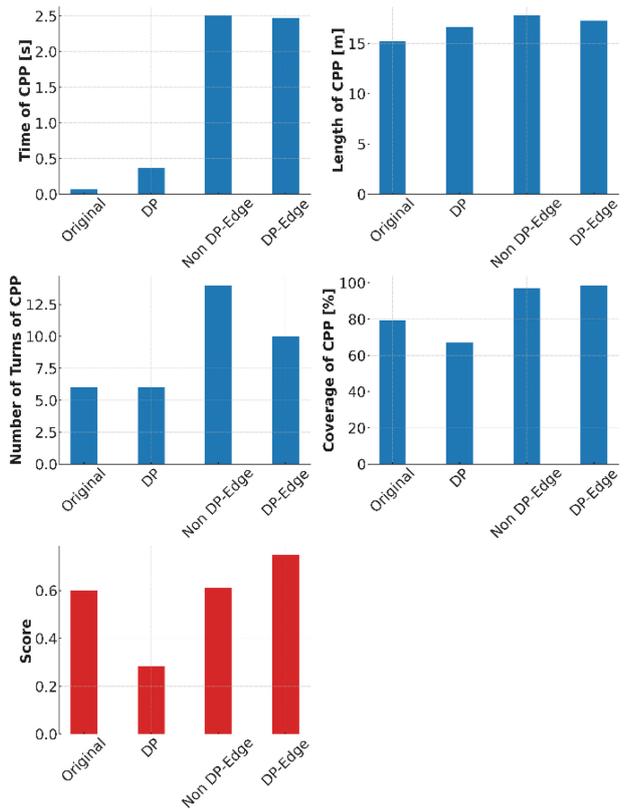


Fig. 21 Graph of path creation for blue boundary evaluation results

Table 3 This table expressing the path creation evaluation results of green boundary coordinates

Green	Original CPP	DP CPP	Non DP-EZP CPP	DP-EZP CPP
Runtime [s]	0.09	0.79	3.51	3.19
Length [m]	68.248	71.75	73.963	73.327
NoT	12	8	16	11
Coverage [%]	84.269	92.56	99.082	99.609

Length에서 가장 우수한 성능을 보였으나, Coverage Ratio가 충분하지 않았다. 앞선 결과와 마찬가지로 Non DP-EZP CPP와 DP-EZP CPP의 Coverage Ratio 값이 가장 높아 이 둘을 비교하였다. 하지만 Non DP-EZP CPP의 NoT 값이 높아 결과적으로 DP-EZP CPP가 가장 최적화된 작업 경로임을 확인하였다.

Table 4는 Orange Boundary에 대한 비교 결과를 나타낸 표이다. 앞선 두 Boundary 결과와 동일하게 Original CPP의 Runtime, Path Length가 가장 우수한 성능을 보였으나, Coverage Ratio의 수치가 낮아 작업 경로 활용하기 어려운 것으로 확인하였다.

Fig. 23은 Orange Boundary에 대한 비교 정보를 표현한 Table 4를 활용하여 그래프로 표현한 것이다. Score 결과가 Original CPP는 0.32, DP CPP는 0.665, Non DP-EZP CPP는 0.606, DP-EZP CPP는 0.744로 나타났다. Original CPP는 Runtime, Path

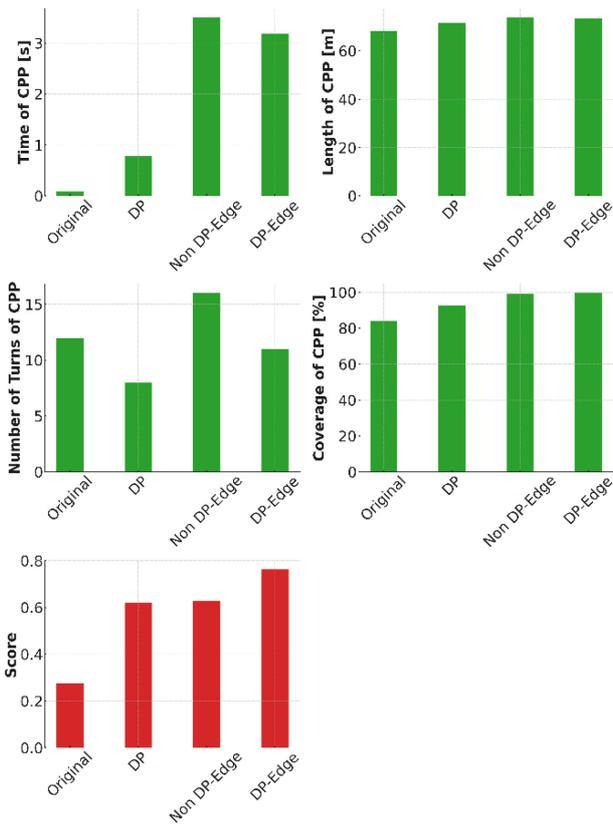


Fig. 22 Graph of path creation for green boundary evaluation results

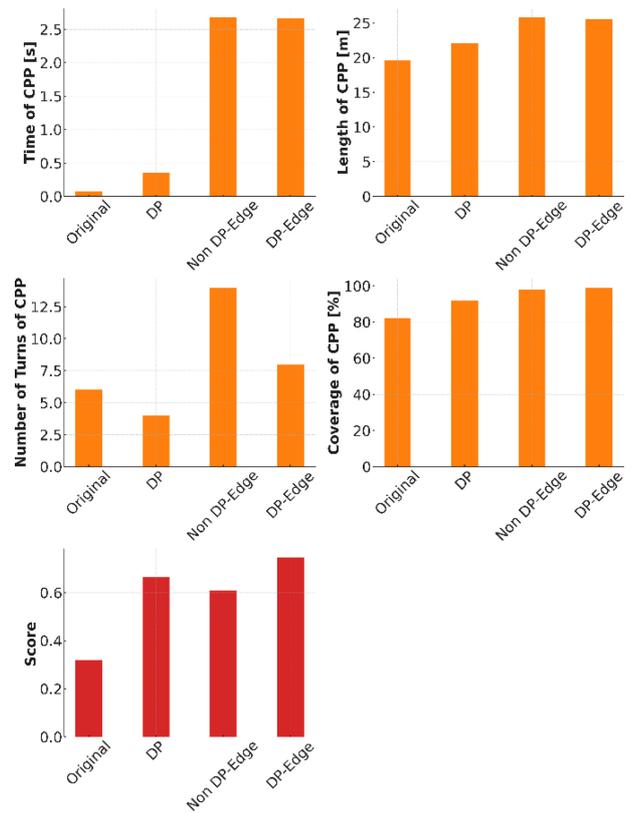


Fig. 23 Graph of path creation for orange boundary evaluation results

Table 4 The path creation evaluation results of orange boundary

Orange	Original CPP	DP CPP	Non DP-EZP CPP	DP-EZP CPP
Runtime [s]	0.07	0.36	2.68	2.66
Length [m]	19.57	22.07	25.824	25.584
NoT	6	4	14	8
Coverage [%]	82.25	91.78	98.028	99.158

Length에서 가장 우수한 성능을 보였으나, Coverage Ratio가 충분하지 않았다. 앞선 결과와 마찬가지로 Non DP-EZP CPP와 DP-EZP CPP의 Coverage Ratio 값이 가장 높아 이 둘을 비교하였다. 하지만 Non DP-EZP CPP의 NoT 값이 높아 결과적으로 DP-EZP CPP가 가장 최적화된 작업 경로임을 확인하였다.

7. Conclusion

본 논문에서는 세 가지 영역분할 알고리즘을 비교하여 실제 측사 환경에 활용할 수 있는 적합한 알고리즘을 탐색하고, 성능을 비교하여 최적의 영역분할 알고리즘을 판별하였다. 또한, 기존 CPP 알고리즘을 변형하여 측사 환경에 효율적이면서 안전성을 확보한 최적의 CPP 알고리즘을 개발하였다.

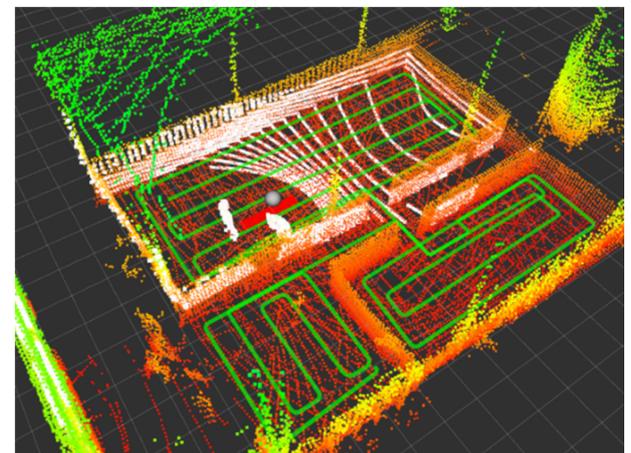


Fig. 24 Experimental method using the final coverage path creation results

세 가지의 영역 분할 알고리즘을 활용하여 성능을 비교한 결과, 실제 측사 환경에서 Voronoi Segmentation 알고리즘이 가장 우수한 성능을 보였다. 따라서 본 논문에서는 Voronoi Segmentation을 통해 영역 분할을 진행하였다.

기존의 영역 분할 데이터는 비정형적인 형태로 나타나므로, DP 알고리즘을 적용하여 데이터를 단순화하였다. 이를 통해 변동성이 큰 경로 좌표를 제거함으로써 주행의 일관성과 안전성을 확보하였다.

기존 커버리지 경로 계획은 환경적 요소와 잦은 방향 전환으로 인한 장애물 충돌을 고려하지 않는다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 측사의 외벽과의 충돌을 막고자 가장자리 경로를 생성하였다. 이를 통해 선회 구간과 측사 외벽 간의 거리를 확보하여 충돌을 최소화하였다. 또한 이를 통해 Coverage Ratio를 증가시켰다.

결과적으로 실제 측사 환경에서 활용 가능한 경로 계획을 개발하였으며, 생성된 커버리지 작업 경로는 효율성과 안전성을 확보하였다.

본 연구에서 생성된 커버리지 작업 경로는 경로 추종 알고리즘을 구현하여 Fig. 24와 같은 방식으로 성능을 평가할 예정이며, 이에 따른 로봇의 분노 처리 작업 효율을 평가할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 농림축산식품부의 ‘차세대융합원천기술연구사업’의 지원을 받아 연구되었다(No. 421044-04).

REFERENCES

1. Tian, F., Wang, X., Yu, S., Wang, R., Song, Z., Yan, Y., Li, F., Wang, Z., Yu, Z., (2022), Research on navigation path extraction and obstacle avoidance strategy for pusher robot in dairy farm, *Agriculture*, 12(7), 1008.
2. Stasewitsch, I., Schattenberg, J., Frerichs, L., (2019), Cleaning robot for free stall dairy barns: sequential control for cleaning and littering of cubicles, *Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference*, 115-126.
3. Shamshiri, R. R., Weltzien, C., Hameed, I. A., Yule, I. J., Grift, T. E., Balasundram, S. K., Pitonakova, L., Ahmad, D., Chowdhary, G., (2018), Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 1-14.
4. Jin, J., Tang, L., (2010), Optimal coverage path planning for arable farming on 2D surfaces, *Transactions of the ASABE*, 53(1), 283-295.
5. Lely, Lely discovery series: robotic manure handling solutions, <https://www.lely.com>
6. JOZ, JOZ-Tech JT200 EVO Manure Robot, www.joz.nl/en
7. Sakshi, K. V., (2022), Segmentation and contour detection for handwritten mathematical expressions using OpenCV, *Proceedings of the International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, 305-310.
8. Chen, Z., Qi, Z., Meng, F., Cui, L., Shi, Y., (2015), Image Segmentation via Improving Clustering Algorithms with Density and Distance, *Procedia Computer Science*, 55, 1015-1022.
9. Frias, E., Balado, J., Díaz-Vilariño, L., Lorenzo, H., (2020), Point cloud room segmentation based on indoor spaces and 3D mathematical morphology, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 44, 49-55.
10. Kise, K., Sato, A., Iwata, M., (1998), Segmentation of page images using the area voronoi diagram, *Computer Vision and Image Understanding*, 70(3), 370-382.
11. Jung, J., Stachniss, C., Kim, C., (2017), Automatic room segmentation of 3d laser data using morphological processing, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(7), 206.
12. Zelinsky, A., Jarvis, R. A., Byrne, J. C., Yuta, S., (1993), Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot, *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-3)*, 533-538.
13. Akpınar, B., (2021), Performance of different SLAM algorithms for indoor and outdoor mapping applications, *Applied System Innovation*, 4(4), 101.
14. Github, Github HDL Graph SLAM. https://github.com/koide3/hdl_graph_slam.git
15. Koide, K., Miura, J., Menegatti, E., (2019), A portable three-dimensional LIDAR-based system for long-term and wide-area people behavior measurement, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2), 1729881419841532.
16. Arshad, S., Kim, G-W., (2021), Role of deep learning in loop closure detection for visual and lidar SLAM: A survey, *Sensors*, 21(4), 1243.
17. Xiong, B., Jiang, W., Li, D., Qi, M., (2021), Voxel grid-based fast registration of terrestrial point cloud, *Remote Sensing*, 13(10), 1905.



Goo Jun Ji

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interest is autonomous driving engineering.
E-mail: jiejg@kitech.re.kr



Myeong Gyu Lee

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, KOREA University of Technology and Education. His research interest is autonomous driving engineering.
E-mail: cobby6010@kitech.re.kr



Won Gun Kim

Dr. Kim is a principal researcher at Korea Institute of Industrial Technologies (KITECH). Ph.D. degrees in graduate school of automotive engineering from Seoul National University, Korea in 2012. His research interests are electric and autonomous vehicle, integrated driving.
E-mail: wgk@kitech.re.kr

굴착 영역 지형 데이터에 기반한 굴착 경로 계획

Excavation Trajectory Planning based on Site Terrain Data

임철환¹, 배장호², 박진우¹, 김선우¹, 홍대희^{3,#}
Chulwhan Im¹, Jangho Bae², Jinwoo Park¹, Seonwoo Kim¹, and Daehie Hong^{3,#}

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University)

² 경성대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kyung Sung University)

³ 고려대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Korea University)

Corresponding Author / E-mail: dhong@korea.ac.kr, TEL: +82-2-3290-3369

ORCID: 0000-0002-2773-2629

KEYWORDS: Autonomous excavator (자율형 굴착기), Excavation trajectory (굴착 경로), Rule-based algorithm (규칙 기반 알고리즘), Depth camera (깊이 감지 카메라)

Excavators are crucial heavy equipment on construction sites, performing diverse earthwork tasks. The construction worksite is experiencing a labor shortage due to an aging workforce. Training new operators requires significant time and resources. Furthermore, the construction environment is hazardous, with a higher rate of excavator-related accidents. Autonomous excavators offer an effective solution by reducing the need for operators in risky environments and substituting skilled workers. Trajectory planning algorithms are vital for autonomous excavators, with skilled operators' paths serving as important references. However, many studies do not adequately consider skilled operators' methods or the actual excavation environment. This paper introduced a rule-based algorithm for excavation trajectory planning using terrain data. Based on analysis results of skilled operators' paths, the proposed algorithm categorizes the excavation process into three stages, depending on the usage rate of the excavator's joints. Terrain data were derived by projecting point clouds from a stereo depth camera onto a side plane. The path was modified if the excavation volume exceeded a set limit to avoid excessive load. The algorithm was tested with a 30-ton excavator, demonstrating validation of operability and efficiency similar to that of skilled operators.

Manuscript received: July 9, 2024 / Revised: August 14, 2024 / Accepted: August 23, 2024

1. 서론

굴착기는 건설 산업에서 필수적인 장비 중 하나로, 본래 용도인 토사 굴착을 포함해 채석, 건물 해체, 지면 정리, 장애물 제거 등 여러 종류의 작업에서 사용된다. 그러나 현재 건설 산업은 숙련된 작업자가 부족한 현상이 발생하고 있다. 작업자들의 고령화와 숙련된 작업자를 학습시키는 데에 많은 시간과 자원이 필요하다는 점이 바로 그 이유이다[1]. 또한 건설 산업 환경은 장애물과 위험한 지형이 많으며, 굴착기에 탑승하는 작업자는 이러한 환경에 노출되어 있다. 2019년 미국에서는 건설 환경에서 1,102명의 사망자가 발생했다[2]. 특히 굴착기 관련 사고율은 건설 산업 평균보다 112% 높다[3]. 굴착기의 자동화는 이 문제들을 해결할 수 있는 훌륭한 해결책으로 자리 잡고 있다. 자율형

굴착기는 숙련된 작업자를 대체하고, 작업자들을 위험한 환경으로부터 벗어날 수 있도록 하며, 반복적인 작업으로 인한 치명적인 실수와 작업 능률의 감소 또한 방지할 수 있다[4]. 굴착 경로의 생성은 자율형 굴착기 연구의 기초이며, 자율형 굴착기의 경로는 높은 능률과 장비의 고장을 최소화하는 안전성을 동시에 가져야 한다[5]. 숙련된 작업자는 두 조건을 모두 만족하여 작업하기에, 숙련된 작업자의 경로는 이러한 연구의 훌륭한 참고자료로서 작용할 수 있다.

굴착 경로에 관한 연구들은 크게 3가지의 방향으로 진행되었으며, 각각 학습 기반 알고리즘(Learning-based), 최적화 기반 알고리즘(Optimization-based), 규칙 기반 알고리즘(Rule-based)으로 구분된다. 학습 기반 알고리즘을 사용한 연구의 경우, Kim 등[6]은 Multi-layer Perceptron (MLP)를 통해 숙련된 작업자 경로의

힘 패턴을 학습시켰고, Sandzimier 등[7]은 단순화시킨 굴착 경로에서 Gaussian Process Regression (GPR)을 사용하여 굴착을 종료하는 시점을 결정하도록 하였지만, 학습시킨 경로의 지형 조건이 매우 한정되어 있어 실제 굴착 환경에 적용하기에는 적합하지 않다. Guo 등[8]은 모방 학습(Imitation Learning, IL)을 통해 숙련자의 경로를 학습하고 지형 데이터를 입력받았지만, 실험실 단계의 검증만이 진행되었다.

최적화 기반 알고리즘을 사용한 연구의 경우, Kim 등[9]은 토사와 버킷 사이의 상호작용을 모델링하여 토크를 구한 뒤 각 조인트에 작용하는 토크와 시간을 최소화하는 최적화를 진행하였고, Zhao 등[10]은 숙련된 작업자가 굴착한 경로들을 통해 추출한 특징점들을 이으면서 시간과 Jerk가 최소화되는 경로를 찾았으나, 모두 계산 시간이 굴착 시간에 비해 길고 경로의 안정성이 낮다는 한계점이 존재한다.

규칙 기반 알고리즘을 사용한 Lee 등[11]은 4개의 굴착 단계를 숙련된 작업자 경로의 조인트 사용률에 따라 나눈 뒤 조인트 사용률에 따라 경로를 생성하였고, Du 등[12]은 퍼지 분류기를 통해 여러 단계를 넘어가는 조건을 만든 가상 작업자 모델을 만들어서 경로를 생성하였다. 규칙 기반의 알고리즘은 환경 조건들을 정하는 만큼에 한해서만 굴착 환경의 일반화가 가능하며 기존 연구들은 평평한 지형에서 굴착만을 가정하는 한계점을 가지고 있다. 하지만 경로를 이루는 규칙을 추가하고 조정하기에 가장 유리한 방식으로, 능률과 안정성을 가진 숙련된 작업자의 경로를 모방하기에는 가장 알맞은 방식이다.

본 논문에서는 지형 데이터를 활용하고 숙련된 작업자 경로의 특징을 추출한 규칙 기반의 굴착 경로 생성 알고리즘을 제안한다. 지형 데이터는 굴착 전 굴착기에 설치된 RGB-Depth 카메라를 사용하여 추출한다. 숙련된 작업자의 경로를 분석함으로써 경로 생성에 필요한 규칙들을 추출하였고, 지형 데이터를 입력 데이터로써 사용하여 지형에 관계없이 굴착 가능한 굴착 경로를 생성하였다. 굴착기의 안정성을 위해 지형 데이터를 사용하여 경로의 굴착 부피를 예상하고, 과도한 부하를 방지하기 위해 경로를 수정하는 알고리즘을 추가하였다. 결과적으로, 본 연구의 경로 생성 알고리즘은 지형에 관계없이 안전하고 높은 능률을 가진 경로를 생성함을 검증하였다. 본 연구의 알고리즘은 숙련된 작업자의 경로를 모방하여 규칙 기반 알고리즘의 장점을 유지하고 다양한 지형 조건에 대해서 굴착이 가능하게 하여 기존 연구들의 한계를 극복하였다.

2. 굴착 경로 생성 알고리즘

2.1 굴착 지형 데이터의 획득

자율형 굴착기 다양한 지형에서 최적의 굴착을 하기 위해서는 굴착 경로 알고리즘이 지형 데이터를 받을 수 있어야 한다. 본 알고리즘의 지형 데이터의 획득과 변형 과정을 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서는 다양한 시각적인 데이터를 얻기 위하여

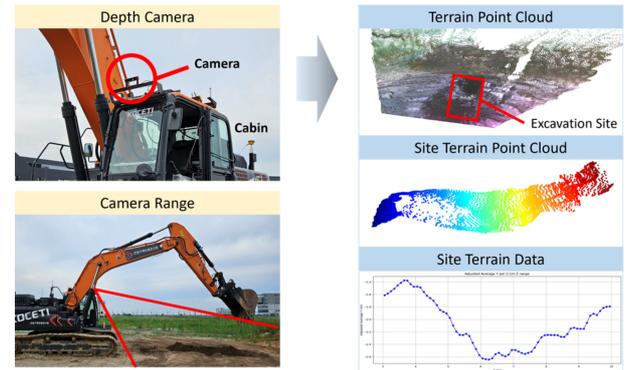


Fig. 1 Flowchart of obtaining site terrain data

RGB-Depth 카메라(Intel RealSense D455 Stereo Depth Camera)를 사용한다. 해당 카메라는 굴착기의 케빈 위에 전방 30° 아래를 바라보며 설치되었다. 설치된 RGB-D 카메라는 굴착 전 버킷을 약 2 m 들어올린 상태에서 지면을 촬영하였다. RGB-D 카메라를 통해 얻은 깊이 이미지는 카메라 좌표계에서의 Point Cloud로 변환하였다. 이후 굴착기의 굴착 경로 생성에 사용할 지형 데이터로써 사용하기 위해 좌표계를 붐 조인트의 좌표계로 변환시킨다. 좌표계의 변환 매트릭스는 식(1)과 같다.

$${}^{Boom}T_{Camera} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1.190 \\ 0 & \cos 30^\circ & \sin 30^\circ & 1.184 \\ 0 & \sin 30^\circ & -\cos 30^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

좌표계를 일치시킨 Point Cloud는 필요 없는 데이터를 제거하고 실질적인 굴착 영역 내부의 Point Cloud만 남기도록 한다. x축은 중앙에서 좌우로 버킷의 폭인 1.4 m만큼, y축으로는 일반적인 굴착 영역인 3-10 m, z 축으로는 촬영 자세에서 버킷을 지우기 위해 1 m 이하의 Point Cloud만을 남긴다.

지형 데이터를 사용하는 많은 연구에서는 지형 데이터를 측면에 투영시킨 뒤 평균 높이를 구하여 알고리즘에 적용하였다[6,8]. 본 연구에서도 절삭된 포인트 클라우드를 x축 성분을 제거함으로써 yz 평면으로 투영하였다. 그 뒤 y축의 범위 7 m를 0.1 m 간격으로 나누어 각 구간 내 점들의 평균 높이를 구하였다. 카메라의 각도에 의해 점이 없어 비어 있는 간격이 있는 경우 선형 보간을 통해 데이터를 채우도록 하였다. 모든 간격의 깊이 데이터를 구하면 이를 지형 데이터로서 경로 생성 알고리즘에 사용하였다.

2.2 숙련된 작업자의 굴착 특징 분석

숙련된 작업자들은 오랜 시간 동안 반복적으로 높은 능률과 지형에 관계없는 작업 안정성을 가진 굴착이 가능하다. 따라서 숙련된 작업자들의 굴착 경로로부터 공통된 규칙을 얻음으로써 규칙 기반 알고리즘의 좋은 자료를 얻을 수 있다고 판단할 수 있다. 실제로 많은 연구에서는 굴착 경로를 지면을 뚫고, 끌고, 들어올리는 3개의 단계로 나누어 분석하였고[5,7,11], 숙련된



Fig. 2 Three phases of excavation trajectory

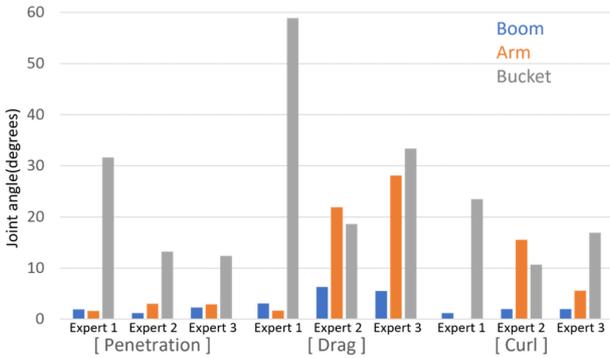


Fig. 3 Three experts' joint usages for each phase

작업자들과의 인터뷰에서 3단계의 굴착에 익숙해지는 것이 기초가 됨을 확인하였다. 하지만 단계를 나누는 것 이외에 경로를 구성하게 될 여러 구속 조건이 필요하다. 본 연구에서는 숙련된 굴착기 작업자들의 경로로부터 특징을 추출하여 숙련자들의 높은 능력과 안정성을 가진 경로를 모방하고자 하였다.

굴착기는 본체인 케빈을 제외하고 붐, 암, 버킷으로 명명된 3개의 링크와 각 링크를 잇는 회전 조인트로 이루어진 3R Manipulator의 형태를 가진다. Lee 등[11]에서는 숙련자들의 경로를 붐, 암, 버킷 조인트의 회전 각도를 조인트 사용량으로 정의하고 각 조인트의 사용량에 따라 4단계, 들어올리는 Up을 제외하면 3단계로 나누었다. 실제로 조인트의 사용량에 따라 구간이 나누는 것을 대략적으로 확인이 가능하였다. 하지만 해당 연구는 단순화가 많이 적용되어 있고, 평평한 지형에서만 적용이 가능하다는 한계점이 명확하다. 본 연구에서는 이 분석 방식만을 가져와 실험에 참여한 숙련된 작업자들의 경로를 분석하였다. 본 연구에서는 Penetration, Drag, Curl의 3단계로 명명하며, Fig. 2처럼 나타나게 된다. 이에 따라 굴착 경로는 지형을 버킷으로 뚫고 들어가는 Penetration, 버킷을 끌어 직선에 가깝게 흙을 담은 Drag, 버킷을 흙과 함께 지면 위로 들어올리는 Curl 단계로 나누어지며, 각 단계는 조인트 사용량을 통해서 구분이 가능하다. 10년 이상의 경력을 가진 숙련자 세 명의 경로를 조인트의 사용량에 따라 나눈 결과, 평균적인 조인트 사용량은 Fig. 3처럼 나타났다. 첫번째 숙련자는 버킷만을 사용하는 굴착 스타일을 보여주었고, 두번째와 세번째 숙련자의 경우 암 또한 사용하는 비슷한 경향을 보였지만 Curl 단계에서 암의 사용이 차이가 났다.

숙련자들과의 인터뷰와 경로 분석을 통해 다음과 같은 특징들을 추출하였다. 1) Penetration과 Curl 단계는 버킷을 주로 사용하였고, Drag에서는 대부분 암과 버킷을 비슷한 비율로 사용하였다. 2) Drag 단계에서는 굴착 목적에 따라 다르지만 일반적

으로 높이를 일정하게 굴착하는 작업이 많다. 3) 붐의 경우 굴착 깊이를 보조하는 역할이다.

2.3 기초 생성 알고리즘

본 연구는 숙련된 작업자들의 경로로부터 얻은 특징들을 이용하여 규칙 기반의 경로 생성 알고리즘을 완성하였다. 각 단계에 대한 특징은 수학적으로 표현할 수 있으며, 경로에 대한 조건을 추가함으로써 굴착경로를 생성할 수 있다. 이 알고리즘에 지형 데이터를 적용 가능하도록 함으로서 실제 환경에서 지형에 관계없이 굴착이 가능한 알고리즘을 만들고자 한다.

Penetration 단계는 시작점 P_1 에서 Drag 단계의 시작점 P_2 까지의 경로를 생성하는 단계이다. 이 단계에서는 버킷의 각도를 음수로 고정하여 이후 단계에서 양수 해를 배제했고 이를 통해 역기구학적으로 문제가 없도록 하였다. 붐 각도는 지형 데이터의 깊이와 경사도에 따라 조정되며, 암 각도는 붐과 버킷 각도가 정해진 후 역기구학을 통해 계산하였다.

숙련된 작업자들의 경로를 분석한 결과, 최저 깊이는 0.3-0.6 m임을 확인하였다. 이에 따라 붐 조인트의 회전을 통해 지면의 경사에 의한 깊이 차이를 보정하였고, 약 1 m 거리의 지면 평균 깊이를 기준으로 y_2 를 0.4 m 깊이로 지정하였다. 이를 통해 P_2 의 좌표와 Penetration 경로, 그에 따른 조인트 각도들을 결정하였다.

Drag 단계는 P_2 에서 Curl 단계의 시작점 P_3 까지의 경로를 포함하는 단계이다. 이 단계에서는 직선 움직임을 구현하여 버킷에 토사를 채우는 작업을 수행하였다. 붐 각도는 굴착이 진행될수록 버킷 팁의 높이가 낮아졌다가 다시 올라오는 경향을 보정하기 위해 각도가 증가 후 감소하는 것을 구현하였다. 숙련자들의 작업 경로를 분석한 결과, 붐 각도는 2-6° 증가 후 감소하며 이를 통해 암 조인트의 높이가 최대 0.15-0.5 m 정도 보정되는 것을 확인하였고 이에 따라 수치를 조정하였다. 암과 버킷 각도는 직선 경로의 점들을 결정한 후 역기구학으로 계산하였다.

Curl 단계는 P_3 에서 끝점 P_4 까지의 경로로, 토사를 끌어 올리는 작업을 수행하는 단계이다. 이 단계에서는 버킷 조인트만을 사용하여 이미 채워진 버킷을 들어올리는 간단한 경로를 유지하였다. 시작점 P_1 과 P_4 의 x축 거리 차이는 굴착 길이로 정의되며, 최대 4.5 m까지로 설정하였다.

본 알고리즘의 경로는 굴착 작업에 용이한 속도와 가감속을 위해 Trapezoidal(사다리꼴) 속도 프로파일의 궤적을 따르도록 적용하였다. 먼저 시작점과 끝점의 조인트 각도를 구하고, 그중 가장 큰 각도 변화량에 정해진 최대 한계 조인트 각속도 V_{max} 를 나누어 시간을 결정하였다. Penetration과 Curl 단계의 경로에서는 암, 버킷, 붐 조인트의 각속도가 Trapezoidal 속도 프로파일을 따르도록 설정하였다. 다만 Drag 단계에서는 직선 경로 위의 직선 속도가 Trapezoidal 속도 프로파일을 따르도록 하였으나, 암 링크가 수직에 가까울 때 버킷이 빠르게 움직이는 현상이 발생하여 계산식에서 V_{max} 를 반절로 적용하였다. 모든 Trapezoidal 속도 프로파일은 가속, 등속, 감속 시간이 동일하다

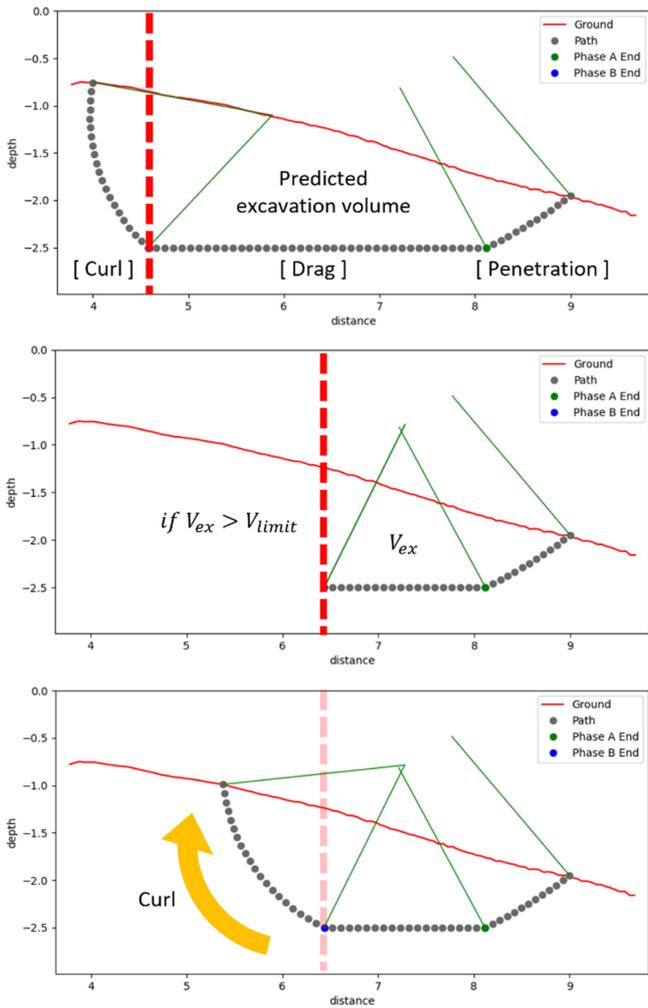


Fig. 4 Trajectory modification by volume limit

록 설정하였다. 속도 프로파일을 통해 굴착 경로를 0.1초마다 이동해야 하는 Waypoint 들의 집합으로 변형할 수 있다.

2.4 제한 부피에 의한 변형 알고리즘

굴착기는 굴착 과정에서 진입 각도나 지형, 토사의 상태에 따라 버켓 앞의 토사에 과도한 부하가 발생하며, 이는 자율형 굴착기의 Tip-over 현상을 비롯한 사고나 장치의 고장을 초래할 수 있다. 과도한 부하를 방지하기 위해 Fig. 4와 같이 굴착 경로의 부피를 미리 계산하고, 굴착되는 토사의 부피가 버켓의 크기에 비해 과하게 크게 계산될 경우 경로를 수정하는 알고리즘을 추가하였다. 지형 데이터와 경로 데이터 사이의 높이 차를 적분하는 방식을 사용하여 시작점으로부터 각 Waypoint까지 지형과 경로 사이의 부피를 계산한다. 만약 Curl 단계가 시작되는 P_3 이전에 미리 설정해 둔 부피 제한에 도달할 경우, 그 Waypoint를 Curl 단계의 새로운 시작점 P_3' 으로 Curl 경로를 생성하게 된다. 새로운 P_4 의 경우 P_3' 으로부터 버켓 조인트를 회전시켜 지면에 닿는 점으로 결정한다. 이후 각 경로에서 Trapezoidal 속도 프로파일을 재적용 시킨다.

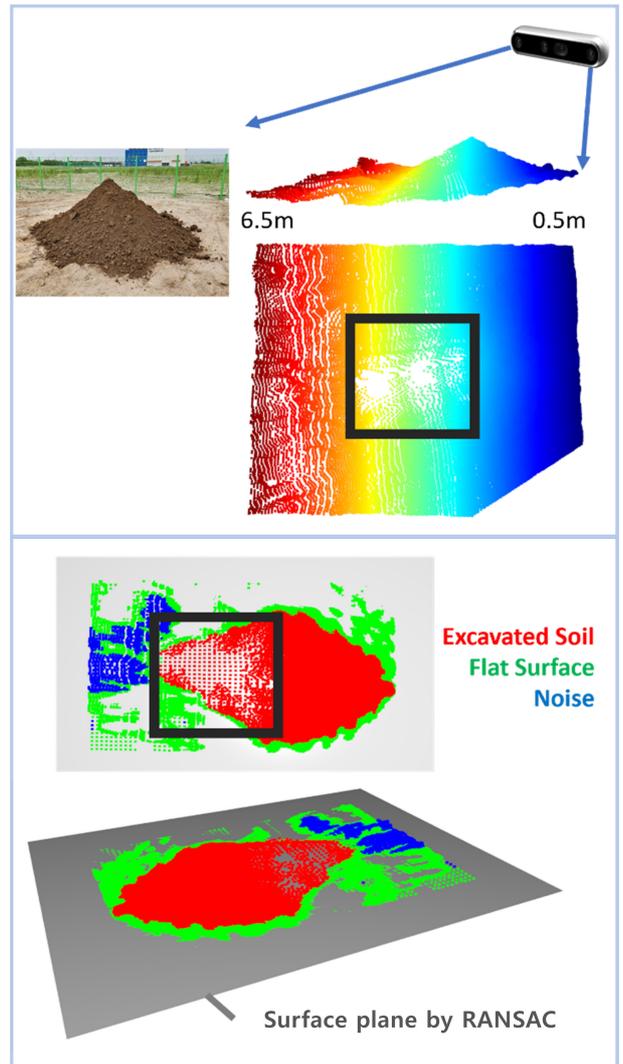


Fig. 5 Excavation volume calculation

3. 실험

3.1 실험 과정

본 연구에서는 군산의 건설기계부품연구원에 있는 지능형 30톤 굴착기를 사용하였다. 먼저 굴착 위치를 바라본 상태에서 RGB-Depth 카메라를 사용하여 지형 데이터를 수집하고, 이 데이터를 토대로 굴착 경로 생성과 실제 굴착이 진행되었다. 굴착된 토사는 평탄화시킨 지면 중 정해진 한 위치에 모아 하차하였다. 같은 위치를 3번 굴착 후 평탄화시킴으로써 일반적인 산업 현장과 비슷한 굴착을 시뮬레이션하였고, 평지와 1,2회 파인 지형에서 굴착한 데이터를 모두 사용함으로써 지형의 다양성을 주고자 하였고 총 15번의 굴착이 진행되었다.

3.2 굴착 토사 부피 측정

굴착기의 능력을 계산하기 위해서는 굴착한 토사의 부피를 측정해야 한다. Fig. 5는 본 연구에서 굴착 토사의 부피를 측정하는 방식을 소개한다. 먼저 뎀스 카메라를 사용하여 토사터미를

촬영하였다. 토사는 최대한 같은 위치에 하차하여 그 뒤 RANSAC (Random Sample Consensus) 알고리즘을 통해 평평한 지면을 구하였고, DBSCAN (Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise) 알고리즘을 통해 굴착 토사와 그 외 노이즈를 구분하였다. 굴착 토사에서 카메라의 각도에 의해 점이 비어 있는 그리드는 선형 보간을 통해 채워 넣었고, 각 그리드의 높이를 적분하여 굴착 부피를 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 알고리즘 경로와 실제 경로

Fig. 6은 생성된 굴착 경로와 실제 경로를 시각화한 자료이다. 굴착기는 알고리즘에 의해 생성된 경로를 대체로 따라가는 경향을 보였지만, 완벽히 해당 경로를 추적하지는 않았다. Fig. 7에서 조인트 각도를 확인해 본 결과, 굴착기 제어에서 움직임 지연이 생기는 것을 확인하였다. 움직임 지연은 굴착 중이 아닌 일반적인 지면 위에서의 움직임에도 존재하였기에, 완벽히 정확한 제어는 불가능하다는 것을 확인하였다. 지면 위에서의 움직임 지연은 붐, 암, 버킷 순서로 0.5, 0.4, 0.2초의 지연이 발생하였다. 굴착 중에 제어 지연이 더 커지는 경우가 있는지 확인해 본 결과, 버킷의 최대 움직임 지연이 0.6초로 간혹 0.1초가량 더 길어지는 경우가 있음을 확인하였다. 이 추가 지연은 Penetration 단계에서는 발생하지 않고, 버킷에 흙의 부하가 커지기 시작하는 Drag 단계와 Curl 단계에서만 발생하였다.

4.2 알고리즘 경로의 구동성 검증

4.2.1 버킷 밀면과 경로의 충돌 여부

움직임 지연이 본 알고리즘의 문제인지 확인하기 위해 두 가지의 조건들을 검증하였다. 먼저 굴착 경로를 추적할 때 버킷 밀면과의 충돌이 존재하는지 확인하였다. 버킷의 밀면은 버킷의 앞면과 44.4°를 이루는 모양이기에 굴착 경로와 버킷 사이의 각도가 너무 클 시 버킷의 밀면이 굴착 중 파지 않은 토사와 만나게 되어 굴착이 불가능한 경로가 된다. Fig. 8은 경로와 버킷 밀면의 각도를 나타낸 그래프로, 0° 이상일 때 충돌이 없다고 확신할 수 있다. 검증 결과 Drag 단계에서 0.9°로 가까스로 충돌을 피하는 경우가 존재하였지만 Drag 단계의 가장 끝에서 발생하였고, 충돌은 전혀 존재하지 않는 것을 확인하였다.

4.2.2 버킷 최고 각속도

굴착기 조인트들의 각속도는 버킷의 경우가 언제나 가장 빨랐다. 굴착작업 외의 작업에서는 최대 초당 30-40°까지 증가하고, 굴착기 조인트의 실질적인 최대 제어 각속도는 약 초당 60° 정도인 것으로 확인하였다. 따라서 굴착 중 버킷 조인트의 각속도는 이 수치를 넘지 않아야 한다. 본 알고리즘의 버킷 각속도는 Fig. 9에 나타나듯 한계치인 40°를 순간적으로 찍는 모습을 보이기는 했지만, 그 외의 경우에 모두 해당 속도들을 넘지 않는

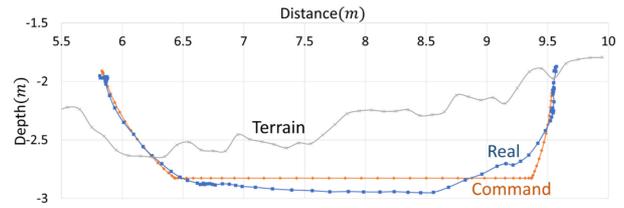


Fig. 6 Trajectory from algorithm and real trajectory

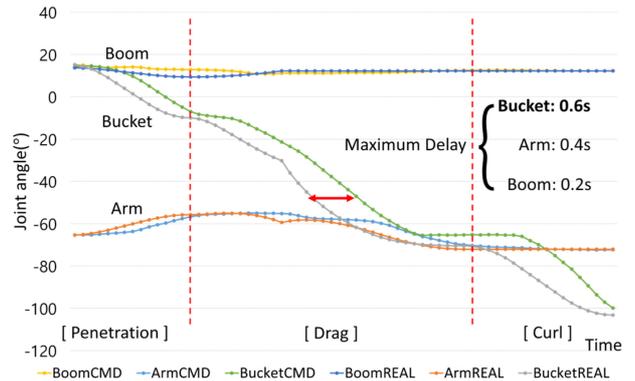


Fig. 7 Joint angle trajectory from algorithm and real trajectory

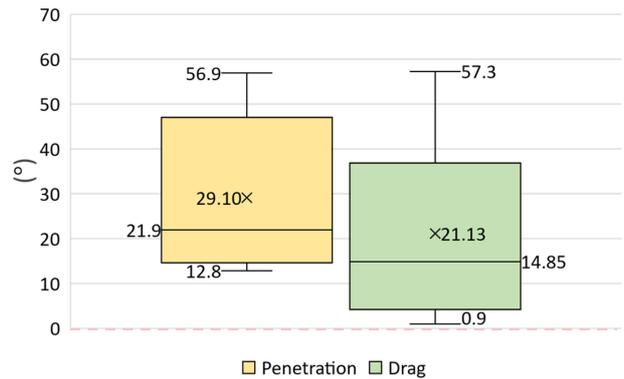


Fig. 8 Angle between trajectory and bucket floor

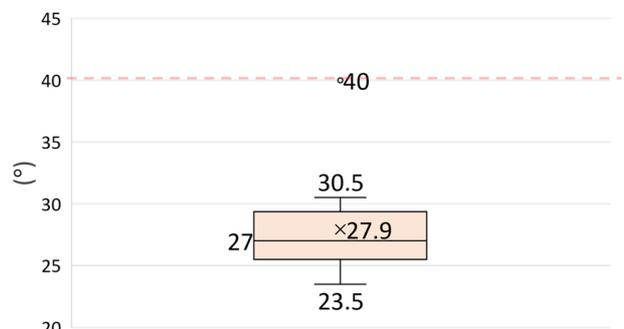


Fig. 9 Maximum angular velocity of bucket joint

모습을 보였다. 이 결과는 조건을 충족하기는 하지만, 굴착 시 토사의 부하 때문에 움직임 지연이 더 길어질 수 있다는 점을 고려하여 좀 더 낮은 속도를 추적하도록 한다면 더 나은 경로 추적 정확도를 가지게 될 것으로 판단된다.

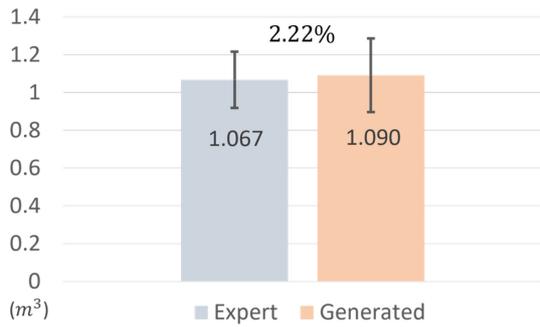


Fig. 10 Excavation volume comparison

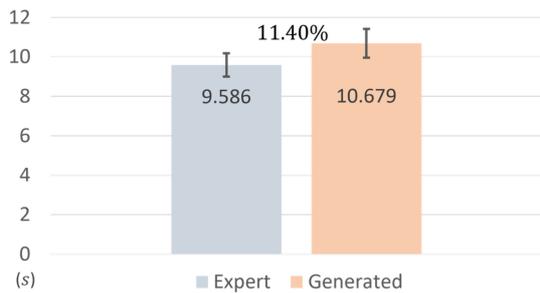


Fig. 11 Excavation time comparison

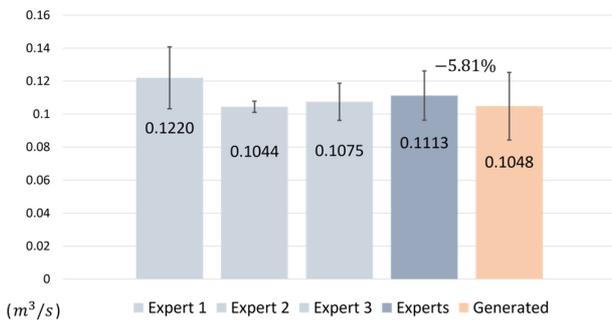


Fig. 12 Excavation efficiency comparison

이로써 본 연구의 알고리즘이 밀면이 경로와 충돌하지 않고, 일반적인 작동 각속도 범위 내에서 작동하는 안전 요구 조건을 만족하는 경로를 생성함을 검증하였다.

4.3 숙련된 작업자와의 능력 비교

Figs. 10과 11이 보여주듯이, 굴착 부피의 경우 본 알고리즘이 약 2.22% 높은 결과를 보였다. 이는 본 알고리즘에서 Curl 단계가 제한 부피 이후로 버킷을 들어올리게 되면서 더 많이 굴착하게 되기 때문이라고 예상된다. 다만 굴착 시간의 경우 약 11.4% 더 긴 결과를 보였다.

Fig. 12는 굴착 부피를 시간으로 나눈 능력을 나타낸 그래프이다. 본 알고리즘은 모두 평균을 낸 능력에 비해서 약 5.81% 낮은 능력을 보였다. 보다 나은 비교를 위해 P-value 0.05에 따른 T-test를 진행한 결과, 숙련된 작업자에 비해 통계적으로 낮은 수치라고 보기 힘들다는 가설이 수용되었다. 이는 본 연구의 알고리즘이 충분히 숙련된 작업자와 비슷한 능력을 보인다는 것을 검증한다.

5. 결론

본 연구에서는 지형 데이터를 이용하고 숙련된 작업자들의 작업을 모방한 굴착 경로를 생성하고자 하였다. 지형 데이터를 위해서는 RGB-D Camera를 사용하였다. 지형을 촬영하여 얻은 Point Cloud를 사용하여 0.1 m 단위로 평균 높이 데이터를 얻었다. 숙련된 작업자들의 경로를 모방하기 위해 조인트의 사용률과 특징을 분석하여 규칙 기반의 굴착 경로 알고리즘을 제안하였다.

제안한 알고리즘의 검증을 위해 실제 크기의 지능형 굴착기의 굴착 작업에 적용하였다. 부피는 RANSAC과 DBSCAN 알고리즘을 사용하여 토사 더미의 부피를 측정하였다. 실험 결과 실제 환경에서 굴착 경로가 생성되고 굴착기가 경로를 성공적으로 추적하는 것을 확인하였다. 본 알고리즘의 굴착 경로는 버킷의 밀면과 경로의 충돌이 없고, 일반적인 최대 각속도를 초과하지 않는 조건을 만족하여 적용 가능성과 안정성을 가졌음을 검증하였다. 숙련된 작업자와의 비교에서는 P-value 0.05의 T-test 검증에서 통계적으로 숙련된 작업자와 차이가 없는 굴착 능력을 보여주며 숙련된 작업자에게 못지 않은 능력의 경로를 생성함을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 경로 생성 알고리즘은 일반적인 실제 굴착 현장에서 사용 가능함을 확인하였다. 본 연구는 숙련된 작업자를 대체함으로써 인력 부족을 해결하고 작업 인원들을 위험한 환경으로부터 벗어나게 함으로서 건설 현장에서의 안정성을 향상시킬 것으로 기대된다.

다만 본 연구의 알고리즘에서 버킷의 속도가 빠를 경우 굴착기의 추적에서 지연 시간이 소량 증가하는 것을 확인하였다. 이는 굴착 경로 알고리즘에서 버킷의 각속도가 빠를 경우 전체 조인트들의 각속도를 감소시키는 방식으로 해결될 것으로 판단되며 추가적인 검증이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No. 20010776, 토공작업 자동화를 위한 협업 운영 시스템 및 무인 굴착기 기술 개발).

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(3세부 디지털기반 도로 건설장비 자동화 기술 개발, No. 20SMIP-A157130-01).

REFERENCES

1. Yao, Z. W., Zhao, S. C., Tan, X. D., Wei, W., Wang, Y., (2023), Real-time task-oriented continuous digging trajectory planning for excavator arms, Automation in Construction, 152, 104916.
2. Brown, S., Harris, W., Brooks, R. D., Dong, X. S., (2021), Fatal and nonfatal struck-by injuries in the construction industry, 2011-

- 2019, CPWR - The Center for Construction Research and Training; National Institute for Occupational Safety and Health.
3. Yuan, C., Li, S., Cai, H., (2017), Vision-based excavator detection and tracking using hybrid kinematic shapes and key nodes, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(1), 04016038.
 4. Feng, C., Shen, Y., Wang, J., Wang, Q., Suo, Z., Su, F., (2024), Task-unit based trajectory generation for excavators utilizing expert operator skills, *Automation in Construction*, 158, 105247.
 5. Yang, Y., Pan, J., Long, P., Song, X., Zhang, L., (2020), Time variable minimum torque trajectory optimization for autonomous excavator. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006>
 6. Kim, C. M., (2020), Trajectory generation for autonomous excavators based on expert operator forcing pattern, M.Sc. Thesis, Seoul National University.
 7. Sandzimier, R. J., Asada, H. H., (2020), A data-driven approach to prediction and optimal bucket-filling control for autonomous excavators, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2682-2689.
 8. Guo, Q., Ye, Z., Wang, L., Zhang, L., (2022), Imitation learning and model integrated excavator trajectory planning, 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 5737-5743.
 9. Kim, Y. B., Ha, J., Kang, H., Kim, P. Y., Park, J., Park, F. C., (2013), Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavator, *Automation in Construction*, 35, 568-578.
 10. Zhao, J., Hu, Y., Liu, C., Tian, M., Xia, X., (2022), Spline-based optimal trajectory generation for autonomous excavator, *Machines*, 10(7), 538.
 11. Lee, C. S., (2014), Efficient path generation and position control for intelligent excavator, M.Sc. Thesis, Korea University.
 12. Du, Y., Dorneich, M. C., Steward, B., (2018), Modeling expertise and adaptability in virtual operator models, *Automation in Construction*, 90, 223-234.



Chulwhan Im

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea University. His research interests include robotics and vision.

E-mail: draknir24@korea.ac.kr



Jangho Bae

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungsoong University. His research interests include design and control of hydraulic robotic system, physical human robot interaction, humanrobot collaboration system, application of artificial intelligence in field robotics and autonomous car system.

E-mail: janghobae@ks.as.kr



Jinwoo Park

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea University. His research interests include biomimetics robot and ERCP.

E-mail: derekdr@naver.com



Seonwoo Kim

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea University. His research interests include A.I.

E-mail: whimoon1826@gmail.com



Daehie Hong

Professor in the school of Mechanical Engineering, Korea University. His research interests include manufacturing automation, precision machine design and control, medical robotics and field robotics.

E-mail: dhhong@korea.ac.kr

직접에너지적층 공정과 P21, H13 분말을 이용한 SKD61 모재에 대한 보수 공정에 관한 연구

Study on Repair of SKD 61 Using Directed Energy Deposition with H13 and P21 Powders

윤빛나¹, 고민성^{1,2}, 강효정¹, 심도식^{1,2,#}

Bit-na Yun¹, Min-seong Ko^{1,2}, Hyo-jeong Kang¹, and Do-Sik Shim^{1,2,#}

¹ 국립한국해양대학교 해양신소재융합공학과 (Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

² 국립한국해양대학교 해양신재생에너지융합전공 (Interdisciplinary Major of Ocean Renewable Energy Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

Corresponding Author / E-mail: think@kmou.ac.kr, TEL: +82-10-4844-4455

ORCID: 0000-0002-5133-1585

KEYWORDS: Directed energy deposition (직접에너지적층), Repair (보수), Microstructure (미세조직), Microhardness (미세경도), Tensile test (인장시험), Fracture (파단)

In this study, we investigated characteristics and mechanical properties of SKD61 repaired using the direct energy deposition (DED) process. Mechanical properties of the repaired product can vary depending on the base material and powder used in the DED process. To prepare for DED repairing for a damaged part, we conducted experiments using two different powders (H13 and P21). Experimental results showed that both powders were deposited without defects in the surface or interface between the deposited zone and the substrate. Hardness measurements indicated that the repaired region of the Repaired-H13 sample exhibited higher hardness than the base material, while the Repaired-P21 sample showed a sharp increase in hardness in the heat-affected zone (HAZ). Additionally, tensile test results revealed that the Repaired-H13 sample had lower tensile strength and elongation than the base material, whereas the Repaired-P21 sample demonstrated higher tensile strength and yield strength with a higher elongation than the Repaired-H13 sample. In case of Repaired-H13, it was confirmed that interfacial crack occurred due to a high hardness difference between the repaired part and the substrate.

Manuscript received: June 14, 2024 / Revised: August 9, 2024 / Accepted: August 16, 2024

1. 서론

금형이나 기계 부품은 사용 중에 과도한 하중, 마모, 피로 등에 의해 손상이 발생할 수 있으며, 이러한 경우 새로운 부품으로 교체하는 대신 비용 및 제작 시간 등을 고려하여 보수를 통해 재사용하는 경우가 있다. 기존에는 용접이나 경납땀과 같은 공정들이 적용되어 왔으나, 이러한 방법은 열영향부가 두껍게 형성되어 기계적 성질의 저하가 불가피하다.

이러한 기존 공정(용접, 경납땀)의 문제점을 극복하기 위해, 최근에는 맞춤형 설계가 가능하고, 절삭 방식 보다 경제적이며 복잡 형상 구현이 가능한 AM (Additive Manufacturing) 기술을

활용하는 시도가 점차 증가하고 있는 추세이다. AM은 3차원의 복잡한 부품을 절삭이 아닌 소재를 Layer-by-layer 방식으로 적층하여 제조하는 공정이다. 금속을 이용한 대표적 AM 기술인 직접에너지적층(Directed Energy Deposition, DED) 공정은 부품 표면에 이중소재를 적층하여 기계적 특성을 강화시키는 하드페이싱(Hardfacing), 부품의 일부 형상을 변경하는 리모델링(Remodeling), 그리고 손상된 부품의 보수(Repair) 등을 위한 용도로 활용되고 있다[1-4].

특히, 기존의 용접을 이용한 보수 시에는 넓은 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)에 의한 기계적 성질 저하와 얼룩무늬 발생 등과 같은 문제점이 있었다. 하지만, 레이저를 열원으로 하는

DED (Laser-DED) 공정은 높은 에너지 밀도를 가지는 레이저를 사용하기 때문에 열영향부를 최소화할 수 있다. 또한, 국부적인 영역에 적층이 가능하며, 제품의 크기에 제한이 없다는 장점을 가지고 있다[5].

이러한 배경으로 국내외에서 DED 공정을 이용한 보수 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Oh 등은 그루브 형상이 기계적 특성에 미치는 효과에 관한 연구를 진행하였다[6]. 그 결과, 보수를 위한 그루브의 경사진 경계면에서 크랙(Crack)이 생성됨을 확인하였으며, 이로부터 파단이 시작됨을 밝혔다. 또한, 보수 그루브의 형상에 따른 크랙 크기를 분석하였으며, 그 결과 사다리꼴 형상에 비해 타원 형상이나 캡슐 형상에서 크랙의 크기가 작은 것을 밝혔다. 또한, Shim 등은 보수폭을 변화시켜, 보수 특성을 관찰하였다[7]. 그 결과, 보수폭이 커질수록 강도는 감소하였지만, 연신율은 크게 증가함을 밝혔다. 또한, 기존의 전통적인 주조, 단조 등으로 제조된 부품 외에도 AM으로 제조된 부품에 대한 보수 연구에 관한 관심도 높아지고 있다. 이와 관련하여, Shim 등[8]은 또 다른 금속 적층 제조 기술 중의 하나인 PBF (Powder Bed Fusion) 공정으로 제조된 소재를 그루브 깊이에 따라 보수하였으며, 적층 특성과 미세조직 등을 관찰하였다.

한편, DED를 활용한 보수 과정에서 발생하는 균열이나 박리(Delamination) 등의 결함은 적층 종료 후 냉각 과정에서 발생하는 것이 일반적이다. 용융된 재료가 급속 응고되는 과정에서 발생하는 열응력(Thermal Stress)에 의해 균열 결함이 발생하며 [8,9], 이러한 균열을 제거하기 위해 다양한 방법들이 시도되었다. Liu 등[10]은 반응 표면분석법(Response Surface Method)을 통해 공정조건을 최적화하였고, 예열 공정(Preheating)을 적용하여 균열 발생을 억제하고자 하였다.

본 연구에서는 금형강 소재인 SKD61를 DED 보수함에 있어서, 상용화된 금형강 분말로 따른 보수 특성을 관찰하고, 보수 영역에서의 결함 및 미세조직을 분석하였다. 또한, 이종 및 동종소재 분말 사용에 따른 계면 특성을 관찰하고, 인장시험을 통해 보수된 소재의 인장 및 파단 특성을 알아보고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 재료

본 연구에서는 열간 금형 공구강인 SKD61을 보수를 위한 모재로 사용되었으며, 보수용 금속 분말로 열간 공구강인 H13과 사출 금형강인 P21을 사용하였다. H13 분말은 SKD61 소재와 거의 동일한 화학적 조성을 가지고 있으므로, SKD61의 동종소재 분말로 선정되었다[11]. 보수에 사용된 분말은 가스아토마이징(Gas Atomizing)으로 제작된 구형 분말이며, H13의 분말 직경은 50-150 μm 이고, P21은 평균 120 μm 이다(Fig. 1). 실험에 사용된 금속 분말과 모재에 대한 화학적 조성비는 Table 1에 나타난 바와 같다. 준비된 모재는 열처리되었으며, 평균 HRC35의

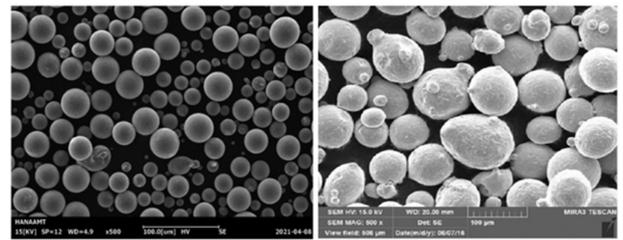


Fig. 1 SEM images of the powders for H13 (left) and P21 (right)

Table 1 Chemical composition of materials [wt%]

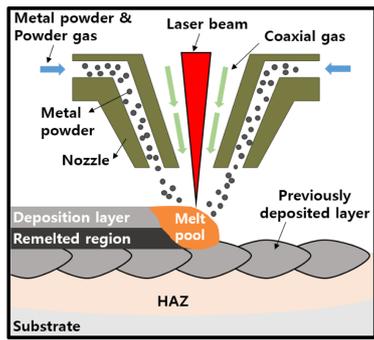
Element	Substrate (SKD61)	Powder (H13)	Powder (P21)
C	0.32-0.42	0.32-0.45	0.20
Si	0.80-1.20	0.80-1.25	0.30
Mn	0.50	0.20-0.60	0.30
P	0.030	0.030	0.030
S	0.030	0.030	0.030
Ni	-	0.75	4.10
Cr	4.50-5.50	4.75-5.50	0.30
Mo	1.00-1.50	1.10-1.75	-
V	0.80-1.20	0.80-1.20	0.20
Cu	-	-	-
Al	-	-	1.15

경도를 가진다. 모재는 가로, 세로, 그리고 높이가 각각 150, 70, 그리고 10 mm 인 직육면체이다.

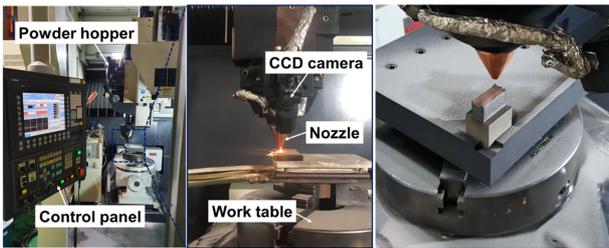
2.2 직접에너지적층(Directed Energy Deposition)

대표적 금속 적층 제조 방식 중 하나인 Laser-DED는 모재 표면에 분말을 공급하고 레이저를 조사하여 모재와 분말을 동시에 녹여서 적층하는 방식이다(Fig. 2). 레이저 빔에 의해서 용융된 소재는 빠르게 응고하여 적층 비드를 형성하고, 이를 특정 경로를 따라 이동시켜 하나의 적층 면을 만들고, 이러한 과정을 반복하여 각 레이어를 높이 방향으로 적층시키게 된다. DED 공정에서는 레이저 출력, 레이저 빔(Beam) 직경, 분말 공급 속도(Powder Feed Rate), 그리고 레이저 이송 속도(Scanning Speed) 등 다양한 공정 변수가 적층재의 정밀도, 표면 상태, 경도, 그리고 미세 구조 등과 같은 특성에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 DED 적층 실험을 위해 DMT (Direct Metal Tooling) MX3 (Insstek Co., Korea)가 사용되었다. MX3는 MX-CAM 소프트웨어로 작동하는 5 축 NC 장치이며, 4 kW CO₂ 레이저 시스템을 포함한다. 3 개의 분말 호퍼와 함께, 분말 및 가스를 공급하기 위한 노즐로 구성된 분말 공급 시스템이 있다. 공정 중 산화를 방지하고, 분말 공급을 위해 아르곤(Ar) 가스가 사용되었다. 분말 공급 장치가 설치된 헤드에 광학 시스템이 설치되었으며, 모재 표면에서 9 mm 떨어진 직경 1.0 mm 노즐을 사용하여 레이저 빔과 분말을 함께 공급한다. Table 2에는 DED 보수 공정에 사용된 주요 공정 변수를 정리하였다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the laser-DED and (b) DMT MX3 machine used for experiments

Table 2 Parameters for DED Processing

Laser powers	830 W
Power feed rates	3.5 g/min
Scanning speed	850 mm/min
Coaxial gas flows	8 L/min
Powder gas flows rate	2.5 L/min

2.3 시편 제작 및 전처리

Fig. 3은 파손된 부품의 보수 과정을 보여준다. 부품이 과도한 하중, 마모, 피로 등에 의해 손상(Damage)이 발생할 경우(1), 손상된 영역 주변을 원형 그루브 형상으로 기계가공한 후(2), DED를 이용하여 보수 적층을 실시하고(3), 마지막으로 연삭 공정으로 표면 후가공을 실시한다. 본 연구에서 가정된 원형 그루브(R14)의 높이는 1 mm이며, 폭은 14.42 mm이다.

또한, 보수된 소재의 기계적 특성을 평가하기 위해 제작되는 인장시험편의 제작 모식도는 Fig. 4에 나타난 바와 같다. DED 공정으로 보수된 모재를 와이어 절단하여 인장시험편을 추출하게 되는데, 이때 인장 시험편의 중앙에 보수부가 위치하도록 하여 보수부에서의 결합 특성을 알아볼 수 있도록 하였다. 인장 시험은 단축인장시험기(Instron 4469)를 사용하였으며, 인장 속도는 1 mm/min으로 설정하였다. 인장 시험 후에는 주사전자현미경(SEM, TESCAN, MIRA 3)을 이용하여 시편의 파단면을 관찰하였다.

보수부의 미세조직 등을 관찰하기 위해 #600-#2000의 SiC 연마지와 3, 1 μm 연마천을 사용하여 시편의 표면을 연마하였다. 이후, H13 분말로 보수한 시편은 H₂O 10, HCl 30, H₂O₂ 1.5 mL를

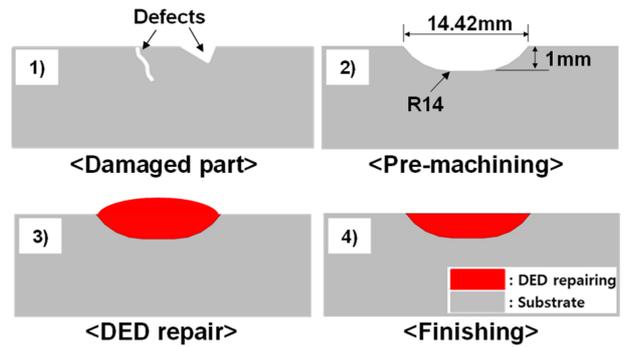


Fig. 3 Repairing procedures for damaged parts and dimensions of pre-machined groove

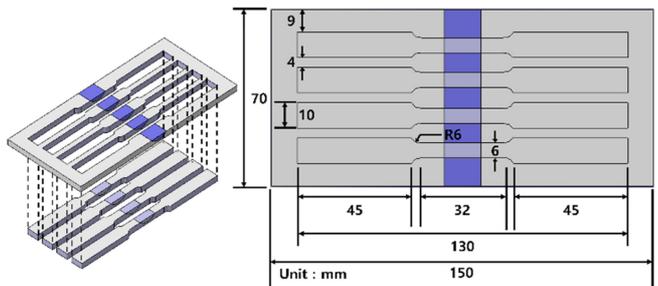
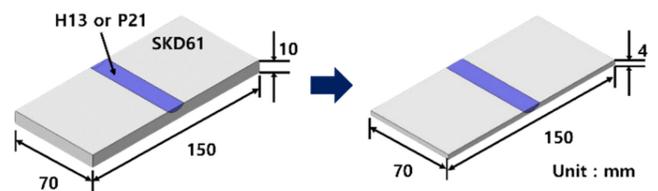


Fig. 4 Preparation of tensile specimens from repaired substrate

혼합한 용액을 이용하여 에칭하였고, P21 분말로 보수한 시편은 Ethanol(C₂H₆O)과 질산(HNO₃)을 97:3 비율로 혼합한 용액을 이용하여 에칭하였다. 에칭된 단면의 미세조직과 균열은 고분해능 광학 3D 표면 분석기와 SEM을 이용하여 정밀 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 균열 관찰

Fig. 5(a)는 기계가공된 모재에 DED로 보수된 샘플을 보여주고 있다. 보수 영역 표면 그리고 보수부와 모재 간의 경계에서의 결함은 육안 상으로는 관찰되지 않았다. 정확한 적층부의 결함을 분석하기 위해 적층부 주변의 단면을 OM과 SEM을 통해 관찰하였다. 이종소재를 모재에 적층할 경우 발생하는 열응력은 계면에서의 크랙과 같은 결함을 야기시키며, 이는 두 이종소재 간의 결합력을 저하시키는 원인이 된다[12]. H13 보수 시편(Repaired-H13)과 P21 보수 시편(Repaired-P21) 모두 모재와 적층부 간의 계면 결함(Interfacial Defect)은 관찰되지 않았다. 추가로 FE-SEM을 사용하여 레이어 간 경계(Inter-layer Boundary)와 비드(Bead) 간 경계를 관찰한 결과(Fig. 5(b)), 크랙 혹은

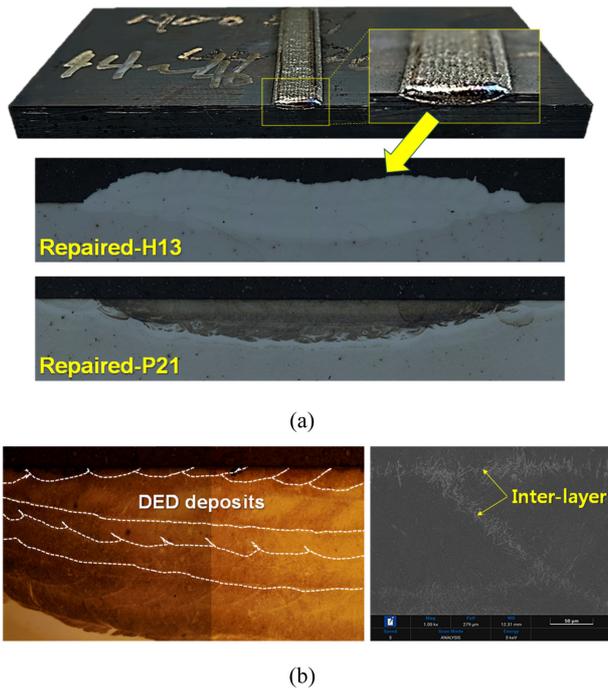


Fig. 5 (a) Fabricated sample and (b) OM and SEM images of deposited beads

기공과 같은 결함은 나타나지 않은 것으로 확인되었다. H13과 P21 모두 탄소함유량이 낮아 적층성이 우수한 분말로 알려져 있으며, 따라서 모재인 SKD61와의 결합력에도 큰 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

3.2 미세 조직(Microstructure)

DED 보수에 따른 미세조직(Microstructure)의 변화를 관찰하기 위해 보수부와 계면을 3,000 배율로 관찰한 SEM 사진들을 Fig. 6에 나타내었다. 우선, Repaired-H13의 경우 보수부에서 다량의 시멘타이트(Cementite), 탄화물, 그리고 마르텐사이트(Martensite)가 관찰되었다. 공급된 상태의 H13에는 체심입방구조를 가진 α -Fe가 주요 상으로 포함되어 있으며, 시멘타이트(Fe₃C)와 (Cr, Fe)₇C₃ 상이 포함되어 있다고 알려져 있다[13]. 이는 H13보수부에서의 높은 경도를 기대할 수 있다. 그러나 계면에서는 오스테나이트(Austenite)가 주로 관찰되고 있어 낮은 경도가 예상된다. 이러한 오스테나이트는 응고 시의 높은 냉각속도로 인해 발생한 잔류 열 응력에 의해 기계적으로 준안정 오스테나이트가 안정화되어 생성된 것으로 알려져 있다[14]. Repaired-P21의 경우, 보수부에서 베이나이트(Bainite)와 마르텐사이트가 주로 관찰되었다. 계면에서는 미세조직이 세립화되었으며, 래스 마르텐사이트(Lath Martensite)가 패킷을 형성하는 것이 관찰되었다. 이러한 구조는 용융풀의 흐름에 따라 형성된 것으로, 모재와 용합(Fusion)되는 첫번째 층이기 때문에 탄소 함량이 가장 높다[15]. 이러한 래스 마르텐사이트는 일반적으로 마르텐사이트 중에서도 경도가 높은 것으로 알려져 있으며[16], 이는 경도를 상승시키는 주요 원인이 된다.

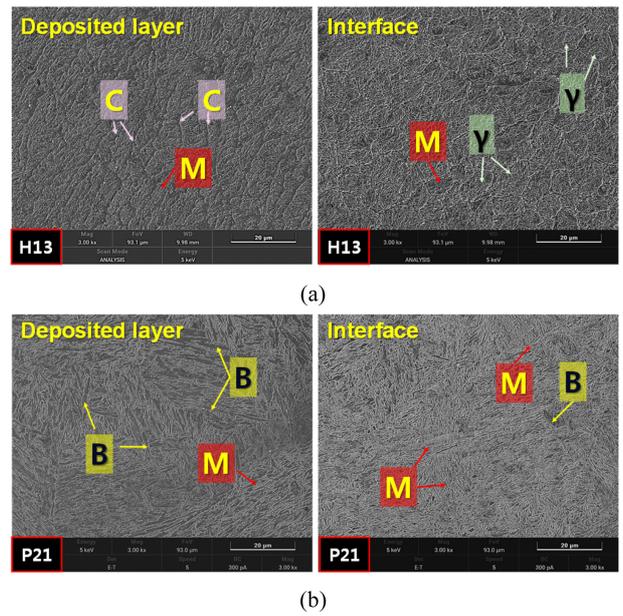


Fig. 6 SEM images showing microstructures on deposited layer and interface of (a) Repaired-H13 and (b) Repaired-P21 (C, γ , B and M indicate Cementite, Austenite, Bainite and Martensite, respectively)

3.3 경도(Hardness)

보수부와 모재의 경도를 미세경도기(Mitutoyo HM-200)를 이용해 보수부에서 모재로 이어지는 깊이 방향으로 경도 변화를 측정하였다. 보수부 최상단 표면에서부터 50 μ m 간격으로 깊이 방향으로 2,500 μ m까지 측정된 마이크로비커스 경도(Micro-vickers Hardness) 값을 Fig. 7에 나타내었다. Repaired-H13과 Repaired-P21 각각 보수부의 평균 경도는 659와 404 HV로 확인되었다. 이는 P21에 비해 H13에서의 탄소함유량이 높으며, 따라서 합금 원소들과 반응하여 다양한 탄화물이 석출되었기 때문이다. 또한, 두 시편의 보수부에서 마르텐사이트가 형성되었지만 일반적으로 탄소함량이 높을수록 마르텐사이트의 경도가 높기 때문에[17], H13 보수부의 경도가 높게 나타났다.

Repaired-P21 보수부의 경도는 모재부(평균 경도 450 HV)에 비해 경도가 낮은 반면, Repaired-H13에서는 보수부의 경도가 더 높게 나타났다. 앞서 언급한대로 H13 분말은 모재인 SKD61과 동일 화학적 조성을 가짐에도 불구하고, 적층된 H13 보수부의 경도가 모재부(SKD61)에 비해 상당히 높게 나타났다. 이에 대한 이유로, 보수부의 미세조직에는 DED 공정의 특성상 레이저 조사에 따른 급속 용융과 냉각(Rapid Melting and Cooling)으로 인해 미세한 구조의 덴드라이트(Dendrite)와 마르텐사이트(Martensite) 조직이 형성된다. 또한, 그러한 급속 용융과 냉각은 결정립(Grain)의 크기도 미세화시킨다[18]. 따라서, 마르텐사이트 조직과 미세한 결정립에 의해서 H13의 보수부 경도가 모재부에 비해 높게 나타난 것으로 분석된다.

한편, 두 시편 모두 적층부에서 모재로 이어지는 부분에서 경도 변화가 나타난다. Repaired-H13 경우, 모재부의 높은 경도는

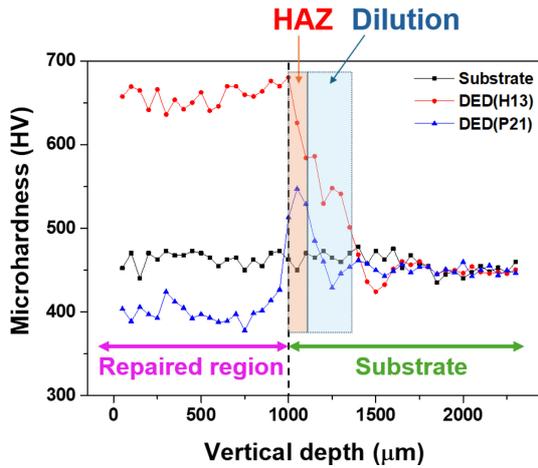


Fig. 7 Vickers hardness distribution in the vertical direction for each material

HAZ와 희석부(Dilution)를 지나면서 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 HAZ에서는 높은 온도에 지속적으로 노출되기 때문에 어닐링(Annealing) 효과에 의한 오스테나이트 상과[19], 희석부에서는 모재 화학적 조성의 영향으로 인해 경도가 낮아지게 된다. 반면, Repaired-P21의 HAZ에서는 급격한 경도 상승이 나타나고 있다. 이는 앞서 3.2절 미세조직에서 설명한 바와 같이, H13과는 달리 P21 적층부-모재 경계면 부근에 형성된 다량의 래스 마르텐사이트의 영향으로 볼 수 있다.

3.4 인장 시험(Tensile Test)

보수된 샘플에서 채취한 시험편을 통해 인장시험을 수행하였으며, 그 결과로 얻은 응력-변형률 선도(Stress-strain Diagram)를 Fig. 8에 나타내었다. 인장시험은 각 조건당 4회 반복 실험을 하였으며, 평균값을 가지는 시험편 결과를 채택하였다. 보수된 시험편인 Repaired-H13과 Repaired-P21을 보수되지 않은 모재(SKD61)와 비교하였다. 또한, 인장 특성값인 항복강도(Yield Strength), 인장강도(Tensile Strength), 그리고 연신율(Elongation)을 Table 3에 요약 정리하였다.

Repaired-H13의 경우 모재 대비 95% 수준의 인장강도와 97%의 항복강도로 우수한 인장 특성을 보였다. 하지만, 연신율은 모재 대비 매우 낮게 나타났다. 이는 앞서 경도에서 확인한 바와 같이 적층부의 경도가 모재부에 비해 높게 나타났으며, 따라서 상대적으로 높은 경도의 적층부에서 낮은 연신 후에 파단이 발생되었기 때문인 것으로 분석된다. 한편, Repaired-P21은 모재에 비해 항복강도와 인장강도가 높게 확인되었다. Repaired-H13과 마찬가지로 모재에 비해 낮은 연신율을 보이고 있지만, Repaired-H13에 비해서는 높은 수준의 연신율을 가진다. 이는 낮은 경도의 P21 적층 보수부에서 충분히 연신되었기 때문이며, 따라서 H13적층보수부에 비해 낮은 경도에도 불구하고 Repaired-H13보다 인장강도가 높게 나타났음을 알 수 있다. 다음 절에서는 파단면 분석을 통해 두 보수 시험편의 인장 특성을 분석하고자 한다.

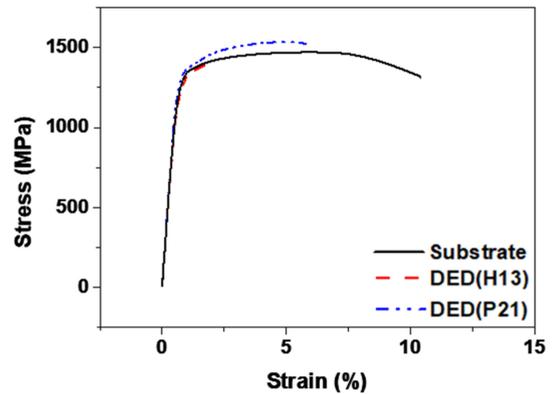


Fig. 8 Stress-strain curve according to repair method

Table 3 Comparison of tensile properties

	Substrate	Repaired-H13	Repaired-P21
Tensile strength [MPa]	1,470	1,403	1,534
Yield strength [MPa]	1,271	1,232	1,318
Elongation [%]	12.48	4.08	7.76

3.5 파단면 분석(Fractured Surface)

Fig. 9에는 인장시험의 파단 위치와 시험편 단면 사진을 나타내었다. 일반적으로 모재와 적층부의 결합이 미흡할 경우에는 모재와 적층부 간의 경계에서 생성된 크랙이 전파되어 파단이 발생하게 된다. 하지만, 본 연구에서는 두 시험편 모두 모재와 적층부 경계 인근의 적층부에서 파단이 일어났다. 따라서, 모재와 적층부 간 결합이 양호함을 알 수 있다. 한편, 단면에서 확인할 수 있는 바와 같이, 보수부보다 모재에서 단면 수축이 뚜렷하게 나타나고 있다. Repaired-P21에서 단면 수축이 다소 크게 나타나고 있으며, 이는 연신율의 결과에서 확인한 바와 같다.

Fig. 10에는 파단면 분석을 위해 얻은 SEM 사진을 나타내었다. Repaired-H13의 경우, 보수부에서 딥플(Dimple)과 벽개파괴(Cleavage)가 함께 관찰되고 있으며, 즉 연성과 취성 파괴가 혼재된 형태를 보인다. 반면, 모재에서는 전형적인 연성파괴 형태를 보인다. 한편, Repaired-P21의 보수부에서는 전형적인 연성 파괴를 나타내고 있으며, Repaired-H13에 비해 더 크고 깊은 딥플이 함께 관찰되었다. 이는 P21 적층부의 높은 연신율을 설명할 수 있는 결과이다[20]. 보수부의 하부 계면 부근에서는 벽개 파괴가 나타나는 것으로 보아 연성과 취성이 혼재된 파괴 형태를 보인다고 할 수 있다.

특히, 파단면을 관찰하는 과정에서 Repaired-H13의 보수부와 모재부 경계에서, 보수부와 모재부가 분리된 흔적이 관찰되었다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 H13적층부와 모재 간의 경계 결함(Interfacial Defect)이 확인되었다. 이는 H13 적층부와 모재 간의 높은 경도 차이로 인해 인장 응력이 작용된 상태에서 단면에서의 균일한 연신이 일어나지 않고, 두 영역 간 연신의 차이가 매우 크기 때문에 나타난 현상이라고 볼 수 있다. 즉, 모재부와 보수부 간의 높은 경도 차이는 조기 파단(Premature

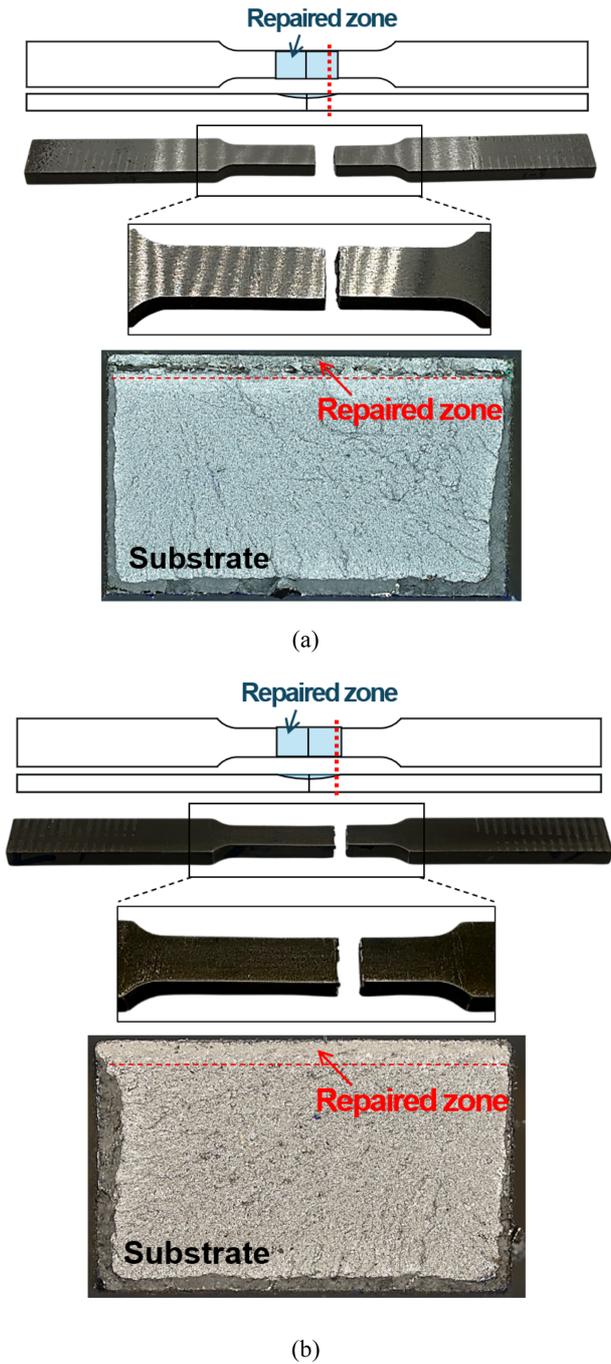


Fig. 9 Fracture and area reduction after tensile test: (a) Repaired-H13 and (b) Repaired-P21

Failure)을 야기할 수 있음을 본 연구를 통해 확인할 수 있었으며, 이는 금속 부품의 파손 시 DED 보수를 위한 분말 소재 선정에 있어서 고려해야 할 중요한 결과라고 할 수 있겠다.

본 연구에서 SKD61 모재의 DED 보수용 분말로 검토된 P21과 H13의 경우에는, 표면에서의 경도를 H13이 우수하나, 연신율은 P21 분말로 적층할 경우에 우수함을 확인할 수 있다. 이는 SKD61 소재의 사용 환경 및 요구 특성에 맞게 SKD61 보수용 분말을 선택할 수 있음을 시사한다.

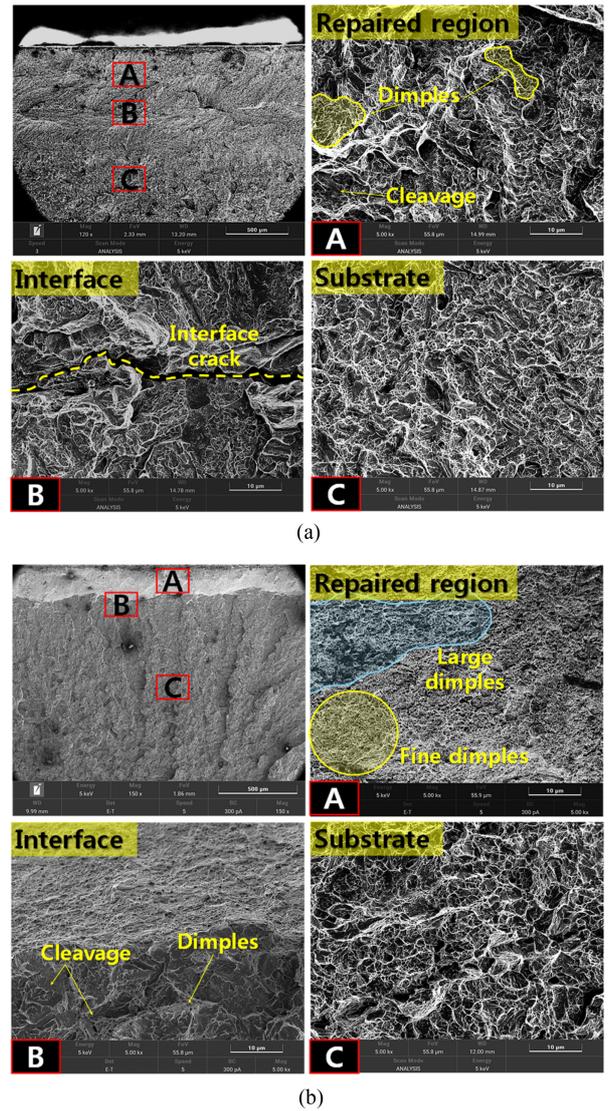


Fig. 10 SEM images of the fractured surfaces of each specimen

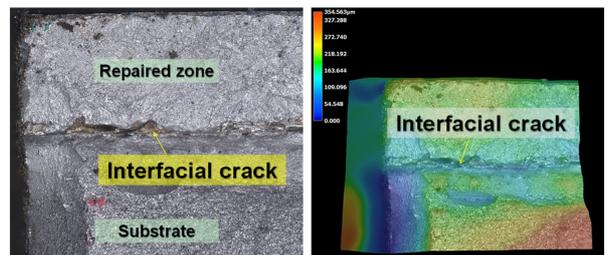


Fig. 11 Interfacial defect on the interface between repaired part and substrate of Repaired-H13 (left: OM image, right: 3D surface roughness)

4. 결론

본 연구에서는 파손된 부품을 모사하기 위해 모재를 원형 그루브 형상으로 가공한 후 DED 기술을 이용하여 보수 적층을 진행하였다. 이를 위해 두 가지 보수 분말(H13, P21)을 사용하였으며,

각각 제작된 샘플에 대하여 적층 특성, 미세조직 및 기계적 특성을 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1) H13과 P21 분말을 사용하여 파손된 모재에 DED 보수하여 적층부 표면 및 계면을 분석한 결과, 적층 공정에 따른 결함은 관찰되지 않았다.

2) Repaired-H13 보수부에서는 시멘타이트와 마르텐사이트가 주로 관찰되었고, 계면 부근에서는 다량의 오스테나이트 조직이 형성되었다. 반면 Repaired-P21의 경우, 보수부에서는 베이나이트와 마르텐사이트가, 계면 부근에서는 다량의 레스 마르텐사이트 조직이 형성되었다.

3) Repaired-H13의 보수부 경도가 Repaired-P21 그리고 모재보다 높게 나타났다. 두 시편 모두 HAZ와 희석부를 지나면서 경도가 급격하게 감소하였으며, Repaired-P21의 계면에서는 급격한 경도 상승이 관찰되었다.

4) 인장시험 결과, Repaired-H13은 모재와 유사한 수준의 인장강도와 항복강도를 보인 반면 연신율은 크게 저하되었다. 반면, Repaired-P21은 모재보다 높은 인장강도와 항복강도를 보였으며, 연신율 또한 Repaired-H13보다 높게 나타났다. Repaired-H13에서는 보수부와 모재부 간 높은 경도 차이로 인해 계면 분리가 일어난 것으로 확인되었다.

이상에서와 같이 보수를 위한 DED 공정 응용에 있어서 이종 및 동종소재 분말 사용에 따른 특성을 비교 분석하였다. P21과 H13 모두 SKD61 모재의 국부 손상부에 대한 보수를 위한 후보 소재로 고려 가능하며, 이는 표면 경도, 인장 및 피로 특성 등 다양한 기계적 특성들이 고려되어야 할 것이다. 따라서, 향후에는 보수용 분말 선정에 필요한 피로 및 고온 환경에서의 기계적 특성들에 대해서도 연구를 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국산업기술평가관리원(KEIT) 산업기술혁신사업(No. K_G012002335502)과 한국연구재단 개인기초연구사업(No. RS-2024-0034616660282063490101)의 지원을 받아 수행되었음. 또한, 2022년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받았음(No. 2022R1A6C101B738).

REFERENCES

1. Reimann, M., Goebel, J., dos Santos, J. F., (2017), Microstructure and mechanical properties of keyhole repair welds in AA 7075-T651 using refill friction stir spot welding, *Materials & Design*, 132, 283-294.
2. Rahni, M. M., Beidokhti, B., Haddad-Sabzevar, M, (2017), Effect of filler metal on microstructure and mechanical properties of manganese–aluminum bronze repair welds, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(3), 507-513.

3. Kadoi, K., Murakami, A., Shinozaki, K., Yamamoto, M., (2016), Crack repair welding by CMT brazing using low melting point filler wire for long-term used steam turbine cases of Cr-Mo-V cast steels, *Materials Science and Engineering: A*, 666, 11-18.
4. Yu, J.-H., Choi, Y.-S., Shim, D.-S., Park, S.-H., (2018), Repairing casting part using laser assisted additive metal-layer deposition and its mechanical properties, *Optics & Laser Technology*, 106, 87-93.
5. Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., Fino, P., (2019), Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair, *Applied Sciences*, 9(16), 3316.
6. Oh, W., Son, Y., Son, J., Shin, G., Shim, D., (2020), Effect of groove shapes on mechanical properties of STS316L repaired by direct energy deposition, *Transactions of Materials Processing*, 29(2), 103-112.
7. Oh, W.-J., Shin, G.-Y., Son, Y., Shim, D.-S., (2020), Effect of repair width on mechanical properties of 630 stainless steel repaired by direct energy deposition process, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 19(3), 42-50.
8. Oh, W. J., Lee, W. J., Kim, M. S., Jeon, J. B., Shim, D. S., (2019), Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition, *Optics & Laser Technology*, 117, 6-17.
9. Chew, Y., Pang, J. H. L., Bi, G., Song, B., (2015), Thermo-mechanical model for simulating laser cladding induced residual stresses with single and multiple clad beads, *Journal of Materials Processing Technology*, 224, 89-101.
10. Krzyzanowski, M., Bajda, S., Liu, Y., Triantaphyllou, A., Rainforth, W. M., Glendenning, M, (2016), 3D analysis of thermal and stress evolution during laser cladding of bioactive glass coatings, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 59, 404-417.
11. Wang, D., Hu, Q., Zeng, X., (2015), Residual stress and cracking behaviors of Cr₁₃Ni₅Si₂ based composite coatings prepared by laser-induction hybrid cladding, *Surface and Coatings Technology*, 274, 51-59.
12. Shin, K. Y., Lee, K. Y., Son, J. Y., Shim, D. S., Kim, D. J., Baek, G. Y., (2022), Characteristics evaluation of AISI H13 deposition on heat-treated SKD61 material, *Proceedings of the KSPE 2022 Autumn Conference*, 485.
13. Yan, J., Zheng, D., Li, H., Jia, X., Sun, J., Li, Y., Qian, M., Yan, M., (2017), Selective laser melting of H13: microstructure and residual stress, *Journal of Materials Science*, 52, 12476-12485.
14. LeBrun, T., Nakamoto, T., Horikawa, K., Kobayashi, H., (2015), Effect of retained austenite on subsequent thermal processing and resultant mechanical properties of selective laser melted 17-4 PH stainless steel, *Materials & Design*, 81, 44-53.

15. Lee, S., Yu, J. H., Park, S.-H., Shim, D.-S., Choi, Y. S., (2021), Effect of carbon content in steel powder feedstock on impact toughness and microstructure of additively manufactured cast iron by directed energy deposition, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 189-198.
16. Lee, Y.-K., Shin, H.-C., Choi, C.-S., (1997), Effect of martensite morphology on damping capacity and mechanical property of Fe-Ni-C alloys, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, 10(3), 188-197.
17. Akinlabi, E. T., Ikumapayi, O. M., Bodunde, O. P., Adaramola, B. A., Uchegbu, I. D., Fatoba, S. O., (2020), Impact of quenching on the hardenability of steels EN-3 (~1015), EN-8 (~1040) and EN-24 (~4340) during jominy end quench technique, *International Journal on Emerging Technologies*, 11(5), 290-297.
18. Oh, W., Son, Y., Son, J., Shin, G., Shim, D., (2020), Effect of groove shapes on mechanical properties of STS316L repaired by direct energy deposition, *Transactions of Materials Processing*, 29(2), 103-112.
19. Oh, W. J., Son, Y., Shim, D. S., (2019), Effect of In-Situ post heating on repairing STS316L built by Laser powder bed fusion using direct energy deposition, *Korean Journal of Metals and Materials*, 57(8), 543-553.
20. Lee, J., Lee, S., Shin, S. Y., (2017), Effects of strain rate and temperature on tensile properties of high mn twinning induced plasticity Steels, *Korean Journal of Materials Research*, 27(12), 643-651.



Bit-na Yun

Bachelor in Dep. Of Ocean Advanced Materials Convergence Eng., Korea Maritime and Ocean University. Her research interest is metal additive manufacturing.
E-mail: qlcsk5643@naver.com



Min-seong Ko

Master in Dep. Of Ocean Advanced Materials Convergence Eng., Korea Maritime and Ocean University. His research interest is metal additive manufacturing.
E-mail: koquma218@naver.com



Hyo-jeong Kang

Bachelor in Dep. Of Ocean Advanced Materials Convergence Eng., Korea Maritime and Ocean University. Her research interest is metal additive manufacturing.
E-mail: gywjd_2045@naver.com



Do-Sik Shim

Associate Professor in Dep. of Ocean Advanced Materials Convergence Eng., Korea Maritime and Ocean University. His research interests include direct energy deposition (DED), incremental and roll forming for sheet metal, and structural analysis as well as optimal design.
E-mail: think@kmou.ac.kr

고속 고기동 비행체용 짐벌 시스템의 질량불균형 및 진동 감소를 위한 동조질량감쇠기(TMD) 활용 연구

A study of Tuned Mass Damper (TMD) Application for Mass Imbalance and Vibration Reduction in Gimbal Systems for High-speed Maneuverable Vehicles

김준수^{1,#}, 이동균¹, 이종국¹, 조현준¹, 정지인²

Jun-Soo Kim^{1,#}, Dong-Kyun Lee¹, Jong-Kuk Lee¹, Hyeon-Jun Cho¹, and Ji-in Jung²

1 LIG 넥스원 기계연구소 (Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd.)

2 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

Corresponding Author / E-mail: Junsoo.kim@lignex1.com, TEL: +82-31-8026-4465

ORCID: 0009-0005-7707-6139

KEYWORDS: Disturbance torque (외란 토크), Transmissibility (전달률), Finite element analysis (유한요소해석), Dual axis gimbal (2축 짐벌), Anti-vibration design (내진설계)

This study proposed a method for simultaneously reducing mass imbalance and vibration in gimbal systems utilizing a tuned mass damper (TMD) as a balancing weight. Finite element analysis (FEA) and experiments were used for testing the method. Mass imbalance in gimbal systems generally causes external disturbance torque. To reduce this, a balancing weight can be used. However, weight increase due to balancing weight causes resonance in the gimbal system, which generates bias error in the gyroscope sensor. This study demonstrated that both mass imbalance reduction and vibration reduction effects could be achieved by utilizing a TMD as a balancing weight. FEA results showed that the mass imbalance reduction effect of the gimbal was not affected by TMD. The magnitude of vibration response at the resonance point was reduced by about 98% with TMD. When a TMD was applied, the magnitude of the vibration response at the resonance point was reduced by 98% to the same level as that of the gimbal. Bias error of the gyroscope sensor was reduced by about 95% or more. These results show that a TMD is useful for effectively reducing mass imbalance and vibration in gimbal systems while improving gyroscope sensor performance.

Manuscript received: June 25, 2024 / Revised: September 24, 2024 / Accepted: October 2, 2024
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2024

1. 서론

짐벌은 외부 감지용 센서를 운용자가 의도하는 방향으로 지향하는 기계장치를 의미하며, 지상형 장비, 항공기, 무인기 등 다양한 플랫폼에서 사용된다.

짐벌은 플랫폼 성능향상에 따라 점점 가혹한 운용환경에 노출되고 있으며, 정밀하고 안정적인 구동 제어를 요구받고 있다.

기존 많은 연구에서 가혹한 운용환경 극복을 위해 기어 구동 방식의 짐벌을 사용해 왔다.

기어 구동 방식은 모터 출력을 증폭할 수 있다는 장점과 기어 백래시로 인한 공진, 응답 지연으로 구동 정밀도 성능이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

Baek 등은 기어 감속이 포함된 2축 짐벌의 백래시의 기여율 및 크기를 주파수응답특성으로 추정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다[1].

백래시 추정을 통해 구동 정밀도 향상이 가능하지만 기어 구동 방식에 따른 한계점이 존재하기 때문에 이를 개선하기 위한 설계가 필요하다.

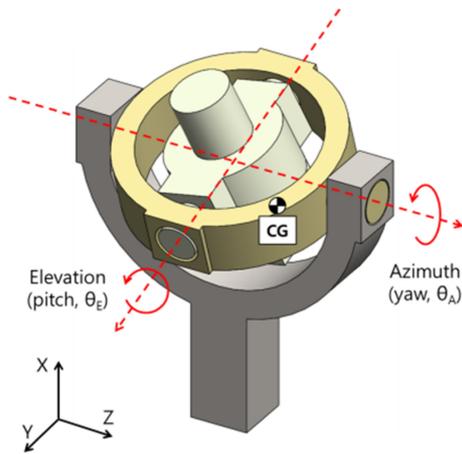


Fig. 1 Schematic diagram of dual axis direct drive gimbal system

백래시 문제 해결을 위해 Fig. 1과 같은 직구동 짐벌 설계가 고려되었다.

직구동 방식은 기어 구동 방식 대비 높은 구동 정밀도를 갖는 반면 낮은 출력으로 인해 외란 토크에 취약하다는 단점을 가진다.

Lim 등은 직구동 짐벌의 질량불균형을 측정하여 이를 제어 변수로 활용하는 보상제어기 설계 및 안정화 알고리즘 연구를 진행하였다[2-5].

Yeo 등은 질량불균형의 측정값 및 자이로 센서의 각속도 측정값을 보상제어에 활용하는 연구를 진행하였다[6-8].

가속도 외란이 작을 경우 보상제어 방식은 짐벌 정밀 제어에 효과적이다. 하지만 고속 고기동 플랫폼과 같이 가속도 외란이 큰 경우 질량불균형에 의한 외란이 증가하여 모터 토크 대부분을 외란 토크 제어에 할당해야 한다.

보정추(Counter Mass)는 회전부 무게중심을 회전중심으로 조정하여 질량불균형을 줄이는 역할을 수행한다.

Kim 등은 짐벌에 보정추를 적용하여 질량불균형을 000 gf-mm 이하로 보정하였으며, 원심 가속도 시험을 수행하였다. 그 결과 질량불균형의 저감을 통한 외란 토크 감소효과를 확인하였다[9].

보정추의 중량은 정적 환경에서 외란 토크를 저감하나, 동적 환경에서 공진을 유발하여 자이로센서 오동작 및 짐벌 성능 저하를 야기할 수 있다.

Kim 등은 기계 구조물의 일부를 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)로 활용하여 진동을 저감하는 연구를 진행하였다. TMD는 주 구조물의 진동 에너지를 흡수하는 부가 질량체로, 별도의 중량 증가 없이 진동을 저감할 수 있어 효과적이다[10-13].

본 연구는 짐벌 보정추를 TMD로 대체하여 자이로센서 오동작 문제를 해결하고자 하였다.

진동환경에서 질량불균형이 짐벌에 미치는 영향을 해석을 통해 분석하고, TMD형 보정추 설계를 통한 질량불균형 저감 및 공진 저감 효과를 해석과 실험으로 검증하여 고속 고기동 환경에 적합한 짐벌 보정추 설계 기준을 제시하고자 한다.

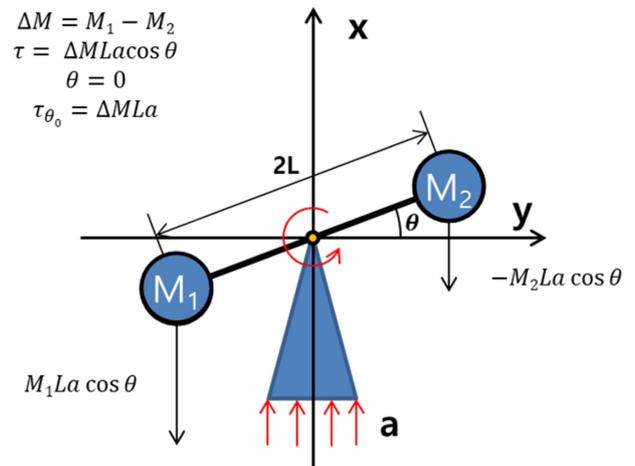


Fig. 2 Simple model of gimbal with two point mass

2. 강체 짐벌의 질량불균형 특성 분석

짐벌의 질량불균형과 외란이 짐벌에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 2의 모델을 구성하였다.

질점이 2개인 강체 짐벌의 질량불균형은 $\Delta M \times L$ 이다. 짐벌의 회전 각도가 0이고 정적가속도가 a 일 때 외란토크는 ΔMLa 이다.

짐벌의 초기각도와 초기각속도는 0이라 가정하고, 매우 작은 각도로 움직인다 가정하였다.

동적가속도가 $a \cos \omega t$ 가 일 때 짐벌의 지배방정식은 식(1)과 같으며, 감쇠 및 강성을 무시할 경우 식(2)와 같이 정리된다. 또한 각속도는 식(3)과 같다.

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = \Delta MLa \cos \omega_a t \tag{1}$$

$$I\ddot{\theta} = \Delta MLa \cos \omega t \tag{2}$$

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta MLa}{I\omega} \sin \omega t \tag{3}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \tau = \lim_{\omega \rightarrow 0} I\dot{\theta} = \Delta MLa \tag{4}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \dot{\theta} = \frac{\Delta MLa}{I} t \tag{5}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \dot{\theta} = 0 \tag{6}$$

외란 주파수 ω 가 0으로 수렴할 때 이를 준 정적 상태로 가정할 수 있다. 식(4)를 통해 정적가속도 환경과 동일한 외란토크가 짐벌에 작용함을 확인하였다.

식(3), 식(5) 및 식(6)을 통해 질량불균형 성분에 의한 각속도 외란은 ω 가 0으로 수렴할 때 가장 크고, 외란 주파수 ω 에 반비례하여 작아짐을 확인할 수 있다.

외란 토크 증가는 모터 소요토크 증가의 원인이며, 각속도 외란의 증가는 자이로센서 오동작을 유발한다. 따라서 질량불균형을 감소시킬 필요가 있다.

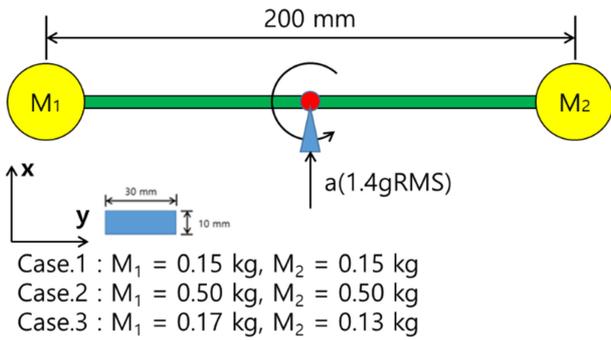


Fig. 3 Simplified model of gimbal for dynamic response analysis

Table 1 Effective mass and natural frequency of the model

	Natural frequency (Effective mass)	
	1 st	2 nd
Case.1	0(100%)	270(83%)
Case.2	0(100%)	154(93%)
Case.3	0(100%)	272(82%)

강체 모델 및 여러 가지 가정을 통해 분석한 결과와 달리 실제 짐벌은 다자유도로 구성되며, 실제 외란은 구동각도와 커플링 된 형태로 존재하여, 이론해 유도에 어려움을 갖는다. 따라서 이를 분석하기 위해 수치해석 및 실험 등을 수행하였다.

3. 유연체 짐벌의 질량불균형 및 공진 특성 분석

유연체 짐벌의 질량불균형 및 공진 영향을 분석하기 위해 Fig. 3과 같은 단순화 모델을 구성하였다.

짐벌의 폭과 높이가 각각 30, 10 mm이고 길이가 200 mm인 알루미늄 재질의 빔으로 구성되고, 양쪽 끝단에는 질량불균형 보정추가 달려있다.

짐벌의 특성을 비교분석하기 위해 보정추를 3가지로 구성하였다.

Case 1은 질량불균형 크기가 0 gf-mm이며, 질량불균형 저감용 보정추의 총 중량이 300 g인 짐벌이다.

Case 2는 질량불균형 크기가 0 gf-mm이며, 질량불균형 저감용 보정추의 총 중량이 1,000 g으로 Case 1 대비 큰 모델이다.

Case 3는 질량불균형의 크기가 4,000 gf-mm이며, 질량불균형 저감용 보정추의 총 중량이 300 g인 짐벌이다.

짐벌의 회전 모사를 위해 유연체 중심에 힌지 형태의 경계조건을 설정하였다.

진동 해석의 하중 조건은 10-2,000 Hz, 1.4 grms의 크기로 힌지에 x축 방향으로 작용한다.

각 해석 모델의 공진주파수 및 유효질량 해석 결과를 Table 1에 정리하였다.

짐벌의 1차 모드는 짐벌 회전중심에서 발생하며, 주파수는 0 Hz이다. (힌지 회전 모드)

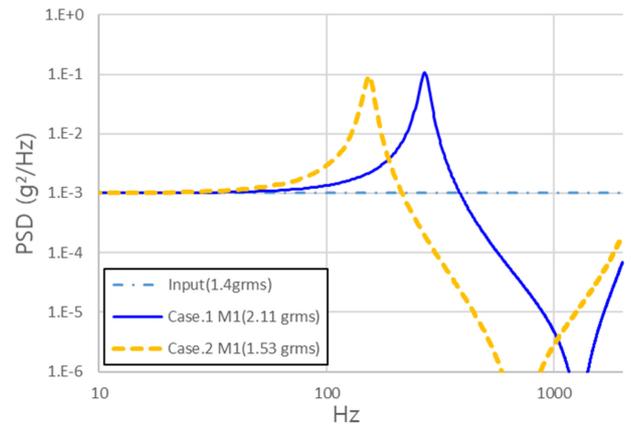


Fig. 4 Comparison results of dynamic response analysis at counterweight position

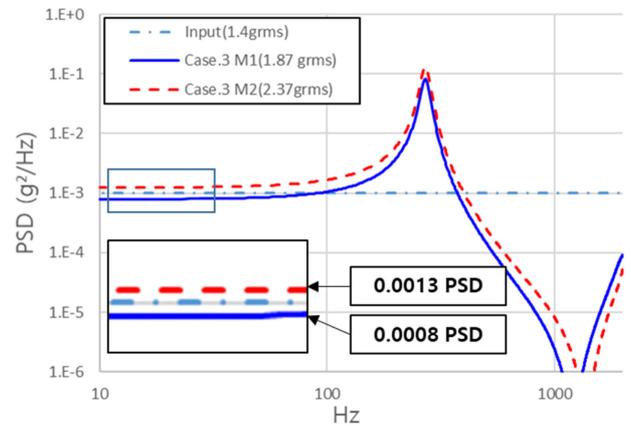


Fig. 5 Comparison results of dynamic response analysis at positions m1 and m2 in case 3

짐벌의 2차 모드는 각각 270, 154, 272 Hz에서 발생하였으며, 보정추 중량 차에 따른 유효질량 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Case 1, 2의 M_1 위치에서 확인한 가속도 진동응답 해석 결과이다.

두 모델의 질량불균형은 0이다. 따라서 두 모델은 외란 토크에 의한 회전은 발생하지 않는다.

해석 결과 두 모델은 보정추 중량 차이에 따른 공진주파수 차이를 갖으며, 공진점에서 가속도 증폭률은 각각 106, 94 이다.

Fig. 5는 Case 3의 M_1, M_2 위치에서 확인한 가속도 진동응답 해석 결과이다.

해석모델은 질량불균형이 4,000 gf × mm이다. 따라서 외란 토크에 의한 회전이 발생한다.

Case 3의 해석 결과 Case1, 2와 달리 M_1, M_2 위치에서 가속도 응답 이격이 발생함을 확인할 수 있다.

하지만 선형 가속도의 차이를 분석하여 질량불균형에 의한 회전 외란 특성을 비교에는 근거가 부족하다.

따라서 선형 가속도 응답 결과로는 회전 응답 발생 여부를 판단할 수 없다.

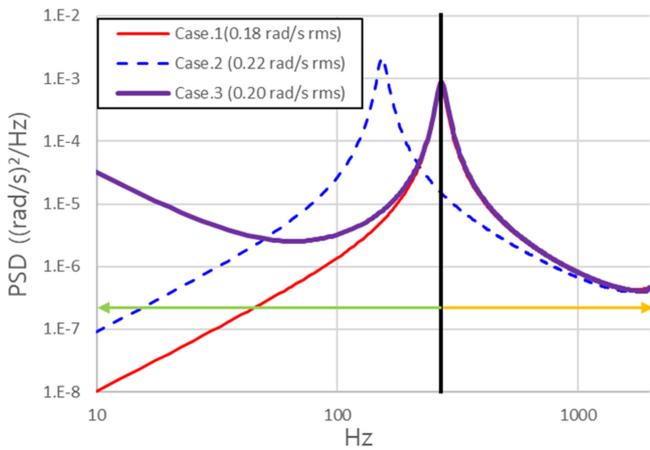


Fig. 6 Comparison results of angular velocity response analysis at counterweight position

실제 시험을 통한 계측도 선형 가속도 센서를 통해 진행하기 때문에 회전 여부를 확인하는 데 어려움이 있다. 따라서 좀 더 직관적인 비교를 위해 각속도 응답 결과를 비교하였다.

각 모델의 각속도 응답 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

질량불균형이 없는 Case 1, 2의 각속도 해석 결과 Case 2의 공진주파수에서 각속도 증폭량이 Case 1 대비 2.8배 더 크게 발생하였다.

앞서 강제 모델의 이론해를 통해 각속도 응답은 질량불균형에 비례하고, 주파수 ω 에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 보정추 중량이 작고 공진주파수가 높을수록 각속도 증폭량은 낮아질 것을 유추할 수 있다.

두 모델의 해석 결과를 통해 보정추 중량 증가에 따른 공진주파수 감소가 짐벌 각속도 응답에 미치는 영향을 간접적으로 확인할 수 있다.

두 모델은 질량불균형에 의한 회전 토크가 발생하지 않는다. 따라서 공진주파수에서 발생한 각속도 증폭은 유연체 모드에 의해 국부적으로 발생한 것이다.

이러한 국부적인 각속도 응답은 자이로센서의 오작동을 유발할 수 있다.

Case 1, 3의 각속도 해석 비교 결과 질량불균형 유/무에 따른 0 Hz 각속도 응답 증폭을 확인할 수 있다.

2차 공진주파수에서는 동일한 수준의 각속도 응답 증폭이 발생한다.

각 모델의 해석을 통해 다음과 같은 특성을 확인할 수 있었다.

첫 번째 질량불균형에 의한 회전 토크는 0 Hz의 회전 공진의 형태로 작용한다.

두 번째 짐벌의 보정추는 0 Hz 회전 토크를 저감할 수 있으며, 보정추의 중량은 저주파 영역 각속도 응답에 영향을 미친다.

세 번째 보정추 중량이 작을수록 유연체 모드에 의한 각속도 응답이 감소되어 자이로센서 오차가 작아진다.

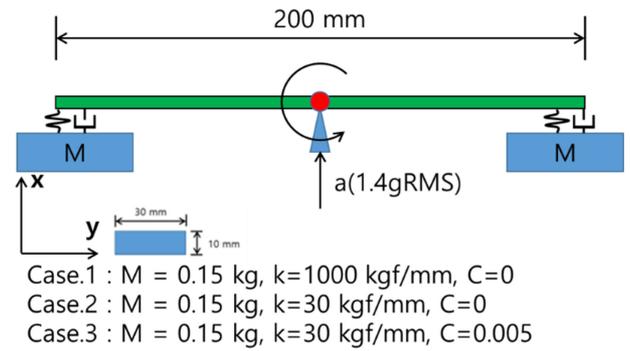


Fig. 7 Simplified model of gimbal with tuned mass damper counterweight for dynamic response analysis

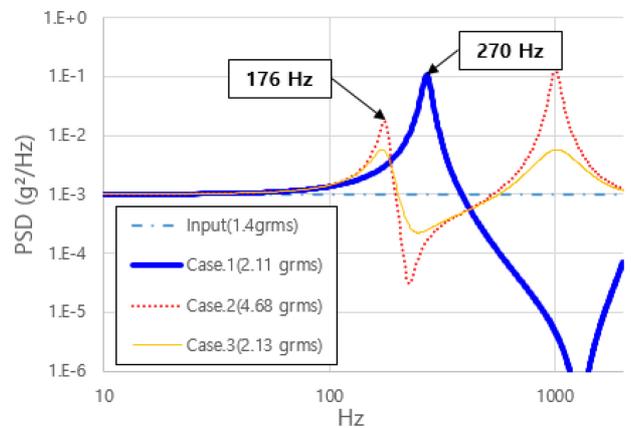


Fig. 8 Comparison results of dynamic response analysis at counterweight position

4. TMD 형 보정추의 진동감쇠 효과 검토

4절에서는 TMD의 설치 방식을 보정추에 적용하는 방안에 대한 연구를 진행하였다.

TMD는 진동을 줄이고자 하는 주 시스템에 상대적으로 작은 질량-스프링계의 부 시스템을 적용하는 방식이며, 두 시스템 간의 공진주파수를 조정하여, 위상 차이에 의한 진동감소 효과를 큰 시스템에 부여한다.

짐벌과 보정추 사이에 스프링과 감쇠기를 설치하여, 보정추를 TMD의 부 시스템으로 활용하였다.

분석에 사용된 해석 모델을 Fig. 7에 나타내었다.

보정추 고정 방식에 따라 짐벌을 3가지 Case로 분석하였다.

Case1은 보정추를 체결류로 고정한 모델이다.

Case2는 보정추를 스프링으로 고정한 모델이다.

Case3은 보정추를 방진구로 고정한 모델이다.

Fig. 8은 분석 모델의 가속도 진동응답 해석 결과다.

TMD형 보정추의 가속도 해석 결과 짐벌의 2차 공진주파수는 270에서 176 Hz로 낮아졌으며, 증폭량은 Case 1 대비 각각 84, 95 % 저감 되었다.

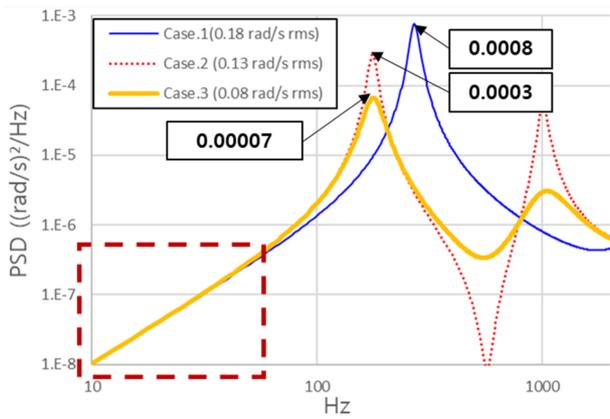


Fig. 9 Comparison results of angular velocity response analysis at counterweight position

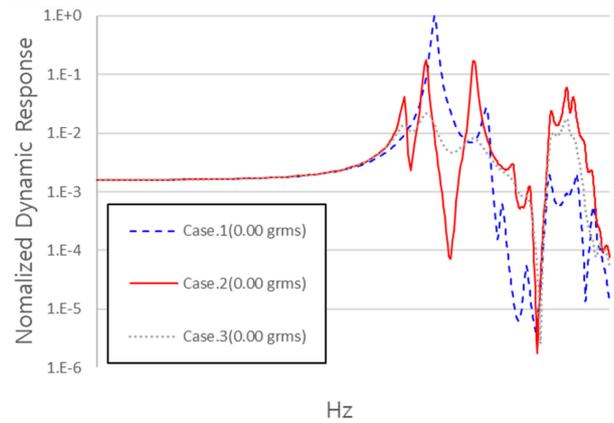


Fig. 10 Comparison results of dynamic response analysis of 2-axis gimbal with complex shape at gyroscope position

Fig. 9은 분석 모델의 각속도 응답 해석 결과다.

TMD형 보정추 적용 모델의 각속도 해석 결과 질량불균형에 의한 0 Hz 회전 외란은 발생하지 않는다. (갈색 점선부)

TMD형 보정추의 적용결과 짐벌의 2차 공진주파수에서 각속도 응답은 Case 1 대비 각각 64, 91% 저감 하였다.

본 절을 통해 TMD 보정추에 대한 다음과 같은 결과를 얻었다. 첫 번째 TMD형 보정추는 기존 보정추 설계 방식과 동일한 회전 외란 저감효과를 갖는다.

두 번째 TMD 형 보정추 적용 시 보정추 중량에 따른 국부적인 공진 및 그 증폭률을 저감할 수 있다.

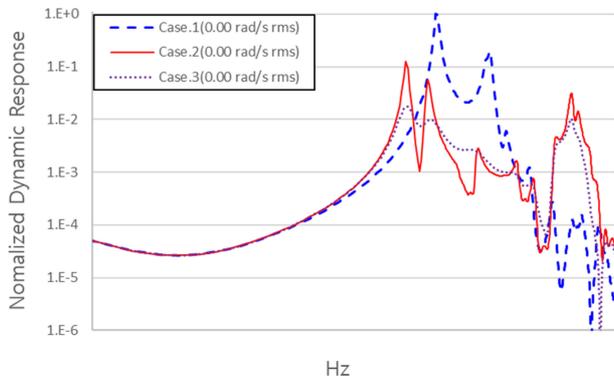


Fig. 11 Comparison results of angular velocity response analysis of 2-axis gimbal with complex shape at gyroscope position

5. 2축 짐벌 모델의 TMD형 보정추 적용효과 검토

본 절에서는 10.0 kg 이하 급 실제 2축 짐벌에 대한 구조해석을 수행하였다. 기존 짐벌의 보정추는 구동부 전체 중량 중 20% 이하이며, 체결류로 고정되어있다.

감쇠형 TMD 적용효과를 확인하기 위해 3가지 Case로 비교 분석을 수행하였다.

Case 1 보정추 당 4개의 체결류 고정된 모델.

Case 2 보정추 당 4개의 스프링으로 고정된 모델.

Case 3 보정추 당 4개의 초탄성 물질로 고정된 모델.

초탄성 물질의 물성치는 실제 제작 업체를 통해 제공받았다. 감쇠 계수를 제거한 스프링 상수는 Case2에 적용하였다.

Figs. 10 및 11은 무차원화 된 짐벌의 가속도 및 각속도 해석 결과다. 해석 결과의 주파수 및 응답의 크기는 제품 보안상의 이유로 블라인드 처리하였다.

Fig. 10의 가속도 해석 결과 각 모델의 자이로센서 위치에서 발생하는 최대 가속도 응답 증폭률이 Case 1 대비 82, 98% 감소되었다.

Case 1은 보정추에 의한 공진 주파수와 각 구성품의 국부적인 공진 주파수의 간격이 작다. 따라서 각 구성품은 상호 공진하여 큰 진동 응답이 발생한다.

Case 2, 3의 경우 보정추에 의한 공진 주파수와 구성품의 국부적인 공진 주파수의 간격이 이격 되어 상대적으로 진폭이 낮아지는 효과를 보였다.

Fig. 11의 각속도 해석 결과 자이로센서 위치에 작용하는 최대 각속도 응답 증폭률은 Case 1 대비 각 모델이 88, 98% 감소하였다.

초탄성물질은 방진 설계를 위해 산업에서 자주 활용된다. 하지만 짐벌 고정부에 이를 적용할 경우 진동에 의한 대 변형이 발생하여 설계 적용을 지양해 왔다.

본 연구에서는 이를 국부적으로 보정추에 적용함으로써 짐벌의 정밀도 및 질량불균형 성능은 유지하고, 진동 외란 및 각속도 외란을 저감할 수 있었다.

6. TMD형 보정추 적용효과 실험 및 검증

본 절에서는 감쇠형 TMD 보정추의 진동저감효과를 실험을 통해 검증하였다.

실제 짐벌의 실험을 Fig. 12와 같이 구성하여 진행하였다.

짐벌은 비행체에 조립되어 있으며, 짐벌에는 외부 구성품이

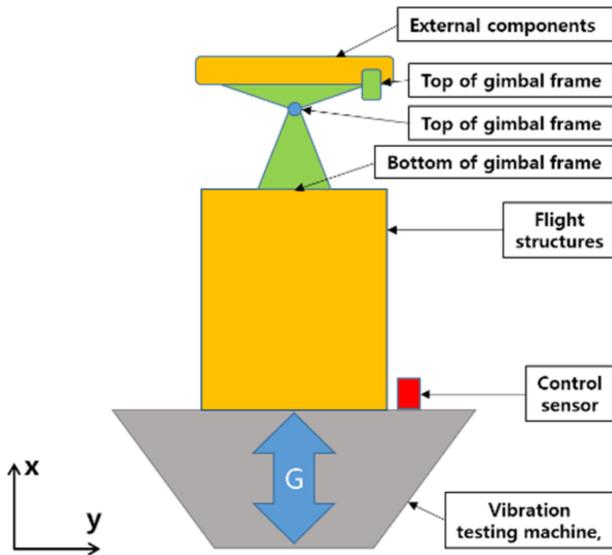


Fig. 12 Random vibration test setting of the gimbal

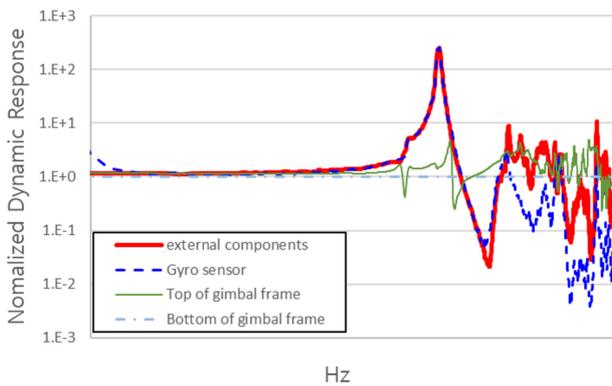


Fig. 13 Random vibration test results of gimbal: Output amplification compared to input without TMD (Case.1)

조립되어 있다. 또한 자이로센서는 외부 구성품과 짐벌의 경계에 설치되어 있다.

짐벌의 진동응답 측정을 위해 4개의 가속도 센서가 적용되었다. 설치 위치는 짐벌 프레임 설치부, 짐벌 구동축 설치부, 자이로센서 설치부, 외부 구성품이다.

Figs. 13부터 15는 짐벌 진동시험의 가속도 센서 측정 결과이다. 해당 실험은 비행체 단위에서 진행되었다. 따라서 짐벌 구조물에 의한 공진과 비행체 하부 구조물에 의한 공진을 명확히 구분하기 어려운 점이 있다.

본 연구에서는 짐벌 구조물에 의한 공진을 분석하기 위해 짐벌 조립부(Bottom of Gimbal Frame) 대비 각 위치에서 가속도 증폭량을 비교하였다.

제시된 그래프의 증폭량은 무차원 값이며, 제품의 주파수는 보안상 블라인드 처리하였다.

Fig. 13은 일반적인 2축 짐벌의 가속도 응답 증폭률이다. 짐벌의 주요 공진은 1차 모드에서 발생하며(0 Hz 회전 모드 무시), 짐벌 입력량 대비 자이로센서 위치에서 발생하는 증폭률은 440이다.

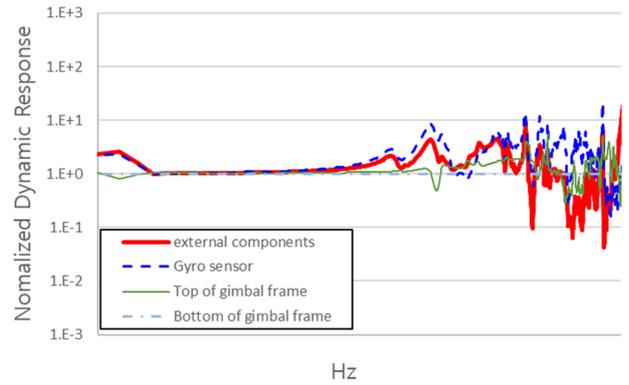


Fig. 14 Random vibration test results of gimbal: Output amplification compared to input with TMD (Case.2)

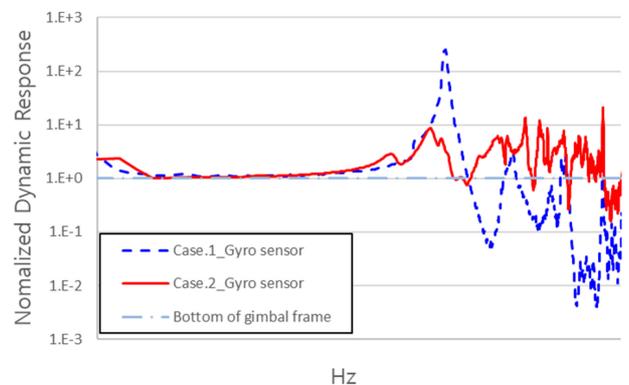


Fig. 15 Comparison of random vibration test results with and without TMD at gimbal gyro sensor position

Fig. 14는 TMD가 설치된 2축 짐벌의 가속도 응답 증폭률이다. 짐벌의 1차 모드에서 발생한 짐벌 입력량 대비 자이로센서 위치에서 발생하는 증폭률은 7.9이다.

Fig. 15는 TMD 유무에 따른 자이로센서 증폭률 비교 결과이다. 감쇠형 TMD 보정추 적용 시 자이로센서에서 발생하는 가속도 진동응답 증폭률은 98% 감소하였다. 이러한 진동응답 감소효과는 자이로센서 운용결과에서도 확인할 수 있다.

짐벌에 설치된 자이로센서에는 바이어스 에러가 발생할 수 있다. 자이로센서의 바이어스 에러는 기구/전기적인 노이즈 성분에 의해 발생할 수 있으며, 짐벌 1차 공진의 각속도 성분에 영향을 받는다.

감쇠형 TMD를 설치한 짐벌의 진동시험 결과 자이로센서 바이어스 에러가 95% 이상 감소됨을 확인하였다.

7. 결론

본 논문에서는 짐벌 질량불균형에 의한 정적 가속도 토크 저감의 용도로 적용되는 보정추를 감쇠형 TMD로 대체하는 방법을 제시하였다.

감쇠형 TMD 보정추 적용 결과 짐벌 구동부 및 외부 구성품에

작용하는 공진에 의한 진동 응답이 저감됨을 구조해석 및 실험으로 검증하였다.

감쇠형 TMD에 의한 진동 저감이 자이로센서의 바이어스 에러를 효과적으로 감소시킴을 실험을 통해 검증하였다.

제안된 방법은 기존 보정추를 통한 질량불균형 조정방법과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖는다.

첫 번째 기존 보정추 적용 방식은 질량불균형을 조정하는 데 효과적이지만 보정추 적용에 따른 중량 증가로 공진에 의한 진동 응답을 증가시켰다. 제안된 방법은 기존 방식과 동일한 수준의 질량 불균형 조정 효과를 가지며, 또한 진동 응답 저감 효과를 갖는다.

두 번째 기존 보정추의 설계 적용 시 공진에 의한 진동 응답을 줄이기 위해 보정추 중량을 줄일 필요가 있었다. 따라서 짐벌 및 외부 구성품은 소형/경량화 설계가 요구되어 더욱 복잡하고 비경제적인 형태로 발전하였다. 제안된 방법은 보정추의 중량을 유지한 상태로도 진동 응답을 줄일 수 있다는 점에서 이점을 갖는다.

세 번째 자이로센서 바이어스 에러는 자이로센서 내/외부적인 요소에 영향을 받는다.

기존 방식에서는 보정추 중량에 의한 국부적인 공진응답을 완화하기 위해 최적 설계를 통해 보정추의 중량을 줄이는 설계가 적용되었다. 하지만 이러한 감량은 전체 짐벌 중량 대비 2% 수준에 불과하다.

따라서 보정추 중량 감량을 통한 자이로센서 바이어스 에러 감소가 불가능했다.

그 결과 이를 줄이기 위한 방안으로 고가의 자이로센서 적용이 불가피했다. 제안된 방법을 통해 짐벌의 설계 시 좀 더 경제적인 형태의 자이로센서의 선정 및 적용이 가능하다는 점에 이점을 갖는다.

본 연구를 통해 짐벌 공진에 의한 진동 응답을 근본적으로 줄일 수 있었다. 따라서 다양한 환경에 대해 보다 경제적이고 효과적인 짐벌 설계가 가능할 것이라고 판단된다.

본 연구에서는 감쇠형 보정추를 질점이 1개인 1자유도로 설계하였으며, 이를 해석 및 실험으로 검증하였다.

추후 연구를 통해 질점이 2개 이상인 다자유도 감쇠형 보정추를 연구하고, 공진주파수를 의도적으로 조정하는 방안에 대한 연구가 진행될 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2023년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC200013CD).

REFERENCES

1. Baek, J.-H., Hong, S.-M., Kwak, Y.-K., Kim, S.-H., (2002), Backlash estimation of a seeker gimbal with two-stage gear

reducers, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 26(10), 2130-2141.

2. Lim, J.-K., Choi, Y.-J., Lyou, J., Seok, H.-D., Kim, B.-U., Kang, M.-S., (2005), Adaptive disturbance compensation control for heavy load target aiming system to improve stabilization performances, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 15(11), 1303-1310.

3. Yeo, S., Park, T., Kang, M., (2017), Feedforward compensation of mass unbalance torque for 2-DOF gimbal system, Proceedings of the KSPE Autumn Conference, 369-370.

4. Kang, M. S., Kim, J. J., Park, T. G., (2012), Stabilization control of OTM(On-The-Move) satellite antenna, Proceedings of the KSME Spring Autumn Conference, 83-34.

5. Kang, M.-S., Cho, Y.-W., (2010), Stabilization control of line of sight of OTM(On-The-Move) antenna, The Korean Institute of Electrical Engineers, 59(11), 2073-2082.

6. Yeo, S. M., Kang, M. S., (2018), A simultaneous experimental disturbances identification of gyro stabilized 2-Axes gimbal system for disturbance feedforward compensation control, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 21(4), 508-519.

7. Mu, Q., Liu, G., Zhong, M., Chu, Z., (2012), Imbalance torque compensation for three-axis inertially stabilized platform using acceleration feedforward, Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT) Proceedings, 157-160.

8. Mao, W., Liu, G., Li, J., Liu, J., (2016), An identification method for the unbalance parameters of a rotor-bearing system, Shock and Vibration, 2016(1), 8284625.

9. Kim, J. S., Lee, D.-K., Lee, S.-I., Cho, H.-J., Yoon, M.-Y., (2022), Theoretic and experimental analysis to the disturbance torque maintaining the angle of gimbal during the centrifugal acceleration test, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(10), 759-766.

10. Kathe, E., (2001), Gun barrel vibration absorber, US6167794B1.

11. Kwag, D.-G., Bae, J.-S., Hwang, J.-H., Kim, H.-S., (2011), A study on the vibration damping of a barrel using vibration absorber, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 21(5), 408-415.

12. Kwag, D.-G., Bae, J.-S., Hwang, J.-H., Kim, H.-S., (2011), An experimental study on the vibration absorber for vibration attenuation of cantilever beam structure, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 21(11), 991-996.

13. Kim, J. S., Park, S. W., Kang, S. W., Cho, J. H., (2017), Vibration absorber design and finite element analysis model building and experimental ion to prepare the anti-vibration design for the flight structure, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 34(5), 331-336.

**Jun-Soo Kim**

Research Engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: junsoo.kim@lignex1.com

**Dong-Kyun Lee**

Research Engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: dongkyun.lee@lignex1

**Jong-Kuk Lee**

Research Engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is linear system design.
E-mail: aqualjk@lignex1.com

**Hyeon-Jun Cho**

Research Engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: hyeonjun.cho@lignex1.com

**Ji-in Jung**

Research Engineer in Agency for Defense Development. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: jiinjung@add.re.kr

CNN을 이용한 방전 표면에 따른 방전 가공 조건 예측

Prediction of Machining Conditions from EDMed Surface Using CNN

이지효¹, 김재연¹, 심대보¹, 김보현^{2,#}
Ji Hyo Lee¹, Jae Yeon Kim¹, Dae Bo Sim¹, and Bo Hyun Kim^{2,#}

¹ 숭실대학교 대학원 기계공학과 (Department of Precision Engineering, Graduate School, Soongsil University)

² 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)

Corresponding Author / E-mail: bhkim@ssu.ac.kr, TEL: +82-2-820-0653

ORCID: 0009-0007-1763-1094

KEYWORDS: Micro EDM (미세 방전 가공), Micro machining (미세 가공), Deep learning (딥러닝), Convolutional neural network (합성곱신경망), Grad CAM (그래드캠)

CNN is one of the deep learning technologies useful for image-based pattern recognition and classification. For machining processes, this technique can be used to predict machining parameters and surface roughness. In electrical discharge machining (EDM), the machined surface is covered with many craters, the shape of which depends on the workpiece material and pulse parameters. In this study, CNN was applied to predict EDM parameters including capacitor, workpiece material, and surface roughness. After machining three metals (brass, stainless steel, and cemented carbide) with different discharge energies, images of machined surfaces were collected using a scanning electron microscope (SEM) and a digital microscope. Surface roughness of each surface was then measured. The CNN model was used to predict machining parameters and surface roughness.

Manuscript received: June 28, 2024 / Accepted: July 28, 2024

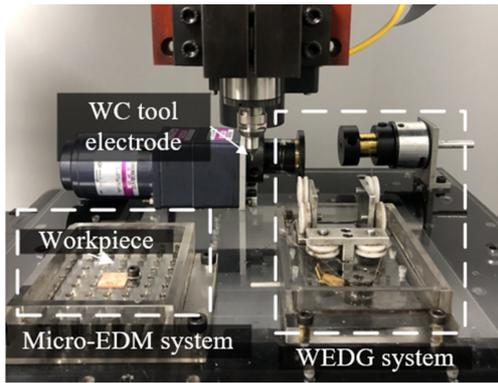
1. 서론

CNN (Convolutional Neural Network)은 딥러닝 알고리즘 중 하나로서, 이미지와 관련된 네트워크에 특화 되어있어 이미지 분류, 객체 감지, 얼굴 인식 등 주로 이미지 내 패턴인식에 활용되고 있다[1,2]. 또한 가공 공정에서 표면 이미지를 활용하여 가공 조건 모니터링 및 분석, 표면 거칠기 예측, 표면 결함 검출 등에 CNN을 비롯한 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 알고리즘이 활용되고 있다[3]. Giusti 등은 금형에 많이 사용되는 5가지 금형강 샘플의 표면 거칠기를 CNN을 통해 훈련시키고 예측 하도록 하였다. 또한 머신러닝을 활용하여 가공표면의 이미지에 결함이 있을 경우 결함 부분을 표시함으로써 결함탐지모델을 제시하였다[4]. Saeedi 등은 이미지 회귀모델 학습을 통해 가공표면의 거칠기를 예측하였다. 또한 ROI (Region of Interest) 추출 방법을 사용하여 가공 표면의 결함을 식별하는 모델을 제시하였다 [5]. Rifai 등은 CNN을 이용하여 선삭 가공과 밀링 가공의 가공

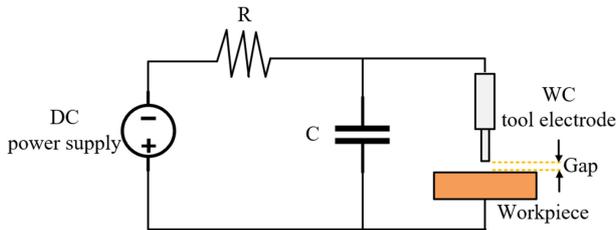
표면 거칠기를 예측하였으며 Abhilash 등은 금속 적층 가공으로 제작된 부품의 표면 품질을 CNN을 이용하여 분류하였다 [3,6].

방전가공은 선삭이나 밀링 가공과는 달리 공구 전극과 가공물 사이에 방전을 일으키고 그때 발생하는 열에너지로 재료를 제거하는 비접촉식 가공이다[7]. 높은 열이 발생하는 순간 재료의 용융과 절연액의 기화가 일어나 가공 표면에 방전흔(Crater)이 남게 된다[8,9]. 이때 방전흔의 크기와 형상은 재료의 열적 물성치와 방전에너지에 따라 달라지며, 방전흔이 중첩되면서 가공 표면을 형성한다[10,11]. 방전흔의 크기와 형상은 결과적으로 가공 표면의 표면 거칠기를 결정하게 된다.

본 논문에서는 각기 다른 방전 가공 조건을 이용하여 황동, 스테인리스강, 초경합금의 3가지의 금속을 가공한 후 CNN 모델을 사용하여 가공면의 이미지만으로 가공물 재료, 방전가공 조건, 표면 거칠기를 예측하고자 하였다. CNN 모델 학습을 위해 주사전자현미경(GeminiSEM 300, Zeiss Co.)과 디지털 현미경(DSX1000, Olympus Co.)으로 가공 표면 이미지를 수집하였으며



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Micro EDM system and (b) EDM circuit

이미지 촬영 방법에 따른 예측 정확도를 비교하였다. 또한 Grad-CAM기법을 통해 방전흔 형상의 어느 부분이 예측 정확도에 영향을 미치는지 분석하였다.

2. 실험 장치와 방법

Fig. 1(a)는 본 실험에서 사용한 방전가공을 위한 시스템이다. 공구 전극 제작을 위한 와이어 방전 연삭(Wire Electro Discharge Grinding, WEDG) 장치와 방전 가공을 위한 수조가 장착되어 있으며, 수직 이송기구에 스피들이 장착되어 있다. 수조에는 두께 1 mm의 황동, 스테인리스강, 초경합금 판재를 고정하였다. 방전 회로는 Fig. 1(b)와 같이 RC 회로를 사용하였다. 공구 전극의 재료로서 초경합금을 사용하였으며, 100 V의 인가 전압과 20,000 pF 축전용량(Capacitance)을 사용하여 WEDG방법으로 지름 1 mm의 환봉을 지름 0.7 mm으로 가공하였다[12,13]. Fig. 2는 제작한 미세 공구전극의 전자현미경 사진이다.

가공물 재료와 방전에너지에 따른 방전 표면을 제작하기 위해 초경합금 공구전극을 이용해 방전 가공을 수행하였다. 가공물의 재료로는 황동(Brass), 스테인리스강(Stainless Steel), 초경합금(WC-Co)을 사용하였으며 동일한 인가 전압 100 V에서 축전용량은 20, 200, 2,000 nF 총 3가지를 사용하였다. 이때 가공물에 나타나는 단발 방전흔과 중첩 방전흔의 형상과 크기를 관찰하고 이미지 데이터를 수집하였다. 방전흔의 이미지 측정과 수집을 위해 주사전자현미경과 디지털 현미경(OLS-5000, Olympus Co.)으로 측정하였다.

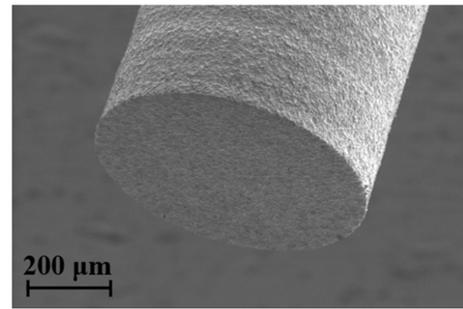


Fig. 2 SEM image of a micro tool electrode

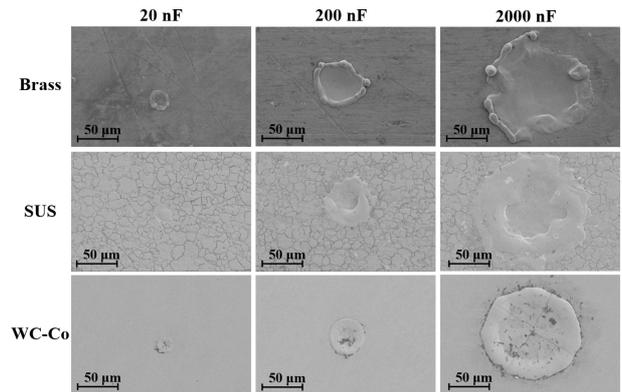


Fig. 3 SEM image of single discharge craters

3. 실험 결과

3.1 축전용량과 재료에 따른 단발 방전흔

방전에너지는 방전흔의 크기에 영향을 미치는 주요 원인 중 하나이다[9]. RC회로를 방전 회로로 사용하는 경우, 방전에너지는 축전용량과 인가 전압으로 결정된다. 이때 방전에너지는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[14,15].

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

위의 식에서 E는 전체 방전에너지, C는 축전용량, V는 전압을 의미한다. 단일방전에너지는 인가 전압과 축전용량의 크기가 증가함에 따라 에너지가 커지기 때문에 방전흔의 크기가 커진다. 본 실험에서는 가공물 재료와 축전용량에 따른 단발 방전흔의 크기를 관찰하였다. Fig. 3은 황동, 스테인리스강, 초경합금의 단발 방전흔의 전자현미경 사진이며, 축전용량이 20, 200, 2,000 nF순으로 증가함에 따라 방전흔의 크기가 커지는 것을 확인하였다. 이는 축전용량이 증가함에 따라 펄스에너지가 커지고 플라즈마 반경이 증가하기 때문이다[16]. Fig. 4는 황동의 단발 방전흔의 폭을 측정한 결과이다.

3.2 가공물 재료에 따른 중첩 방전흔 형상

실제 방전 가공된 제품의 가공표면은 단발 방전흔이 중첩되어 있으므로 중첩 방전흔의 형상을 관찰할 필요가 있다. 중첩 방전흔은

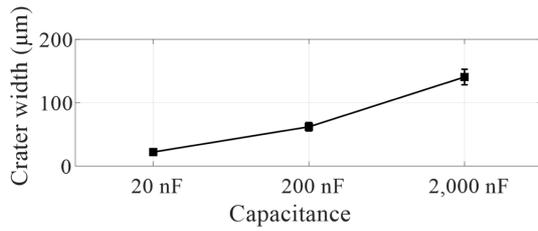


Fig. 4 Single crater width according to capacitance (workpiece: brass, voltage: 100 V)

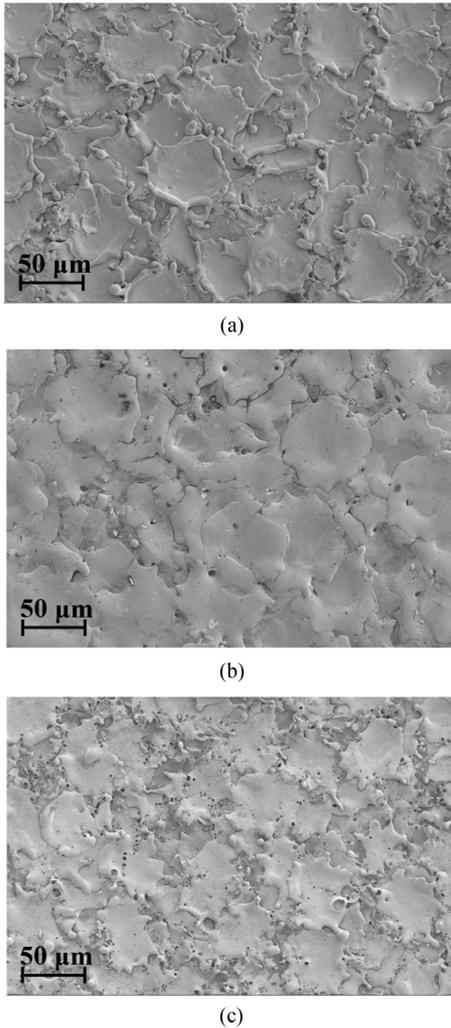


Fig. 5 Overlapping discharge crater SEM images (a) brass, (b) stainless steel, and (c) WC-Co

단일 방전흔과 다르게 기존에 형성되어 있는 방전흔 위에 연속적으로 방전이 발생하면서 생성되어 표면이 불균일하게 형성된다. 방전흔의 모양은 재료의 용융과 재응고층에 의해 결정되며, 재료의 녹는점, 열전도도, 비열, 열확산도 등에 의해 영향을 받는다[17].

본 실험에서는 가공물 재료에 따른 중첩 방전흔의 형상을 관찰하였다. Fig. 5는 가공물 재료에 따른 중첩 방전흔의 전자현미경 사진이다. 사진에서 볼 수 있는 것처럼 각 재료별로 방전흔의

Table 1 Properties of workpiece materials

Material	Brass	Stainless steel	WC-Co
Thermal conductivity [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]	99	16.8	110
Specific heat [$\text{J/kg}\times\text{K}$]	920	490	280
Melting temperature [K]	1,228	1,700	3,140
Latent heat of melting [kJ/kg]	168	285	330
Density [kg/m^3]	8,700	8,000	15,800
Thermal diffusivity [mm^2/s]	12.4	4.28	24.9

Table 2 Surface roughness of EDMed surface

Material	Capacitance [nF]	Ra [μm]
Brass	20	1.5
	200	2.7
	2,000	4.3
Stainless steel	20	1.1
	200	2.1
	2,000	3.2
WC-Co	20	1.7
	200	2.3
	2,000	3.3

모양이 각기 다른 것을 확인할 수 있으며, 황동과 초경합금은 스테인리스강에 비해 방전흔 가장자리 부분이 돌출된 것을 볼 수 있다. 방전가공 시 재료는 고온의 열로 용융되고 절연액의 폭발로 인해 방전이 시작된 지점을 중심으로 주변으로 흘러 나가게 된다. 방전 직후 용융된 재료가 냉각되면서 재응고층(Recast Layer)을 형성하며 재료의 열전도율과 열확산율(Thermal Diffusivity)이 높을수록 재응고층이 더 두껍고 많이 형성된다[18-22]. 각 재료의 열특성을 나타낸 Table 1에서 볼 수 있듯이, 스테인리스강은 황동과 초경합금에 비해 낮은 열전도율과 열확산율을 가지고 있어 방전흔 주변에 재응고층이 거의 형성되지 않은 반면 황동과 초경합금은 방전흔 주변에 재응고층이 두껍고 많이 형성되었음을 알 수 있다. 또한 녹는점이 높고 밀도가 높을수록 재료제거율이 낮아지고 방전흔의 크기가 작게 형성되기 때문에 초경합금의 방전흔이 가장 작은 것을 알 수 있다[23]. 초경합금은 황동과 스테인리스강에 비하여 가공 표면에 균열과 기공 등이 많이 나타났다. 이는 초경 합금에 포함된 코발트가 영향을 미쳤기 때문이다. 코발트의 녹는 점은 텅스텐 카바이드의 녹는 점에 비해 낮기 때문에 방전 가공 시 고온의 열에 의해 코발트가 증발되면서 가공 표면에 핀홀과 벌집모양 등의 균열이 표면에 형성된다[24].

3.3 축전용량과 재료에 따른 표면거칠기

축전용량과 재료에 따른 방전 표면의 표면거칠기를 공초점 현미경을 사용하여 측정하였다. Table 2는 가공물 재료와 축전용량에 따른 표면거칠기(Average Roughness, Ra) 값을 나타낸다.

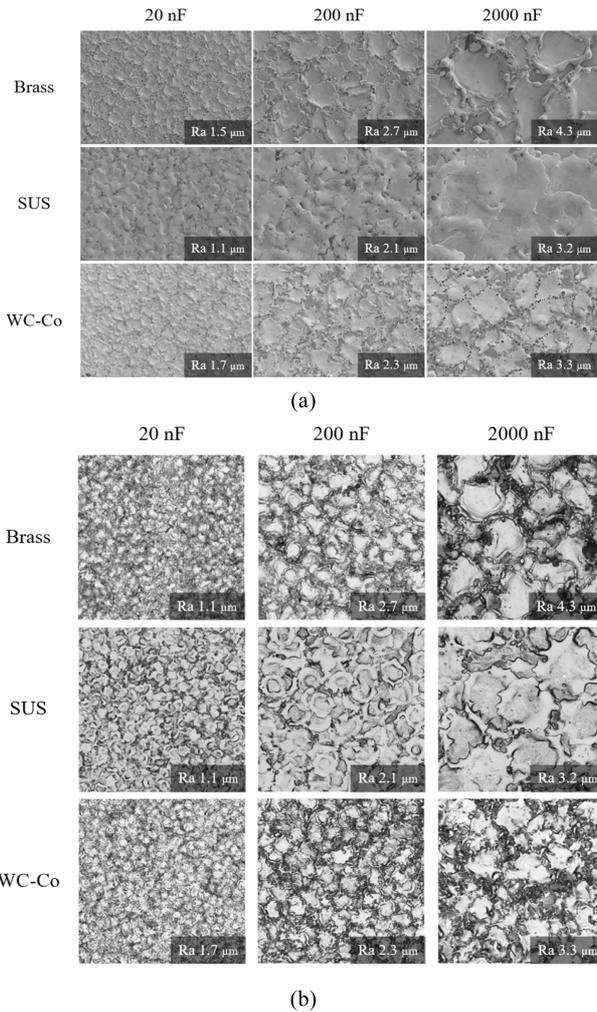


Fig. 6 Dataset images (a) SEM image and (b) digital image

4. 이미지 분류 CNN 모델 제안

4.1 이미지 데이터 셋

방전흔 이미지의 데이터는 가공물의 종류와 가공 조건에 따라 다르게 나타난 방전흔을 디지털 광학 현미경과 주사전자현미경으로 촬영하여 Fig. 6과 같이 이미지를 수집하였다. 또한 각 현미경 별로 가공 조건에 따른 방전흔 이미지를 2장씩 수집하여 18장으로 이미지 데이터셋을 구성하였다.

4.2 데이터 증강

모델학습시 이미지 데이터에 방전흔 외에 불필요한 데이터가 포함되지 않도록 데이터 전처리를 진행하였다. 또한 데이터의 개수가 많지 않으므로 데이터 부족에 의한 과적합을 방지하고자 데이터 증강(Data Augmentation)을 사용하였다. 데이터 증강 기법으로는 이미지 분할 기법을 사용하였으며 디지털 이미지와 SEM 이미지 데이터에 대해 각각 적용하였다. 이미지 분할은 가로, 세로 축으로 64픽셀씩 이동시키면서 하나의 이미지를 여러 장으로 분할하는 방식으로 진행하였다. 또한 분할 이미지 데이터의

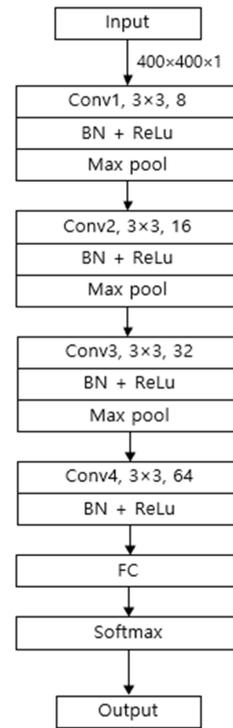


Fig. 7 CNN architecture

크기는 CNN 모델의 입력 이미지 데이터 크기와 동일한 픽셀 크기를 가지도록 하였다. 이를 바탕으로 디지털 이미지와 SEM 이미지에 대해 각각 900장의 이미지 데이터를 확보하였다. SEM 이미지 데이터는 1차원의 Grayscale 형태 그대로 사용하였으며 디지털 이미지 데이터는 3차원의 RGB 형태 이므로 Grayscale 형태로 변환하여 사용하였다. 라벨링은 가공물의 종류, 축전용량 조건, 표면 거칠기에 따라 가공 조건 클래스를 정의하였다. 또한 모델 학습과 평가를 위해 전처리한 분할 이미지 데이터의 80%는 훈련 데이터로, 20%는 검증 데이터로 나누어 진행하였다.

4.3 CNN 모델

Fig. 7은 본 연구에서 사용하기 위해 설계한 CNN 모델 구조를 나타낸다. CNN 모델은 4개의 Convolution Layer와 1개의 Fully-connected Layer로 구성하였다. Convolution Layer에는 ‘Same’ Padding과 활성화 함수 ReLu를 적용하였다. 또한 과적합 방지와 심층신경망 학습을 가속시킬 수 있는 Batch Normalization을 Convolution Layer와 ReLu 함수 사이에 사용하였다. Pooling Layer에서는 Max Pooling Layer를 사용하여 최댓값으로 데이터 크기를 줄였다. 이후 Dropout Layer를 적용하여 랜덤으로 은닉층에 있는 노드를 삭제해 훈련시켜 과적합을 방지하였다[25]. 또한 Fully-connected Layer와 Softmax 함수를 사용한 Output Layer를 사용해 최종 클래스와 확률값을 출력하였다.

4.4 모델 성능 평가

디지털 이미지와 SEM 이미지 모두 900장의 이미지 중 720장의

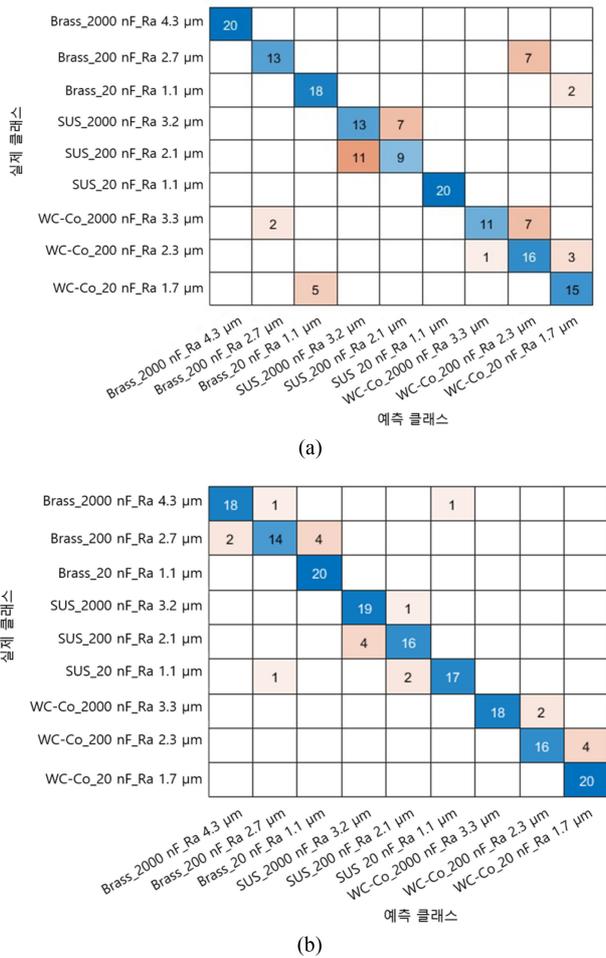


Fig. 8 Confusion matrix of CNN model (a) digital image and (b) SEM image

이미지를 학습 데이터로 사용하여 모델 학습을 진행하였다. 나머지 180장의 이미지는 검증데이터로 사용해 모델 검증을 진행하였다. 이때 학습 Epoch는 30으로 설정하였다. 또한 모델 학습에서는 모델의 손실률을 줄이고자 Adam을 Optimizer로 사용하였다.

Fig. 8은 CNN 모델을 검증데이터에 적용하였을 때 분류 결과를 Confusion Matrix로 나타낸 그림이다. 혼동 행렬 표에서 대각선은 올바르게 분류한 이미지 개수를 나타낸다. Fig. 8(a)와 같이 디지털 이미지 데이터를 사용할 경우에는 180장의 검증 이미지 데이터 중 오분류된 이미지가 45장으로 검증데이터에 대해서 75%의 정확도를 얻었다. 반면 SEM 이미지 데이터를 사용할 경우에는 Fig. 8(b)와 같이 총 180장의 검증 이미지 데이터 중 오분류된 이미지가 22장으로 검증데이터에 대해서 87%의 정확도를 얻었다. 디지털 이미지와 SEM 이미지에 동일한 CNN 알고리즘을 사용하였으나 SEM 이미지를 사용할 때 정확도가 더 높았음을 확인하였다.

4.5 Grad-CAM 시각화

Grad-CAM은 CNN 모델이 입력데이터에 대한 판단의 근거를

시각적으로 보여주는 기법이다[26]. Gradient 신호로 Grad-CAM 스코어를 계산함으로써 CNN 모델의 의사결정에 많은 영향을 미치는 입력 이미지의 특정 부분을 확인할 수 있다. Grad-CAM 스코어는 CNN 모델 구조에서 마지막 Convolution Layer의 Feature Map인 A^K 와 Softmax 함수를 적용하기 전 각 클래스에 대한 예측값인 y^c 값에 대한 스코어 기울기를 계산하여 나타낸다. 스코어 기울기는 식(2)과 같이 정의한다. 이후 각 Feature Map마다 스코어 기울기를 계산한 후 전체 픽셀 수 Z 에 대해 Global Average Pooling을 적용하여 평균 가중치 w_k^c 를 계산한다. 평균 가중치는 식(3)과 같이 정의한다. 이후 전체 Feature Map의 가중치를 합산하고 ReLU 함수를 적용하여 음수 값을 제거함으로써 최종 Grad-CAM 스코어를 계산한다. 최종 Grad-CAM 스코어는 식(4)와 같이 정의한다[26].

$$Gradient = \frac{\partial y^c}{\partial A^K} \tag{2}$$

$$w_k^c = \frac{1}{z} \sum_{i,j} \frac{\partial y^c}{\partial A^K} \tag{3}$$

$$L_{Grad-CAM}^c = ReLU(\sum_k w_k^c A^K) \tag{4}$$

입력데이터인 디지털 이미지와 SEM 이미지에 대해CNN 모델의 클래스 분류 결정에 영향을 미친 영역을 확인하기 위해 Grad-CAM을 적용하였다.

Figs. 9와 10은 각각 디지털 현미경과 전자현미경으로 촬영한 방전 가공면의 Grad-CAM을 Heatmap으로 시각화한 결과이다. Heatmap에서 CNN 모델의 의사결정에 많은 영향을 미치는 영역 일수록 픽셀값과 Grad-CAM 스코어 값이 높아 붉은 색을 띤다.

디지털 이미지를 사용하였을 때 Fig. 9(a)와 같이 CNN이 올바르게 예측할 경우 이미지 내 방전흔 형상을 띄는 부분이 가장 붉게 나타났으며 방전흔의 경계 부분은 푸른색으로 나타났다. 이는 CNN 모델이 클래스 분류 시 방전흔의 중심부분을 기준으로 방전흔 모양과 형태가 분류 결정 의사에 많은 영향을 미쳤음을 확인하였다. 반면 Fig. 9(b)와 같이 예측 결과가 다를 경우 방전흔이 아닌 부분도 붉은색으로 나타났다. 이에 CNN 모델이 방전흔의 모양과 형태를 제대로 인식하지 못하였으며 방전흔이 아닌 표면 결함과 불순물 등이 클래스 분류에 영향을 미쳤음을 확인하였다.

전자현미경 이미지를 사용하였을 때 CNN이 올바르게 예측한 경우 Fig. 10과 같이 가공 재료에 따라 Grad-CAM을 적용하였을 때의 Heatmap을 확인하였다. 황동과 스테인리스강의 Heatmap은 방전흔 가장자리의 재용고가 붉은 색을 띠며 따라 재용고층이 CNN 모델의 분류 결정에 많은 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 초경합금의 경우 황동과 스테인리스강에 비해 방전흔의 중심 부분이 CNN의 분류 결정에 영향을 미쳤음을 Grad-CAM으로 확인하였다. 그러나 방전흔의 가장자리 부분의 재용고층이 중심부보다 더 진한 붉은색으로 표시됨에 따라

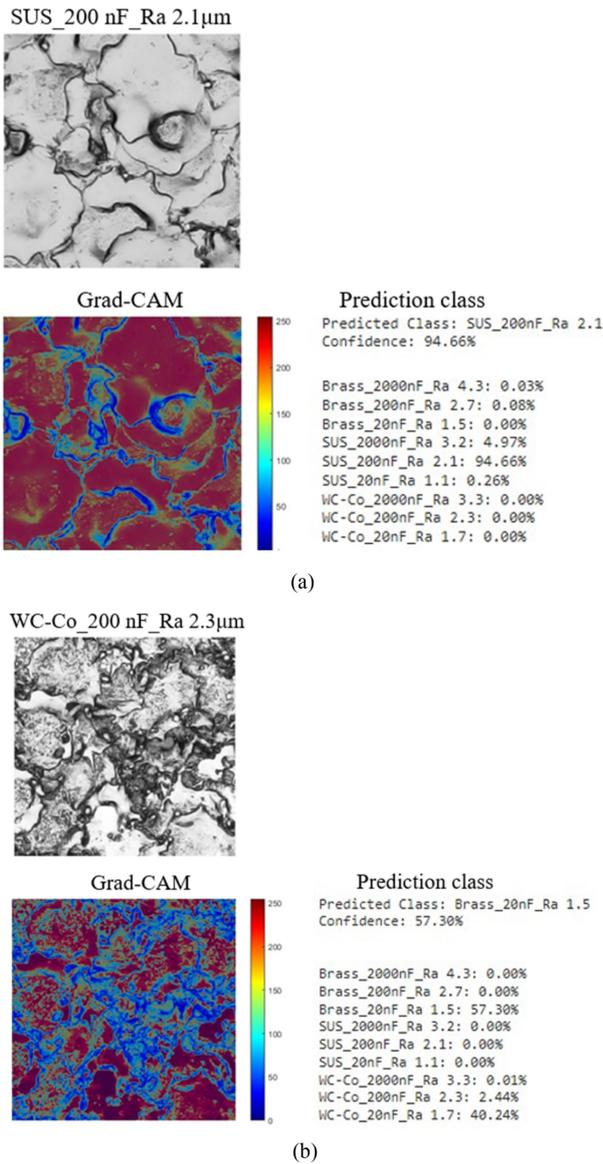


Fig. 9 Grad cam and prediction class of (a) correct predictions and (b) inaccurate predictions

결론적으로는 재응고층이 분류 결정에 가장 큰 영향을 미친다고 판단되었다. 이를 바탕으로 방전흔의 중심부보다 방전흔 사이의 경계면이나 방전흔의 가장자리가 CNN 모델의 분류 결정의사에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

5. 이미지 분할을 이용한 예측 향상 모델 제안

가공 현장에서 방전 가공면의 분류와 표면 거칠기를 예측하고자 할 때, 주사전자 현미경보다 디지털 현미경을 사용하는 것이 용이하지만 디지털 이미지의 경우 이미지 분류 예측 정확도가 낮다는 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 기존의 CNN 모델 구조를 변경하지 않고 Fig. 11과 같이 이미지 분할과 병합 기법을

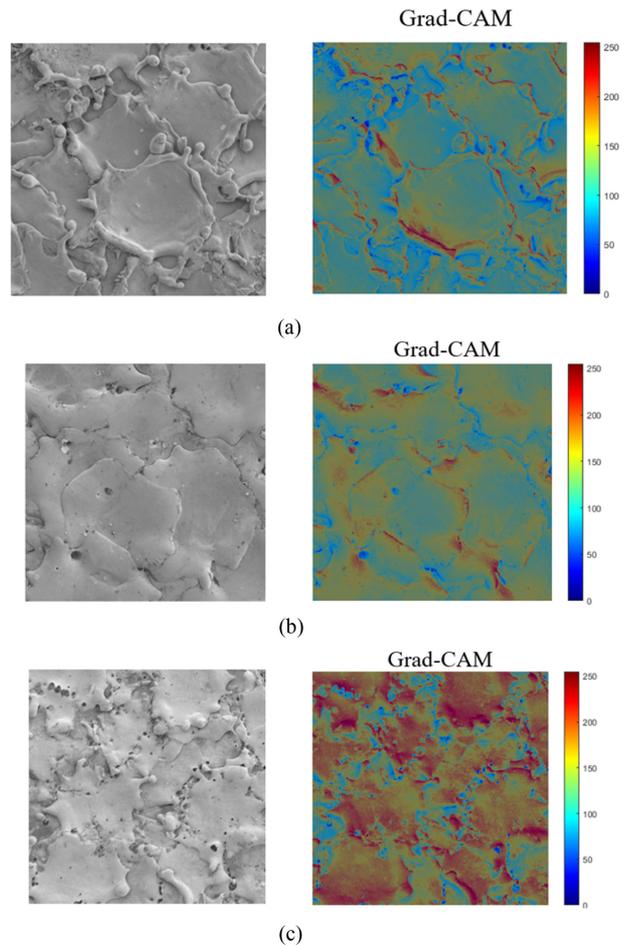


Fig. 10 Grad cam visualization of input data according to (a) brass, (b) stainless steel, and (c) WC-Co

사용해 디지털 이미지 기반 표면 거칠기 예측 정확도를 향상시켰다. 방전 가공면에는 일부 불균일한 방전흔이나, 경계에서의 재응고층 등의 결함이 존재하고 이러한 형상이 CNN 모델의 예측 정확도를 떨어뜨리게 된다. 하지만 디지털 현미경으로 방전 가공 표면을 촬영할 때 측정 영역을 조절하면 Fig. 11(a)와 같이 충분히 많은 방전흔이 포함된 이미지를 얻을 수 있다. 전체 이미지에서 가공 조건별 방전흔의 형태와 특징이 잘 드러나도록 방전흔 크기 정도의 이미지로 분할한 뒤 Fig. 11(b)와 같이 분할한 이미지들을 기존 CNN 모델을 사용하여 각 이미지에 대해 출력되는 예측률을 합산하고 그중 가장 높은 값을 가진 클래스가 출력되도록 하였다. 이후 Fig. 11(c)와 같이 분할 이미지에 대해 출력된 예측률을 합산하고 그중 가장 높은 값을 가진 클래스가 출력되도록 하였다. 디지털 이미지를 사용한 기존 CNN 모델의 예측 정확도는 75%를 보인 반면에, 이 방식을 통해 거의 100%에 가까운 예측 정확도를 얻을 수 있었다. 또한 Fig. 12와 같이 모델 훈련에 사용되지 않은 가공 표면에 대해서도 100%의 예측 정확도를 얻었다. 이는 분할한 일부 이미지에서 불균일한 방전흔, 불순물 등이 존재하여 분류 예측 결과가 부정확하더라도 결과적으로 분할 이미지의 클래스 예측률을 모두 합산해 최종

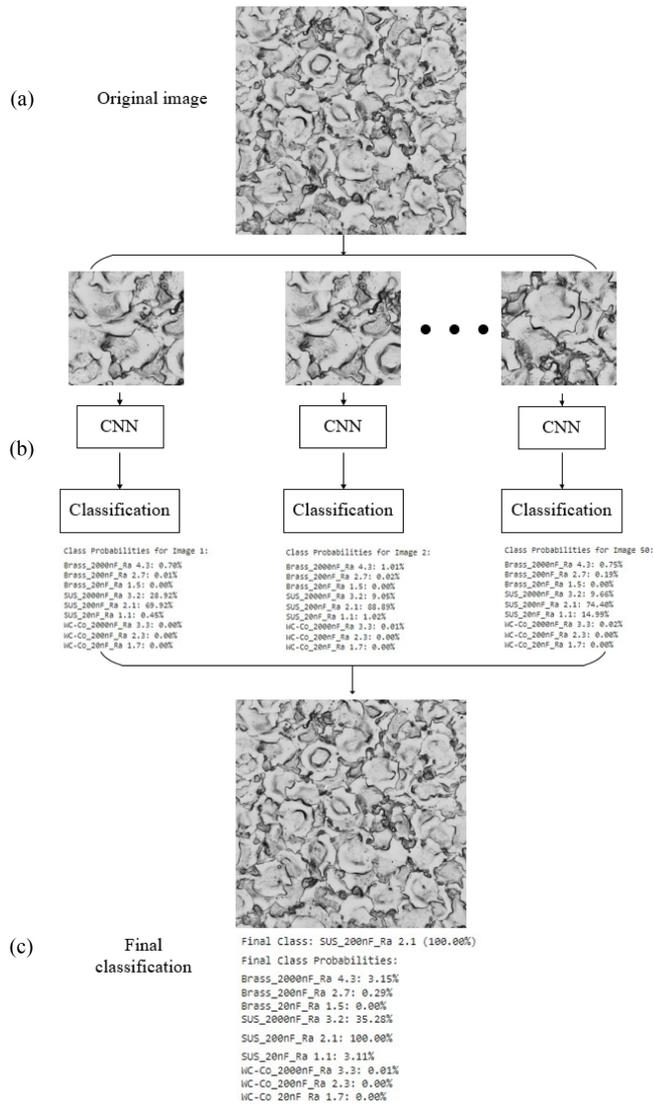


Fig. 11 Model structure to enhance prediction accuracy



Fig. 12 Prediction results for images that were not used for model training

클래스 예측이 이뤄지기 때문에 가공표면 결함이 예측 정확도에 미치는 영향을 크게 줄이는 것을 확인하였다.

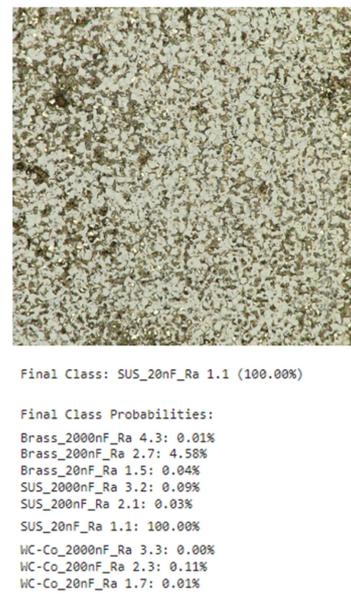


Fig. 13 Prediction results for EDM surface machined with 2 nF

6. 결론

본 연구에서는 방전흔 이미지를 기반으로 가공물 재료, 가공 조건, 표면 거칠기를 예측하기 위한 CNN 모델을 설계하고 예측 정확도 향상을 위한 딥러닝 구조를 제안하였다. 방전흔 이미지는 주사전자 현미경과 디지털 현미경 두 가지 방법으로 수집하였다. 동일한 CNN 모델 알고리즘을 사용할 때 검증데이터의 정확도는 주사전자현미경의 이미지가 디지털 현미경의 이미지보다 높게 나타났으며 Grad-CAM 시각화를 통해 방전흔의 가장자리 또는 방전흔 주변의 재용고층이 CNN 모델의 클래스 분류 결과와 예측 정확도에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 디지털 현미경 이미지의 예측 정확도를 높이는 방법으로 CNN 모델 구조를 수정하지 않고 이미지 분할 및 예측을 합산 기법을 제안하였다. 이를 통해 정확도가 낮은 디지털 이미지의 CNN 모델 예측 정확도를 향상시켰다. 본 연구에서는 축전 용량 20, 200, 2,000 nF의 일부 가공 조건에 대해서만 CNN 모델을 훈련시켰으므로 다른 가공 조건에 대한 예측에 한계가 있다. 그 예로, Fig. 13과 같이 2 nF로 가공된 방전흔은 20 nF로 예측이 된다. 하지만 훈련된 가공 조건 중, 방전흔 크기가 가장 작은 조건인 20 nF로 예측되는 것으로 보아 다양한 가공 조건의 이미지를 추가하여 훈련시키면 예측 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1067961).

REFERENCES

1. Janiesch, C., Zschech, P., Heinrich, K., (2021), Machine learning and deep learning, *Electronic Markets*, 31(3), 685-695.
2. Sharma, N., Jain, V., Mishra, A., (2018), An analysis of convolutional neural networks for image classification, *Procedia Computer Science*, 132, 377-384.
3. Rifai, A. P., Aoyama, H., Tho, N. H., Md Dawal, S. Z., Masruroh, N. A., (2020), Evaluation of turned and milled surfaces roughness using convolutional neural network, *Measurement*, 161, 107860.
4. Giusti, A., Dotta, M., Maradia, U., Boccadoro, M., Gambardella, L. M., Nasciuti, A., (2020), Image-based measurement of material roughness using machine learning techniques, *Procedia CIRP*, 95, 377-382.
5. Saeedi, J., Dotta, M., Galli, A., Nasciuti, A., Maradia, U., Boccadoro, M., Gambardella, L. M., Giusti, A., (2021), Measurement and inspection of electrical discharge machined steel surfaces using deep neural networks, *Machine Vision and Applications*, 32, 1-15.
6. Abhilash, P. M., Ahmed, A., (2023), Convolutional neural network-based classification for improving the surface quality of metal additive manufactured components, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(9), 3873-3885.
7. 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.
8. Moon, I. Y., Kim, B. H., (2013), Micro machining of titanium alloy using polycrystalline diamond tools, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 30(3), 284-291.
9. 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.
10. Lee, P. A., Lee, U. S., Sim, D. B., Kim, B. H., (2023), Microfluidic chip fabrication of fused silica using microgrinding, *Micromachines*, 14(1), 96.
11. Na, Y., Lee, U. S., Kim, B. H., (2021), Experimental study on micro-grinding of ceramics for micro-structuring, *Applied Sciences*, 11(17), 8119.
12. Lee, P. A., Kim, B. H., (2022), A study of microdrilling of fused silica using edmed PCD tools, *Applied Sciences*, 12(21), 11166.
13. Kim, M. K., Yang, C. Y., Sim, D. B., Lee, J. H., Kim, B. H., (2024), Study on micro grooving of tungsten carbide using disk tool, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 41(2), 123-129.
14. Chu, X., Feng, W., Wang, C., Hong, Y., (2017), Analysis of mechanism based on two types of pulse generators in micro-edm using single pulse discharge, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 3217-3230.
15. Wong, Y. S., Rahman, M., Lim, H. S., 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.
16. Shao, B., Rajurkar, K. P., (2015), Modelling of the crater formation in micro-EDM, *Procedia CIRP*, 33, 376-381.
17. Feng, X., Wong, Y. S., Hong, G. S., (2016), Characterization and geometric modeling of single and overlapping craters in micro-EDM, *Machining Science and Technology*, 20(1), 79-98.
18. Nadda, R., Nirala, C. K., (2019), Effect of single spark micro-EDM on crater size of different alloys, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012032.
19. Kar, S., Patowari, P. K., (2019), Experimental investigation of machinability and surface characteristics in microelectrical discharge milling of titanium, stainless steel and copper, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(9), 7843-7858.
20. Feng, W., Chu, X., Hong, Y., Wang, K., Zhang, L., (2018), Studies on micro-EDM surface performance using a comprehensive method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 1875-1889.
21. Kumar, A., Kumar, V., Kumar, J., (2016), Surface crack density and recast layer thickness analysis in wedm process through response surface methodology, *Machining Science and Technology*, 20(2), 201-230.
22. Mahardika, M., Tsujimoto, T., Mitsui, K., (2008), A new approach on the determination of ease of machining by EDM processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(7-8), 746-760.
23. Paswan, K., Sharma, S., Li, C., Mohammed, K. A., Kumar, A., Abbas, M., Tag-Eldin, E. M., (2023), Unravelling the analysis of electrical discharge machining process parameters, microstructural morphology, surface integrity, recast layer formation, and material properties: A comparative study of aluminum, brass, and inconel 617 materials, *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 7713-7729.
24. Pandey, P. C., Jilani, S. T., (1987), Electrical machining characteristics of cemented carbides, *Wear*, 116(1), 77-88.
25. Alzubaidi, L., Zhang, J., Humaidi, A. J., Al-Dujaili, A., Duan, Y., Al-Shamma, O., Santamaria, J., Fadhel, M. A., Al-Amidie, M., Farhan, L., (2021), Review of deep learning: Concepts, cnn architectures, challenges, applications, future directions, *Journal of Big Data*, 8, 1-74.
26. Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., Batra, D., (2017), Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 618-626.



Ji Hyo Lee

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

E-mail: jihyolee@soongsil.ac.kr



Jae Yeon Kim

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

E-mail: kimjyprema@soongsil.ac.kr



Dae Bo Sim

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

E-mail: daebosim@soongsil.ac.kr



Bo Hyun Kim

Professor in the School of Mechanical engineering, Soongsil University. His research topics are micro mechanical and non-conventional machining processes.

E-mail: bhkim@ssu.ac.kr

선형 모터 모션 스테이지의 맞춤형 전류 제어

Customized Current Control of a Linear Motor Motion Stage

양경호¹, 안형준^{2,#}
Kyung Ho Yang¹ and Hyeong-Joon Ahn^{2,#}

1 숭실대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University)
2 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)
Corresponding Author / E-mail: ahj123@ssu.ac.kr, TEL: +82-10-2701-7528
ORCID: 0000-0002-4947-2311

KEYWORDS: Linear motor motion stage (선형 모터 모션 스테이지), Positioning performance (위치 결정 성능), Customized current control (맞춤형 전류 제어)

In the 4th Industrial Revolution, advancements in semiconductor technology demand high performance, efficiency, and precision, highlighting the importance of high-speed and ultra-precise motion stages. To improve positioning performance of a motion stage, robust torque generation by current controllers alongside position control is crucial. This paper explored a custom current control for linear motor motion stages. We built a linear motor motion stage with a 560 mm stroke, 5 m/s speed, and 280 N continuous thrust supported by air bearings and equipped with a passive reaction force compensation. Custom user code for position and current controls of PowerPMAC motion controller was developed for the motion stage. The position control code included frequency domain system identification, disturbance observer, and repetitive learning control while the current control code featured vector or d/q-axis current controllers and disturbance observer. We developed a current control tuning GUI to adjust the current control gain by injecting an excitation signal into the motion controller and measuring the frequency response of the open-loop transfer function. Experimental results confirmed the effectiveness of the custom current controller for evaluating static and dynamic performance.

Manuscript received: July 16, 2024 / Revised: August 21, 2024 / Accepted: September 2, 2024
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2024

NOMENCLATURE

C_i	=	Current Controller
C_m	=	Motion Controller
d	=	Disturbance
\hat{d}	=	Estimated Disturbance
I_{Act}	=	Actual Current
I_a, I_b, I_c	=	a,b, and c-Phase Currents
I_d, I_q	=	d and q-axis Currents
I_{dCmd}, I_{qCmd}	=	d and q-axis Current Commands
K_i	=	Current Integral Gain
K_{pb}, K_{pf}	=	Current Back and Forward-path Proportional Gains
L_n	=	Nominal Inductance of Motor

R_n	=	Nominal Resistance of Motor
s	=	Continuous Time Domain Variable
U_a, U_b, U_c	=	a,b, and c-Phase Input Voltages
U_d, U_q	=	d and q-axis Input Voltages
U^*	=	d and q-axis Input Voltages
z	=	Discrete Time Domain Variable
ω_D	=	Cutoff Frequency of Current DOB
θ_p	=	Phase Angle

1. 서론

21세기 4차 산업혁명 시대에 AI 기술이 발전하면서 반도체 회로의 집적도가 높아지고 수요가 폭발적으로 증가함에 따라

고성능, 고효율, 초정밀 반도체 생산 공정이 요구되고 있다[1]. 예를 들어, 반도체 노광 장비는 고속으로 이동하며 시간당 230 장의 웨이퍼를 나노미터 단위의 정밀도로 처리해야 한다[2].

고속 고정밀 반도체 생산 공정 장비의 핵심 요소로서 고성능 모션 스테이지의 중요성이 부각되고 있다. 스테이지의 모션 성능 향상을 위해서는 위치 제어기뿐 아니라 정밀한 추력 생성을 위한 전류 제어기도 중요하다[3]. 간단한 구조로 외란을 추정하고 보상하는 외란 관측기(DOB)를 전류 제어에 적용하여 모델의 불확실성과 역기전력을 보상할 수 있다[4-6]. 하지만 스테이지 최종 성능 향상을 위해서 시스템 주파수 응답을 고려한 체계적인 전류 제어기 설계가 필요하다[7-9].

수동 반발력 보상(Reaction Force Compensation, RFC) 선형 모터 모션 스테이지는 자석 트랙 관성 에너지로 이동자 반발력을 소산하지만 모션 종료 후 자석 트랙 잔류 진동으로 이동자의 정착 시간과 미세 지터(Zitter) 증가 등의 성능 저하가 발생할 수 있다[10]. 모델 기반 외란 관측기를 모션 제어에 적용하여 반발력 보상 스테이지 성능 저하를 줄일 수 있다[11-12].

이 논문에서는 선형 모터 모션 스테이지의 위치 결정 성능 향상을 위한 맞춤형 전류 제어를 연구하였다. 먼저 에어 베어링으로 지지되고 수동 반발력 보상을 갖춘 560 mm 스트로크, 5 m/s 속도, 280 N 추력의 선형 모터 모션 스테이지를 구축하였다. Power PMAC 모션 제어기의 맞춤형 전류 제어 유저 코드를 개발하고 이를 선형 모터 모션 스테이지에 적용하였다. 맞춤형 전류 제어에는 d/q축 전류 제어기와 전류 외란 관측기가 포함된다. 모션 제어기에 가진 신호를 주입하고 전체 시스템 주파수 응답을 측정하고 이를 바탕으로 전류 제어기 이득을 조절할 수 있는 튜닝 GUI를 개발하였다. 전류 제어기 이득 조절 전후 Power PMAC 전류 제어기와 정적 및 동적 성능을 비교하여 그 효과성을 검증하였다.

2. 전류 제어 유저 코드 구현

2.1 시스템 구성

수동 반발력 보상 선형 모터 모션 스테이지 모션 제어 시스템은 Fig. 1과 같이 공심형 선형 모터(Justek JTKL-3638), Direct PWM 드라이버(Servotronix CDHD-006), 상용 모션 제어기(PowerPMAC, ACC-24E3)로 구성되어 있다. 모션 스테이지는 최대 스트로크 560 mm, 최대 속도 5 m/s, 연속 추력 280 N, 추력 계수(K_m) 34.7 N/A를 가진다. 1 μ m 분해능의 아날로그 사인 엔코더(Renishaw)를 측정에 사용한다.

2.2 전류 제어 알고리즘

Power PMAC 제어기의 전류 제어 알고리즘은 Fig. 2와 같이 d/q축 PI 제어와 후진 경로 비례 이득(K_{pb})을 포함한다. d축 전류 명령(I_{dCmd})은 0이고, q축 전류 명령(I_{qCmd})은 위치 제어 추력 명령이다. 각 제어기 출력은 식(1)과 같이 역 Park and Clarke

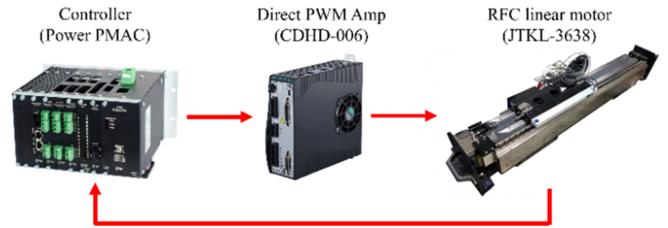


Fig. 1 Control system of the RFC linear motor motion stage

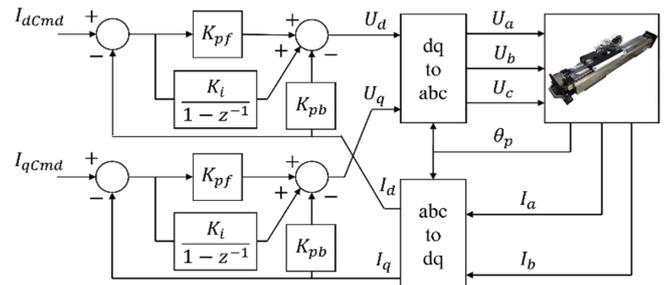


Fig. 2 Block diagram of PMAC current controller

변환을 거쳐 3상으로 PWM 드라이버에 입력된다. 측정된 실제 3상 전류는 다시 식(2)와 같이 Park and Clarke 변환을 거쳐 d/q 축 전류 제어기로 귀환된다. Power PMAC 전류 제어기를 분석해 동일한 구조를 갖는 전류 제어기 유저 코드를 C언어로 작성하여 구현하였다.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_p) & \cos(\theta_p) \\ \sin(\theta_p + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_p + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_p - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_p - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p + \frac{\pi}{2}) & \cos(\theta_p + \frac{7\pi}{6}) & \cos(\theta_p - \frac{\pi}{6}) \\ \sin(\theta_p + \frac{\pi}{2}) & \sin(\theta_p + \frac{7\pi}{6}) & \sin(\theta_p - \frac{\pi}{6}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.3 전류 제어 실험

2.3.1 주파수 응답 비교

상용 제어기와 유저코드 전류 제어기 성능을 비교하기 위해 위치 제어기 서보 출력단에 1-1 kHz의 다중 주파수 정현파 신호를 주입하고 주파수 응답을 측정하여 Fig. 3에 나타냈다. 상용 제어기와 유저 코드 전류 제어기는 동일한 주파수 응답을 가진다. d축 전류 명령과 제어 출력은 거의 0에 가깝기 때문에 전류 명령으로 충분한 가진이 어려워 측정 주파수 응답에 잡음이 포함되어 있다.

2.3.2 시간 영역 성능 비교

Fig. 4와 같이 이동 거리 200 mm, 최대 속도 250 mm/s, 최대

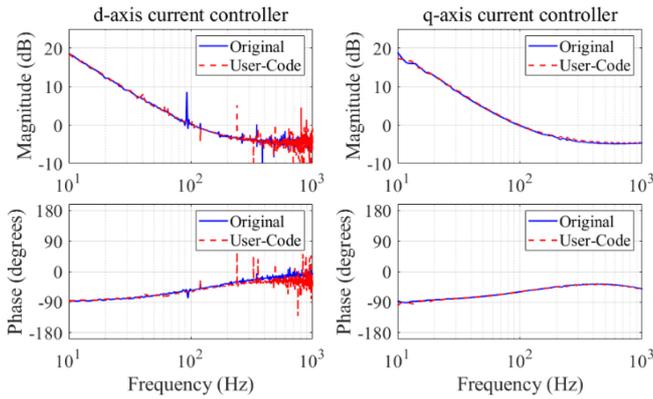


Fig. 3 FRF of current controllers

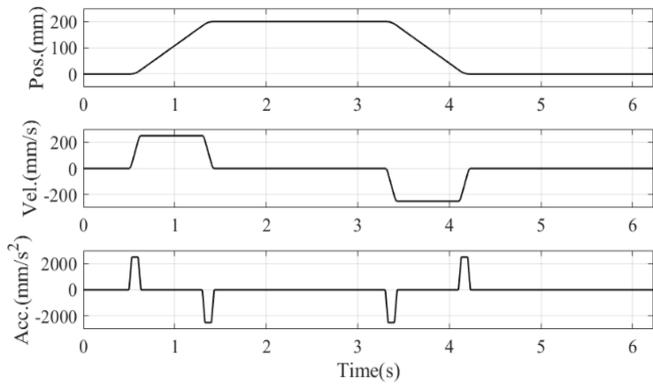


Fig. 4 Motion profiles

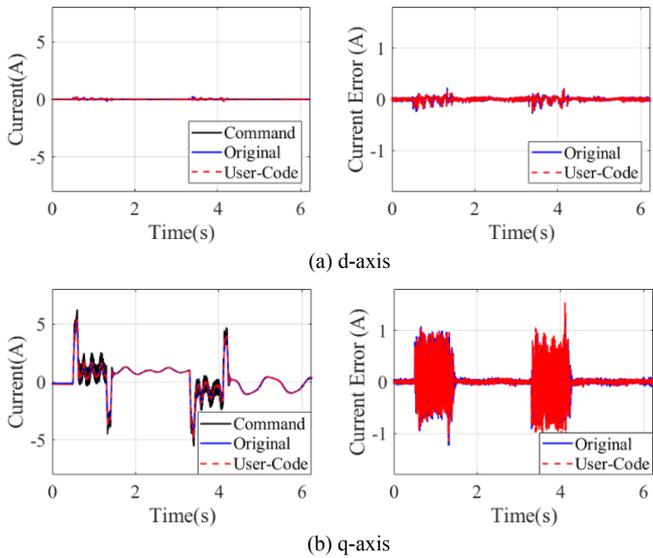


Fig. 5 Current and current errors

가속도 2,500 mm/s²의 모션 프로파일에 대한 d/q축 전류 명령, 실제 전류, 그리고 전류 오차를 Fig. 5에 나타냈다. 그리고 각 제어기 위치 명령 추종오차를 Fig. 6에 나타냈다. 유저 코드로 구현된 전류 제어기 추종 성능이 기존 PowerPMAC 전류 제어기와 동일하였다.

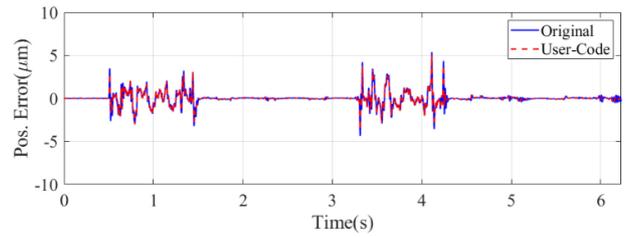


Fig. 6 Position errors

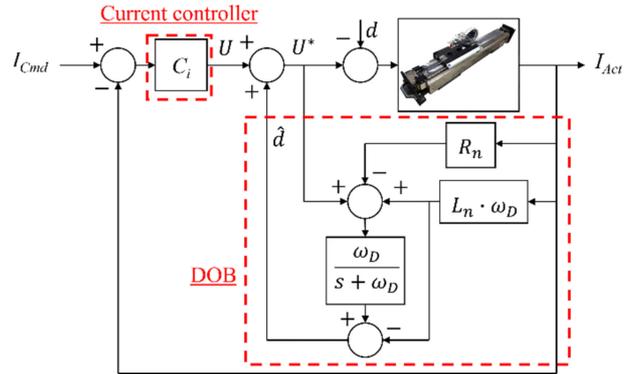


Fig. 7 Block diagram of Current DOB

2.4 전류 외란 관측기(DOB)

반발력 보상 선형 모터 모션 스테이지 고속 운전으로 발생하는 역기전력과 같은 외란을 보상하기 위해 d/q축 전류 제어기에 외란 관측기를 적용하였다. 전류 외란 관측기의 구조는 Fig. 7와 같고 공칭 인덕턴스(L_n), 공칭 저항(R_n), 절점주파수(ω_D)를 가지는 1차 Q 필터로 구성된다. 식(3)과 같이 선형 모터 실제 전류(I_{Act}), 전류 제어기 출력(U^*) 그리고 1차 Q필터로 외란을 추정하여 보상할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{d} &= \frac{\omega_D}{s + \omega_D} (U^* + L_n \omega_D I_{Act} + R_n I_{Act}) - L_n \omega_D I_{Act} \\ &= \frac{\omega_D}{s + \omega_D} U^* + \left(-\frac{s}{s + \omega_D} L_n \omega_D I_{Act} - \frac{\omega_D}{s + \omega_D} R_n I_{Act} \right) \\ &= \frac{\omega_D}{s + \omega_D} U^* - \frac{\omega_D}{s + \omega_D} I_{Act} (L_n s + R_n) \\ &= \frac{\omega_D}{s + \omega_D} U^* - \frac{\omega_D}{s + \omega_D} \frac{U^* - d}{L_n s - R_n} (L_n s + R_n) = \frac{\omega_D - d}{s + \omega_D} \end{aligned} \tag{3}$$

3. 주파수 영역 전류 제어기 설계

3.1 주파수 응답 측정

Fig. 8과 같이 1-1 kHz 다중 정현파 신호를 주입하여 전기 시스템(P_i)과 기계 시스템(P_m)을 포함한 선형 모터 모션 스테이지 (P), 위치 제어(C_m) 그리고 전류 제어(C_i)로 구성된 전체 시스템 주파수 응답을 측정하였다. 가진 신호 주입 전후의 위치 제어기 출력을 이용하여 개루프 주파수 응답을 측정하였다.

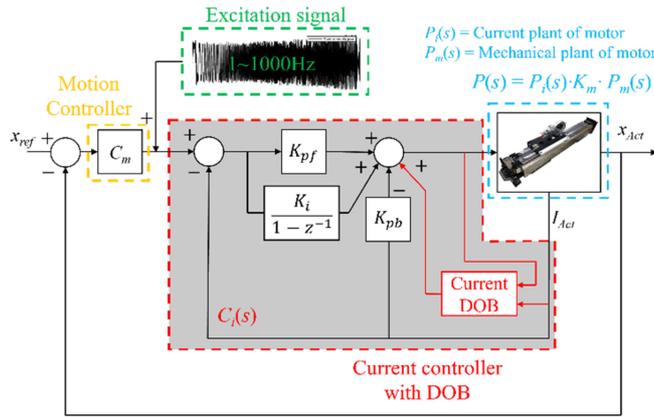
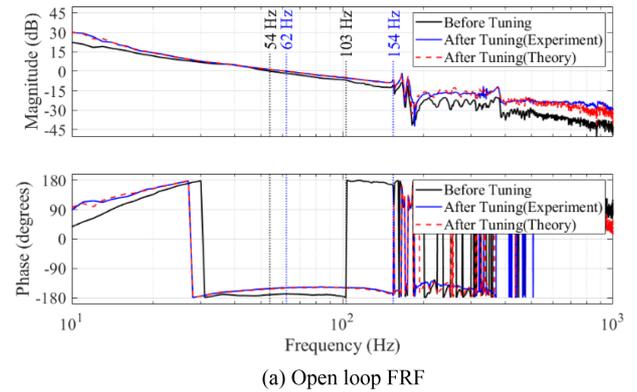
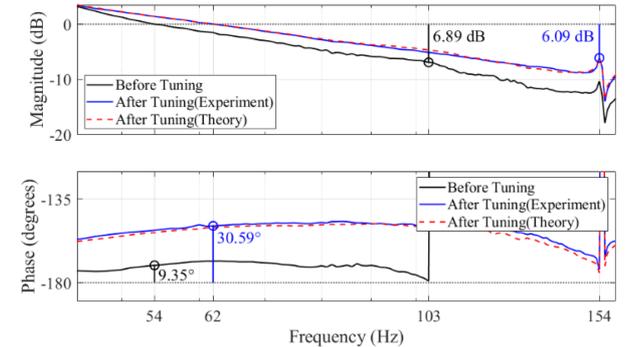


Fig. 8 Schematic of frequency response measurement



(a) Open loop FRF



(b) Gain and phase margin

Fig. 10 FRF of the open-loop transfer function

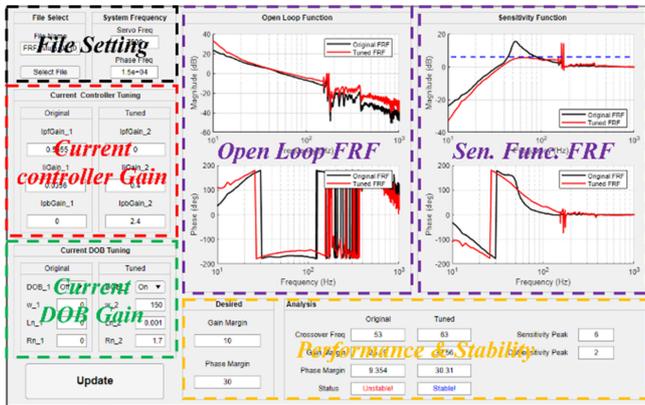


Fig. 9 Frequency response based Current control tuning GUI

Table 1 Current controller tuning

Gains	Before	After	Gains	Before	After
K_{pf}	0.566	0	K_{pb}	0	2.4
K_i	0.037	0.4	ω_D	0	150

3.2 주파수 응답 기반 전류 제어기 설계

전류 제어가 포함된 모션 제어 시스템의 안정성과 성능을 예측하고 평가하기 위해 Fig. 9와 같은 주파수 응답 기반 전류 제어 튜닝 GUI를 개발하였다. 기존 전류 제어 이득, 외란 관측기가 포함된 전류 제어기 전달함수 식(4)와 3.1에서 측정한 개루프 전달함수 주파수 응답을 이용해 제어 이득 변화에 따른 개루프 전달함수, 페루프 민감도 함수, 대역폭, 이득 및 위상 여유 변화를 예측할 수 있다. 특히, Fig. 9 오른쪽 페루프 민감도 함수에서 기계 모드에 의한 최댓값이 크기 때문에 전체 주파수 응답을 고려한 제어 이득 조절이 필요하다. Table 1에 튜닝 전후의 전류 제어기 이득을 표시하였다.

$$C_i(s) = \frac{K_{pf} + \frac{K_i}{s}}{\frac{s}{s + \omega_D} + P_i(s) \left[(L_n s + R_n) \frac{\omega_D}{s + \omega_D} + K_{pb} \right]} \quad (4)$$

Table 2 Accuracy of the current control tuning GUI

Performance	Theory	Experiment	Accuracy
Bandwidth	62.26 Hz	62.18 Hz	99.87%
Phase margin	29.74°	30.59°	97.22%
Gain margin	6.03 dB	6.09 dB	98.92%

4. 실험 결과

4.1 주파수 영역 전류 제어기 설계 결과

전류 제어 이득 조절 전후 이론 및 실험 개루프 전달 함수 주파수 응답을 Fig. 10에 나타냈다. 이득 조절 후 대역폭과 이득 및 위상 여유 변화를 각각 Figs. 10(a)와 10(b)에 나타냈다. 전류 제어 튜닝 GUI 예측 정확도는 Table 2와 같이 대역폭이 99.87%, 위상 여유가 97.22%, 이득 여유가 98.92%이다.

4.2 시간 영역 성능 평가

4.2.1 모션 스테이지 위치 결정 성능 평가

Fig. 4의 모션 프로파일을 사용하여 전류 제어 이득 조절 전후 모션 스테이지 위치 결정 성능, 즉, 추종 오차와 지터를 Fig. 11에 나타냈다. 동일한 위치 제어 이득에서 전류 제어 이득 조절만으로 지터의 평균 제공근 오차가 12.19% 감소했다. 0.2 mm 저주파 지터는 반발력 보상 선형 모터 모션 스테이지의 자석 트랙 잔류 진동으로 발생하며 위치 제어 외란 관측기로 지터 크기가 크게 감소했지만 추가 보상을 위한 연구가 진행 중이다[11-12].

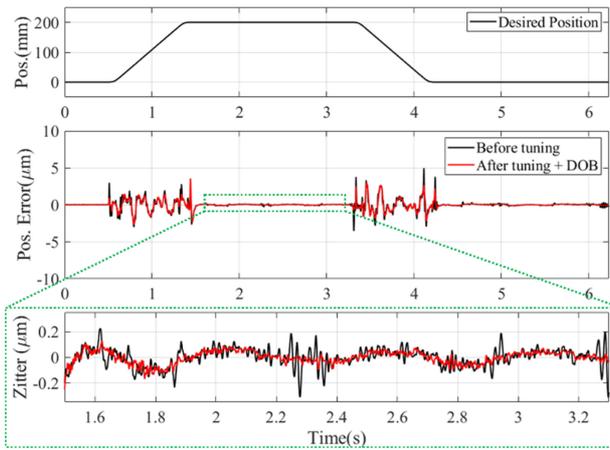


Fig. 11 Following errors

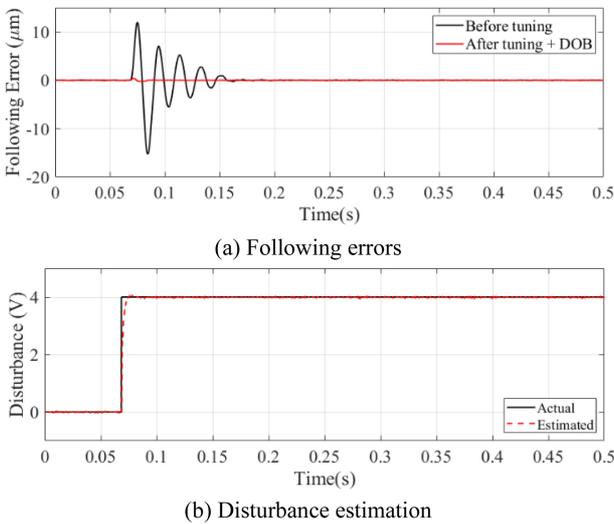


Fig. 12 Current DOB experiment

4.3 외란 제거 성능 평가

전류 외란 관측기의 외란 제거 성능을 평가하기 위해 크기 4 V 계단 외란을 d/q축 제어기 출력단에 입력하였다. 외란을 입력한 추종 오차를 Fig. 12(a)에, 입력한 외란과 추정 외란을 Fig. 12(b)에 나타내었다. 외란 관측기 적용후 전압 외란에 의한 추종 오차가 82.41% 감소했다.

5. 결론

이 연구에서는 반발력 보상 선형 모터 모션 스테이지의 위치 결정 성능을 향상시키기 위해 맞춤형 전류 제어 방법을 개발하고 이를 실험적으로 검증하였다. 먼저 상용 Power PMAC 모션 제어기의 전류 제어기와 동일한 구조를 갖는 유저 코드를 개발했다. 전류 외란 관측기가 포함된 전류 제어기 주파수 영역 설계를 위해 개루프 전달함수의 주파수 응답을 측정하여 전류 제어기 이득을 조절할 수 있는 전류 제어 튜닝 GUI를 개발하였다. 전류 제어

튜닝 GUI는 전류 제어 이득 조절 전후 대역폭을 99.87%, 위상 여유를 97.22%, 이득 여유를 98.92%의 정확도로 예측하였다. 주파수 영역 기반 전류 제어기 이득 조절 후 지터의 평균 제곱근 오차가 12.19% 감소했다. 전류 제어기 출력단 4 V계단 외란의 제거 성능을 비교한 결과 외란에 의한 추종 오차가 82.41% 감소하여 맞춤형 전류 제어기의 효과를 실험적으로 검증했다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 산업통상자원부(한국산업기술평가관리원) 산업기술혁신사업(2021년도 소재부품기술개발사업)의 지원으로 수행되었음(20017202).

REFERENCES

- Chen, Z., Yao, B., Wang, Q., (2014), μ -Synthesis-based adaptive robust control of linear motor driven stages with high-frequency dynamics: A case study, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(3), 1482-1490.
- Schmidt, R. H. M., (2012), Ultra-precision engineering in lithographic exposure equipment for the semiconductor industry, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1973), 3950-3972.
- Kim, Y. H, Kim, K.-S., Kim, S. H., (2015), A DOB based robust current control of Permanent Magnet Synchronous Motor, *Proceedings of the 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 301-306.
- Chen, H. C., Huang, M. S., Liaw, C. M., Chang, Y. C., Yu, P. Y., Huang, J. M., (2000), Robust current control for brushless DC motors, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 147(6), 503-512.
- Liu, J., Wu, W., Chung, H. S.-H., Blaabjerg, F., (2019), Disturbance observer-based adaptive current control with self-learning ability to improve the grid-injected current for *LCL*-filtered grid-connected inverter, *IEEE Access*, 7, 105376-105390.
- Wallscheid, O., Ngoumtsa, E. F. B., (2020), Investigation of disturbance observers for model predictive current control in electric drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(12), 13563-13572.
- Zhang, M.-G., Wang, X.-G., Liu, M.-Q., (2005), Adaptive PID control based on RBF neural network identification, *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'05)*, 681-683.
- Chen, Y., Yang, M., Long, J., Qu, W., Xu, D., Blaabjerg, F., (2019), A moderate online servo controller parameter self-tuning method via variable-period inertia identification, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(12), 12165-12180.

9. Malassé, O., Zasadzinski, M., Razik, H., Iung, C., (1993), A comparison of robust loop shaping designs: an application to an electromechanical actuator, Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference-SMC, 3(1), 764-769.
10. Nguyen, D. C., Ahn, H. J., (2014), Dynamic analysis and iterative design of a passive reaction force compensation device for a linear motor motion stage, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 15, 2367-2373
11. Yoo, S. J., Ahn, H.-J., (2020), Software-based integral product architecture for modular motion control system of a RFC linear motor motion stage: Model-based DOB for residual vibration suppression, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 21, 203-209.
12. Jeon, H. W., Ahn, H. J., (2024), Model-based motion control design of a linear motor stage in frequency domain, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 41(1), 55-60.

**Kyung Ho Yang**

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is linear motor control.

E-mail: bgyang2322@gmail.com

**Hyeong-Joon Ahn**

Received B.Sc., M.Sc., Ph.D. degrees from the Department of Mechanical Design & Production Engineering, Seoul National University. His research interest is the area of mechatronics, sensors, actuators, control and precision machine design.

E-mail: ahj123@ssu.ac.kr

나노미터 수준의 변위제어가 가능한 실시간 유·무선 재료시험기

In-situ Wired and Wireless Material Testing System with Nanometer-level Displacement Control

박경석¹, 김필호², 오충석¹,#
Kyoung Seok Park¹, Pill Ho Kim², and Chung-Seog Oh¹,#

¹ 국립금오공과대학교 기계시스템공학부 (School of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
² (주)알앤비 (Research and Business, R&B Inc.)
Corresponding Author / E-mail: ocs@kumoh.ac.kr, TEL: +82-54-478-7323
ORCID: 0000-0002-0340-345X

KEYWORDS: Displacement control (변위제어), In-situ (실시간), Material testing system (재료시험기), Scanning electron microscope (주사전자현미경), Wireless (무선)

To accurately assess mechanical properties of micro- and nano-sized specimens, a reliable material testing system is indispensable. However, due to small sizes of these test specimens, in-situ measurement of their mechanical behavior necessitates installing the tester within high-magnification microscopes such as SEM. Traditionally, researchers have used wired methods by placing the tester inside the SEM chamber and connecting it to an external controller via electrical feedthrough. Unfortunately, this approach is cumbersome. In addition, it limits its compatibility with other SEMs. In this study, we developed a compact controller capable of driving 3-axis piezoelectric actuators with nanometer-level displacement control resolution via Bluetooth communication. This innovative setup enables wireless control and data acquisition from outside the closed confines of an SEM chamber. To validate the versatility of our tester, we conducted both a nanoindentation test on a fused silica specimen using a Berkovich indenter in a wired configuration and a copper micropillar compression test wirelessly using a flat punch indenter within an SEM. By installing this tester in various measurement systems, researchers could observe deformation patterns in real time, making it a valuable tool for investigating deformation mechanisms of diverse micro- and nano-sized specimens.

Manuscript received: July 22, 2024 / Revised: August 12, 2024 / Accepted: August 14, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2022

NOMENCLATURE

d = Grain Size
 δ = Displacement
 F = Axial Force
 σ_y = Yield Strength

1. 서론

1950년대 초 Hall과 Petch가 항복강도(σ_y)에 대한 결정립크기

(Grain Size, d)의 역의존성($\sigma_y \sim 1/\sqrt{d}$)을 발표한 이후 수많은 연구자들이 이 관계를 검증 및 발전시켜 왔다[1,2]. 이러한 연구 과정에서 결정립크기가 100 nm 미만인 나노결정질(Nanocrystalline) 영역에서는 Hall-Petch 관계와 반대되는 효과가 발생함도 실험적으로 검증하였다[1,3]. 이와 같은 시편 크기 의존적인 재료 물성에 관한 연구가 활발하게 진행될 수 있었던 것은 MEMS (Micro-Electro Mechanical System) 시험기[4]와 같은 소형 시험기를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)과 같은 고배율 현미경 내부에 설치한 뒤 실시간(In-situ)으로 시편의 변형을 관찰하면서 재료시험을 수행할 수 있었기 때문이었다. 마이크로 및 나노 크기 시편의 실시간 재료 물성 시험법에는

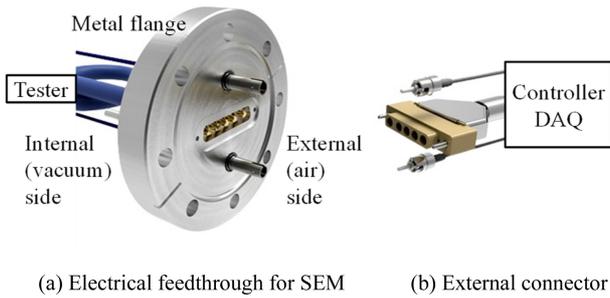


Fig. 1 An example of electrical feedthrough designed for ultra-high vacuum environments

가장 기본적이면서도 표준적인 인장 시험[5]을 비롯해 비틀림 시험[6], 마이크로 기둥(Micropillars) 압축 시험[7,8] 및 나노압입 시험[9,10] 등이 있다. 현재 가장 보편적인 시험 방법은 시편의 변형 양상을 실시간으로 관찰 및 측정할 수 있는 SEM 챔버 내에 소형 시험기를 설치하고 챔버에 맞게 설계된 Fig. 1 [11]과 같은 진공용 전기 피드스루(Electrical Feedthrough) 포트를 통해 외부 제어 장치와 유선으로 연결해 시험을 수행하는 것이다[5-9]. 이 방법은 안정적으로 시험을 수행할 수 있는 장점이 있는 반면에 시험 시스템과 호환되는 전기 피드스루가 설치되어 있는 장비에서만 사용할 수 있고, 사용 전후 커넥터를 연결 및 분해해야 하는 번거로운 과정이 필요하다. 특히, 시험기 선들이 SEM 챔버 내부의 전기 피드스루에 연결된 상태에서 SEM 스테이지(Stage)를 과도하게 움직일 경우 시험기가 파손될 위험이 크기 때문에, 안전한 시험을 위해서는 고도의 숙련된 운영자가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 실시간 유선방식 재료시험기들이 갖는 문제점들을 근본적으로 해결하기 위해 전기 피드스루 없이 무선 방식으로 다양한 시험을 수행할 수 있는 유·무선 재료시험기를 개발하고, 이의 유용성을 두 가지 예비 시험을 통해 검증하고자 하였다.

2. 무선 재료시험기 제작

2.1 재료시험기 본체 및 나노 스테이지

마이크로 및 나노 크기 시편에 대한 재료시험을 원활하게 수행하기 위해서는 수 nm 수준의 변위 제어가 가능해야 함과 동시에 수십 mm 수준의 최대 이동 거리(Maximum Travel)가 가능해야 하므로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전용 컨트롤러 사용 시 1 nm정도의 변위 분해능(Resolution)을 갖는 3 개의 상용 압전 선형 나노 스테이지(SLC-1720/30/40, SmarAct)를 채용하였다. Fig. 2에서 x-축 스테이지(26 mm 이동 거리)는 인장, 압축, 굽힘 및 압입 시험용, y-z 방향 스테이지들(12, 21 mm 이동 거리)은 로드셀의 위치를 조정하거나 전단, 스크래치 시험용으로 설계하였다. 기존의 다양한 실시간 재료시험기들과 본 연구에서 사용한 3축 스테이지들의 3D 모델들을 이용하여 기본 재료시험기를 Fig. 2와 같이 설계하였다.

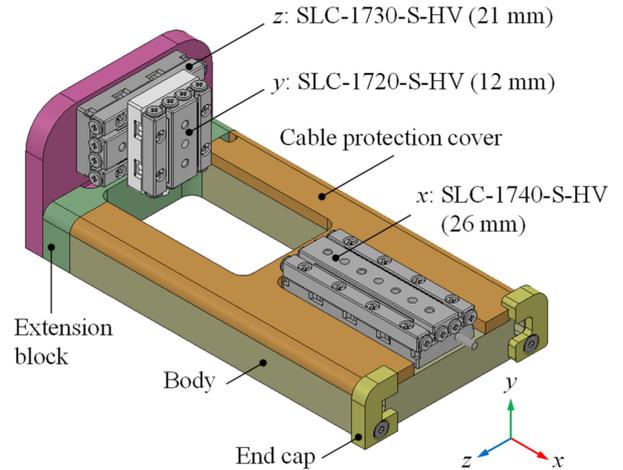


Fig. 2 Components of main body and 3 linear nano stages to align a load cell (y, z) and to apply load (x)

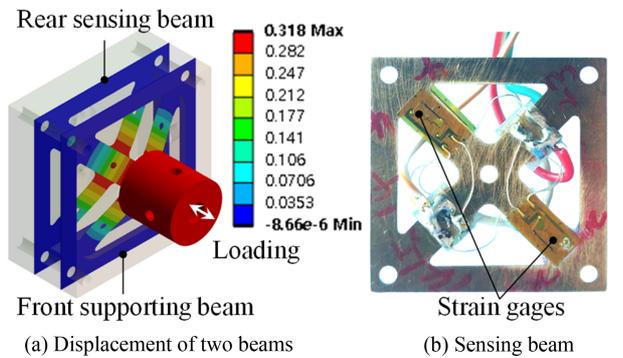


Fig. 3 Design of load cell and attachment of 4 semiconductor strain gages on Be-Cu sensing beam

2.2 로드셀 설계, 제작 및 보정

시편에 가해지는 축하중(Axial Force)을 측정하기 위해 Fig. 3(a)와 같은 한 쌍의 십자형 양팔보를 유한요소해석을 통해 설계한 뒤 고분해능 측정을 위해 Fig. 3(b)와 같은 4장의 반도체 스트레인게이지(KSPB-2-1K-E4, Gage Factor ≈ 182 , Gage Resistance $\approx 976.3 \Omega$, Kyowa)를 인장과 압축 발생 영역에 각각 2장씩 부착하여 풀브리지(Full Bridge) 로드셀(Load Cell)을 제작하였다. 보(Beams)는 선형성과 내구성이 우수한 0.1 mm 두께의 베릴륨동(Beryllium Cu) 재료를 사용하여 제작하였다. 한 쌍의 보들 중 각종 지그를 끼워야 하는 전방 보는 길이 방향 직진성을 향상시키기 위한 지지 역할만 수행하며, 스트레인게이지는 모두 후방 보에 부착하였다. 최대 설계 하중은 1 N이며, 이 하중을 가했을 때 Fig. 3(a)에서와 같이 약 318 μm 의 변위가 발생하여 길이 방향 강성(Axial Stiffness)은 약 3.1 $\text{mN}/\mu\text{m}$ 인 것으로 계산되었다. 제작 완료된 로드셀을 KOLAS 검증 기관에서 측정한 결과 해상도는 약 0.1 mN 으로 측정되어 최대 용량인 1 N의 0.01%로 판명되었다. 재료시험에 있어서 로드셀은 중요한 센서인 관계로 향후 보다 정밀한 상용 로드셀로 교체할 예정이다.

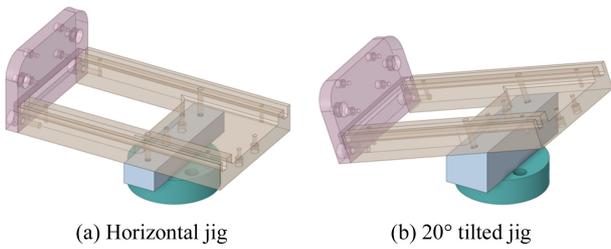


Fig. 4 Auxiliary jigs for fixing the tester to an SEM stage

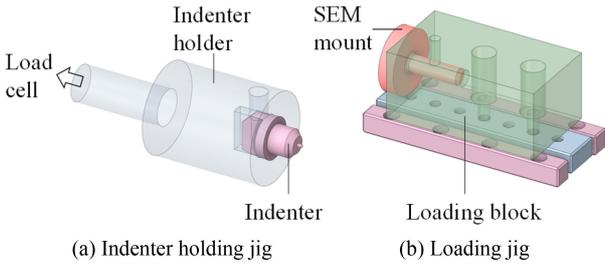


Fig. 5 Auxiliary jigs for connection to SEM stage

2.3 SEM 내에서의 실시간 재료시험용 보조 지그

재료시험기를 SEM 챔버 스테이지에 고정하기 위해 Fig. 4와 같은 두 종류의 지그를 제작하였다. 나노와이어(Nanowires)와 같은 1차원 시편에 대한 인장 시험과 같이 SEM 내에서 측정 위치 선정 등의 추가적인 작업이 없거나 SEM 이미지 캡처를 통해 시편의 변형률을 정확히 측정하고자 할 경우에는 Fig. 4(a)와 같은 수평 연결 지그를 사용한다. 반면에, 나노압입이나 마이크로 기동 압축 시험 등과 같이 SEM 내에서 측정할 시편을 탐색하거나, 시편과 하중 지그 사이의 정렬을 맞춰야 하거나, 하중점에서의 변형 양상을 관찰하고자 하는 경우에는 Fig. 4(b)와 같이 수평 방향에 대해 20° 기울인 경사 지그를 사용한다. 로드셀 측에는 Fig. 5(a)와 같은 인텐터나 각종 시험용 지그를 설치하고, 26 mm 나노 스테이지에는 Fig. 5(b)와 같은 블록에 SEM 마운트나 다양한 시험용 지그를 설치해 사용한다.

2.4 무선 컨트롤러 및 데이터 송·수신 장치 제작

2.4.1 나노 스테이지 구동 원리

나노 스테이지는 크게 압전소자(Piezoelectric Element, PE)와 실제 이동하는 스테이지로 구성되며, 기본 구동 원리를 Fig. 6에 나타내었다. 압전소자에 전압이 가해지지 않았을 때(점 A) PE의 초기 길이를 S_0 라고 가정하면, Fig. 6(a)와 같이 전압을 점 A에서 점 B까지 서서히 증가시키는 경우 PE가 S_0 에서 S_f 까지 늘어나게 되며 이와 접촉하고 있는 스테이지도 마찰력으로 인해 부착(Stick)된 상태로 Figs. 6(c) 및 6(d)와 같이 ($S_f - S_0$)만큼 함께 전진(Forward)한다. 반면에 점 B에서 점 C까지는 PE에 충전된 전하를 매우 짧은 시간 내에 급격히 방전시켜 버리는 단계로서, PE는 순간적으로 길이가 줄어 초기 길이(S_0)로 복원되지만 스테이지는 자체 관성력 때문에 Fig. 6(e)와 같이 제자리에(Slip) 머물게 된다. 이러한 이유로 본 연구에서 사용한 나노

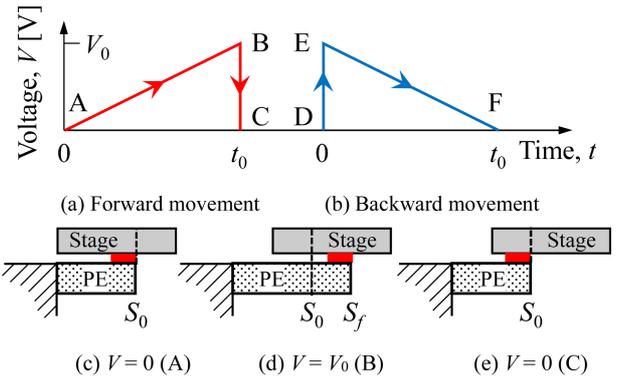


Fig. 6 Nano stage driving principle (AB/EF: stick, BC/DE: slip)

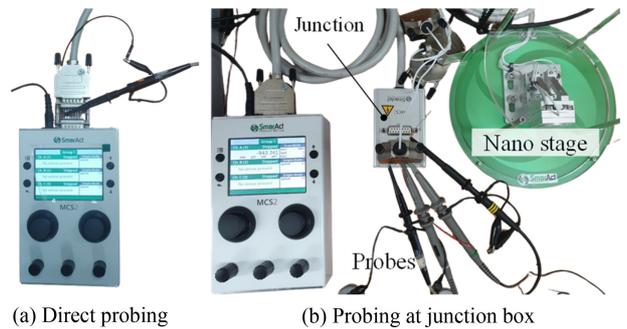


Fig. 7 Dedicated controller input/output signal probing

스테이지들을 ‘Stick and Slip (SS)’ 가진기(Actuators)라고 부른다. 전방 이송에서와 반대로 Fig. 6(b)와 같이 D에서 F까지의 파형으로 전압을 인가하면 스테이지를 후진(Backward)시킬 수 있다. 이와 같은 파형을 나노 스테이지에 반복해 가하면 수 nm의 해상도를 가지면서도 수십 mm의 이송이 가능해진다. 나노 스테이지의 수명은 초고진공 환경에서 사용 시 1 km 이송 거리로 주어져 있어 가장 가혹한 조건인 1회 26 mm 이송 기준으로 약 38,000회 사용 가능하므로, 본 재료시험기의 수명은 반영구적이라고 볼 수 있다.

2.4.2 나노 스테이지 컨트롤러 구동 전압 분석

상용 나노 스테이지 전용 유선 컨트롤러(MCS2, SmarAct)의 입·출력 전압 신호를 Fig. 7과 같이 컨트롤러 출력 단자나 중간 연결 박스(Junction Box)에서 추출해 디지털 오실로스코프(WaveSurfer 104MXs, LeCroy)로 관찰, 캡처 및 기록하여 Fig. 8에 나타내었다. Figs. 8(a)와 8(b)에서 알 수 있듯이 전진과 후진 시 파형이 Fig. 6에 나타난 파형과 같은 형태임을 알 수 있다. SS 모드에서 파형 주기(t_0)는 Fig. 8(c)에서 알 수 있듯이 1 ms이며, 가진 전압(V_0)에 따라 한 사이클당 이송량이 결정된다. 실제 이동이 발생하는 문턱 전압(Threshold Voltage)은 약 35 V이었다. Fig. 8(c)의 초기 전압강하 부분(M)을 확대한 Fig. 8(d)에서 알 수 있듯이 Fig. 6의 단계 BC는 약 1 μ s 안에 최고 전압에서 문턱 전압 이하로 떨어졌다. 후진의 경우는 전진의 경우와 정확히 상하 대칭인 파형을 보였다.

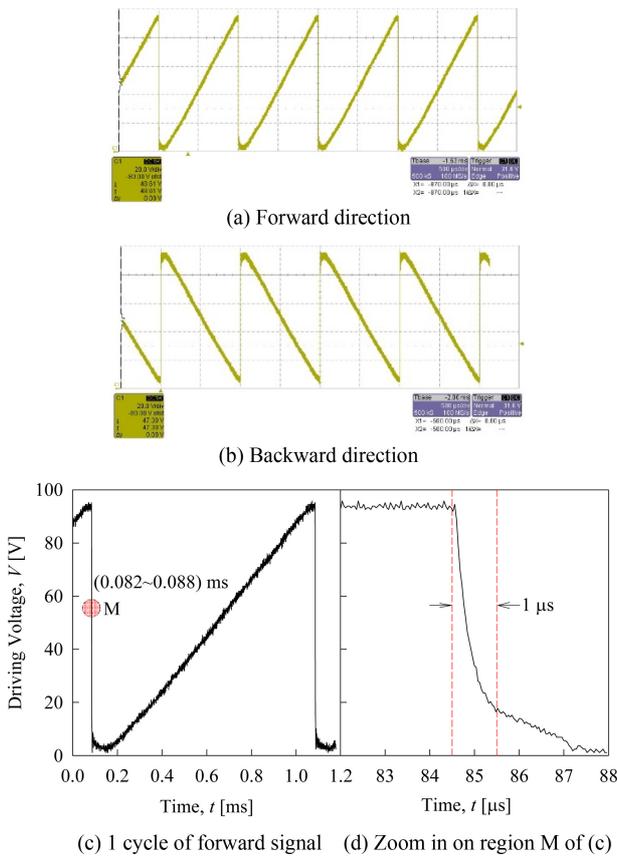


Fig. 8 Forward and backward control signals observed and recorded with a digital oscilloscope

나노 스테이지용 전용 컨트롤러는 조절 손잡이 등의 돌출부까지 고려했을 때 크기가 (170 × 106 × 56) mm³로 크고 별도의 교류 전원과 직류전원장치가 필요해 협소한 SEM 챔버에 설치할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 일반 알칼리 건전지(AA 사이즈, 1.5 V)를 전원으로 사용하면서 외부에서 무선으로 제어할 수 있는 별도의 소형 컨트롤러를 자체적으로 개발하였다.

2.4.3 무선 구동기 제어 및 데이터 획득용 회로 설계

SEM 챔버와 같이 협소한 공간에 설치된 재료시험기를 외부에서 제어하고 데이터를 주고받기 위해서는 집적 및 소형화된 무선 통신 및 압전 구동 회로를 구비한 MCU (Micro Controller Unit)가 필요하다. 이를 위해 모터 정밀 제어 등의 용도로 사용되고 있는 32비트 CPU (M4F, ARM® Cortex™)와 블루투스 무선통신(Bluetooth Low Energy, BT4.0) 모듈을 탑재한 소형(크기 10 × 16 × 2.2 mm³) MCU (MDBT42Q-512KV2, Raytac)를 사용하였다.

MCU에 연결된 입·출력 라인 연결도를 Fig. 9에 나타내었으며, 각 라인의 용도를 Table 1에 정리하였다. MCU 연결이 필요한 라인은 압전 구동기 구동 라인(21-29), 컨트롤러 동작 상태 표시를 위한 LED 라인(3, 4, 38) 및 센서값 측정을 위한 아날로그 입력 라인(15-18) 등이다. 블루투스 회로는 모듈로 내장되어

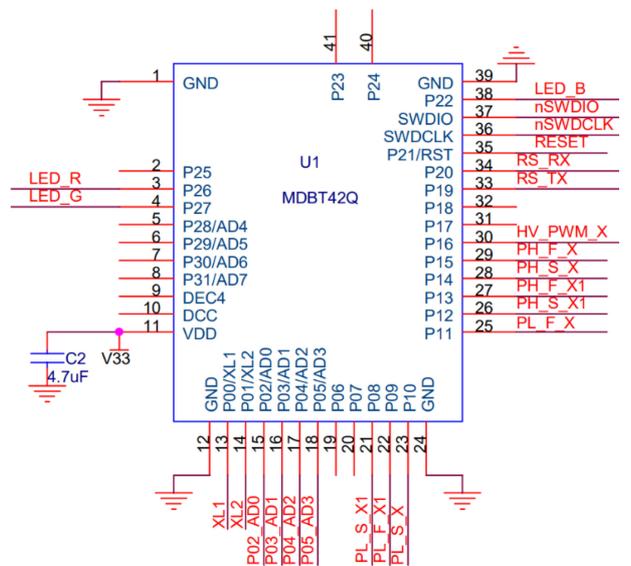


Fig. 9 MCU connection diagram

Table 1 Description of main MCU lines

Line	Description	Line	Description
3	LED (red)	25	Discharging (fast)
4	LED (green)	26	HV charging (slow)
11	MCU driving voltage	27	HV charging (fast)
15	12-bit AD converter	28	HV charging (slow)
16	12-bit AD converter	29	HV charging (fast)
17	12-bit AD converter	30	PWM signal
18	12-bit AD converter	33	Serial communication
21	Discharging (slow)	34	Serial communication
22	Discharging (fast)	35	MCU reset
23	Discharging (slow)	38	LED (blue)

있고 소프트웨어로만 접근하도록 되어 있어 별도로 나타내지 않았다.

압전소자(Fig. 6의 PE)가 한번에 늘어나는 길이는 전하의 총 전량에 비례하므로 큰 이송을 위해서는 전하 총전량을 크게 해야 하며, 이를 위해서는 높은 직류 전압이 필요하다. 본 연구에서는 1.5 V 알카라인 건전지 4 개를 직렬 연결하여 사용하므로 이 건전지 전압을 고전압으로 승압시켜 사용해야 하며, 이를 위한 승압 회로를 Fig. 10에 나타내었다. 이 회로를 사용해 1차 측에서 PWM (Pulse Width Modulation)으로 On/Off 구동되는 약 5-6 V 배터리 전압(VBAT)을 권선비가 약 1:50인 변압기(T1)를 사용해 2차 측에서 약 120 V 정도(VHigh)까지 승압시킬 수 있다. 승압시킨 전압은 콘덴서(C23, C24)에 저장되는데, 단일 고전압 콘덴서(High Voltage Condenser)는 크기와 가격이 문제가 되므로 복수 개의 저전압(Low Voltage) 콘덴서를 직렬로 연결해 고전압 저장 문제를 해결하였다. 이때 압전소자의 정전용량이 작아 구동에 필요한 전하량이 크지 않으므로 대용량 콘덴서는

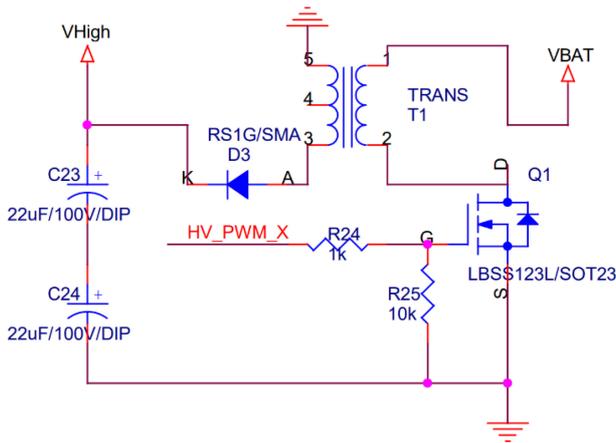


Fig. 10 Voltage booster circuit

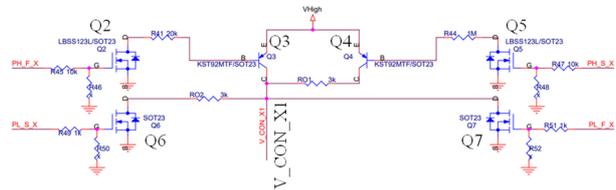


Fig. 11 Piezoelectric actuator driving circuit

필요하지 않다. 회로도에 나타내지는 않았으나 저장된 고전압은 전압 배분 회로를 통해 MCU의 아날로그 입력단으로 연결된다. 따라서 승압된 고전압을 측정하여 1차 측 On/Off 펄스파의 PWM 듀티와 지속 시간 등을 제어하여 일정한 고전압이 안정적으로 유지 및 인가되도록 하였다.

최종 나노 스테이지 구동 회로를 Fig. 11에 나타내었다. 고전압 측에 배치한 충전용 트랜지스터들 중 Q3은 고속 충전용이며, Q4는 저항을 통해 충전되도록 함으로써 저속 충전용으로 사용된다. 마찬가지로 저속 방전을 위해 저항과 직렬 연결된 Q6이 사용되고, 고속 방전을 위해 Q7이 사용된다. 라인 V_CON_X1은 압전 가진기의 한쪽에 연결되고, 가진기의 다른 쪽은 그라운드 라인에 연결된다. 제어적인 측면에서 볼 때, 나노 스테이지의 방향을 전환할 때 압전 가진기에 가하는 전원의 극성을 바꾸는 대신 파형만 바꾸면 된다는 점이 일반 직류 모터와 확연히 다른 점이다.

2.4.4 인쇄회로기판 및 컨트롤러 제작

무선 재료시험기 구동 및 데이터 수집용으로 제작한 2개의 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)들을 Fig. 12에 나타내었다. 하나의 PCB로 최대 2개의 나노 스테이지를 구동할 수 있도록 제작하였고 시험기에 총 3개의 스테이지들을 사용하는 관계로 2개의 PCB를 2층으로 쌓아 사용하였다. 개별 보드에 대해 블루투스 통신을 별도로 연결할 경우 제어가 불편하므로 하나의 보드(Master)만 연결되도록 한 뒤 두번째 보드(Slave)는 첫번째 보드로부터 시리얼 통신으로 제어 명령을 받아 필요한

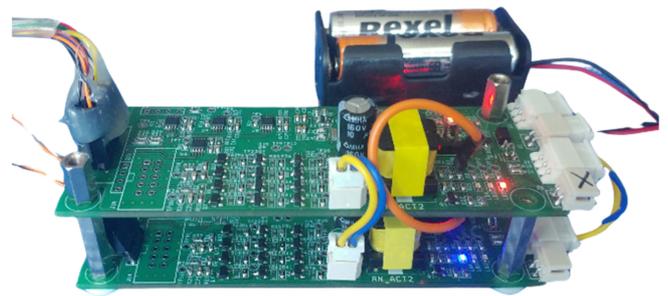


Fig. 12 Main controller made by stacking two PCBs

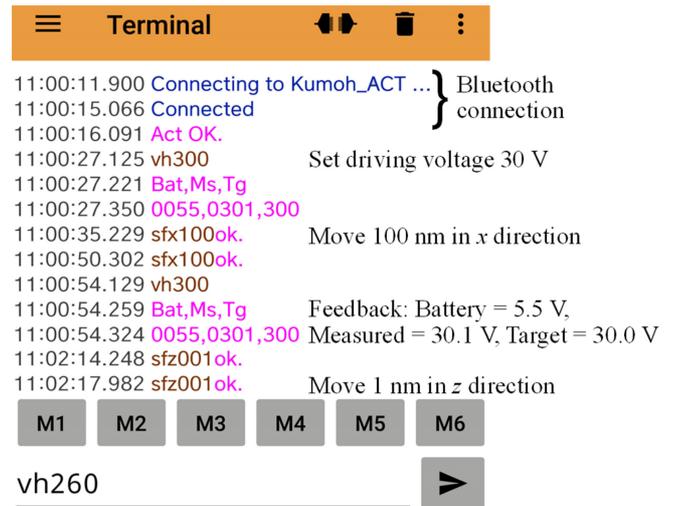


Fig. 13 Bluetooth communication between the tester and a mobile phone

동작을 수행하도록 프로그램을 작성하였다. Fig. 12에 나타낸 컨트롤러의 전체 크기는 일반적인 SEM 챔버에 적합하도록 길이 120, 폭 40, 높이 50 mm로 제작하였다.

2.4.5 블루투스 무선통신

무선 재료시험기 제어 및 센서(로드셀 및 나노 스테이지 변위) 신호 획득은 사용자 편의를 위해 휴대폰과 같은 스마트 기기에 설치해 사용할 수 있는 앱(Serial Bluetooth Terminal, Kai Morich)을 활용하였으며, 통신의 한 예를 스테이지 제어 명령 및 모니터링용 피드백과 함께 Fig. 13에 나타내었다. 향후 블루투스 통신보다 통신 거리가 더 긴 통신 방식이 필요하다.

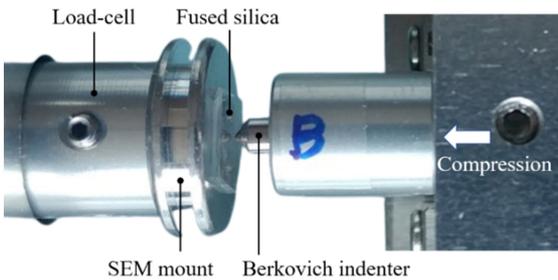
3. 유·무선 재료시험기 성능 평가 결과 및 고찰

3.1 나노압입 시험(유선 및 대기 중)

일차적으로 Fig. 14(a)와 같이 유선 및 대기 중에서 시험기에 나노 스테이지 전용 컨트롤러를 연결하고 로드셀과 정적 변형률 앰프(P3, Micro-Measurements)를 연결한 뒤 변위 제어 방식으로 하중을 인가하면서 Fig. 14(b)에 나타낸 석영(Fused Silica)



(a) Wired test setup in air



(b) Detail around the Berkovich indenter and fused silica

Fig. 14 Wired test setup for the nanoindentation test in air

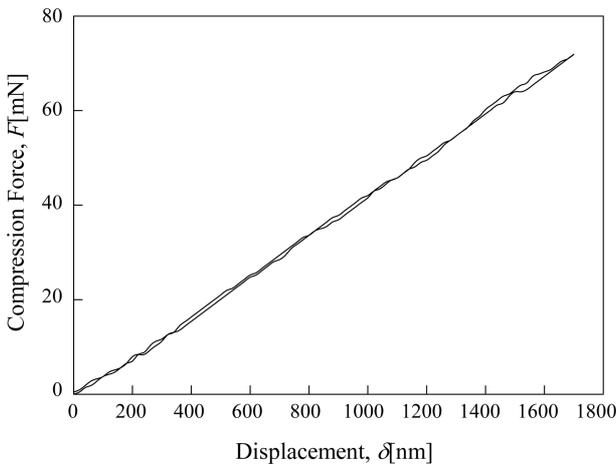
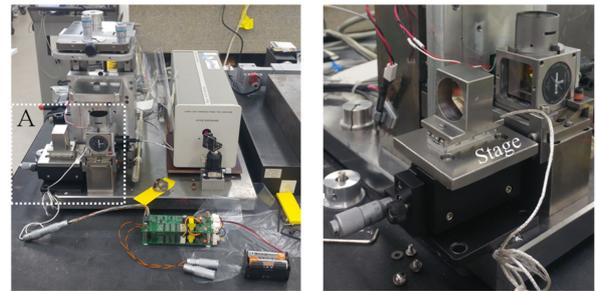


Fig. 15 Load-displacement graph obtained with wired test setup

재료에 대해 Berkovich 인텐터(XP, Probes)를 사용해 나노압입 시험을 수행하였다. 20 nm/s의 속도로 1.7 μm 까지 이동시키면서 얻은 하중(F)-변위(δ) 선도의 한 예를 Fig. 15에 나타내었다. 원하는 위치에서 나노압입 시험을 수행해 F - δ 선도를 얻었으나 Young 계수와 같은 재료 물성을 계산하기 위해서는 추가로 압입 깊이와 접촉면적 사이의 관계, 로드셀 강성 보정, 압입자 영향 보정 등 많은 단계의 추가적인 데이터 처리 과정[9,10]이 필요한 관계로 본 연구 범위를 벗어나 생략하였다.

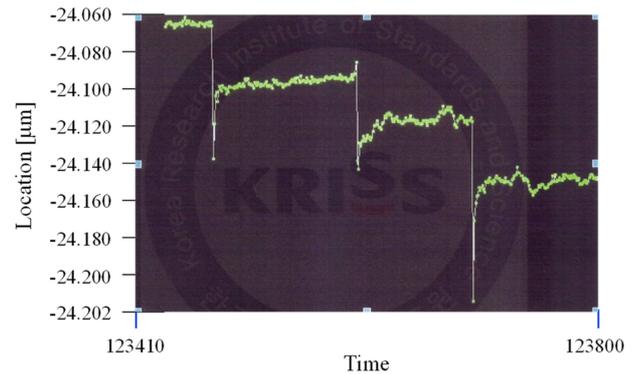
3.2 무선 제어 시 변위 분해능 평가(무선 및 대기 중)

무선 재료시험기의 변위 분해능을 확인하기 위해 Fig. 2에 나타난 세 종류의 나노 스테이지들을 Figs. 16(a) 및 16(b)에



(a) Michelson interferometer

(b) Enlarged view of part A



(c) Movement of a nano stage

Fig. 16 Setup and inspection result for displacement control resolution

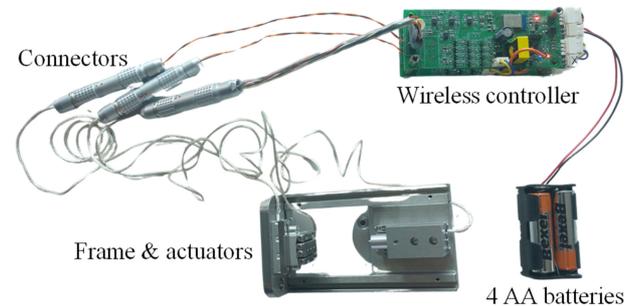


Fig. 17 Entire wireless material testing system that needs to be put in an SEM chamber

나타낸 바와 같이 KOLAS 인증 기관에서 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)에 설치한 뒤 무선으로 이동시키면서 확인한 결과 분해능은 95% 신뢰수준에서 (33±5) nm로 평가되었다. 이는 나노 스테이지를 전용 유선 컨트롤러와 연결해 사용할 때의 분해능인 수 nm에 비해 큰 값이지만 추후 16-bit ADC (Analog-to-digital Converter) 보드 채용과 무선 제어장치의 개선을 통해 더 낮출 수 있을 것으로 생각된다.

3.3 마이크로 기둥 압축 시험(무선 및 진공 중)

직경 100 μm 미만인 마이크로 기둥 압축 시험을 위해서는 Fig. 17에 나타난 무선 재료시험기 전체를 SEM 챔버에 넣어야 하는데 챔버에 여유 공간이 없는 경우도 발생한다. 이 경우에는 SEM 챔버의 사용하지 않는 확장 슬롯에 Figs. 18 및 19(a)에 E로

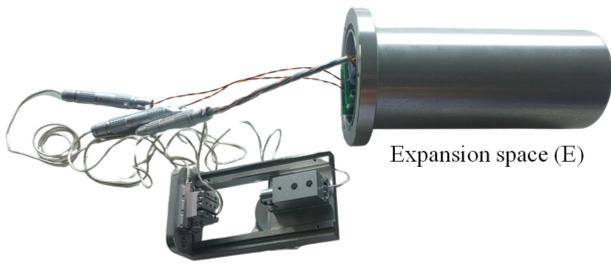


Fig. 18 Expansion space for controller and battery storage

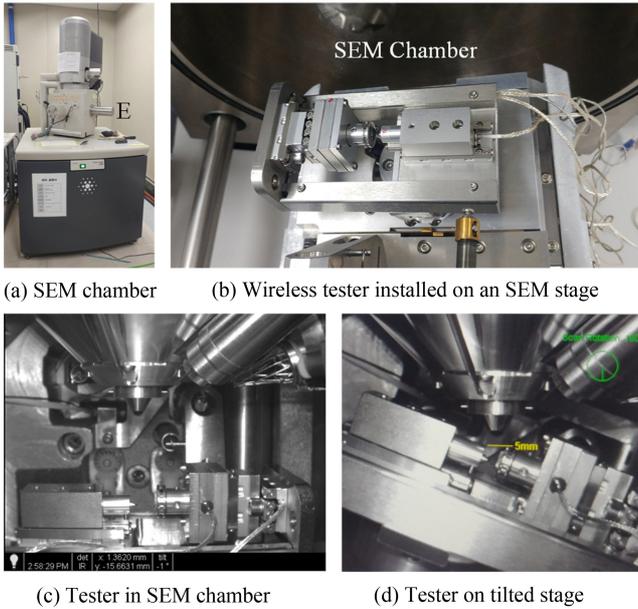


Fig. 19 Wireless material testing system installed in an SEM chamber

표시한 부분과 같이 컨트롤러와 건전지를 수납할 수 있는 확장 공간을 제작해 챔버에 미리 설치해두면 편리하다.

무선 재료시험기를 Fig. 19(a)에 나타난 SEM (Nova Nano SEM200, FEI) 스테이지에 Fig. 19(b)와 같이 고정하였다. 재료시험기를 챔버에 설치한 후의 내부 사진을 Figs. 19(c)와 19(d)에 나타내었다. 마이크로 기둥 압축 시험 전 끝단 직경이 100 μm인 평면 인텐터(Flat Punch Indenter, XP, Probes)를 무선으로 55 μm 이동시킨 전후의 사진을 Fig. 20에 나타내었으며 원하는 방향과 이송량만큼 안정적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

순도 99.99%이고 두께가 1 mm인 단결정 구리(Single Crystal Cu) 다이(5 × 5 mm²)를 화학적 부식 방법[7]을 이용해 거칠게 제작한 마이크로 기둥들 중 임의로 2 개를 선택하여 압축 하중을 인가하였다. 첫 번째 기둥의 시험 전, 시험 도중 및 시험 후의 사진들을 평면 인텐터와 함께 Figs. 21(a)부터 21(c)에 나타내었으며, 동일한 과정을 거쳐 얻은 두 번째 기둥에 대한 사진들을 Figs. 21(d)부터 21(f)에 나타내었다. 무선 재료시험기를 이용해 원하는 위치에 있는 마이크로 기둥을 찾아 압축 시험을 수월하게 수행할 수 있었다.

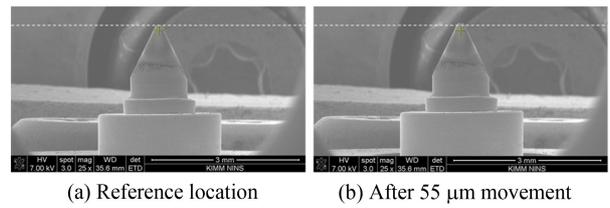


Fig. 20 Movement of a flat punch indenter

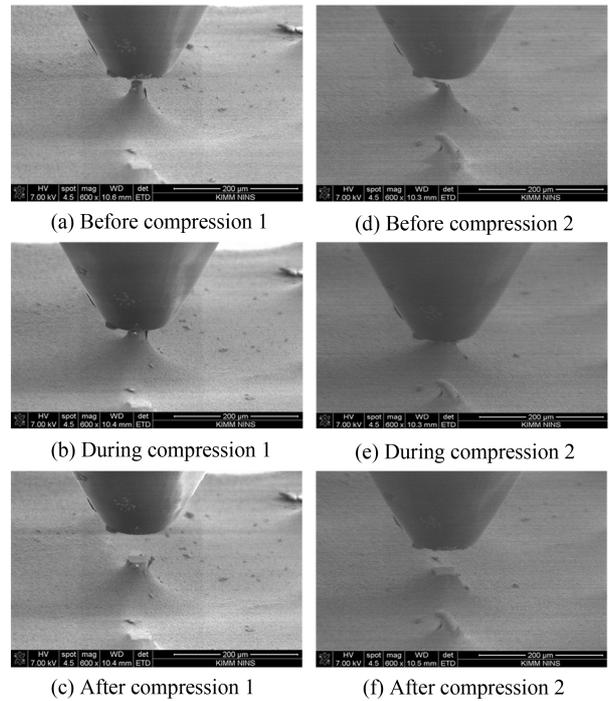


Fig. 21 Micropillar compression tests in an SEM chamber

4. 결론

별도의 전기적인 피드스루없이 SEM 챔버와 같은 밀폐공간에서 실시간 및 무선으로 시험할 수 있는 수 나노미터 범위 분해능을 갖는 소형 유-무선 재료시험기를 개발하였다. 재료시험기의 성능을 검증해 보기 위해 대기 중에서 우선으로 Berkovich 인텐터를 이용한 나노압입 시험을 수행하여 하중-변위 곡선을 얻었으며, 대기 중에서 무선으로 변위 분해능을 평가한 결과 33 nm로 확인되었다. SEM 챔버 내에서 평면 인텐터를 이용해 단결정 구리 마이크로 기둥 압축 시험을 무선방식으로 안정적으로 수행하였다. 본 연구를 통해 개발된 유-무선 재료시험기는 다축 로드셀과 보조 지그들을 사용할 경우 인장 시험, 굽힘 시험, 전단 시험, 점착력 시험 등 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 학술연구비로 지원되었음 (2021).

REFERENCES

1. Hahn, E. N., Meyers, M. A., (2015), Grain-size dependent mechanical behavior of nanocrystalline metals, *Materials Science & Engineering A*, 646, 101-134.
2. Cordero, Z. C., Knight, B. E., Schuh, C. A., (2016), Six decades of the hall-petch effect - a survey of grain-size strengthening studies on pure metals, *International Materials Reviews*, 61(8), 495-512.
3. Chandiran, E., Ogawa, Y., Ueji, R., Somekawa, H., (2023), An inverse hall-petch relationship during room-temperature compression of commercially pure magnesium, *Journal of Alloys and Compounds*, 930, 167443.
4. Fechner, R., Muslija, A., Kohl, M., (2017), A micro test platform for in-situ mechanical and electrical characterization of nanostructured multiferroic materials, *Microelectronic Engineering*, 173, 58-61.
5. Min, H.-G., Park, J.-H., (2023), Development of in-situ SEM testing apparatus for observing behavior of material at high magnification during tensile test, *Measurement*, 221, 113454.
6. Chen, B., Yang, R., Dong, J., Wang, S., Wang, J., Huan, Y., (2019), Development of in-situ SEM torsion tester for microscale materials, *Measurement*, 139, 421-425.
7. Lin, Z., Magagnosc, D. J., Wen, J., Oh, C.-S., Kim, S.-M., Espinosa, H. D., (2021), In-situ SEM high strain rate testing of large diameter micropillars followed by TEM and EBSD postmortem analysis, *Experimental Mechanics*, 61, 739-752.
8. Juri, A. Z., Basak, A. K., Yin, L., (2022), In-situ SEM micropillar compression of porous and dense zirconia materials, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 132, 105268.
9. Kiener, D., Wurmshuber, M., Alfreider, M., Schaffar, G. J. K., Maier-Kiener, V., (2023), Recent advances in nanomechanical and in situ testing techniques: Towards extreme conditions, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 27(6), 101108.
10. Choi, J., Hwang, H., Jeong, J., Hwang, W., (2021), Measurement of mechanical properties according to the thickness of anodic aluminum oxide through nanoindentation test, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(3), 203-108.
11. Scanwel, Vacuum feedthroughs and accessories. <https://www.scanwel.com/vacuum-components/vacuum-feedthroughs>

**Kyoung Seok Park**

Professor in the School of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His primary research interests lie in mechatronics, focusing on smart mobility, automotive engine electronic control, sensors and actuators.

E-mail: kspark@kumoh.ac.kr

**Pill Ho Kim**

CEO of R&B Corporation. His primary focus is on developing and overseeing the testing equipment needed by industries and research institutes.

E-mail: phkim@randb.co.kr

**Chung-Seog Oh**

Professor in the School of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests include mechanical behavior of micro- and nano-materials, micro-LED transfer, micro-structure fabrication, and finite element analysis.

E-mail: ocs@kumoh.ac.kr

초소형 위성용 전기 추력기 전원 및 가스 공급 장치의 소형 경량화 방안에 관한 연구

Study on Miniaturization and Lightweight Method of Electric Thruster Power and Gas Supply Device for Micro Satellite

박진영^{1,#}
Jin Young Park^{1,#}

¹ (주)이피에스텍 연구소 (Laboratory, EPS Tech Co., Ltd)
Corresponding Author / E-mail: pjy0079@epstech.co.kr, TEL: +82-42-320-0829
ORCID: 0000-0001-7577-472X

KEYWORDS: Power processing unit (전원공급장치), Hall thruster (홀 추력기), LLC resonant converter (LLC 공진형 컨버터), Compact (소형), Lightweight (경량화)

Recent advancements in science and technology have enabled even microsatellites to perform various high-level tasks. As the range of missions that satellites undertake expands, even microsatellites now require thrust systems for orbit adjustment and collision avoidance. In such satellite applications, sizes and weights of all electrical components and propulsion systems are restricted, emphasizing the importance of miniaturization and weight reduction. Research is ongoing in various methods to address these needs. To solve these challenges, this study proposed a design model for miniaturizing and lightening both Anode Power Module (APM) and gas supply system. The APM utilizing an LLC resonant converter achieved an efficiency of up to 86%. An evaluation of flow control characteristics of the proposed gas supply device showed that the flow control error was less than 2.3%, indicating effective results. A thermal mass flow sensor was developed to measure the flow of gas. Temperature characteristics derived from experiments were analyzed to assess their applicability to electric thruster systems for satellites.

Manuscript received: August 4, 2024 / Revised: September 19, 2024 / Accepted: September 24, 2024

1. 서론

최근 전 세계적으로 인공위성에 대한 관심이 높아지면서 스타링크와 같이 초소형위성을 수십-수백 대를 궤도상에 올려 일정한 간격을 유지하면서 비행하는 형태인 군집 비행 위성에 대한 수요가 증가하고 있다. 또한, 인공위성은 기본적으로 긴 수명, 높은 연산량이 요구되지만, 최근에는 광학기술 및 전자기술의 발전으로 초소형 위성으로도 고부가가치의 임무수행이 가능하기에 인공위성의 발사 비용 절감에도 큰 영향을 준다[1-4].

전기 추진 시스템은 화학 추진 시스템에 비해 연료 질량을 크게 줄임으로써 궤도 유지, 궤도 이동, 충돌 회피 등 위성 운영자에게 다양한 기능을 제공하며, 2010년에 들어서는 전기추력 시스템을 인공위성에서 가장 많이 사용되고 있는 것으로 집계되었다[5,6].

인공위성에 사용되는 전기 추력기에는 여러 가지 종류가 있지만, 주로 사용되는 추력기는 홀 추력기이다. 이는 다른 전기 추력기에 비해 소비전력 대비 추력이 50 nN/kW 이상이며, 1,500 s 이상의 큰 비추력을 보유하고 있다. 이와 같이 높은 추력밀도를 갖는 장점으로 수요가 증가하고 있다. 하지만, 기존의 전기 추력기는 크기가 크고 무게가 많이 나가는 문제로 인해 초소형위성에 적용하기 어렵다. 따라서 초소형 위성을 위한 전기 추력기의 소형 경량화 기술이 요구된다[7-9].

홀 추력기의 구성요소는 크게 Gas Tank, Thruster (Anode, Cathode), 제논가스 공급 장치(Xenon Feed System), 전력 처리 장치(Power Processing Unit)로 되어 있다. 제논가스를 사용하는 홀 추력기 시스템에서 무게에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 Gas Tank이지만, 홀 추력기 시스템에서 Thruster와 Gas Tank의

경우 기술의 한계로 인해 추가적인 소형 경량화에는 어려움이 있기에 기타 홀 추력기의 구성품 중 제논가스 공급 장치와 Anode 전력 공급 장치에 대하여 소형 경량화 진행이 필요한 실정이다[10,11].

일반적으로 위성용 전원에서는 단순한 구조로 설계되는 Buck-boost 컨버터를 선호하지만 홀 추력기의 PPU는 입력 전력과 출력 전원이 절연된 구조가 아닌 경우 전원의 안전성이 좋지 않다[12-14]. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 절연형 DC/DC 컨버터가 도입되어 Flyback과 푸시 풀과 같은 토폴로지를 적용하여 왔지만, 동작 중 전압 또는 전류 스파이크가 발생할 수 있다[15,16].

기존의 전기 추력기용 가스 공급 장치의 경우 구조적 간결성과 제어성에만 초점이 맞춰진 연구가 진행되어 왔으며, 압력 조절을 통해 오리피스를 하루로 공급하는 솔레노이드 밸브제어에 의존했다. 이는 압력을 차단하기 위한 별도의 장치가 필요한 문제가 있다[17,18]. 따라서 본 연구에서는 홀 추력기의 핵심 구성요소 중 전력 공급 장치의 APM은 LLC 공진형 컨버터를 적용하고 가스 공급 장치는 PFCV를 적용하여 홀 추력기의 소형 경량화 설계 방안을 도출하고자 한다. 이는 프로토타입을 제작하여 성능 실험을 진행하여 적용 가능성을 확인할 수 있다.

2. 구성요소 및 이론적 배경

2.1 Anode 전력 공급 장치

홀 추력기에서 Power Processing Unit (PPU)는 크게 Anode Power Module (APM)과 Cathode Power Module (CPM)로 구성된다. 일반적으로 CPM은 0.1 A 수준의 낮은 출력 전류를 갖지만, APM은 200-300 V, 1-2 A 수준으로 높은 출력 전력을 갖는다. 기존의 전기 추력기의 PPU는 Buck 컨버터나 Boost 컨버터를 통해 개발되어 상대적으로 크기가 크고 효율이 낮은 상황이다[12-14,19]. 따라서 본 연구에서는 높은 스위칭 주파수 동작으로 변압기, 필터 등 수동소자의 크기를 감소시킬 수 있고, 높은 전력 밀도를 갖는 등 많은 장점을 보유하고 있는 LLC 공진형 컨버터에 SiCFET소자 적용을 통한 Small Size DC/DC 컨버터를 개발하고자 한다.

LLC 공진형 컨버터의 구성은 스위칭 네트워크, 공진 네트워크, 정류 네트워크로 되어 있다. 여기서 스위칭 네트워크는 Full-bridge 또는 Half-bridge 유형으로 구성할 수 있으며, Fig. 1은 Full-bridge 정류기를 갖춘 Half-bridge LLC 공진형 컨버터의 구성을 보여준다. 여기서 L_r 은 공진 인덕턴스, L_m 은 자화 인덕턴스이며, C_r 은 공진 커패시턴스를 의미한다. 또한 L_{lkp} 와 L_{lks} 는 변압기 1차측 및 2차측의 누설 인덕턴스이다. 이와 같은 공진형 컨버터에는 C_r 과 L_r 에 의해 결정되는 직렬 공진주파수와 C_r , L_r 및 L_m 에 의해 결정되는 병렬 공진주파수로 두 개의 공진 주파수가 있다. 두 공진 주파수는 식(1) 및 식(2)와 같다[20,21].

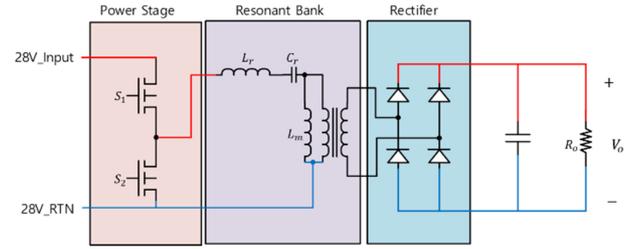


Fig. 1 Configuration of a half-bridge LLC resonant converter

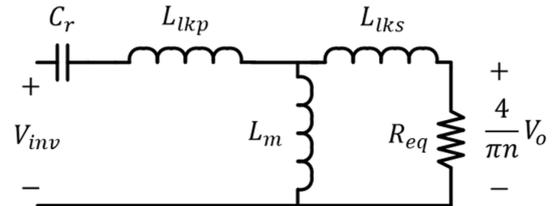


Fig. 2 Equivalent circuit of an LLC resonant converter

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \tag{1}$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m) C_r}} \tag{2}$$

공진 인덕터는 변압기와 분리되어 있기에 변압기에 의한 누설 인덕턴스가 존재하게 된다. 이와 같이 누설 인덕턴스를 고려한 LLC 공진형 컨버터 설계가 필요하다. 설계 시 계산의 복잡성을 줄이기 위해 2차 누설 인덕턴스는 1차 누설 인덕턴스와 같다고 가정하여 Fig. 2와 같이 등가회로를 구성하였다[22,23].

푸리에 해석을 통해 인버터의 전압 V_{inv} 는 식(3)과 같이 정의되며, 일반적으로 LLC 공진형 컨버터의 설계를 위해서 FHA (First Harmonic Approximation)방법을 많이 사용하고 있어 FHA 접근 방식을 기반으로 한 Half-bridge LLC 공진형 컨버터의 출력 전압은 식(4)와 같이 정의된다.

$$V_{inv} = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{m=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m\omega t) \tag{3}$$

$$V_{inv_1} = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sin(\omega t) \tag{4}$$

LLC 공진형 컨버터의 전압이득은 입력전압과 출력전압의 비로 Fig. 2의 등가회로를 통해 구할 수 있으며, 식(5)와 같이 정리하였다.

$$M(s) = \frac{V_o}{V_{inv_1}} = n \frac{SL_m // R_{eq}}{SL_m // R_{eq} + SL_r + \frac{1}{sC_r}} \tag{5}$$

여기서 C_r , L_r , L_m , R_{eq} , n 은 각각 공진 커패시턴스, 공진 인덕턴스, 자화 인덕턴스, 등가저항, 변압기 권선비를 의미하며, 식(5)를 Table 1의 매개변수를 통해 정리할 수 있다.

식(5)에서 라플라스 변환에 의해 $S = j\omega$ 가 되며, 이를 적용하면 전압이득은 식(6)과 같이 정리할 수 있다.

Table 1 Parameter definitions of an LLC resonant converter

Parameter	Define
Characteristic impedance [Z]	$Z = \sqrt{L_r/C_r}$
Quality factor [Q]	$Q = Z/R_{eq}$
Resonant frequency [ω_o]	$\omega_o = 1/\sqrt{L_r C_r}$
Series inductance [L_p]	$L_p = L_m + L_{kp}$
Resonant inductance [L_r]	$L_r = L_{kp} + L_m/n^2 L_{ks}$ $= L_{kp} + L_m/L_{kp}$
Inductance ratio [k]	$k = L_p/L_r$
Equivalent resistance [R_{eq}]	$R_{eq} = (8n^2 V_o^2)/(\pi^2 P_o)$

Table 2 Design specifications of an LLC resonant converter

Parameter	Value
Input voltage [V]	28
Output voltage [V]	250
Output max current [A]	1
Output power [W]	250
Switching frequency [kHz]	300-450
Resonant frequency [kHz]	450

$$n = \frac{V_{dc}}{2(V_o + 2V_d)} \tag{7}$$

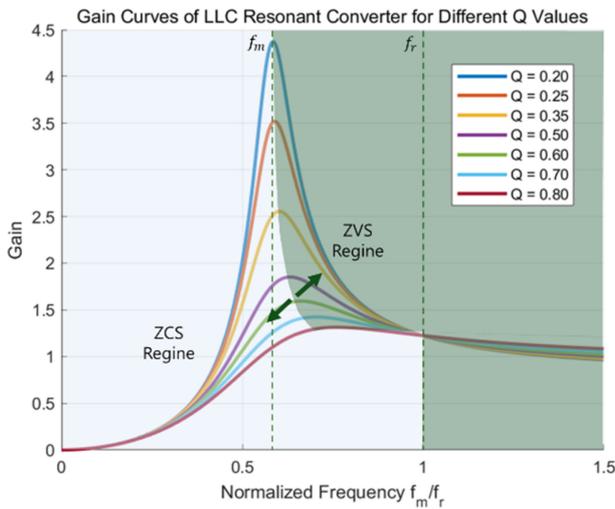


Fig. 3 Voltage gain curve of an LLC resonant converter

$$M(Q, k, \omega, \omega_o) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 \sqrt{k(k-1)}}{n \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 k\right)^2 + \left(\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 Q^2 (k-1) \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2\right)\right)}} \tag{6}$$

이렇게 얻은 전압이득 식은 인덕턴스 비 = 3, 직렬 공진 주파수와 병렬 공진 주파수의 비 0부터 1.5구간 일 때 여러 개의 Q 값에 대하여 전압이득 곡선을 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 공진주파수에서 전압이득은 거의 독립적인 특성을 보인다는 것을 알 수 있으며, 이는 LLC 공진형 컨버터의 독특한 장점이라고 할 수 있다.

2.1.1 DC/DC 컨버터 설계

제안하는 LLC 공진형 컨버터는 Half-bridge 구조이며, 이 컨버터의 특징을 고려하여 공진 주파수를 450 kHz 기준으로 설계를 진행한다. 컨버터의 최대 출력은 250 V, 1A로 250 W이다. 컨버터의 사양은 Table 2에 정리하였으며, 설계는 앞 절에서 구한 식을 통해 수행된다.

변압기의 권선비는 입력 전압 V_{dc} 와 출력 전압 V_o 의 비로 식(7)을 통해 간단하게 구할 수 있다.

여기서 V_d 는 정류 다이오드의 전압강하를 의미한다. 일반적으로 전압이득은 부하조건 및 주파수 변화에 따라 영향을 받지만 입력전압의 변화에도 영향을 받는다. 이러한 이유로 전압이득의 최솟값과 최댓값을 알아야 하며, 스위칭 손실을 최소화하기 위해서 이득 곡선을 통해 항상 ZVS 동작이 가능한 영역이 되도록 선정되어야 한다. 제안된 컨버터는 입력 및 출력전압이 고정되어 있기에 이득상수를 통해 식(8)과 같이 구해진다.

$$M_{max} = 1.20 \times \frac{2nV_o}{V_{dc}} \tag{8}$$

인덕턴스 비를 결정하기 위해서는 공진 인덕턴스 값을 선정해야 한다. 이는 일반적인 방법이 아닌 엔지니어링적인 경험에 기반하여 수행된다. 제안된 컨버터의 설계 시 인덕턴스 비 k를 5로 고정하고 95%의 마진을 고려하면 Quality Factor는 식(9)와 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{0.95}{k|M_{max}} \sqrt{k + \frac{|M_{max}^2}{|M_{max}^2 - 1}} \tag{9}$$

공진 네트워크의 공진 커패시턴스, 공진 인덕턴스, 자화 인덕턴스의 값은 다음 식으로 정의하여 구할 수 있다.

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_r Q R_{eq}} \tag{10}$$

$$L_r = C_r (Q R_{eq})^2 = \frac{Q R_{eq}}{2\pi f_r} \tag{11}$$

$$L_m = k L_r \tag{12}$$

설계된 LLC 공진형 컨버터의 파라미터는 Table 3에 정리하였으며, 이를 바탕으로 LLC 공진형 컨버터를 제작하였다. Fig. 4는 제안된 LLC 공진형 컨버터의 프로토타입을 보여준다. 250 W 급 DC/DC 컨버터의 크기는 100 × 72 mm이며, 무게는 200 g 이하로 제작되었다.

2.2 가스 공급장치

홀 추력기의 연료로 주로 사용되는 가스는 제논가스와 크립톤

Table 3 Design parameters of an LLC resonant converter

Parameter	Value
Equivalent resistance [Ω]	0.63
Resonant capacitance [nF]	754
Resonant inductance [nH]	135
Magnetizing inductance [nH]	403
Quality factor [Q]	0.67
Inductance ratio [k]	3
Transformer ratio [n]	1:18

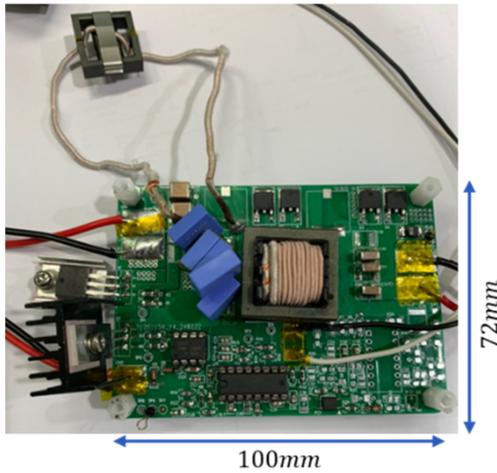


Fig. 4 Prototype of LLC resonant converter

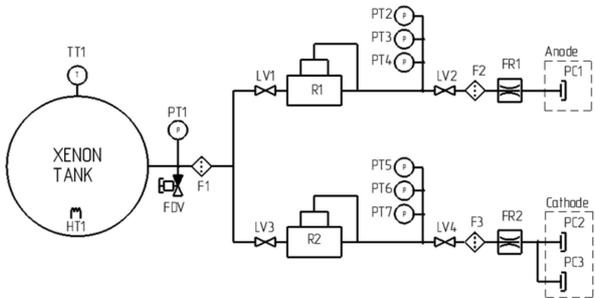


Fig. 5 Configuration of the existing gas supply system

가스이다. 이와 같은 가스는 홀 추력기에 수 - 수십 SCCM (Standard Cubic Centimeters per Minute)으로 공급해야 한다. 가스 공급장치의 구성은 가스 저장 탱크, 압력 조절기, 유량 제어기, 센서, 밸브, 필터로 구성된다. 가스 저장 탱크는 30 Mpa 이상 고압의 제논가스를 저장할 수 있는 재질로 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)가 주로 사용되며, 초소형 위성급에서 사용되는 탱크의 무게는 미 충전 상태에서 약 4 kg이 기준이다. 일반적인 제논가스 공급장치는 Fig. 5와 같이 별도의 유량제어 장치 없이 압력 조절기, 오리피스 그리고 가스 공급 및 차단을 위한 밸브로 구성된다. 압력 제어를 통한 유량 조절은 온도에 영향으로 정밀한 제어가 어려우며, 정밀한 유량제어를 위해서 오리피스의 형상이 매우 중요하지만, 유량이 작을수록 오리피스의

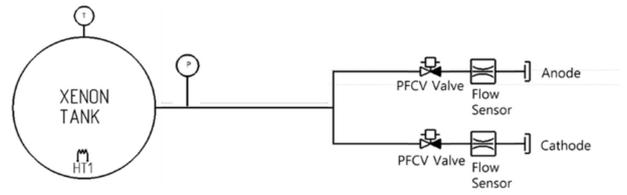


Fig. 6 Configuration of the proposed gas supply system

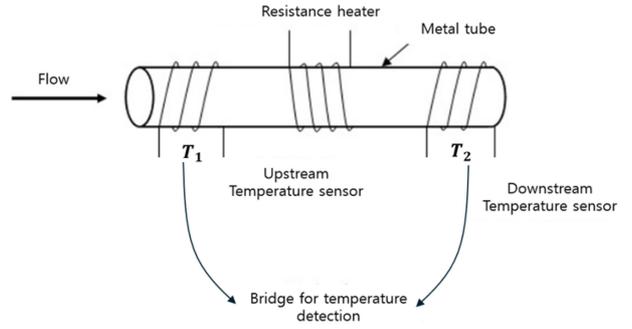


Fig. 7 Flow measurement method of a thermal mass flow meter

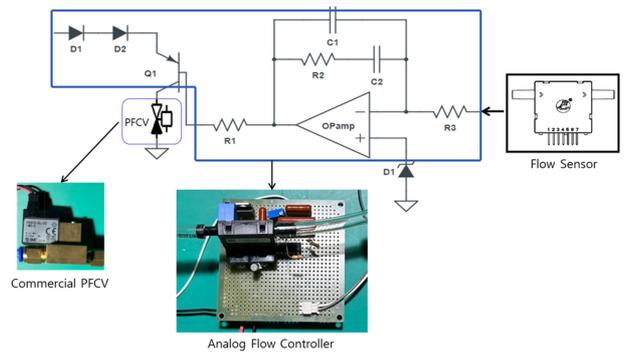


Fig. 8 Schematic of the gas supply system

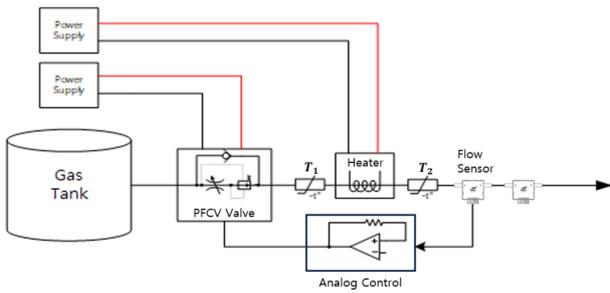
정밀가공이 어려운 문제가 있다[24-26].

기존의 가스 공급 장치의 구성은 물리적인 부피와 무게를 감소시키기에는 한계가 있어 Fig. 6과 같이 가스 공급 장치를 제안하고자 한다. 제안하는 가스 조절 장치는 기존의 압력조절기, 솔레노이드밸브, 오리피스를 PFCV (Propulsion Proportional Flow Control Valve)로 적용하고 압력센서 대신 유량센서를 사용하여 구성한 것이다.

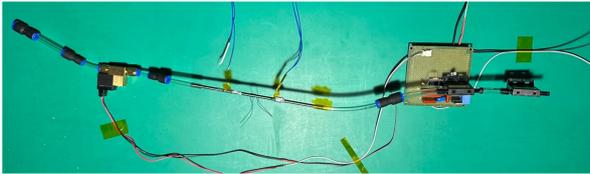
우주에서 사용할 수 있는 유량센서는 현실적으로 구하기가 매우 어렵기에 열식 질량 유량계를 통한 유량을 계측하고자 한다. Fig. 7은 열식 유량계를 나타낸다. 일반적으로 열식 유량계는 열교환을 통한 온도 변화로 유체의 유량을 예측하는 방법으로 온도 차는 식(13)을 통해 구할 수 있다[27-29].

$$\Delta T = T_1 - T_2 \tag{13}$$

Fig. 8은 제안된 가스 공급 장치의 회로도 및 프로토타입을 나타내는 그림이며, Fig. 9는 가스 공급 장치 및 온도센서 실험 구성도이다. 실험장치에 사용 파이프의 재질은 고장력 스테인리스인



(a) Experimental device configuration diagram



(b) Experimental device configuration photo

Fig. 9 Configuration of the gas supply system and flow sensor experimental setup

SUS304를 사용하였으며, 가스 공급 압력은 PFCV의 허용 압력을 기준으로 0.5 Mpa으로 공급하여 실험을 진행하였다. 본 연구를 통해 유량센서의 적용 가능성 및 PFCV를 통한 유량제어 가능성을 확인하고자 한다.

3. 실험결과

3.1 Anode Power Module 실험 결과

APM의 프로토타입 제작을 통해 LLC 공진형 컨버터의 특징인 ZVS 구동과 최대 출력을 확인하였다. APM에서 스위칭 소자는 SICFET를 사용하였으며, 변압기는 N97 페라이트 코어를 사용하여 제작하였다. 출력을 확인하기 위해서 실험 장치 구성은 Fig. 10과 같이 전원공급장치, 오실로스코프, 전자부하로 구성하였다.

Fig. 11은 LLC 공진형 컨버터의 실험 결과 파형이다. 실험을 통하여 최대 출력일 때 공진전류는 Peak to Peak 26.5A가 흐르며, 스위칭 주파수가 약 360 kHz임에도 ZVS동작이 수행되기에 스위칭 손실없이 전도손실만 존재하는 것으로 확인하였다. 또한, 스위치 Turn on시에 노이즈가 발생하지만 이는 Turn on에 필요한 Gate 전압보다 높은 20 V 이상에서 발생하기에 출력에는 영향을 주지 않는다. 따라서 Turn on 및 Turn off는 원활하게 수행되는 것을 알 수 있다. 실험을 통하여 APM의 출력은 최대 250 W(250 V, 1 A)를 도출하였으며, 출력 전력에 대한 노이즈도 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이때 효율은 약 86%로 확인하였다.

3.2 열식 질량 유량 센서 실험결과

열식 질량 유량 센서 제작을 위해 텅스텐 와이어와 NTC-thermistor (Negative Temperature Coefficient Thermistor)를 사용하여 유량 센서 제작 가능성을 확인하고자 한다. 유량 센서의

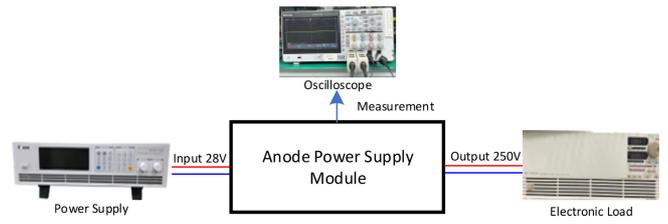
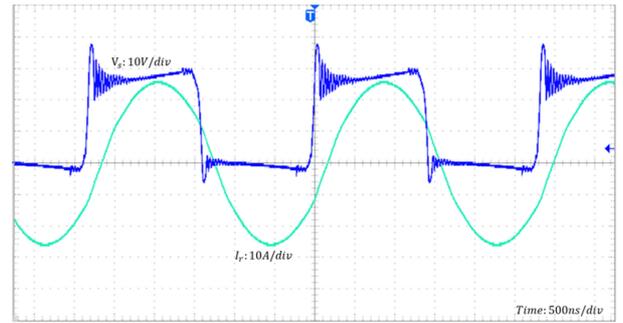
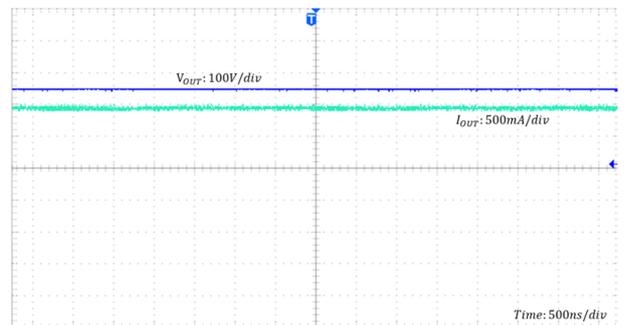


Fig. 10 Schematic of equipment configuration for experiment



(a) Current and voltage of the resonant tank



(b) Output voltage and current

Fig. 11 Output experiment of an LLC resonant converter

실험은 금속 튜브에 텅스텐 와이어 권선하여 가열하고 열원으로부터 10 mm 간격으로 NTC-thermistor를 설치하여 기체의 흐름에 의한 온도의 차이를 확인하였다.

Fig. 12는 유량에 따른 NTC-thermistor의 온도 차이를 실험한 결과이다. 온도 차이는 최대 4.88, 최소 0.16°C 발생한다. 유량이 낮은 구간에서는 온도 차이가 작지만 5 ccm의 유량으로도 온도 차이가 발생하는 것으로 낮은 유량에서도 유량을 측정할 수 있을 것이다. 유량의 크기에 따라 온도 차이가 변화하지만 30 ccm부터 포화되어 온도가 상승하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 히터 전류를 높이면 해결될 것으로 판단되며, 이와 같은 특성을 통해 인공위성용 유량 센서로 사용할 수 있는 것으로 판단된다.

3.3 가스 공급 장치 실험결과

가스 공급 장치의 실험은 PFCV를 통한 유량 제어성능을 확인하기 위해서 초소형 위성에 사용되는 홀 추력기의 요구 추력에 대응할 수 있는 5-40 ccm 범위에서 5 ccm 단위로 유량 제어를 진행하였다. 유량 제어가 원활하게 수행되는지에 대한 검증은

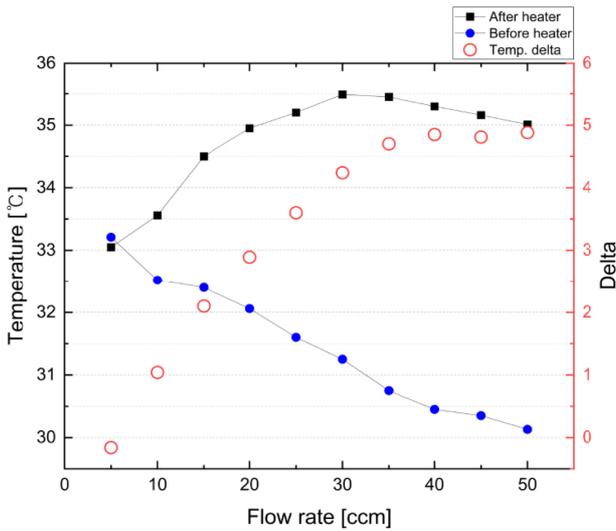


Fig. 12 Temperature measurement results according to flow rate

위해서 유량 센서를 추가로 설치하여 유량 센서에서 출력되는 신호를 기반으로 오차를 확인하였다.

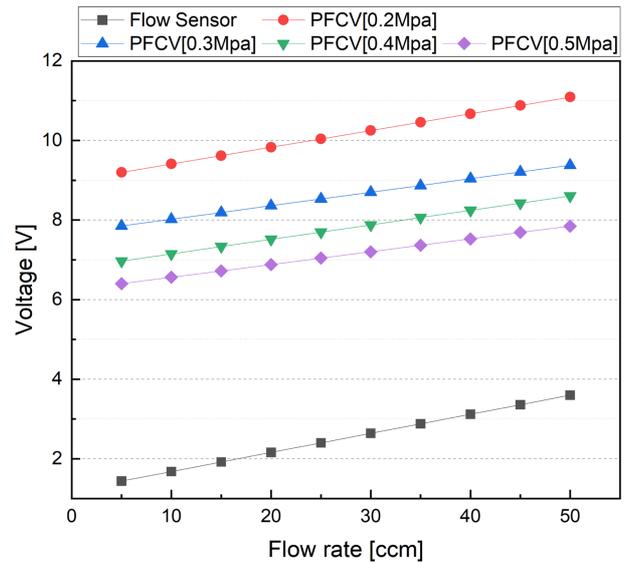
Fig. 13은 유량 제어 결과 그래프이다. Figs. 13(a)는 유량 센서의 출력 전압과 PFCV의 제어 전압을 나타낸 그래프이며, 13(b)는 유량제어 오차 그래프이다. Fig. 13(a) 그래프를 통해 유량 변화에 따라 PFCV를 제어하는 전압도 비례적으로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 PFCV밸브의 열림 정도에 따라 유량이 제어되는 것을 알 수 있으며, 가스탱크의 압력에 따라 제어 전압이 변화하지만 제어변수는 유량에 독립적인 것을 알 수 있다.

Fig. 13(b) 그래프에 나타내었듯이 제어 유량과 실제 유량의 차이는 최대 0.85, 최소 0.275 ccm이 도출되었으며, 오차가 최대인 구간은 유량이 가장 큰 50 ccm이다. 하지만, 오차율로 분석하였을 때는 5 ccm이 5.4%로 가장 큰 오차율이 도출된 것을 확인할 수 있다. 이는 공기 유량이 매우 작아 오차율이 크게 나타난 것으로 보이며, 전체적으로 평균 오차가 약 2.3%로 유량 제어에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

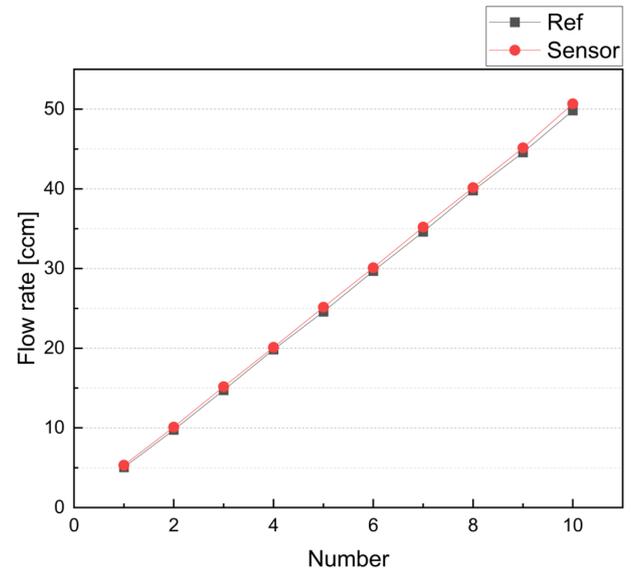
4. 결론

본 연구를 통해 기존 전기 추력 시스템에서 사용되고 있는 Power Module 및 가스 공급장치에 대하여 경량화 방안을 제시하고 프로토타입을 제작 후 실험을 통해 각 장치에 대한 성능을 검증하였다. 또한 가스 공급장치의 경우 우주용 유량센서 개발 위해 센서에 대한 적용 가능성도 확인하였다.

Anode Power Module의 경우 LLC 공진형 컨버터를 통해 공진 주파수를 450 kHz로 하여 커패시터 및 인덕터의 크기 및 용량을 감소시킬 수 있어 제작된 기판의 무게를 약 200g까지 줄일 수 있는 것을 확인하였다. 여기에 구조물이 제작된다고 하여도 총 무게는 500 g 미만으로 제작 가능할 것으로 판단된다.



(a) Flow Sensor and PFCV control voltage results



(b) Error due to flow control

Fig. 13 Flow control results

또한 현재 100 × 72 mm 크기의 250 W급 DC/DC 컨버터는 상용화된 제품이 존재하지 않기에 경량화 적용에 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

전기 추력기용 가스 공급 장치의 설계 방안을 제시하고 실험을 통해 제논가스의 유량 제어 시 오차가 2.3%로 제어됨을 확인하였다. 또한, 가스 공급 압력에 따른 PFCV의 제어 전압은 압력이 0.5 Mpa 일 때 6.40에서 7.85 V, 0.1 Mpa일 때 9.20에서 11.09 V로 압력이 높을수록 낮은 제어전압을 요구하지만 실제 유량제어는 공급 압력에 무관하게 원활히 수행되는 것으로 판단된다.

유량을 간접적으로 계측하기 위해서 열식 질량 유량 센서의 적용 가능성을 확인하였다. 2개의 온도센서의 온도차이가 0.16 부터 4.88°C까지 선형적으로 도출됨에 따라 유량 센서의 특성을

도출하였으며, 유량이 40 cm 이상이 되면 포화되지만, 이는 열원의 전력을 높이거나 온도 센서의 거리를 조절하면 해결 가능할 것으로 판단된다.

가스 공급 장치는 기존에 사용되고 있는 방식대비 구조 및 제어가 간단하고 구성품 수를 줄일 수 있는 PFCV 유량 제어 방식과 열식 질량 유량 센서를 적용한다면 전기 추력 시스템에 추가적인 경량화가 가능할 것으로 예상된다.

큐브 위성부터 초소형 위성에 사용되는 전기 추력 시스템을 적용하기 위해서는 소모 전력도 중요하지만 위성의 무게에 대한 큰 제한사항이 있다. 본 연구에서 제안된 전력 공급 모듈과 가스 공급장치를 적용한다면 전기 추력 시스템을 경량화하는데 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

향후 본 연구에서 제시된 열식 질량 유량 센서를 보다 고도화하여 제안된 가스 공급 장치에 적용하여 정밀한 제어가 가능한 가스 공급장치를 개발하고, Anode Power Module과 함께 실제 전기 추력기에 적용하여 전기 추력기 방전 실험을 통한 성능 검증을 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 결과물은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-004).

REFERENCES

- Hamley, J. A., (1996), Direct drive options for electric propulsion systems, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 11(2), 20-24.
- Sandau, R., (2010), Status and trends of small satellite missions for Earth observation, *Acta astronautica*, 66(1-2), 1-12.
- Wikipedia, Starlink. <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>
- Buchen, E., (2015), Small satellite market observations, AIAA/USU Conference on Small Satellites. <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2015/all2015/51/>
- Lev, D. R., Alon, G., (2017), Operation of a hollow cathode neutralizer for sub-100-W hall and ion thrusters, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46(2), 311-318.
- Wang, Y., Ding, W., Cheng, L., Yan, J., Li, Z., Wang, J., Wang, Y., (2017), An investigation of discharge characteristics of an electrothermal pulsed plasma thruster, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(10), 2715-2724.
- Mazouffre, S., (2016), Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches, *Plasma Sources Science and Technology*, 25(3), 033002.
- Boeuf, J.-P., (2017), Tutorial: Physics and modeling of hall thrusters, *Journal of Applied Physics*, 121(1), 011101.
- Lev, D., Myers, R. M., Lemmer, K. M., Kolbeck, J., Koizumi, H., Polzin, K., (2019), The technological and commercial expansion of electric propulsion, *Acta Astronautica*, 159, 213-227.
- Matsunaga, Y., Takahashi, T., Watanabe, H., Goto, D., Cho, S., Kusawake, H., Kurokawa, F., Kajiwara, K., Funaki, I., (2021), Wide-output range power processing unit for 6-kW hall thruster, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(3), 1609-1620.
- Fang, M., Zhang, D., Qi, X., (2022), A novel power processing unit (PPU) system architecture based on HFAC bus for electric propulsion spacecraft, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(5), 5381-5391.
- Elserougi, A., Massoud, A. M., Ahmed, S., (2016), A boost-inverter-based bipolar high-voltage pulse generator, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(4), 2846-2855.
- Garcia, O., Alou, P., Oliver, J., Diaz, D., Meneses, D., Cobos, J., Soto, A., Lapena, E., Rancano, J., (2013), Comparison of boost-based MPPT topologies for space applications, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 49(2), 1091-1107.
- Axelrod, B., Berkovich, Y., Tapuchi, S., Ioinovici, A., (2009), Single-stage single-switch switched-capacitor buck/buck-boost-type converter, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 45(2), 419-430.
- Yang, S. H., Tsai, T.-H., Chen, H., Chiu, C.-C., Chen, K.-H., Lin, Y.-H., Lin, J.-R., Tsai, T.-Y., (2016), High accuracy knee voltage detection for primary-side control in flyback battery charger, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 64(4), 1003-1012.
- Dragonas, F. A., Neretti, G., Sanjeevikumar, P., Grandi, G., (2015), High-voltage high-frequency arbitrary waveform multilevel generator for DBD plasma actuators, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4), 3334-3342.
- Lee, E., Lee, H., Moon, Y., Kang, S., Kim, Y., Jeong, Y., Yoon, H., Son M., Sayegh, A. M. A., Cerrón, M. L., (2018), Development of robust and affordable xenon feed unit for hall effect propulsion systems, *Proceedings of the Space Propulsion, SP2018_00007*.
- Osborn, M., Netwall, C., (2009), High performance xenon flow system (XFS) optimized for low mass, volume, and cost, *Proceedings of the 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 4909.
- Jiao, T., Sha, D., Wang, L., Jia, X., Gao, C., (2024), High voltage wide output range isolated DC-DC converter for micro-newton ion thruster, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Early Access)*, 1-10.
- Shen, Y., Zhao, W., Chen, Z., Cai, C., (2018), Full-bridge LLC resonant converter with series-parallel connected transformers for electric vehicle on-board charger, *IEEE Access*, 6, 13490-13500.

21. Sun, S., Fu, J., Wei, L., (2021), Optimization of high-efficiency half-bridge LLC resonant converter, Proceedings of the 40th Chinese Control Conference (CCC), 5922-5926.
22. Choi, H., (2007), Analysis and design of LLC resonant converter with integrated transformer, Proceedings of the APEC 07-Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1630-1635.
23. Choi, H.-S., (2007), Design consideration of half-bridge LLC resonant converter, Journal of Power Electronics, 7(1), 13-20.
24. Coxhill, I., Gibbon, D., (2005), A xenon resistojet propulsion system for microsattellites, Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 4260.
25. Lee, J., Kim, D. H., Lee, J. C., So, S., Kim, Y., Sirl, Y., Son, M., Shin, D. Y., Yoon, H., (2022), Development of compact xenon feeding unit for 100W class hall effect propulsion system, Space Propulsion 2022.
26. Yurkov, B., Asmolovskiy, S., Pererva, V., Voronovskiy, D., Kulagin, S., (2023), Optimization of the accumulator tank filling modes of the xenon feed system for electric propulsion system, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 125(2), 78.
27. Huijsing, J. H., Van Dorp, A. L. C., Loos, P. J. G., (1988), Thermal mass-flow meter, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 21(10), 994.
28. Yu, Y. M., He, Z. H., Roesler, H., Solano, C., Zhang, Z., (2020), Design and application of thermal mass flow meter in space, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 950, 163003.
29. Cascetta, F., Rotondo, G., Piccato, A., Spazzini, P. G., (2016), Calibration procedures and uncertainty analysis for a thermal mass gas flowmeter of a new generation, Measurement, 89, 280-287.

**Jin Young Park**

Director of research in the laboratory, EPS Tech Co., Ltd. He received a degree in automotive engineering from Kongju National University in 2017 and a doctorate in mechanical engineering in 2023.

From 2021 to 2023, he worked as a senior researcher in the RIS Mobility Business Division. His research interests include electric vehicle battery chargers, power conversion devices, DC-DC converters, and satellite power systems.

E-mail: pjy0079@epstech.co.kr

인공신경망을 활용한 재료 및 설계 변수에 따른 다공성 구조체의 탄성계수 예측

Prediction of Elastic Modulus in Porous Structures Considering Materials and Design Variables Using Artificial Neural Network

함민지^{1,2}, 문인용^{1,#}
Min Ji Ham^{1,2} and In Yong Moon^{1,#}

¹ 한국생산기술연구원 기능성소재부품그룹 (Functional Materials and Components Group, Korea Institute of Industrial Technology)

² 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)

Corresponding Author / E-mail: mooniy085@kitech.re.kr, TEL: +82-33-649-4044

ORCID: 0000-0002-2279-1144

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층제조), Lattice structures (격자구조), Elastic modulus (탄성계수), Artificial neural network (인공신경망), Porous structures (다공성 구조)

Predicting elastic modulus of a porous structure is essential for applications in aerospace, biomedical, and structural engineering. Traditional methods often struggle to capture complex relationships between material properties, design variables, and mechanical behavior. This study employed artificial neural networks (ANNs) to predict the elastic modulus of a porous structure based on various material and design parameters. An ANN model was trained on a dataset generated via finite element analysis (FEA) simulations, covering diverse combinations of material properties and design variables (e.g., porosity, structure types). The model demonstrated high accuracy in predicting the elastic modulus on a separate test dataset. Key findings included identification of significant design variables influencing the elastic modulus and the ANN model's ability to generalize predictions to new data. This approach showcases that ANN is a powerful tool for designing and optimizing porous structures, providing reliable mechanical property predictions without extensive experimental testing or complex simulations. The proposed method can enhance design efficiency and pave the way for developing advanced materials with tailored mechanical properties. Future research will extend the model to predict other mechanical properties and incorporate experimental validation to verify ANN predictions.

Manuscript received: August 13, 2024 / Revised: September 5, 2024 / Accepted: September 6, 2024

1. 서론

다공성 구조체는 가볍고 높은 에너지 흡수 능력과 같은 특성으로 인해 항공우주, 의료, 구조 공학 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 하고 있다[1,2]. 이러한 다공성 구조체의 기계적 성능, 특히 탄성계수는 재료의 특성과 설계 변수에 따라 크게 달라진다[3]. 따라서 다공성 구조의 설계 변수에 따른 기계적 물성을 계산 및 예측하고자 하는 많은 시도가 이루어져 왔다[4-7]. 하지만 전통적인 방법으로는 재료 특성과 설계 변수 간의 복잡한 상관관계를 완전히 해석하는 데 한계가 있으며, 이는 정확한 탄성

계수 예측을 어렵게 만드는 요인으로 작용하고 있다.

최근 인공신경망(Artificial Neural Networks, ANNs)이 복잡한 비선형 시스템의 예측 및 분석에 있어 강력한 도구로 부상하고 있다. 인공신경망은 대규모 데이터로부터 학습하여 다양한 변수 간의 복잡한 관계를 모델링할 수 있으며, 이를 통해 전통적인 방법보다 더 높은 예측 정확도를 제공할 수 있음이 여러 연구 결과를 통해 검증되어 왔다[8-11].

본 연구에서는 재료의 종류 및 설계 변수(예: 체적 분율, 구조의 종류)를 바탕으로 다공성 구조체의 탄성계수를 예측하기 위한 인공신경망 모델을 개발하고자 하였다. 공학 분야에서의

인공지능 연구에서 지속적으로 문제시되는 데이터 부족 문제를 해결하기 위해 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA) 시뮬레이션을 통하여 설계 변수-탄성계수 간의 커플링 된 대량의 데이터셋을 확보하였으며, 이를 활용하여 ANN 모델을 학습시키고, 별도의 테스트 데이터셋을 통해 모델의 성능을 평가하였다. 그 결과, 재료 종류와 설계 변수가 탄성계수에 미치는 영향을 면밀히 분석할 수 있었으며, 인공신경망 모델의 예측 능력을 검증하여 실제 설계에 적용 가능한 수준의 예측 정확도를 확보할 수 있음을 확인하였다.

2. 실험방법

2.1 유한요소해석 기반 탄성계수 데이터 구축

인공신경망 학습에 필요한 설계 변수-탄성계수 데이터 구축을 위해 유한요소해석을 기반으로 설계 변수에 따른 탄성계수를 계산하였다. 유한요소해석은 ANSYS Workbench의 Material Designer 모듈을 통해 수행하였다. 연구에 적용된 다공성 구조체는 Fig. 1과 같이 격자(Lattice) 및 TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces)로 이루어진 6가지 종류를 사용하였으며, 각각의 다공성 구조체는 5 mm 크기의 단위 셀(Unit Cell)로 설계 및 메쉬화를 수행한 뒤 탄성계수 계산에 적용되었다. 각 구조체의 체적분율(Volume Fraction, VF)은 0.2-0.8(0.1 간격)로 다양하게 하여 유한요소해석을 수행하였다. 다만, TPMS SchwarzP 형상의 경우, 다른 구조에 비해 체적 분율이 증가할수록 표면적과 곡률이 기하학적으로 복잡하게 변하면서 해석 도중 수렴문제를 유발하여 0.2-0.6으로 해석을 진행하였다. 6가지의 구조체와 체적분율 범위, 6종류의 재료를 조합하여 총 240개의 데이터를 유한요소해석을 통해 생성하였다. 이후 인공신경망 학습을 위한 충분한 데이터셋을 확보하기 위해 주어진 데이터로부터 2차 다항식 적합(Polynomial Fitting)을 수행한 뒤 체적 분율 범위에서 100개의 데이터를 추출하여 총 3,636개의 데이터를 얻을 수 있었다.

준비된 데이터는 학습, 테스트, 검증 데이터로 각각 70, 15, 15%씩 배분하여 인공신경망 최적화를 위한 훈련 및 검증에 사용하였다.

유한요소해석에 적용된 재료물성은 ANSYS Material Library에서 제공하는 6개의 대표적인 적층 제조 재료의 물성을 사용하였으며 사용된 재료 및 이에 대한 탄성계수 값을 Table 1에 나타내었다.

2.2 인공신경망 모델 및 평가 방법

Fig. 2(a)는 본 연구에 사용된 인공신경망의 구조를 나타내고 있다. 인공신경망은 크게 입력층(Input Layer), 은닉층(Hidden Layers), 그리고 출력층(Output Layer)으로 구분되어 있다. 입력층은 총 8개의 노드(Nodes)로 이루어져 있으며, 이 중 6개는 다공성 구조체의 종류를 구분하는 원-핫 인코딩(One-hot Encoding) 값이

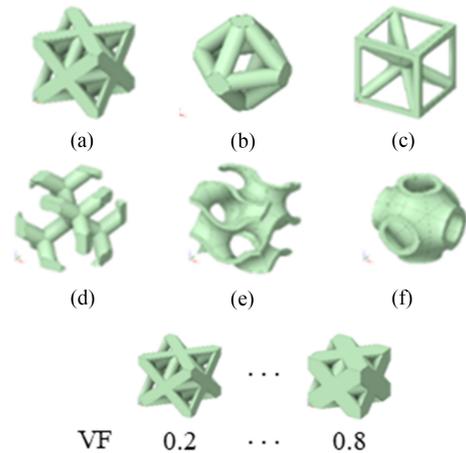
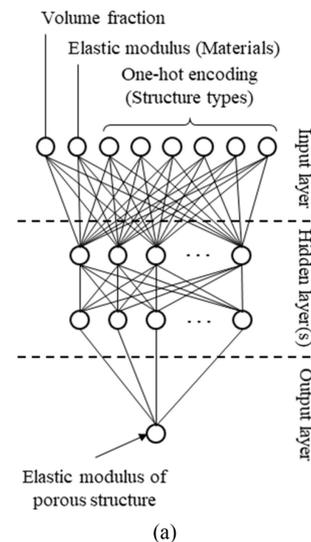


Fig. 1 Schematic of porous structures for (a) octet, (b) double pyramid, (c) cubic with enter supports, (d) diamond, (e) TPMS Gyroid, and (f) TPMS SchwarzP

Table 1 Materials and their elastic modulus

Materials	Elastic modulus
316 Stainless steels	195
AlSi10Mg	70
Co-Cr	200
Inconel 625	1,262
Inconel 718	165
Ti-6Al-4V	107



One-hot encoding	
Octet	= [1, 0, 0, 0, 0, 0]
Double pyramid	= [0, 1, 0, 0, 0, 0]
Cubic with center supports	= [0, 0, 1, 0, 0, 0]
Diamond	= [0, 0, 0, 1, 0, 0]
TPMS Gyroid	= [0, 0, 0, 0, 1, 0]
TPMS SchwarzP	= [0, 0, 0, 0, 0, 1]

Fig. 2 Schematic depicting (a) architecture of the ANN and (b) one-hot encoding for porous structures

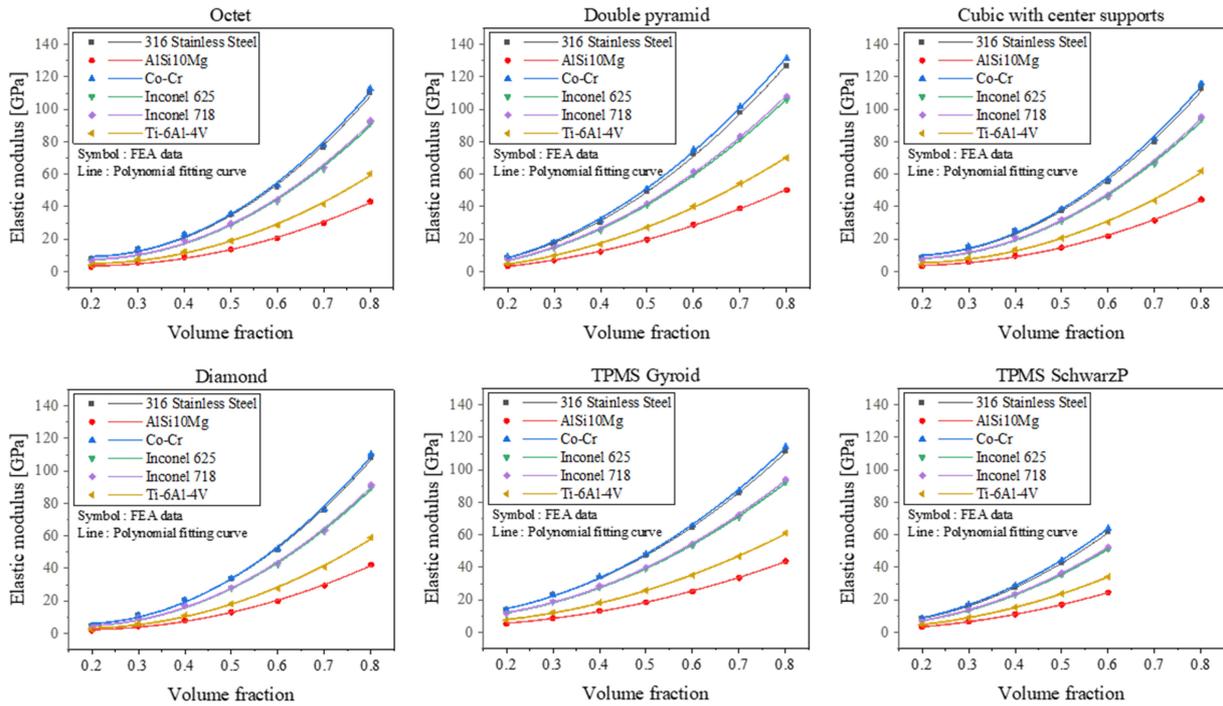


Fig. 3 Results of elastic modulus calculation using FE-simulation

(Fig. 2(b)), 나머지 2개는 체적 분율과 재료의 탄성계수 값이 입력되도록 구성하였다.

은닉층의 경우 다양한 층수(3-8 Layers) 및 노드 수(4-128 Nodes)를 적용하여 학습을 수행하였으며, 그 결과를 분석하여 최적의 인공신경망 구조를 얻고자 하였다. 여기서 모든 은닉층은 동일한 노드 수를 갖도록 설계하였음을 알려 둔다. 출력층은 다공성 구조체의 탄성계수 값에 대응하는 하나의 노드로 구성되어 있다.

인공신경망에 적용되는 재료 및 다공성 구조체의 탄성계수 값은 아래 수식을 통해 0.1에서 0.9 사이의 정규화(Normalization)된 값으로 변환하여 사용하였다. 이는 모든 데이터의 범위를 균일하게 하여 일부 데이터가 모델 학습에 과도한 중요도를 갖게 하는 것을 방지하기 위함이다.

$$x' = 0.1 + 0.8 \left(\frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) \quad (1)$$

여기서, x' , X , X_{min} , 및 X_{max} 는 각각 정규화된 값, 실제값, 데이터 최솟값 및 데이터 최댓값을 의미한다.

각각의 모든 완전 연결층(Fully Connected Layer) 뒤에는 Batch Normalization과 ReLu 활성화 함수를 추가하고, Huber 손실 함수 및 Adam Optimizer를 사용하여 최적화를 수행하였다. ReLu 활성화 함수 이후 Batch Normalization을 적용함으로써, 활성화된 데이터의 분포를 정규화하여 과도한 가중치 변동을 방지하고 학습 안정성을 높일 수 있었으며, 이 방식은 모델이 비선형성을 효과적으로 학습하면서도 데이터의 분포를 일정하게 유지하도록 하여, 기울기 소실 문제를 완화하였다. 또한 학습의 반복적 수행에도 더 이상의 손실함수의 향상이 없을 때

학습을 중지시키는 조기 종료 콜백 함수를 추가하여 모델 학습의 과적합(Over Fitting)을 방지하였다. 학습은 32 미니배치(Mini-Batch)로 10,000번의 Epoch동안 반복 수행되게 설정하였으며, GEFORCE RTX A6000 GPU (NVIDIA, Santa Clara, CA, USA)을 사용하여 훈련을 수행하였다.

학습이 완료된 인공신경망은 아래의 AE (Average Error)와 AARE (Average Absolute Relative Error)값을 계산하여 예측 성능을 평가하였다.

$$AE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - P_i| \quad (2)$$

$$AARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100 \quad (3)$$

여기서 E_i , P_i , 및 n 은 각각 다항식 적합 곡선으로부터 얻은 탄성계수, 인공신경망 모델의 예측 탄성계수, 그리고 평가에 사용된 데이터의 수를 의미한다. AE와 AARE는 각각 모델의 예측값과 실제값 간의 평균 및 상대오차를 나타내며, 이를 통해 모델의 성능을 객관적으로 평가하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 결과

6가지 다공성 구조체의 재료 및 체적 분율에 따른 탄성계수에 대한 유한요소해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 모든 구조와 재료의 탄성계수는 체적 분율이 증가함에

Table 2 Results of ANN prediction with respect to the number of layers and nodes

Cases	No. layers	No. nodes	AE [GPa]	AARE [%]	Cases	No. layers	No. nodes	AE [GPa]	AARE [%]
1	3	4	4.35	21.50	19	6	4	2.01	12.16
2		8	2.63	10.28	20		8	4.53	23.18
3		16	3.10	14.00	21		16	2.84	11.18
4		32	3.29	21.88	22		32	2.83	15.83
5		64	2.96	16.11	23		64	3.97	22.23
6		128	7.75	44.96	24		128	5.39	28.15
7	4	4	3.31	14.40	25	7	4	5.68	26.25
8		8	2.26	12.27	26		8	1.66	8.64
9		16	2.64	11.25	27		16	2.07	12.23
10		32	3.26	17.90	28		32	2.82	15.17
11		64	3.12	17.47	29		64	2.70	18.40
12		128	6.07	34.09	30		128	7.96	43.96
13	5	4	1.39	6.69	31	8	4	3.72	21.48
14		8	3.77	17.16	32		8	3.44	15.54
15		16	2.57	13.65	33		16	1.93	7.61
16		32	3.74	22.89	34		32	2.84	17.90
17		64	3.15	13.31	35		64	3.53	18.58
18		128	6.14	34.02	36		128	5.82	32.51

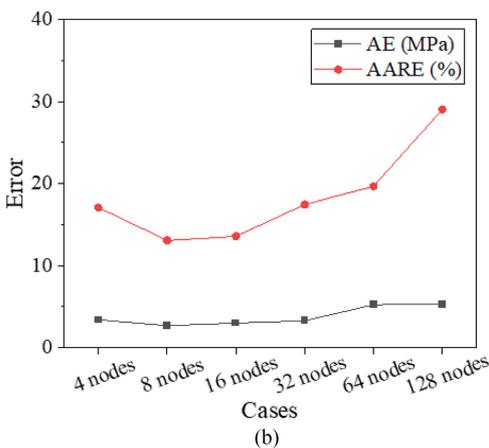
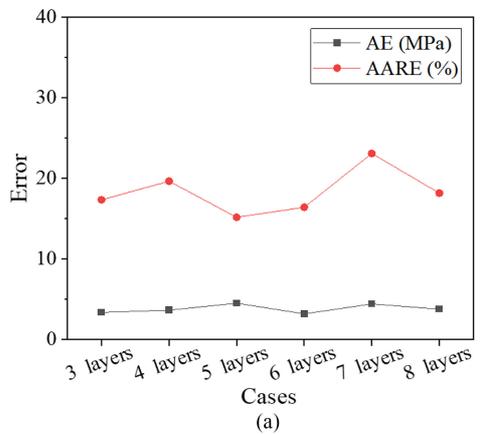


Fig. 4 Graphs showing the results of AE and AARE calculation according to (a) the number of hidden layers and (b) the number of nodes

따라 비선형 적으로 증가하는 경향을 보였으며, 재료의 탄성계수가 높아짐에 따라 다공성 구조체의 탄성계수 또한 높아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 다항식 적합 곡선이 FEA결과(Symbol 데이터)와 정확히 교차하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 다항식 적합이 해석결과를 충분히 반영하는 곡선을 얻을 수 있음을 확인하였다. 2.1장에서 언급한 바와 같이 인공신경망 학습에 사용되는 데이터는 위 다항식 적합 곡선으로부터 얻은 값을 알려 둔다.

3.2 ANN 학습 결과

인공신경망 모델의 구조 최적화를 위해 다양한 층수와 노드 수의 은닉층을 갖는 여러 모델을 학습시켰으며, 그 전체 결과를 Table 2에 나타내었다. 모델 성능에 대한 검토 결과, 5개의 층수와 4개의 노드를 갖는 모델이 가장 높은 정확도를 보임을 확인하였다. (AE: 1.39 GPa, AARE: 6.69%).

은닉층의 층수와 노드 수가 인공신경망 예측 성능에 미치는 영향을 직관적으로 분석하기 위해 인공신경망 구조에 따른 예측 성능 변화 추이를 Fig. 4에 나타내었다. 층수에 따른 예측 성능의 경우, 유의미한 경향성은 나타나지 않았으며 AE는 6개의 층수에서, AARE는 5개의 층수에서 가장 좋은 성능을 보였다.

노드 수는 층수에 비해 모델의 예측 성능에 보다 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 초기 4 노드에서 16 노드까지는 비교적 균일한 성능을 보였지만, 이후 노드가 128까지 증가됨에 따라 AARE가 급격히 악화됨이 확인되었다. 이는 과도한 노드 수가 입력데이터의 중요도를 지나치게 희석시켜 예측 능력을

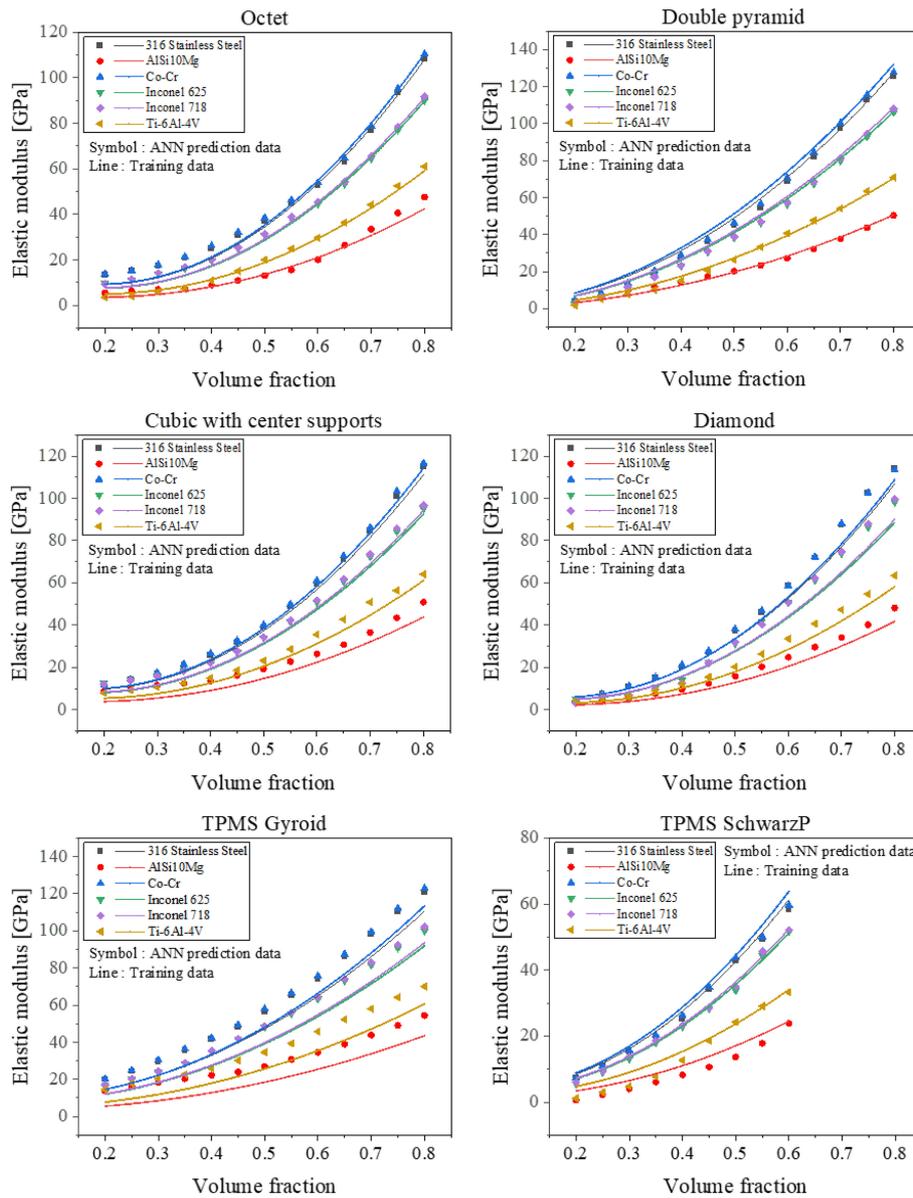


Fig. 5 Comparison between ANN prediction and training data

저하시킨 것으로 판단된다.

Fig. 5는 인공지능망으로부터 예측된 탄성계수 값을 다항식 적합 곡선으로부터 얻은 학습 데이터와 비교한 결과를 나타내고 있다. 전반적으로 인공지능망 모델이 모든 구조체 종류 및 재료에서의 체적 분율에 따른 탄성계수 변화 경향을 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 해당 모델이 재료 특성 및 설계 변수와 탄성계수 간의 상관관계를 정확히 학습하였음을 의미한다. 하지만 TPMS Gyroid의 경우, 모든 재료 종류에서 학습 데이터에 비해 높은 탄성계수를 보이며 다른 다공성 구조에 비하여 예측 정확도가 낮았다. 이러한 특징은 TPMS Gyroid 구조가 다른 5가지 구조와는 다른 설계 변수-탄성계수 상관관계 특성을 갖고 있으며 이에 따라 일반화된 인공지능망이 정확한 예측을 하지 못한 것이라 판단된다. 실제로 TPMS Gyroid구조는

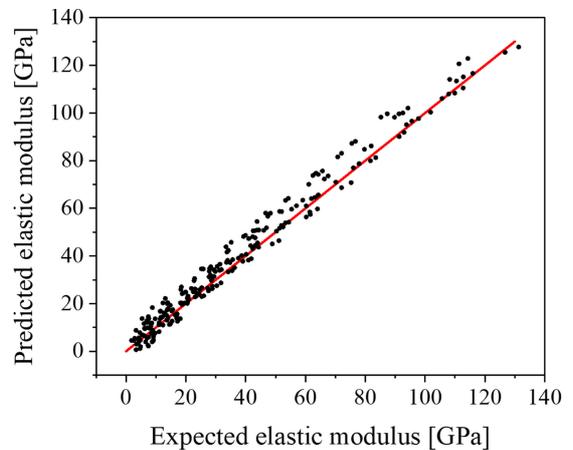


Fig. 6 Correlation relationship between the expected and predicted values using optimized ANN model

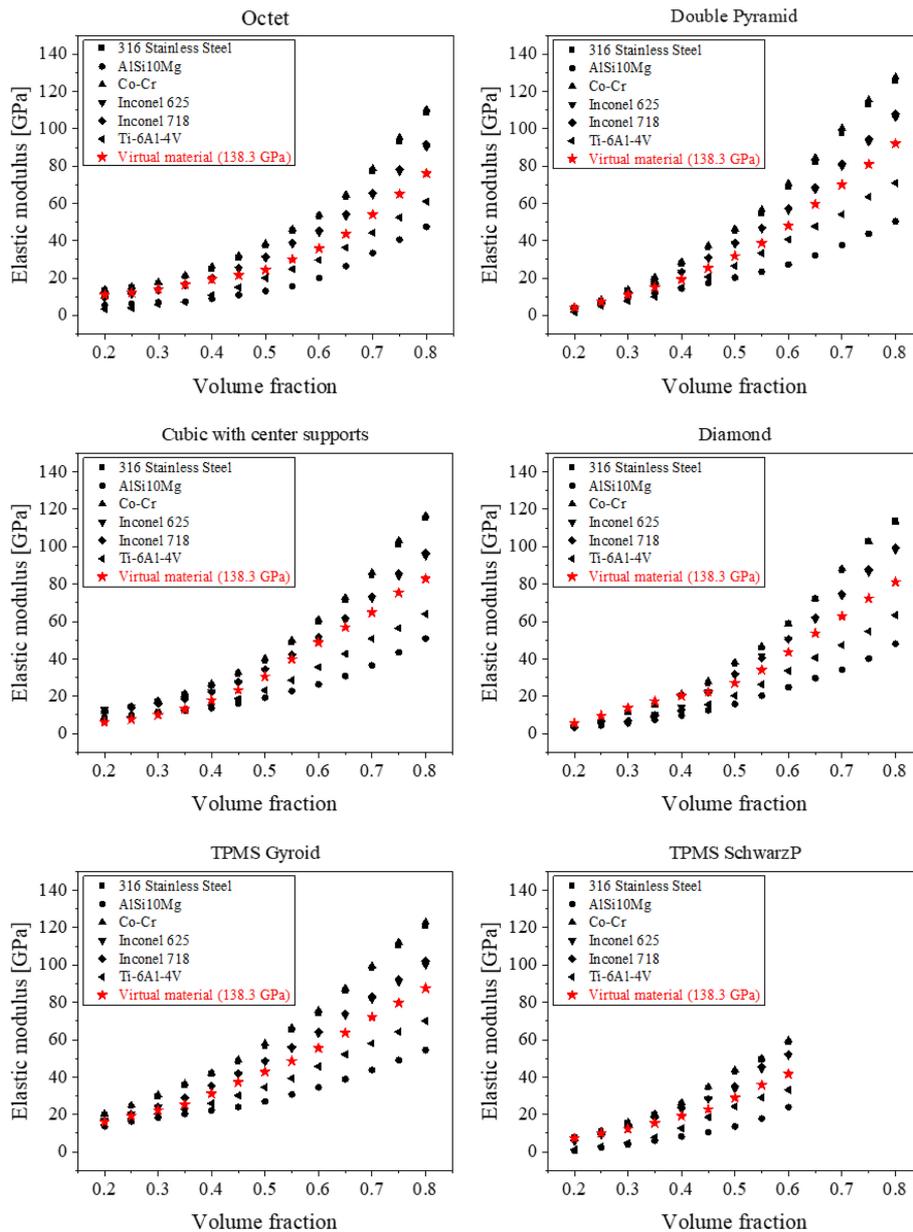


Fig. 7 Results of elastic modulus prediction for virtual material according to structure types and volume fraction

반복되는 곡면과 높은 표면적 대비 낮은 부피 분율을 가지는 구조이기 때문에 복잡성이 높으며 이로 인해 다른 구조체와는 다른 상관관계 특성을 가질 가능성이 있다고 판단된다[12].

Fig. 6은 탄성계수의 수준에 따른 기댓값과 예측값 사이의 연관성 그래프를 나타내고 있다. 전체 범위에서 인공신경망은 기댓값 대비 높은 예측값을 나타냈지만 기준선(적색선)에서 크게 벗어나지 않는 결과를 보여주었다. 또한 탄성계수의 수준에 따른 예측 성능의 차이는 존재하지 않았다. 따라서 훈련된 인공신경망은 탄성계수 예측에 효과적으로 활용할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구를 통해 개발된 탄성계수 예측을 위한 인공신경망을 새로운 재료에 대해 설계 변수에 따른 탄성계수 예측에 사용할 수 있다면 활용성 측면에서의 강점이 되리라는 것은 의문의 여지가

없다. 따라서 이러한 기능을 확인하기 위하여 탄성계수 138.3 GPa를 갖는 가상의 재료에 대해 구조체의 종류 및 체적 분율에 따른 탄성계수 예측을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 가상의 재료에 대한 예측값(적색 별표)은 Inconel 625(162 GPa)과 Ti-6Al-4V(107 GPa) 사이에 위치함을 알 수 있다. 가상 재료의 탄성계수가 138.3 GPa이라는 것을 감안하였을 때 충분히 합리적인 결과라고 판단되며, 체적 분율의 증가에 따른 탄성계수 증가 추세도 다른 재료와 같이 비선형적으로 증가되는 경향을 모사함을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 인공신경망은 훈련에 적용된 재료뿐만 아니라 새로운 재료에 대한 다공성 구조 설계에도 유용하게 활용될 수 있는 도구임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인공지능망을 활용하여 다양한 재료 및 설계 변수를 고려한 다공성 구조체의 탄성계수를 예측하는 모델을 개발하였다. 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 생성된 대규모의 데이터셋을 바탕으로 인공지능망 모델을 학습시키고, 그 과정에서 최적의 모델 구조를 제안하였으며, 이를 통해 전통적인 방법에 비해 더욱 정확하고 신뢰성 있는 예측이 가능함을 확인하였다. 학습된 인공지능망은 학습에 사용되지 않은 새로운 데이터에 대해서도 일반화된 예측 능력을 보여주었으며, 이는 다양한 다공성 구조 설계에 적용 가능함을 시사한다. 모델의 활용성 측면에서는 새로운 재료에 대해서도 추가적인 유한요소해석이나 인공지능망의 학습 없이도 구조체의 탄성계수를 신뢰성 있게 예측 가능함을 보였으며 이를 통해 설계 효율성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 한국생산기술연구원 기업수요기반생산기술 실용화사업(No. JA240011)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다

REFERENCES

1. Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., Qian, M., Brandt, M., Xie, Y. M., (2016), Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review, *Biomaterials*, 83, 127-141.
2. Egan, P. F., Gonella, V. C., Engensperger, M., Ferguson, S. J., Shea, K., (2017), Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing, *PloS one*, 12(8), e0182902.
3. Moon, I. Y., Song, Y., (2023), Design of lattice structure for controlling elastic modulus in metal additive manufacturing, *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 33(6), 276-281.
4. Karamooz Ravari, M. R., Kadkhodaei, M., (2015), A computationally efficient modeling approach for predicting mechanical behavior of cellular lattice structures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 245-252.
5. Alwattar, T. A., Mian, A., (2019), Development of an elastic material model for BCC lattice cell structures using finite element analysis and neural networks approaches, *Journal of Composites Science*, 3(2), 33.
6. Peng, C., Tran, P., Nguyen-Xuan, H., Ferreira, A. J. M., (2020), Mechanical performance and fatigue life prediction of lattice structures: Parametric computational approach, *Composite Structures*, 235, 111821.

7. Ravari, M. K., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M., Rezaei, R., (2014), Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling, *International Journal of Mechanical Sciences*, 88, 154-161.
8. Moon, I. Y., Jeong, H. W., Lee, H. W., Kim, S.-J., Oh, Y.-S., Jung, J., Oh, S., Kang, S.-H., (2022), Predicting high temperature flow stress of nickel alloy A230 based on an artificial neural network, *Metals*, 12(2), 223
9. Kim, B., Ha, S. H., (2023), Simulation-based material property analysis of 3D woven materials using artificial neural network, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 36(4), 259-264.
10. Liu, X., Yan, Z., Zhong, Z., (2021), Predicting elastic modulus of porous $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ cathodes from microstructures via FEM and deep learning, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(42), 22079-22091.
11. Maurizi, M., Gao, C., Berto, F., (2022), Predicting stress, strain and deformation fields in materials and structures with graph neural networks, *Scientific Reports*, 12(1), 21834.
12. Zhang, J., Zhao, J., Rong, Q., Yu, W., Li, X., Misra, R. D. K., (2022), Machine learning guided prediction of mechanical properties of TPMS structures based on finite element simulation for biomedical titanium, *Materials Technology*, 37(1), 1-8.



Min Ji Ham

Researcher in the Functional Materials and Component Group, Korea Institute of Industrial Technology. Her research interest is DfAM (Design for Additive Manufacturing) and AI (artificial intelligence) modeling.
E-mail: ham9081@kitech.re.kr



In Yong Moon

Senior researcher in the Functional Materials and Component Group, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is process design related with FE-simulation and industrial AI (artificial intelligence) application.
E-mail: mooniy085@kitech.re.kr

MCNP 활용 듀얼에너지 포터블 X-ray 개발

Development of Dual Energy Portable X-ray Using MCNP

이경일^{1,#}
Gyung-Il Lee^{1,#}

¹ 송원대학교 자율전공학과 (Department Undeclared Majors, Songwon University)
Corresponding Author / E-mail: jia789@songwon.ac.kr, TEL: +82-062-360-5729
ORCID 0000-0002-1485-5056

KEYWORDS: Dual energy (듀얼에너지), X-ray (엑스레이), Portable X-ray (휴대용 엑스레이), Multi-energy X-ray (다중에너지엑스레이)

Recently, X-ray images through chest radiography (CXR) can distinguish gas, fat, soft tissue, bone, and metal based on their densities. It is the most basic chest imaging technique. With advancement of technology, CXR is becoming safer by lowering the radiation dose. It has become the first examination performed on patients with thoracic abnormality syndrome for early diagnosis of various chest diseases worldwide, accounting for up to 26% of all diagnostic radiology examinations. Despite its various advantages, CXR can distinguish only a few densities. Various thoracic anatomical structures can overlap in a single 2D image and various pathologies can show the same density, making accurate interpretation at various densities difficult. Errors in CXR interpretation have been present since the mid-20th century, with 10-20% of tuberculosis cases being interpreted differently by various radiologists and 19% of lung cancer cases being misinterpreted. To address these issues in interpreting chest CXR and to increase its usability in emergency situations and various environments, the quality of CXR images needs to be improved. In order to improve the quality of these images, this study aimed to establish a portable multi-energy X-ray field technique using MCNP with dual energies of 40 and 70 keV.

Manuscript received: September 11, 2024 / Revised: September 13, 2024 / Accepted: September 13, 2024

NOMENCLATURE

Fm	=	Main Cutting Force
Fr	=	Radial/Thrust Cutting Force
Fa	=	Feed Cutting Force
N	=	Shape Function
\hat{a}	=	Parameter
BKG	=	Background
ROI	=	Region of Interest
MPV	=	Mean Pixel Value
w_{Hard}	=	Soft Tissue Weighting
w_{Soft}	=	Hard Tissue Weighting
I_H	=	Images Obtained Using High Energy Electron Beams
I_L	=	Images Obtained Using Low-energy Electron Beams
VAR	=	Variance

1. 서론

최근 흉부 방사선 촬영을 통한 X-선 영상(CXR)은 가스, 지방, 연조직, 뼈, 금속 등 5가지를 기본적으로 구별 가능한 밀도로 정의되며 가장 기본적인 흉부 영상 촬영 기법이다. 기술의 발달로 CXR은 디지털화 되어 PACS (Picture Archiving and Communications System)에서 관독하며 저장하며 방사선량을 낮추어 점점 안전해지고 있다[1-3].

이러한 요인으로 인해 CXR은 전 세계적으로 다양한 흉부 질환을 조기 진단하기 위해 흉부 이상 증후군 환자에서 실시하는 1차 검사로 자리 잡았으며 전체 진단 방사선 검사의 최대 26%를 차지한다[4,5].

CXR의 다양한 장점에도 불구하고 CXR은 소수의 밀도만 구별할 수 있고 단일 2D이미지에서 다양한 흉부 해부학적 구조가 중첩되며, 다양한 병리가 동일한 밀도를 나타내기에 다양한

밀도에서의 정확한 해석에는 여전히 의사의 경험에서 판독되는 부분이 많다. CXR 해석의 오류는 20세기 중반부터 결핵 사례의 10-20%가 다양한 영상의학과 전문의에 의해 다르게 해석되고, 폐암 사례의 19%가 잘못 해석되는 등 오류가 인정되고 있다. 오류를 줄이기 위해서 수동 방사선 연구에서는 CXR의 체계적인 분석을 사용하여 환부의 위치, 종격침투, 구조의 선명도, 폐 용적 및 인공물의 존재에 따라 판독하고 있으나 아직 판독에 대하여 경험에 의존하기에 판독오류가 존재한다.

이러한 흉부 CXR 판독에 대한 문제와 응급상황 및 다양한 환경에서의 활용성을 증가시키기 위하여 CXR 영상의 질적 향상이 필요하다. 이러한 영상의 질적 향상을 위하여 본 연구에서는 MCNP를 활용하여 40, 70 keV의 듀얼 에너지를 갖는 포터블식 다중에너지 엑스선장기법에 대하여 정리하고자 한다.

2. 듀얼 에너지 X-ray

듀얼 에너지 시스템을 이용하여 물질을 구분하는 것은 서로 다른 레벨의 두 에너지(HE, LE)의 감쇠를 이용해 원자번호 Z를 찾는 방법이다. 물질의 원자번호에 대한 듀얼 에너지 함수의 의존성은 Fig. 1에 과 같으며 총 3가지의 영역으로 나눌 수 있다. 영역 1은 낮은 Z (Z<=10)의 영역으로 이 영역에서의 F(Z)는 거의 일정하다. 따라서 이 영역의 물질의 불변이 힘들다. 반면 영역 2(10<Z<=46)에서는 F(Z)가 단조적으로 변화하기에 물질의 결정이 가능하며 다른 영역과 비교된다. 영역3은 원자번호 Z>46에 대응하며 F(Z)는 서로 다른 Z에 대해 비슷한 값을 가지며 물질 결정에 어려움이 있다.

일반적으로는 위에서 설명한 두께에 독립적이지 않으며 듀얼 에너지 함수 F(Z)는 물질의 원자번호뿐만 아니라 두께에 의존적인 특성을 갖는다[6-9].

$$F(Z) = \frac{\mu_{low}(Z)}{\mu_{high}(Z)} = \frac{\int_{E=0}^{E_{max}} W(E_1)e^{-(E_1)t} dE_1}{\int_{E=0}^{E_{max}} W(E_2)e^{-(E_2)t} dE_2} \quad (1)$$

Fig. 2를 보면 위 식은 물질의 원자번호보다 두께에 더욱 크게 의존하는 모습을 확인할 수 있다.

2.1 포터블식 Dual Energy X-ray 설계

현재 시판되고 있는 포터블이동형 의료용 X-ray 발생장치의 경우 Tube Voltage의 범위가 최소 40 kV에서 최대 150 kV의 넓은 범위를 가지고 있다. 또한 물질의 크기에 따라 X-ray의 Target을 단일 Target과 Triple Target으로 나누어진다. Table 1은 Triple Target과 Dual Target을 비교하였다. 단일 Target의 투입된 kV보다 X-ray 생성량이 낮고 많은 에너지가 열로 변환되는 단점이 있으며, Triple Target은 Target의 경우 튜브 자체의 반경이 커지고 타깃 사이의 거리가 멀어져 강한 자기장이 요구된다. 강한 세기의 자기장을 위해서는 전자석의 부피가 증가해, 자기장이 Focal Spot Size에 영향을 주어 에너지에 따라 균일한 Focal Spot Value를

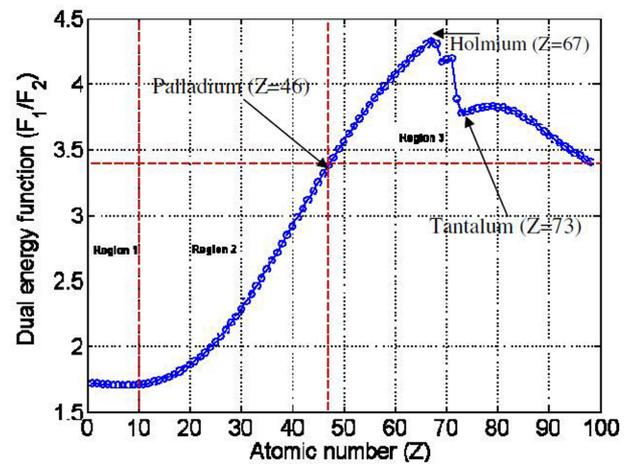


Fig. 1 Change of dual energy function F(Z) according to atomic number (Z)

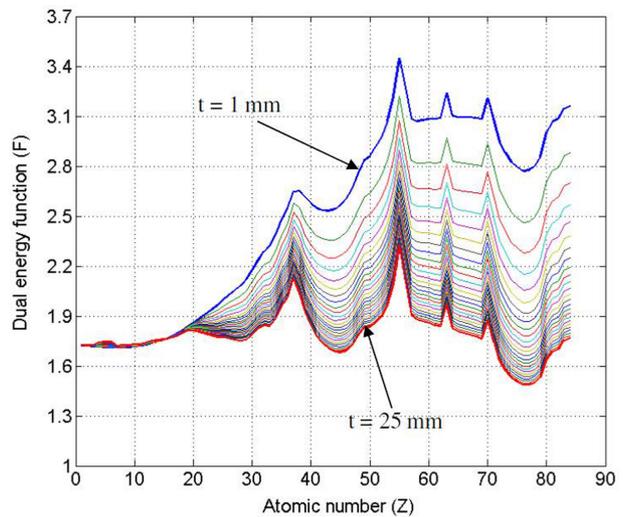


Fig. 2 Changes in dual energy function F(Z,t) according to atomic number (Z) and thickness (t)

얻는 것이 어려워진다. 이러한 문제를 고려하여 Target수를 2개로 줄인 Dual Target X-ray Tube를 개발하였다.

설계의 목표는 Toshiba D-045 X-ray Tube의 Focal Spot Value에 해당하는 f = 0.4를 40, 70 keV 두 에너지에 대해 만족하는 것이다[9-12].

2.2 Dual Target X-ray Tube를 위한 전자선 궤적 시뮬레이션

튜브의 기본적인 설계는 Toshiba D-045 X-ray Tube를 참고하여, 40, 70 keV의 Dual Energy & Dual Target X-ray Tube를 위한 Focusing Cup, 캐소드, 애노드 등을 디자인하였다.

70 keV의 전자선은 전자석의 전원을 끈 상태로 자기장 없이 직진하여 정면에 있는 타깃에 조사되며, 40 keV의 전자선은 전자석의 전원을 켜진 상태에서 수평방향 자기장의 영향으로 궤적이 애노드의 상단으로 입사하여 70 keV와 서로 다른 타깃에 조사된다. 70과 40 keV의 경우 기계 가공의 한계 및 전자 궤적의 분해 가능

Table 1 Comparison of triple target and dual target

Modle	Triple Target	Dual Target
Number of targets	3	2
Target's location	Upper, middle, lower	Upper, middle
Strength of magnetic field	> 200 Gauss	< 200 Gauss
Special feature	Conventional Model Large tube radius due to number of targets High intensity magnetic field required Increased electromagnet volume Large Focal Spot Value	Newly optimized model Small tube radius Weak magnetic field strength Reduced electromagnet volume Small and uniform Focal Spot Value even with different energies

여부를 고려하여 약 2 mm의 분리거리를 가지며, 전자석은 자기장의 세기로 인한 전자선 궤적의 뭉개 짐을 막기 위해 자기장의 세기를 200 Gauss 이하가 되도록 설계하였다. 또한 D-045의 경우 X선의 해상도를 결정하는 Focal Spot Value가 $f = 0.4$ 의 값을 가지고 이를 기반으로 최적화 목표를 40, 70 keV 각각의 경우에 $f = 0.4$ 를 만족하도록 Focusing Cup, 캐소드, 애노드를 설계하였다.

디자인 및 최적화 과정은 3D 전자기장 계산, 데이터 포맷 변환, 전자 궤적 시뮬레이션의 총 3단계로 나누어져 있으며, 3D 전자기장 계산에 있어서는 X선 장치 개발 분야 및 고주파 장치 개발 분야에서 널리 사용되는 소프트웨어인 CST (Computer Simulation Technology)를 사용하여 계산된 3D 전자기장을 MATLAB 코드 데이터 포맷으로 변환하여 가속기 분야에서 전자 빔 동역학 계산에 표준에 준하게 사용되는 ASTRA (A Space Charge Tracking Algorithm)를 이용하여 전자 궤적 시뮬레이션 수행하였으며, 결과 분포를 분석하고, 이를 고려해 Focusing Cup, 캐소드, 애노드를 다시 디자인하고, 처음의 단계로 돌아가는 과정을 반복해 목표로 하는 성능을 만족하는 디자인을 도출하였다. 도출된 디자인은 Table 2와 같다.

설계 목표를 만족하는 Dual Energy X-ray Tube의 기하 구조는 Figs. 4와 5에 나타내었다.

전자빔의 경로를 휘어 두 개 이상의 타겟 물질이 전자를 입사시키기 위해서는 강한 자기장이 요구되고, 이를 위해 전자석이 필요하다. 하지만 일정 세기 이상의 자기장은 전자빔의 궤적을 왜곡시킬 수 있고, 이로 인해 Focal Spot Value가 커질 수 있고 Focal Spot Value를 일정 수준($f = 0.4$)로 유지하면서 전자빔의 경로를 충분히 크게 휘어지게 하기 위해 캐소드-애노드 사이의 거리와 자기장의 세기에 대한 최적화를 하였다. 최적화 결과 필라멘트 중심-애노드 중심 사이의 거리가 15 mm, 중심부 자기장의 세기가 188 Gauss로 설정되었다. Figs. 6은 전자석 모델 및 자기장 측정 위치를 나타내고 있으며, 7은 자기장에 의한 40 keV 전자빔의 회절을 묘사하고 있다.

Table 2 Dual target design goals

Design goals	
Number of targets	2
Target separation distance	2 mm
Energy and Position	40 keV, Anode top 70 keV, Anode center
Magnetic field strength	< 200 Gauss
Focal Spot Value	40, 70 keV, $f=0.4$

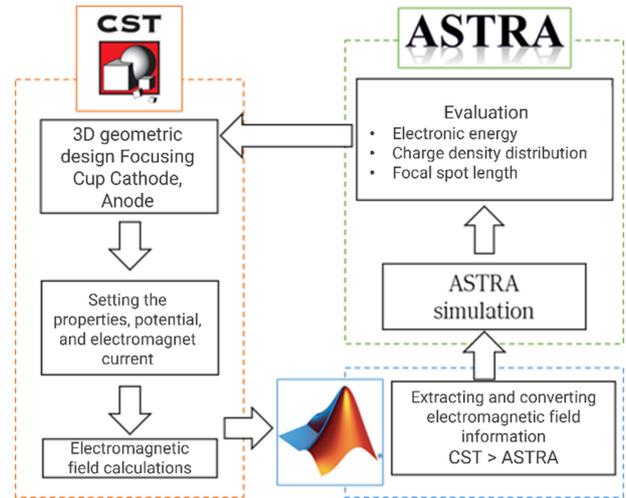


Fig. 3 design process

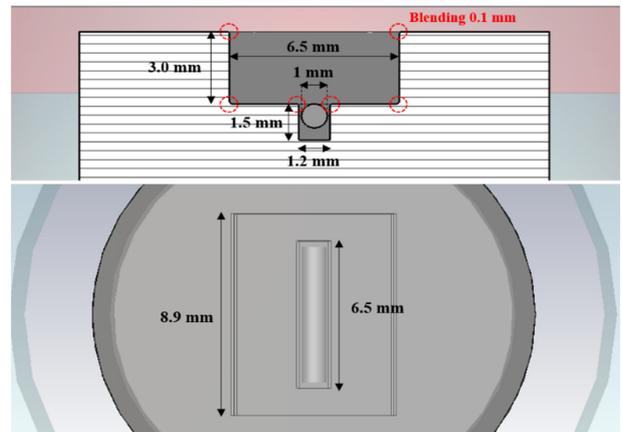


Fig. 4 Optimized geometry - cathode

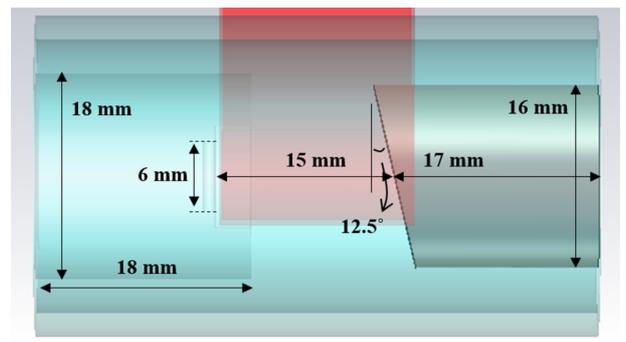


Fig. 5 Optimized geometry

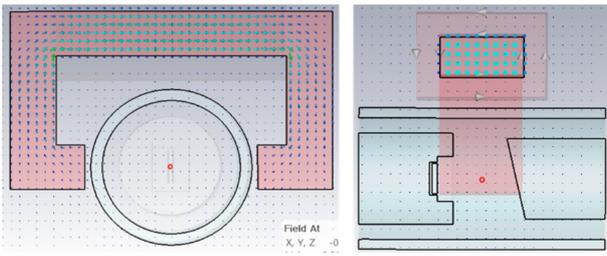


Fig. 6 Electromagnet model and magnetic field measurement location

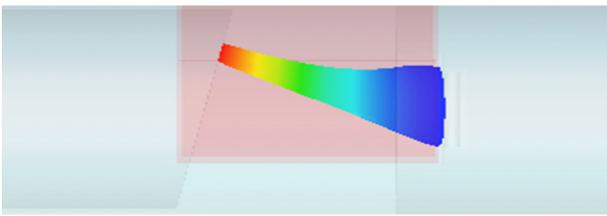


Fig. 7 40keV electron beam bent by the magnetic field of an electromagnet

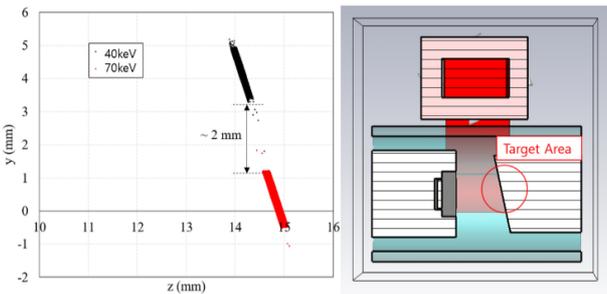


Fig. 8 Electron distribution in z-y direction at target plane

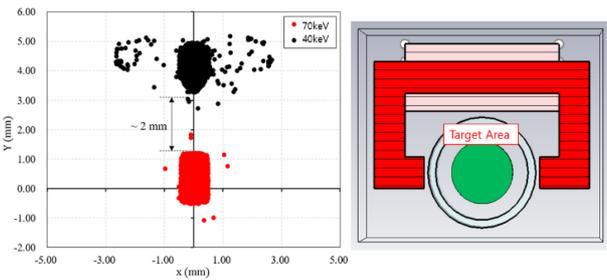


Fig. 9 Electron distribution in x-y direction at target plane

2.3 전자 분포 및 Focal Spot Value 평가

자기장을 끈 상태로 진행한 70 keV 전자선과 자기장을 켜진 상태로 진행한 40 keV 전자선이 타겟에 도달했을 때의 z-y 방향 및 x-y 방향 전자 분포는 Figs. 8과 9와 같다.

자기장의 영향으로 인해 40, 70 keV 전자의 궤적이 분리되었음을 확인할 수 있으며, 이때의 분리 거리는 y 방향으로 약 2 mm로 확인되었다.

x방향 전자의 분포는 Fig. 10의 그래프에 나타나 있으며, 표준(의료용 전기기기-진단용 X선관 장치-초점의 특성)에 따르면

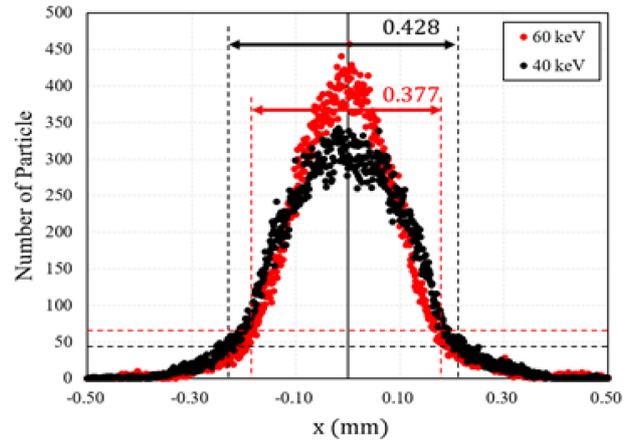


Fig. 10 x-direction charge density distribution

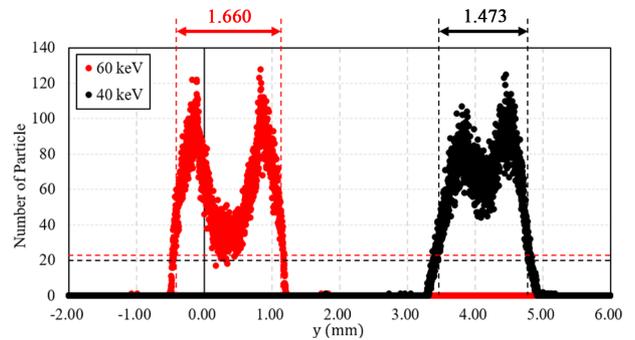


Fig. 11 y-direction charge density distribution

$f = 0.4$ 의 X-ray Tube의 최대 허용 너비는 0.60 mm이다. 전자 분포도 평가 결과 40, 70 keV의 두 경우 모두 입사 전자선의 너비가 0.60 mm 이하로, $f = 0.4$ 의 조건을 만족함을 확인할 수 있다.

y방향 전자의 분포는 Fig. 11의 그래프와 같다. 표준(의료용 전기기기-진단용 X선관 장치-초점의 특성)에 따르면 $f = 0.4$ 의 X-ray Tube의 최대 허용 높이는 0.85 mm이며, Angle = 12.5°를 고려한 길이는 3.83 mm이다. 전자 분포도 평가 결과 두 경우 모두 입사 전자선의 높이가 3.83 mm 이하로 기준을 모두 만족한다.

3. MCNP 전산모사 기반 타겟 물질 조사

MCNP는 몬테칼로 방법에 기반한 입자 수송 시뮬레이션 코드입니다. 본 연구에서는 MCNP의 Radiography Tally를 활용하여 다중에너지 X-ray 이미지 전산모사를 수행하였다. Fig. 12는 MCNP 전산모사 과정을 나타내고 있으며, Fig. 13은 X선 스펙트럼을 나타내었다.

효율적으로 X-ray를 발생시키기 위한 예비 타겟 물질로 텅스텐(W), 몰리브데넘(Mo), 로듐(Rh)을 선정한 후 MCNP 전산모사를 통해 70, 40 keV 전자빔이 타겟과 충돌했을 때 방출되는 X-ray 스펙트럼을 계산하였다.

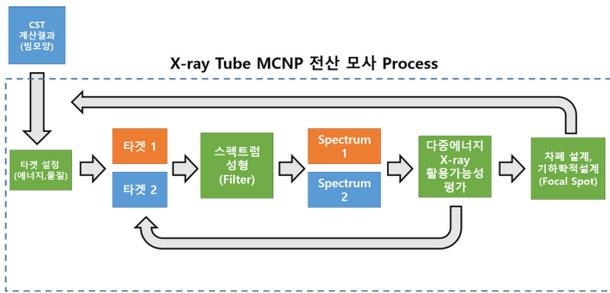


Fig. 12 MCNP computerized simulation procedure

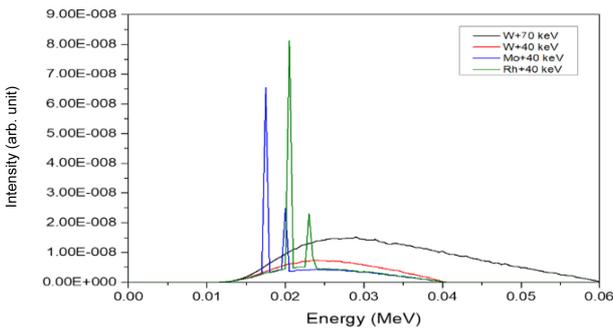


Fig. 13 X-ray spectrum generated from selected target material

선정한 타겟 물질 중 텅스텐의 경우 원자번호가 높아 X-Ray 발생 효율이 높으며 녹는점(Melting Point)이 3,410°C로 높아 고열에 강인하다. 몰리브데넘과 로듐 역시 각각 2,623°C, 1,964°C의 높은 녹는점을 갖고 있으며 20 keV 부근에서 특성 X-ray가 매우 많이 방출되므로 이러한 특성을 다중에너지 X-ray 적용하였다. 다중에너지 X-ray 기술의 핵심인 서로 다른 에너지 영역에서 생성된 이미지 대비를 활용하기 위해서는 필터를 활용해 겹치는 에너지 영역이 최소화되도록 X-ray 스펙트럼을 변경하기 위하여 선형감쇄계수를 고려한 필터를 선정하였다.

X-ray Tube에서 발생하는 스펙트럼을 조절해 환자의 피복선량을 줄이고 영상 형성에 유용한 광자의 비율을 높이기 위해 X-ray의 진행 방향에 필터가 사용하였다. 필터 후보 물질은 Al, Cu, Mo, Rh, Sn로 선정하였으며 각 물질의 선형감쇄계수는 Fig. 14와 같다.

모든 에너지 영역에서 알루미늄(Al)의 감쇄 효과가 가장 적은 것을 확인할 수 있으며 구리(Cu), 몰리브데넘(Mo), 로듐(Rh), 주석(Sn)의 경우 각각 10, 20, 25, 30 keV 전후에서 감쇄 계수가 크게 변화하며 이 성질을 활용하여 여러 가지 필터를 조합하여 계산을 수행하였고 최종적으로 알루미늄, 몰리브데넘, 구리, 주석으로 구성된 필터를 구성하였다. Figs. 15부터 19는 각 타겟 물질별 X선의 스펙트럼이다.

알루미늄 필터의 경우 전 에너지 영역에 걸쳐 스펙트럼을 감쇄시키는 효과가 있으나 각 타겟의 스펙트럼의 중첩되는 부분이 많고 저에너지 영역의 특성 X-ray가 크게 감쇄되지 않아 다중에너지 X-ray의 필터로 부적합하다.

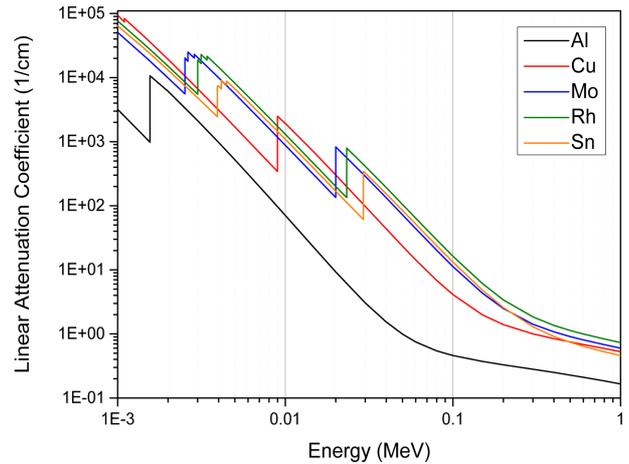


Fig. 14 Linear attenuation coefficients of filter candidates

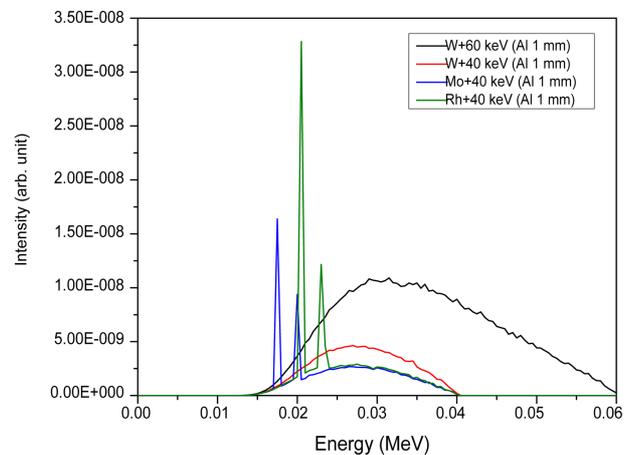


Fig. 15 X-ray spectrum using an aluminum 1.0 mm filter

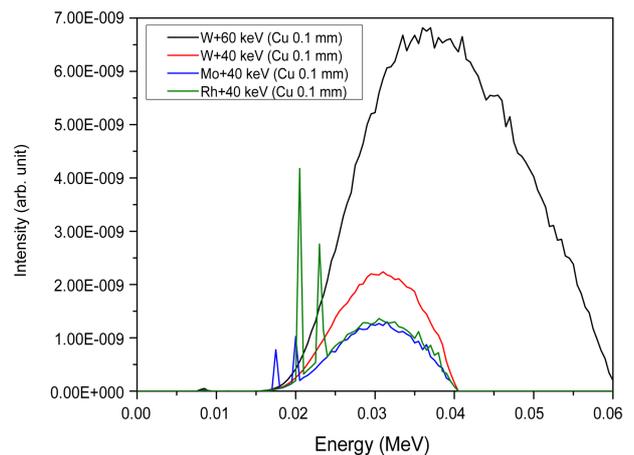


Fig. 16 X-ray spectrum using a Cu 0.1 mm filter

구리 필터의 경우 저에너지 영역의 특성 X-ray가 눈에 띄게 감쇄된 것을 확인할 수 있으나 로듐 타겟을 제외한 나머지 스펙트럼들이 70 keV 전자빔과 텅스텐 타겟이 사용된 경우의 스펙트럼과 중첩되는 부분이 많아 다중에너지 X-ray의 필터로 적합하지 않다.

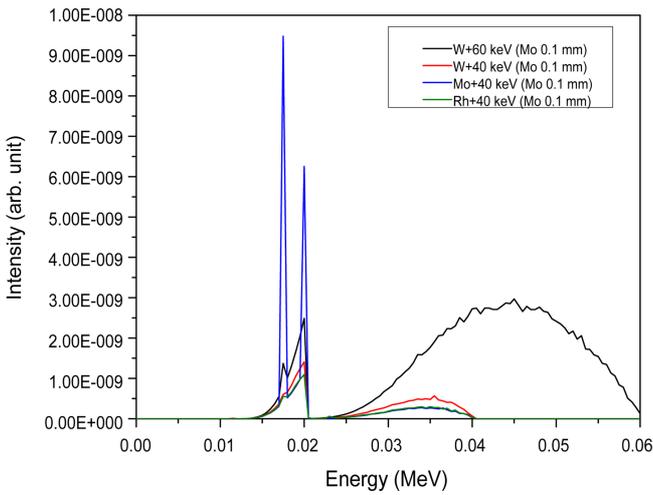


Fig. 17 X-ray spectrum using a Mo 0.1 mm filter

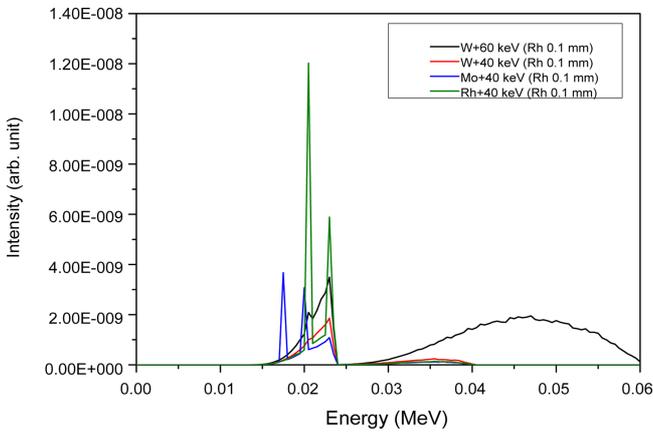


Fig. 18 X-ray spectrum using an Rh 0.1 mm filter

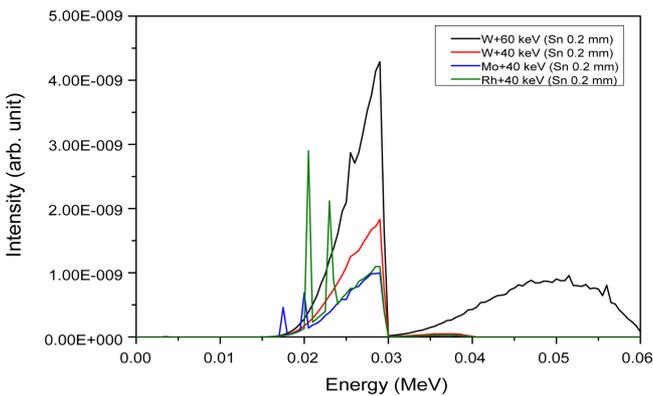


Fig. 19 X-ray spectrum using an Sn 0.1 mm filter

로듐, 몰브리데넘 필터의 경우 저에너지 영역과 고에너지 영역의 스펙트럼이 확실하게 구분되어 구리와 알루미늄 필터보다 좋은 성능을 보였으며, 주석 필터의 경우 고에너지 영역의 스펙트럼이 과도하게 감쇄되는 특성을 확인하였다. 따라서 듀얼 에너지 X-ray의 필터로는 로듐 또는 몰브리데넘 필터로 최종 선정하였다.

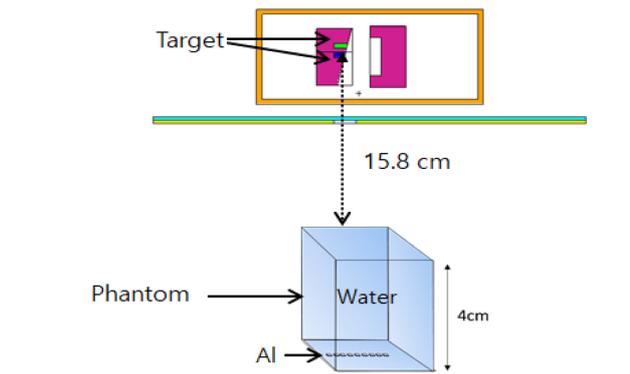


Fig. 20 Radiography calculation system structure using MCNP

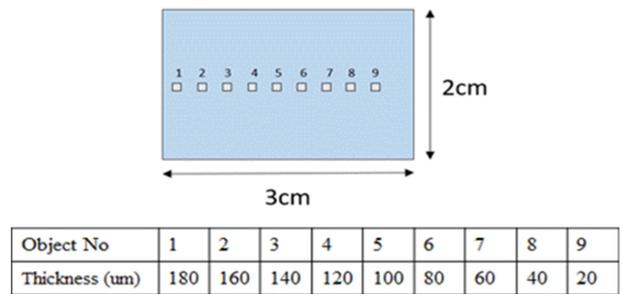


Fig. 21 Phantom structure used in MCNP computer simulation

4. 다중에너지 X-ray Radiography 및 MCNP 전산모사

전산모사로 얻어진 두 가지 에너지영역의 데이터에 이미지 후처리 기술을 적용시켜 다중에너지 X-ray Radiography를 비교를 위하여 연조직(Soft)과 경조직(Hard)을 더 명확하게 구분할 수 있게 해주는 다중에너지 이미지 기술 중 Simple Log Subtraction (SLS) 방법을 사용하였다. SLS 방법은 저에너지, 고에너지 영역에서 얻은 X-ray 이미지 데이터에 가중치를 곱한 뒤 빼주는 방법이며, 다음 식(2)와 식(3)을 전산모사 결과에 적용시켜 수행하였다.

$$I_{Soft}(x, y) = -\omega_{Hard}I_L(x, y) + I_H(x, y) \tag{2}$$

$$I_{Hard}(x, y) = -\omega_{Soft}I_L(x, y) + I_H(x, y) \tag{3}$$

앞서 선정된 타겟과 필터 후보물질에 대한 X-ray Radiography를 생성하기 위해 임의의 물(연조직 모사)과 알루미늄(경조직 모사)으로 이루어진 팬텀을 모델링 하였다.

Radiography Quality 평가는 식(4)을 이용해 Contrast to Noise Ratio (CNR)를 계산하여 이미지의 Quality를 평가하였다.

Figs. 20은 MCNP를 이용한 방사선 계산 시스템을 나타내며, 21은 시뮬레이션에 사용된 팬텀 구조이다.

$$CNR = \frac{|MPV_{ROI} - MPV_{BKG}|}{\sqrt{VAR_{ROI} - VAR_{ROI}}} \tag{4}$$

전산모사 결과 로듐 필터를 사용한 경우에 다중에너지 X-ray 이미지의 Quality가 가장 향상된 것으로 확인되었다. 단일 에너지

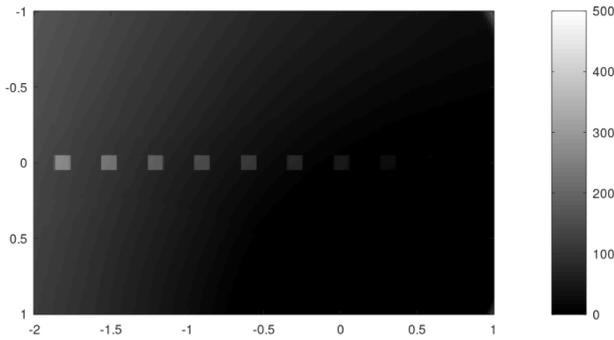


Fig. 22 W target+70 keV electron beam (single energy, single target used)

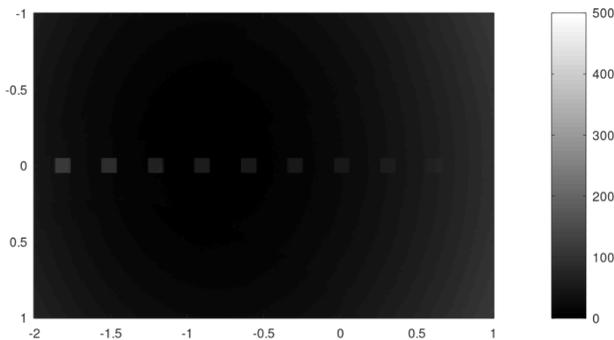


Fig. 23 Mo target+40 keV / W+70 keV (multi-energy, multiple targets used)

X-ray의 분석 결과 Figs. 22과 같이 팬텀 구조의 8번까지 확인이 되었지만 듀얼에너지 X-ray는 23과 같이 팬텀 구조의 9번까지 확인이 가능하여 X-ray 이미지의 Quality가 듀얼에너지 활용시 더욱 뛰어나다.

5. 결론

본 연구에서는 다중에너지를 활용한 X-ray의 설계를 MCNP 전산모사를 기반으로 진행하였다.

다중에너지 X-ray를 이용해 좋은 Quality의 Radiography를 얻기 위해서는 X-ray Tube에서 발생하는 저에너지와 고에너지 스펙트럼의 차이가 확실해야 한다. 전산모사에서는 CNR 값을 비교해 봤을 때, 70 keV 전자빔일 때 로듐 필터와 텅스텐 타깃, 40 keV 전자빔일 때 몰리브데넘 타깃의 경우의 다중에너지 X-ray Radiography가 가장 뛰어난 성능이 확인됨으로 40 keV-몰리브데넘 타깃, 70 keV-텅스텐 타깃, 로듐 필터의 조합이 Dual Energy X-ray Tube를 위한 최적의 조합으로 확인되었다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024년도 송원대학교 학술연구비 지원을 받아 연구되었음(No. C2024-01).

REFERENCES

1. Puddy, E., Hill, C., (2007), Interpretation of the chest radiograph, Continuing Education in Anaesthesia Critical Care & Pain, 7(3), 71-75.
2. Kelly, B., (2012), The chest radiograph, The Ulster medical Journal, 81(3), 143.
3. World Health Organization, (2016), Chest radiography in tuberculosis detection, World Health Organization.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, (2008), Sources and effects of Ionizing radiation: UNSCEAR 2008 Report. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html
5. Hwang, E. J., Park, S., Jin, K.-N., Kim, J. M., Choi, S. Y., Lee, J. H., Goo, J. M., Aum, J., Yim, J.-J., Cohen, J. G., Ferretti, G. R., Park, C. M., (2019), Development and validation of a deep learning-based automated detection algorithm for major thoracic diseases on chest radiographs, JAMA Network Open, 2(3), e191095.
6. Anis, S., Lai, K. W., Chuah, J. H., Ali, S. M., Mohafez, H., Hadizadeh, M., Yan, D., Ong, Z.-C., (2020), An overview of deep learning approaches in chest radiograph, IEEE Access, 8, 182347-182354.
7. Kolkoori, S., Wrobel, N., Dersesch, A., Redmer, B., Ewert, U., (2014), Dual high-energy X-ray digital radiography for material discrimination in cargo containers, Proceedings of the 11th European Conference on Non-Destructive Testing, 19(12), 1-10.
8. Ferreira, J. R., Cardenas, D. A. C., Moreno, R. A., de Sá Rebelo, M. d. F., Krieger, J. E., Gutierrez, M. A., (2020), Multi-view ensemble convolutional neural network to improve classification of pneumonia in low contrast chest x-ray images, Proceedings of the 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC) 1238-1241.
9. Salehi, M., Mohammadi, R., Ghaffari, H., Sadighi, N., Reiazi, R., (2021), Automated detection of pneumonia cases using deep transfer learning with paediatric chest X-ray images, The British journal of radiology, 94(1121), 20201263.
10. Geyl, R., (1994), Design and fabrication of three-mirror flat-field anastigmat for high-resolution earth observation, SPIE, 2210, 739-746.
11. Kim, J.-Y., Kim, Y.-S., Kwac, L.-K., Ma, S. D., Han, J.-H., (2000), Control performance evaluation of ultra precision servo apparatus(II), Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, 617-620.
12. Shiraishi, M., Uehara, K., (1979), In-process control of workpiece dimension in turning, Annals of the CIRP, 28(1), 333-337.



Gyung-II Lee

Assistant Professor in the Department of Undeclared Majors, Songwon University. He is majoring in mechanical engineering and system engineering. His current research Dual servo system for nano-level processing, and Lightweight Design by Jointing of Meterogeneous Materials.
E-mail: jjia789@songwon.ac.kr

압전형 고속 조준 거울의 주파수 영역에서의 이력 특성 분석

Study on Hysteretic Characteristics of Piezoelectric Fast Steering Mirror in Frequency Response

정상원¹, 이효건¹, 정재우¹, 김재현¹, 임선빈¹, 박영진¹, 김원목¹, 임재현¹, 성기준², 임대희², 고민재², 박노철¹, 윤준영¹,
Sang Won Jung¹, Hyo Geon Lee¹, Jae Woo Jung¹, Jae Hyun Kim¹, Seonbin Lim¹, Youngjin Park¹, Onemook Kim¹,
Jaehyun Lim¹, Kijun Seong², Daehee Lee², Minjae Ko², No-Cheol Park¹, and Jun Young Yoon¹*

¹ 연세대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)

² LIG넥스원 광정보융합연구소 (EO/IR System R&D, LIG Nex1)

Corresponding Author / E-mail: junyoung.yoon@yonsei.ac.kr, TEL: +82-2-2123-2817

ORCID: 0000-0001-5893-3477

KEYWORDS: Fast steering mirror (고속 조준 거울), Piezoelectric actuator (압전형 액추에이터), Hysteresis (이력 현상), Precision control (정밀 제어)

Nonlinear hysteresis effects in piezoelectric fast steering mirrors (FSMs) are major culprits of deteriorating the servo performance and reducing the robustness of a control system. In order to compensate for such nonlinearities, this paper presents an identification and compensation method of piezoelectric hysteresis using frequency response measurements. The relationship between hysteresis curves and frequency response was analyzed using various amplitudes of input voltage and measured output displacements. Results proved that hysteresis curves could be reconstructed based on frequency response measurements. By utilizing an inverse function from reconstructed hysteresis curves, parameters for the compensation model were identified. Experimental results showed that the maximum range of output displacement at the nominal position due to hysteresis was significantly decreased by 76% when the hysteresis model identified by the proposed frequency-domain method was used. In addition, the compensated frequency response showed consistent results regardless of input amplitudes, implying that linear dynamics of the piezoelectric FSM could be separately measured.

Manuscript received: September 19, 2024 / Revised: October 7, 2024 / Accepted: October 10, 2024

1. 서론

레이저 통신, 레이저 스캐너 등 레이저를 활용하는 다양한 분야에서 레이저의 정밀한 조준 및 스캔 성능은 핵심 요구 기술이다[1-3]. 고속 조준 거울(Fast Steering Mirror, FSM)은 거울부의 2자유도 틸트/회전 구동을 통해 레이저의 정밀한 목표 지향을 제어하는 핵심 구동장치로서 응용 분야에 따라 구동 범위, 속도, 구동대역폭 등 다양한 설계 요구 조건을 가진다[4].

FSM은 주로 보이스 코일 액추에이터 등의 전자기형 액추에이터와 압전형 액추에이터를 활용한다. 보이스 코일 액추에이터는 넓은 구동 범위에서 높은 선형성을 통해 정밀한 구동이 가능하다는 장점이 있지만, 낮은 추력 성능으로 인해 최대 구동

대역폭이 상대적으로 낮다는 한계가 있다[5,6]. 그에 반해, 압전형 액추에이터는 작은 구동 범위를 가지지만, 높은 추력과 그에 따른 높은 구동대역폭을 통해 고응답 구동이 요구되는 다양한 분야에서 활용이 되고 있다[7,8].

압전형 액추에이터의 전압 인가 시 생성된 전기장은 내부 쌍극자 정렬에 의해 액추에이터의 변형, 즉 변위를 발생시킨다. 하지만, 인가한 전압을 제거하였을 때, 초기 상태로 돌아가지 않는 입력 의존적인 거동을 가지는데, 이를 이력 현상이라 한다. 이력 특성에 의한 입력 전압과 출력 변위 간의 비선형성은 압전형 FSM의 구동 정밀도를 저하시키는 주요 요인 중 하나이다[9-11]. 구동 성능 향상을 위해서는 이력 특성의 보상이 요구되지만, 이는 이력 특성에 대한 이해 그리고 보상을 위한 정교한

모델이 필요하다.

본 논문에서는 압전형 FSM의 이력 특성을 주파수 영역에서 분석 및 식별하였으며, 시스템의 주파수 응답 결과 기반으로 이력 특성을 모델링하는 방안에 대해서 제시하였다. 또한, 설계한 모델 기반 이력 특성 보상에 따른 성능 시험을 통해서, 제안하는 방법의 적용 가능성을 주파수 영역과 시간 영역에서 모두 확인하였다.

2. 압전형 FSM 이력 특성 측정 셋업

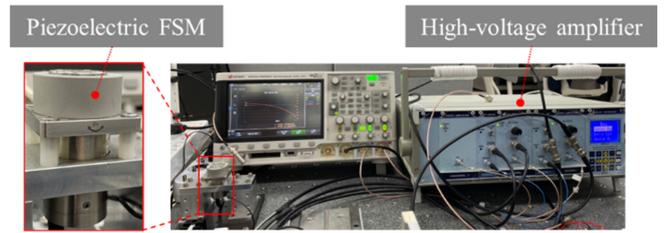
Fig. 1(a)는 본 연구에서 이력 특성 측정을 위해 사용한 압전형 FSM (Coremorow 社, S37.T4SF)과 액추에이터 구동을 위한 High-voltage Amplifier (Coremorow 社, E01.D3)로 구성된 실험 셋업을 보여준다. 압전형 FSM은 상부에 위치한 구동부의 2-자유도 팁/틸트(θ_x, θ_y) 회전 구동을 위해 내부에 4개의 압전 스택형 액추에이터와 스트레인 게이지 센서를 포함하며, 모션 가이드를 위한 유연형 힌지와 고정부를 포함한 하우징으로 구성되어 있다.

Fig. 1(b)는 고속 조준 거울의 구동 원리를 보여준다. 각 팁/틸트 축에 위치한 2개의 압전형 액추에이터는 High-voltage Amplifier의 차등 전압 인가를 통해 변위의 증가/감소를 발생시키는 Push-pull 구동 방식으로 회전 변위를 발생시킨다. 이때, 압전형 액추에이터는 단방향 구동만 가능하기 때문에 Fig. 1(c)에서와 같이 오프셋 전압 75 V를 초기에 인가해야 하며, 각 구동 축에 대한 인가 전압의 최대 범위는 0-150 V이다. 구동 변위 발생에 따라 각 압전형 액추에이터에 부착된 스트레인 게이지 센서는 액추에이터의 길이 변화를 측정하여 회전 각도를 출력하며, 낮은 주파수 대역에서 최대 구동 전압 범위에 따른 최대 구동 범위는 ± 3.1 mrad이다. 실험에 사용된 압전형 FSM 및 전압 증폭기의 구체적인 성능 및 제원은 Table 1에 정리되었다.

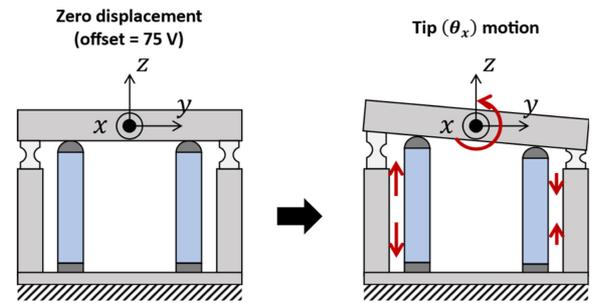
3. 주파수 영역에서의 압전형 FSM 이력 특성 분석

구축된 압전형 FSM의 이력 특성을 분석 및 식별하기 위해 다양한 크기를 가지는 정현파 전압이 사용되며, Fig. 2는 인가된 입력 전압 크기에 따른 FSM 회전 변위의 이력 곡선을 보여준다. 본 시험에서는 유연형 힌지 등으로부터 비롯된 구조적인 선형 동특성의 영향을 배제하기 위해 1 Hz의 낮은 주파수의 정현파를 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 입력 전압 크기가 작은 구간에서는 낮은 출력 변위 기울기를 보이지만, 입력 전압의 크기가 증가하면서 출력 변위의 기울기도 비선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 이력 곡선의 폭도 입력 전압의 크기에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 출력 변위의 신호가 입력 전압 증가에 따라 지연되고 있음을 의미한다.

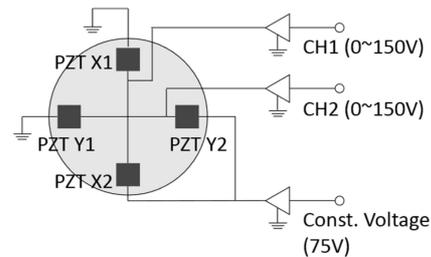
이러한 특성을 확인하기 위해, Fig. 3(a)에서는 최대 전압 범위



(a) Experimental setup of piezoelectric fast steering mirror



(b) Schematic working principle of piezoelectric fast steering mirror



(c) Control principle with 3 driving channels for 2-DOF tip/tilt motion in the piezoelectric fast steering mirror

Fig. 1 Experimental setup and working principle of piezoelectric fast steering mirror

Table 1 Specification of Piezo-FSM and voltage amplifier

Piezoelectric FSM (Coremorow, S37.T4SF)	
Max. tip/tilt angle	6.2 mrad (± 3.1)
Resolution	0.04 urad
Unloaded resonance frequency	6 kHz
Platform length	46 mm
Mover diameter	21 mm
High-voltage amplifier (E01.D3)	
Output voltage	0-150 V
Peak current	1A
Bandwidth	> 20 kHz

인가를 통해 측정된 입출력 값과 주파수 응답 계산을 위하여 Fast Fourier Transform (FFT)을 통해 계산된 출력값의 기본 고조파(Fundamental Harmonic) 성분을 보여준다. 앞서 설명된 바와 같이 이력 곡선 폭이 증가함으로 인해, 파란색 실선으로 표시된 출력 값은 입력 신호에 비해 지연된 효과를 보여준다. 따라서, 빨간 점선으로 표시된 출력값의 기본 고조파 성분에서도

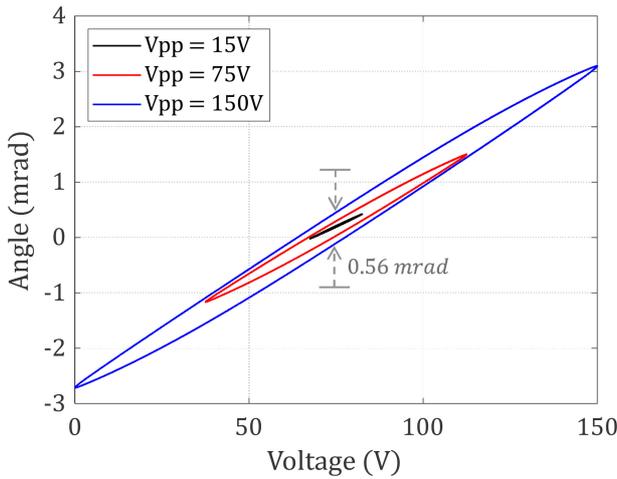
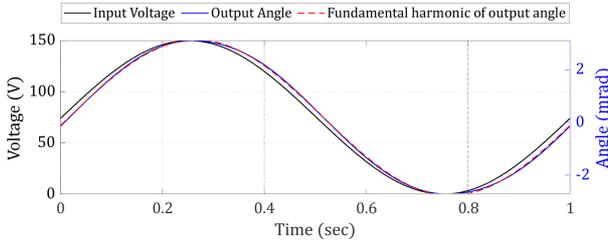
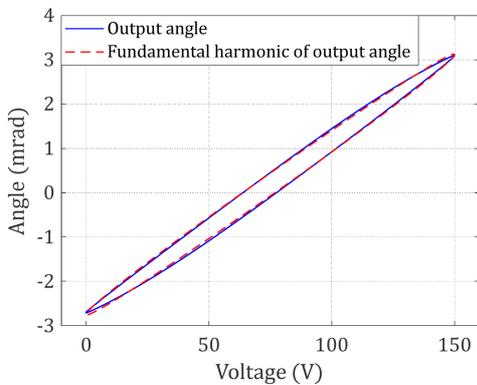


Fig. 2 Measured hysteresis curve by using input sine waveform with various amplitudes where V_{pp} indicates the peak-to-peak voltage amplitude



(a) Output angle and its fundamental harmonic from input sine wave



(b) Hysteresis and fundamental harmonic curve in input-output plane

Fig. 3 Measured steady-state response from input sine wave and fundamental harmonic of corresponding output waveform

마찬가지로 신호 지연 효과가 나타나며, 이는 주파수 응답 결과에서 위상 지연 효과로 나타나게 된다.

Fig. 3(b)는 측정된 출력 각도와 계산된 기본 고조파 성분을 기반으로 나타낸 이력 곡선을 보여준다. 파란 실선으로 표시된 측정값의 경우 비선형적인 입출력 간 관계로 인해 이력 곡선 형태로 표현되지만, 빨간 점선으로 표시된 기본 고조파 성분의 경우 선형적인 입출력 간 관계로 인해 이력 곡선과 유사한 모양을 가지는 타원 형태로 표현이 된다. 이때 타원의 장축 기울기는 주파수 응답에서의 크기를 의미하고 장축과 단축의 크기 비율은

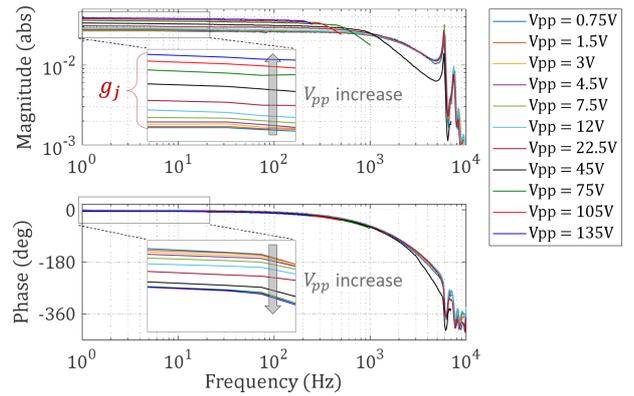


Fig. 4 Measured frequency responses with varying input levels

주파수 응답에서의 위상 지연을 의미하며, 이는 아래 식으로 표현된다.

$$\left| \frac{\theta_{out}(s)}{V_{in}(s)} \right| = \tan\left(\frac{a_2}{a_1}\right) \quad (1)$$

$$\angle \frac{\theta_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\tan^{-1}\left(\frac{b}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2)$$

여기서 $V_{in}(s)$, $\theta_{out}(s)$ 는 입력 전압과 출력 각도의 라플라스 변환, a , b 는 타원 장축과 단축의 길이, a_1 , a_2 는 타원 장축의 가로축과 세로축 길이를 나타낸다. 이러한 과정을 통해 이력 곡선으로부터 주파수 응답의 크기와 위상값을 추정할 수 있다는 사실이 확인되었으며, 반대로 주파수 응답 값을 통해 이력 곡선과 유사한 타원 형태의 곡선을 복원할 수 있다는 것 또한 확인되었다.

입력 전압 크기 변화에 따른 출력 변위의 기울기 변화 및 신호 지연 현상의 확인을 위하여 다양한 입력 전압 폭에 대한 주파수 응답을 측정하였으며, Fig. 4에서 그 측정 결과를 보여준다. 여기서 높은 입력 전압 폭을 가지는 주파수 응답의 경우 Voltage Amplifier의 한계로 인하여 고주파 대역에 대해 제한적으로 측정되었으며, 이력 특성 분석은 유연형 힌지와 같은 구조로 인한 공진과 같은 동적 특성의 영향이 적은 저주파 대역에서 수행된다.

Fig. 4의 저주파 구간에 대해 확대된 주파수 응답에서 입력 전압 폭의 증가에 따라 주파수 응답의 크기 g_i 와 위상 지연이 증가하는 현상이 최종적으로 확인되었으며, 해당 값들을 통해 이력 곡선과 유사한 타원 형태의 입출력 곡선이 복원될 수 있다는 것을 알 수 있다. 다음 장에서는 복원된 곡선을 이용한 이력 특성 보상 모델 설계 및 모델 변수 식별 과정에 대해 기술한다.

4. 이력 특성 보상 모델 및 모델 변수 식별

4.1 이력 특성 보상 역함수 모델

유연형 힌지와 같은 동적 특성을 가지는 가이드 조립체와

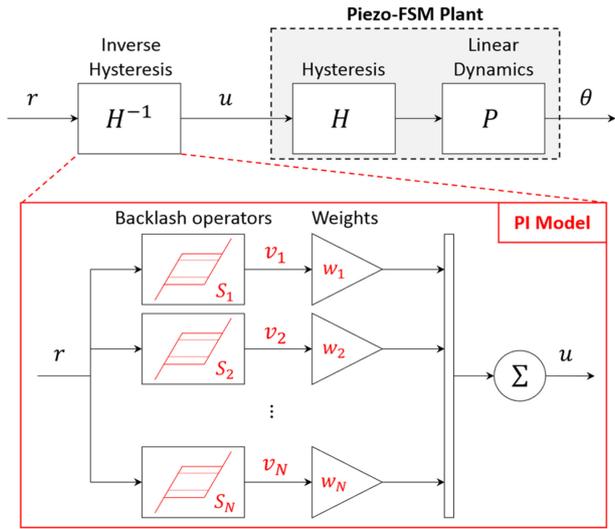


Fig. 5 Schematic block diagram of FSM plant and inverse hysteresis compensation by using PI model

압전형 액추에이터가 결합되어 사용되는 경우, FSM 플랜트는 비선형적인 정적 이력 특성과 선형적인 동적 특성이 조합된 형태인 Hammerstein 구조로 표현할 수 있다[11,12]. 따라서 본 연구에서 압전형 FSM 플랜트의 구조는 Fig. 5에서와 같이 Cascade 형태로 연결된 Hammerstein 구조의 블록 선도 형태로 모델링된다.

이러한 압전형 FSM 플랜트의 비선형 이력 특성 식별 및 보상 제어를 수행하기 위해 이력 특성의 역함수 모델을 설계하여 Cascade 연결을 함으로써 직접적인 보상을 할 수 있다. 본 연구에서는 압전형 FSM의 이력 특성 역함수 모델링을 위해 Prandtl-Ishlinskii (PI) 모델을 채택하였으며, 모델의 구조는 Fig. 5에 표기된 바와 같이 병렬 구조의 Backlash 연산자들과 가중치 (Weight)들의 연산 합으로 표현된다.

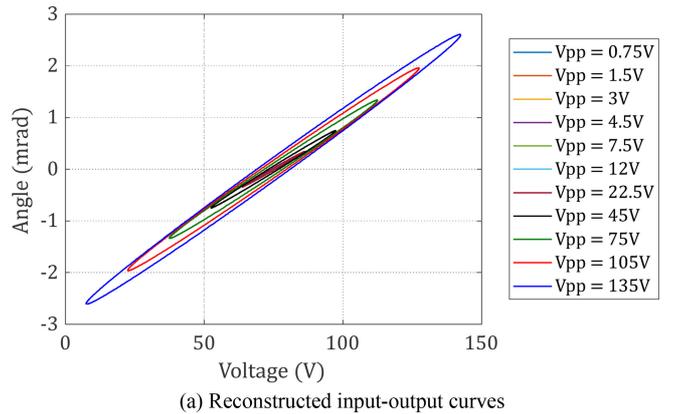
각 Backlash 연산자들은 입력 값(r)의 증가/감소 방향이 변할 경우 특정 임계 값(S) 이상 움직여야 출력 값(v)이 선형적으로 변하는 함수이며, 이는 아래 식으로 정리되어 표현할 수 있다.

$$v_{(i,j)} = \max(r_i - S/2, \min(r_i + S/2, r_{i-1})) \quad (3)$$

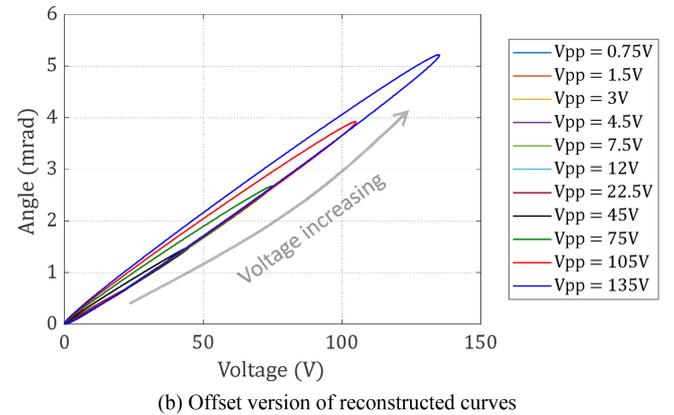
여기서, 아래 첨자 i 는 이산 시간 영역에서 i 번째 입력 혹은 출력 값을 의미하며 j 는 Backlash 연산자의 번호를 의미한다. 식(3)을 이용하여 이력 특성 역함수 모델의 i 번째 출력(u_i)은 아래 식을 통해 계산된다.

$$u_i = \sum_{j=1}^N w_j v_{(i,j)} \quad (4)$$

여기서 w_j 는 j 번째 Backlash 연산자와 연결되는 가중치 값을 의미한다. PI 모델은 비선형적인 이력 곡선을 구간별로 나눠진 선형 함수 형태로 모델링하기 때문에, 정확도를 높이기 위해서 더 많은 수의 연산자를 사용할 수 있다. 다음 장에서는 이력 특성 모델링에 필요한 변수들을 식별하는 과정에 대해 기술한다.



(a) Reconstructed input-output curves



(b) Offset version of reconstructed curves

Fig. 6 Reconstructed curves by using measured frequency responses

4.2 주파수 응답 측정을 통한 이력 곡선 복원

Fig. 6(a)는 입력 전압 폭에 따른 1 Hz 대역의 주파수 응답 결과를 통해 복원된 입출력 곡선을 보여준다. 복원된 곡선들은 Fig. 2에서의 결과와 유사하게 입력 전압 증가에 따라 기울기가 증가하며, 각 기울기 값은 Fig. 4의 주파수 응답 곡선에서 1 Hz 대역 크기에 해당하는 g 와 일치한다. 또한 주파수 응답의 위상 지연 증가에 따라 복원된 곡선의 폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6(b)는 복원된 입출력 곡선을 평행 이동하여 최소 지점이 정렬된 곡선들을 보여준다. 이 때, 입력 전압 폭의 증가에 따라 전압 상승 구간의 곡선들은 최대 전압 인가 시의 곡선에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 최외곽 곡선은 내부 곡선들의 기울기 및 폭 변화에 대한 정보를 포함하고 있다는 사실을 알 수 있다. 다음 장에서는 이러한 최외곽 곡선을 이용하여 이력 특성을 보상하기 위한 역함수 이력 곡선의 모델링 및 변수 식별 과정에 대해 기술한다.

4.3 이력 특성 보상 모델 변수 식별

역함수 이력 곡선은 PI 모델을 통해 병렬 연결된 Backlash 연산자들과 가중치의 합으로 표현할 수 있다. 따라서 이력 특성 보상을 위한 PI 모델의 설계를 위해서는 Backlash 연산자들의

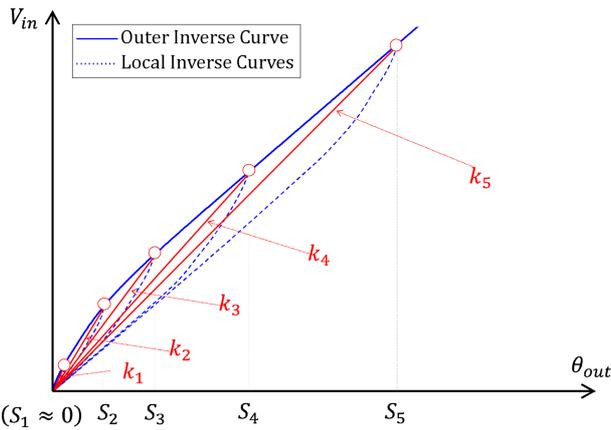


Fig. 7 Schematic of parameter identification process for inverse hysteresis PI model

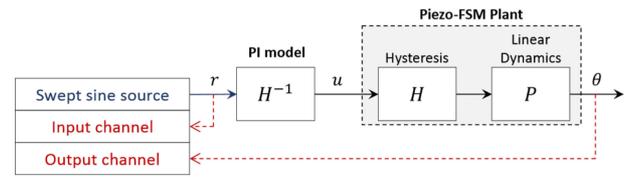
Table 2 Identified parameters of PI model

Index	Threshold (S_j)	Weight (w_j)
1	0 V	1.5412
2	1.5 V	-0.0272
3	3 V	-0.0172
4	4.5 V	-0.0343
5	7.5 V	-0.0553
6	12 V	-0.0674
7	22.5 V	-0.1074
8	45 V	-0.0837
9	75 V	-0.0516
10	105 V	-0.0364
11	135 V	-0.0082

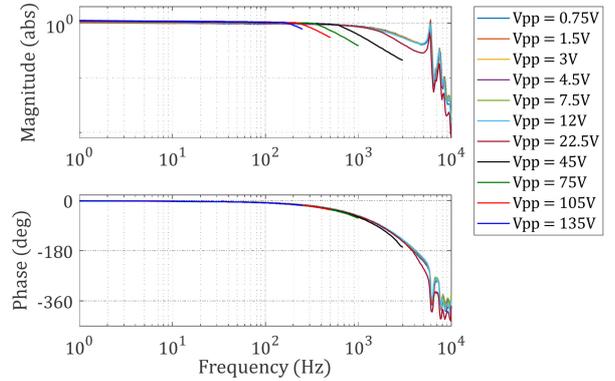
임계 값 S_j 와 가중치 w_j 의 식별이 필요하다. Fig. 7에서는 이러한 모델 변수들의 식별을 위한 역함수 이력 곡선과 식별 과정을 보여준다. 해당 그림에서 파란 실선으로 표기된 역함수 곡선은 Fig. 6(b)에서 최외곽 곡선 상승 구간의 역함수 부분이며, 그 외 작은 폭의 곡선들의 역함수는 점선 형태로 표기되었다.

여기서, Backlash 연산자의 임계 값 S_j 는 주파수 응답 측정에서의 입력 전압 크기 값을 통해 결정할 수 있으며 해당 값들은 가로 축에 표기되어 있다. 이 때, 이력 곡선의 곡률이 큰 초기 구간에 임계 값을 집중적으로 설정함으로써 모델링 정확도를 높일 수 있으며, 곡선의 초기 기울기 설정을 위해 첫 번째 임계 값은 항상 0으로 설정한다($S_1 = 0$).

다음으로 설정된 Backlash 연산자를 통해 역함수 이력 곡선을 표현하기 위해 각 연산자에 대응되는 가중치 값을 계산해야 한다. 이를 위해 각 임계 지점의 기울기(k_j)가 활용된다. 기울기 k_j 는 주파수 응답으로부터 복원된 곡선들의 역함수 기울기이기 때문에, 1 Hz 주파수 응답 크기인 g_j 의 역수로부터 계산할 수 있다. 최종적으로 계산된 기울기의 차등 값을 통해 가중치 w_j 를 구할 수 있으며, 이를 통해 역함수 이력 곡선을 부분적인



(a) Schematic configuration for frequency response measurement



(b) Compensated frequency responses

Fig. 8 Measured frequency responses using hysteresis compensation

선형 함수(Piecewise Linear Function) 형태로 묘사하는 PI 모델이 설계된다. 상기 기술한 과정들은 아래 식으로 정리하여 표현된다.

$$k_j = \frac{1}{g_j} \tag{5}$$

$$\begin{cases} w_1 = k_1 \\ w_j = k_j - k_{j-1} \end{cases} \tag{6}$$

위 과정을 통해 식별된 임계 값과 가중치는 Table 2에 정리되었다. 본 연구에서 사용된 압전형 FSM의 경우 대칭적인 이력 곡선 특성을 보이므로 전압 증가 및 감소에 대해 동일한 임계 값과 가중치가 사용된다. 식별된 PI모델을 이용한 이력 특성 보상 제어에 대한 결과는 다음 장에 기술되었다.

5. 이력 특성 보상 결과

제한된 주파수 영역에서의 이력 특성 분석 및 역함수 모델 설계를 통해 PI모델 설계가 진행되었으며, 이를 이용하여 오픈-루프 상태에서 압전형 FSM 이력 특성의 보상 제어가 진행되었다. Fig. 8(a)는 이력 특성 보상 모델의 성능 확인을 위한 오픈-루프 주파수 응답 측정 시험의 개략도를 보여주며, Fig. 8(b)에서는 해당 시험을 통해 측정된 주파수 응답 결과를 보여준다.

해당 측정 결과를 통해 기존 저주파 대역에서 존재하던 이력 특성으로 인한 입력 전압 폭에 따른 응답 크기의 비선형적인 변화나 위상 지연 현상이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

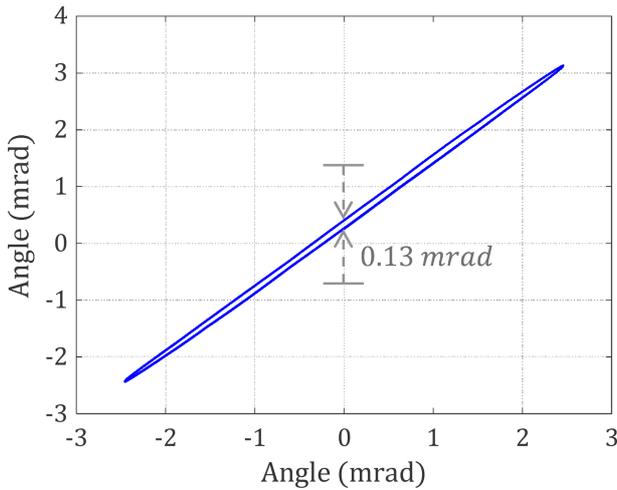


Fig. 9 Measured hysteresis curve using hysteresis compensation

이는 설계된 이력 특성의 역함수 PI 모델을 통한 보상이 잘 이루어져 비선형성이 상쇄가 되었음을 의미하며, 이를 통해 압전형 FSM의 Hammerstein 구조에서 비선형 이력 특성을 제외한 선형적인 동특성을 분리하여 식별하고 제어할 수 있음을 의미한다.

Fig. 9는 설계된 역함수 PI 모델을 통해 보상된 이력 특성 측정 결과를 보여준다. 해당 결과는 최대 구동 범위의 입력 전압 신호 인가를 통해 측정되었으며, 이력 곡선의 최대 폭은 0.13 mrad 수준으로 측정되었다. 이는 이력 특성 보상 제어를 사용하기 전인 Fig. 2의 최대 폭 0.56 mrad에 비하여 약 76% 감소된 수준이며, 제안된 이력 특성 보상 효과를 통해 압전형 FSM의 특성이 높은 수준으로 선형화되었음을 보여준다.

여기서 설계된 PI 모델의 이력 특성과 실제 이력 특성 간의 오차로 인해 기울기 오차와 약간의 이력 곡선 폭이 남아있는 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 주요 원인은 1) 주파수 응답을 통한 역함수 이력 곡선 식별 방법은 간접적으로 실제 역함수 이력 곡선을 추정하는 방법이며, 2) 부분적인 선형 함수 형태로 보상하는 PI 모델링 방법에서 오는 오차가 존재한다. 또한, 3) 압전형 FSM의 Amplifier 한계로 인해 액추에이터 변위가 포화되는 최외곽 이력 곡선은 식별이 불가능하며, 따라서 최외곽 곡선이 아닌 임의의 내부 곡선을 모델링함으로써 발생하는 오차의 영향이 있다.

그럼에도 불구하고, 제안된 방법을 통한 모델은 비선형적인 이력 특성을 잘 보상하는 모습을 보이며, 다양한 입력 전압 폭의 변화에도 균일한 주파수 응답 결과를 제공함에 따라 압전형 FSM의 비선형 및 선형 특성을 분리하여 식별하고 제어할 수 있는 보상 방법이라는 점에 의의를 갖는다. 본 논문에서 제안된 이력 특성 보상 제어 방법은 추후 다양한 가이드 힌지 설계 변경 및 적용, 압전형 구동기 설계 변경 및 적용, 최적 피드백 제어 알고리즘 적용 등의 추가 연구를 통해 확장 적용 및 추가 성능 검토 진행 예정이다.

6. 결론

본 연구에서는 주파수 응답 측정 방법을 통해 압전형 고속 조준 거울의 이력 특성을 식별하고 보상하는 방법을 제안하였다. 압전형 고속 조준 거울의 이력 특성 식별을 위해서 다양한 크기의 정현파 입력 전압을 통해 나타나는 이력 특성의 변화와 주파수 응답의 크기 및 위상 지연 간의 관계를 분석하였으며, 이를 이용하여 주파수 응답 측정을 통해 이력 곡선의 형태가 복원될 수 있음을 확인하였다. 복원된 이력 곡선의 역함수를 활용하여 이력 특성 보상을 위한 PI 모델 변수들이 식별되었으며, 보상 제어를 통해 입력력 계인 변화, 위상 지연과 같은 이력 특성들이 잘 보상되었음을 확인하였다. 이는 압전형 고속 조준 거울의 Hammerstein 구조에서 비선형 특성이 상쇄되었으며, 유연형 힌지 등에서 비롯된 선형 동적 특성을 분리하여 식별하고 제어할 수 있음을 의미한다. 따라서 제안된 이력 특성 식별 및 보상 방법은 추후 Loop Shaping이나 H-infinity 제어 방법 같은 주파수 응답 기반의 선형 피드백 제어를 보다 강건하게 설계하기 위한 사전 보상기로써 유용하게 사용될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-084).

REFERENCES

- Gillmer, S. R., Smeaton, C. V., Burnside, J. W., Torres, J., Hubbard, W., Bennett, C., DeVoe, C., Wellman, J. A., Rey, J. J., Zervas, M. J., Khatri, F. I., Shih, T., Guldner, O., Padula, M., Robinson, B. S., (2021), Demonstration of a modular, scalable, laser communication terminal for manned spaceflight missions, SPIE Optics and Photonics 2021.
- Nguyen, T., Riesing, K., Kingsbury, R., Cahoy, K., (2015), Development of a pointing, acquisition, and tracking system for a CubeSat optical communication module, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII, 194-202.
- Csencsics, E., Ito, S., Schlarp, J., Schitter, G., (2019), System integration and control for 3D scanning laser metrology, IEEJ Journal of Industry Applications, 8(2), 207-217.
- Csencsics, E., Schitter, G., (2020), Exploring the pareto fronts of actuation technologies for high performance mechatronic systems, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 26(2), 1053-1063.
- Xiao, R., Xu, M., Shao, S., Tian, Z., (2019), Design and wide-bandwidth control of large aperture fast steering mirror with integrated-sensing unit, Mechanical Systems and Signal Processing, 126, 211-226.

6. Csencsics, E., Schlarp, J., Schitter, G., (2018), High-performance hybrid-reluctance-force-based tip/tilt system: design, control, and evaluation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(5), 2494-2502.
7. Han, W., Shao, S., Zhang, S., Tian, Z., Xu, M., (2022), Design and modeling of decoupled miniature fast steering mirror with ultrahigh precision, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 167, 108521.
8. Chang, Q., Chen, W., Liu, J., Yu, H., Deng, J., Liu, Y., (2021), Development of a novel two-DOF piezo-driven fast steering mirror with high stiffness and good decoupling characteristic, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 159, 107851.
9. Zhong, J., Nishida, R., Shinshi, T., (2022), Design and precision tracking control of a high-bandwidth fast steering mirror for laser beam machining, *Precision Engineering*, 73, 128-139.
10. Wang, G., Wang, Y., Zhou, H., Bai, F., Chen, G., Ma, J., (2019), Comprehensive approach to modeling and identification of a two-axis piezoelectric fast steering mirror system based on multi-component analysis and synthesis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 127, 50-67.
11. Liu, L., Li, Q., Yun, H., Liang, J., Ma, X., (2019), Composite modeling and parameter identification of broad bandwidth hysteretic dynamics in piezoelectric fast steering platform, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 121, 97-111.
12. Jian, Y., Huang, D., Liu, J., Min, D., (2018), High-precision tracking of piezoelectric actuator using iterative learning control and direct inverse compensation of hysteresis, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 368-377.



Sang Won Jung

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2020. He is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include analytical modeling and design of electromagnetic machine, manufacturing mechatronics and precision motion control.

E-mail: jahoo135@yonsei.ac.kr



Hyo Geon Lee

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2021. He is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include analytical modeling of electromagnetic actuators, precision motion control and manufacturing mechatronics.

E-mail: hyogeon007@yonsei.ac.kr



Jae Woo Jung

received the B.S. degree in mechanical engineering in 2020 from Yonsei University, Seoul, South Korea, where he is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering. His research interests include mechatronic systems for manufacturing, electromagnetic and electromechanical machine design, and precision motion control.

E-mail: jjwooo@yonsei.ac.kr



Jae Hyun Kim

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2021. He is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include analytical modeling and design optimization of electromagnetic machines.

E-mail: jaehyun0924@yonsei.ac.kr



Seonbin Lim

is graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University and currently majoring in Structural Vibration. He is especially interested in vibration transmissions in electric vehicles.

E-mail: dlaths@yonsei.ac.kr



Youngjin Park

received the B.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University, Seoul, South Korea, in 2020. He is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include mechanical vibration, haptic, and structural vibration.

E-mail: pyj1586@yonsei.ac.kr



No-Cheol Park

received B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Yonsei University in 1986, 1988, and 1997, respectively. He is currently a professor at the department of mechanical engineering in Yonsei University. His research interest is in Vibration & Optics.

E-mail: pnch@yonsei.ac.kr



Onemook Kim

is graduate school student in Mechanical Engineering at Soongsil University and currently majoring Structural Vibration in Yonsei University. He is especially interested in vibration analysis of actuator.

E-mail: ookss2@yonsei.ac.kr



Jun young Yoon

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2009 and the M.S. and Ph.D. degrees in mechanical engineering from the Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA, in 2011 and 2017, respectively. He is currently an Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University. From 2017 to 2019, he was a postdoctoral researcher in mechanical engineering and biological engineering at MIT. His research interests include manufacturing mechatronics and robotics system design, electromagnetic and electromechanical machine design, mechatronic devices for biomedical applications, and precision motion control.

E-mail: junyoung.yoon@yonsei.ac.kr



Jaehyun Lim

received the B.S degree in mechanical engineering from Gachon University, Seongnam, South-Korea, in 2024. He is currently working toward the M.S degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include mechanical vibration, vibroacoustics, and structural vibration.

E-mail: jhlim00@yonsei.ac.kr



Kijun Seong

received the M.S degree in aerospace engineering from Pusan University, Pusan, South Korea, in 2005. He is currently working at LIG Nex1 Co., Ltd.. His research interests include linear system control, stabilization control of EO/IR system.

E-mail: kijun.seong@lignex1.com



Daehee Lee

received the M.S degree in aerospace engineering from Pusan University, Pusan, South Korea, in 2019. He is currently working at LIG Nex1 Co., Ltd.. His research interests include linear system control, stabilization control of EO/IR system.

E-mail: daehee.lim@lignex1.com



Minjae Ko

received the B.S degree in mechanical engineering from Korea Aerospace University, Goyang, South Korea, in 2024. He is currently working at LIG Nex1 Co., Ltd.. His research interests include linear system control, stabilization control of EO/IR system.

E-mail: minjae.ko@lignex1.com

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://article.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.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 심사위원회에 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.

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문집필요령

1. 논문원고를 투고할 때는 한국정밀공학회지 양식에 맞춰 <https://article.kspe.or.kr/>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: http://jkspe.kspe.or.kr/_common/do.php?a=html&b=16
- 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 본 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 우리 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, 연구결과의 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 저자를 대상으로 한다.

- ① 연구 논문의 구상, 설계, 데이터의 획득과 분석, 해석에 실제로 기여한 자
- ② 논문의 초안을 작성하거나 논문의 주요 내용을 학술적으로 개선한 자
- ③ 최종 원고의 출판에 동의한 자
- ④ 논문 내용의 정확성과 진실성에 대한 의문이 있을 경우 대응 책임에 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 발표한 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 본 학회지에 이중으로 투고하는 행위는 부정한 행위로서 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 부정이 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 위험사항이 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 최종결과가 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안 된다.

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

저자(들)는 위 논문이 한국정밀공학회지에 게재되기를 희망하며 아래와 같은 사항들에 대하여 확인하고 동의합니다.

1. 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
2. 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 받았습니다.
3. 저자(들)는 위 논문의 작성과 연구에 실질적인 기여를 하였으며, 위 논문의 작성과 내용에 대한 책임이 있습니다.
4. 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.
5. 저자(들)는 위 논문이 과거에 어떠한 학술지에도 출판된 적이 없으며, 현재 다른 학술지에 게재를 목적으로 제출되었거나 제출할 계획이 없습니다.
6. 저자(들)는 한국정밀공학회의 윤리규정에 있는 학술활동 윤리규정을 준수합니다.
또한, 중복 출판이나 표절 예방을 위해 CrossCheck 확인에 동의합니다.
(* (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_학술활동_윤리규정.pdf)
7. 책임저자는 위 논문의 공동저자들이 1항-6항의 사실들을 인식하고 있으며, 위 6가지 사항들에 대하여 동의합니다.
8. 한국정밀공학회는 저자(들)가 위 7가지 사항에 동의하지 않았을 경우, 위 논문의 출판을 지연시키거나 중지시킬 수 있는 권리를 가집니다.
9. 전체 저자들은 위 논문의 저작권과 일체 권리 양도에 관한 권한을 책임저자에게 일임하며, 책임저자는 전체 저자들을 대표하여 저작권을 양도합니다.

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

논문심사과정에서 교신저자의 역할을 수행함과 아울러 논문의 학술지 게재 시 저자들을 대표하여 저작권에 대한 일체의 책임을 담당하는 저자

(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://article.kspe.or.kr>
Search for Journal of Korean Society for Precision Engineering: <http://jkspe.kspe.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://article.kspe.or.kr>).
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: http://jkspe.kspe.or.kr/_common/do.php?a=html&b=16
- 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.

Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

Title	Korean
	English
Authors	

I hereby certify that I agreed to submit the manuscript entitled above to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering with the following statements.

1. The submitting/corresponding authors (hereafter referred to as "authors") warrant that the copyright shall be transferred to the 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 given in [http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_Code of Ethics for Academic Activities \(English\).pdf](http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_Code%20of%20Ethics%20for%20Academic%20Activities%20(English).pdf). Authors also agree to CrossCheck verification of the manuscript for prevention of duplicate publication and plagerism.
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.

**Corresponding
Author's
Signature**

- Corresponding author (name): _____
- Position: _____
- Affiliation: _____
- Date: ____ / ____ / ____

**Corresponding
Author**

The author to whom all correspondence should be addressed from submission to publication process and who is responsible for the published contents and communications with the co-authors.

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 25 · Number 11 · November 2024

REGULAR PAPERS

A Novel Precision Grinding Method for Roller Enveloping Hourglass Worm

Y. Chen · W. Wang · H. Ma · Y. Pu · Y. Chen 2223

Speed Planning and Interpolation Algorithm of Archimedes Spiral Based on Tangential Vector

Q. Liu · G. Huang · X. Zhang · Z. Liu · Z. Li · S. Liu · T. Hao 2235

On the Laser Forming Process of 6061 Aluminium Alloy Sheets with Angular Segment Irradiating Scheme: A Numerical and Statistical Investigation

U. Nath · V. Yadav 2249

A Novel Grinding Process on Compacted Graphite Iron Using Cutting Fluid with Nano-solid Lubricant Additives

T.K. Nguyen · H.T. Phi · N.-T. Bui · S.H. Truong 2263

Welding Strategy for Medium and Thick-Wall Pipes Based on Three-Line Laser

T. Wang · K. Meng · J. He · L. Wang 2275

Study on the Mechanism of the Influence of Passenger Load on the Vibration Characteristics of Railway Vehicles Based on Modal Characteristics

X. He · Q. Zeng · M. Xu · L. Wang · J. Yu · X. Ban 2285

Characterization of Laser Drilling and Parametric Optimization Using Golden Jackal Optimizer

A.K. Sahoo · D.R. Mishra 2299

Defect Detection of Scroll Fixed Using AI Machine Vision Inspection

J.-S. Lee · K.-C. Yun · J.K. Park 2311

An Enhanced Energy Coupling-Based Control Method for Quadrotor UAV Suspended Payload with Variable Rope Length

Y. Zhang · B. Fan · L. Sun · G. Huang · Y. Zhao 2321

Synchronous Measurement and Verification of Position-Independent Geometric Errors and Position-Dependent Geometric Errors of Rotary Axes on Five-Axis Machine Tools

Y.-T. Chen · C.-S. Liu · K.-M. Lin 2337

Pressure Ulcer Breakout Time Estimation Model for the Wearable Robot Use

C.-H. Lee · K.-W. Gwak 2353

Research on Pressure Buffer Structure of Swash Plate Plunger Hydraulic Transformer

X. Wang · Y. Zhang · S. Huo 2365

Evaluation of the Reverse Deep Drawing Process to Produce Square Cup of Brass Without Blank-Holder

A.H. Saleh · H.M. Abdulridha · R.H.M. Al-Kalali · M.I. Ismail 2377

Subsidence of Center or Off-Center Posterior Lumbar Interbody Fusion and Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Cages

S.-W. Kim · H.-Y. Jeong 2387

Analyzing Annealing Effects on Residual Stresses in Injection Molded Microstructures

W. Wang · H. Yang · Y. Wang · C. Weng 2397

A Novel Model for Copper Electroplating Process Simulation Minimizing Chemical Additives

M. Kim · J.H. Bae · S.J. Bai 2407

Implementation of Conceptual Design and Taguchi Optimization Method for the Construction of Multi-Resin 3D Printer

Y.S. Romario · C. Bhat · S.A. Riyanto · S.B. Sanjoto · E. Toyserkani · M. Ramezani · C.-P. Jiang 2419

Further articles can be found at 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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 11 · Number 6 · November 2024

REGULAR PAPERS

Comprehensive Analysis of Heavy Metal Aerosol Emissions and Health Risk from the Electrical Discharge Machining Process: A Control and Mitigation Approach for Green Manufacturing

G.A. Gupta · M. Singh · J. Ramkumar · T. Gupta · S. Patil 1703

Research on Reducing Drilling Damage of CFRP Pipe Based on Plastic Pipe Auxiliary Support

L. Tang · S. Tang · X. Qiu · P. Li · S. Li · C. Li · Q. Niu · H. Liu 1731

Characterization of Physical and Mechanical Properties of Tungsten Alloy Surfaces for Electroplasticity-Assisted Dry Cutting Machining

J. Liu · G. Chen · Z. Yu · X. Jia · J. Huang 1745

Impact of Backing Plate and Thermal Boundary Conditions for High-Speed Friction Stir Welding of 25-mm Thick Aluminum Alloy 7175-T79

H. Das · Md. Reza-E-Rabby · S.A. Whalen · P. Upadhyay · G.J. Grant 1757

Influence of Nozzle Temperature on Gas Emissions and Mechanical Properties in Material Extrusion-based Additive Manufacturing of Super Engineering Plastics

S.J. Park · J.S. Lee · J.E. Lee · S.K. Moon · Y. Son · S.-H. Park 1769

Effect of Abnormal Powder Feeding on Mechanical Properties of Fabricated Part in Directed Energy Deposition

J. Yang · S. Ji · D.-R. Eo · J. Yoon · P. Kahhal · H. Lee · S.-H. Park 1781

Control of the Ionomer Contents in the Electrode Catalyst Layer for Enhanced Performance of Methanol–Water Electrolyzers for Hydrogen Production

D.-H. Kang · S. Kang · S.-Y. Yoon · D.-H. Peck 1797

SDP-Based Battery Charging Controller for Hybrid Electric Vehicles in Preparation for Zero-Emission Zone Drives

J. Woo · S. Han · C. Ahn 1809

Highly Flexible, Conductive, and Antibacterial Surfaces Toward Multifunctional Flexible Electronics

D.G. Ruzgar · S. Akin · S. Lee · J. Walsh · H.H. Lee ·

Y.H. Jeong · Y. Jeon · S.-Y. Baek · M.B.-G. Jun 1823

A Study on the Coupling Effect of Draping Angle and Size of a Draped Composite Egg-Box Structure on Its Deformation

J.-L. Che · S.-H. Chang 1837

Further articles can be found at 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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 2 · Number 2 · July 2024

REGULAR PAPERS

Integrating Entropy-based Data Reduction and Machine Learning in Multidisciplinary Engineering Systems for Enhanced Response Prediction

Sungkun Hwang · Eun-Ho Lee · Seung-Kyum Choi 79

A Digital Approach to via Edge Roughness Characterization and Quantification

Kuan Lu · Pengfei Lin · ChaBum Lee 93

Development of Micro Electrical Discharge Machine and Micro-hole Machining Using Multiple Micro Electrodes

Min Chul Shin · Bo Hyun Kim · Gyu Man Kim 101

Fuzzy Neural Network Control for a Reaction Force Compensation Linear Motor Motion Stage

Kyung Ho Yang · Hyeong-Joon Ahn 109

Development of a Bowden-cable-based Exoskeleton Suit for Assisting Passive Stretching Exercises in Patients with Frozen Shoulder

Haneul Jeon · Taeho Kim · Donghun Lee 115

Development of Situation Awareness Model in Robotic Spot-welding (RSW) System based on Sensor Data Visualization

Inwoong Noh · Jiho Lee · Sang Won Lee 123

Enhancing Inductive IR Thermography by Using FFT-Equalization, Motion Tracking Detection and VDSR Super-resolution Processing

Seungju Lee · Yoonjae Chung · Wontae Kim 133

REVIEW

OPC UA-based Force Control for Deep Rolling with Mechanical Tools

Berend Denkena · Henning Buhl · Jan Berlin · Oliver Maiß 143

Advancements in Energy Harvesting: Piezoelectric, Triboelectric, Pyroelectric, and Magnetolectric Technologies for Self-powered Sensor Systems

Biswajit Mahanty · Dong-Weon Lee 151

INDUSTRY CASE STUDY

Measurement-based Dynamic Modelling in Levitated Active Magnetic Bearing Systems

Brett Wallace · Matthew Nesbitt · Jihyun Lee 169

Case Study of KIMM Universal Gripper: Analysis of Commercial Industrial Gripper and Evaluation of the KIMM Universal Gripper in Industry

Sung-Hyuk Song · Yong-Sin Seo · Jae-Young Lee · Min-jun Kim 179

Hybrid Model Based Autonomous System for Controlling Double Side Grinding Process

Hong-Seok Park · Ngoc-Hien Tran 191

SHORT COMMUNICATION

Introduction of Human-in-the-Loop in Smart Manufacturing (H-SM)

Duck Bong Kim · Mahdi Sadeqi Bajestani · Ju Yeon Lee · Seung-Jun Shin · Sang Do Noh 209

신입회원인준명단

• 정회원 •

회원번호	이름	소속	회원번호	이름	소속
202410107	이재현	한국표준과학연구원	202410065	노윤수	UNIST
202410106	정성인	성균관대학교	202410044	임태식	한양대학교
202410098	나계취판데이	순천대학교	202410045	김소람	(재) 자동차융합기술원
202410214	잔아가아미르	POSTECH	202410102	지윤	성균관대학교
202410091	김민영	LIGNEX1	202410204	이광호	한화시스템
202410212	고대연	연세대학교	202410054	엘스토이	세종대학교
202410094	디팍포다르	한국기술교육대학교	202410167	권태하	(재) 대구기계부품연구원
202410083	고현협	울산과학기술원	202410165	이재오	대구기계부품연구원
202410087	정원영	한국생산기술연구원	202410033	김용환	한국과학기술원
202410187	이일천	한영알코비스	202410130	류민수	KAIST
202410113	김성태	(주)케이에스티플랜트	202410168	전효원	대구기계부품연구원
202410160	남기홍	현진제업(주)	202410135	부하이린	한국표준과학연구원 / 과학기술연합대학원대학교
202410110	정덕기	한국기계연구원			
202410088	김혜림	한국생산기술연구원	202410164	이상진	진양오일셀
202410197	배종인	한화시스템	202410041	강민수	한국전자기술연구원
202410075	윤주성	한국원자력연구원	202410051	김도형	서울대학교
202410205	박훈혁	한화시스템	202410099	유하영	한국생산기술연구원
202410108	이현지	고려대학교	202410064	이윤수	LIG넥스원(주)
202410139	이수현	과학기술연합대학원대학교 - 한국표준과학연구원	202410203	최윤선	국방과학연구소
			202410180	김도영	한국전자기술연구원
202410202	김세현	부산대학교	202410079	손호민	에스제이앤티
202410191	김산	부산대학교	202410060	강경호	현대로템(주)
202410080	김경민	LIG넥스원(주)	202410025	김영섭	LIG넥스원(주)
202410109	이행복	한밭대학교	202410076	김준혁	LIG넥스원
202410177	허준	서울대학교	202410074	정봉원	한국원자력연구원
202410119	장우성	LIG넥스원	202410026	양밍다이	영남대학교
202410068	엄영철	LIG넥스원(주)	202410186	민경태	LIG넥스원
202410063	송현수	LIG넥스원(주)	202410022	이미선	LG이노텍
202410089	채종혁	한국전자기술연구원	202410052	이종원	(주)신영
202410124	정지수	Korea Institute of Industrial Technology			

• 학생회원 •

회원번호	이름	소속	회원번호	이름	소속
202410209	천준호	경북대학교	202410061	범종찬	조선대학교
202410199	유희연	서울과학기술대학교	202410193	김진아	원광대학교
202410196	배태검	서울과학기술대학교	202410069	이승훈	금오공과대학교
202410195	이수한	서울과학기술대학교	202410059	임현구	강원대학교
202410189	부소연	서울과학기술대학교	202410140	장나예	창원대학교
202410176	김재호	영남대학교	202410057	곽명규	강원대학교
202410174	김은엽	영남대학교	202410155	송준호	국립창원대학교
202410154	이제윤	포항공과대학교	202410056	장상혁	강원대학교
202410151	박상민	포항공과대학교	202410207	장예찬	경북대학교
202410150	조웅희	포항공과대학교(POSTECH)	202410111	박진혁	중앙대학교
202410152	김우영	포항공과대학교	202410095	김근호	송실대학교
202410148	박요셉	영남대학교	202410097	한유주	창원대학교
202410126	남대균	조선대학교	202410161	하피즈알리라 자라피케	전남대학교
202410118	서승우	아주대학교	202410163	파이잔E 무 스타파	Chonnam National University
202410115	이권희	국립금오공과대학교	202410122	황지민	한국생산기술연구원
202410184	방준범	국립한국교통대학교	202410128	지용경	한국공학대학교
202410141	김준현	한양대학교	202410070	고영균	국립금오공과대학교
202410104	변지섭	성균관대학교	202410171	김준승	연세대학교
202410105	이채원	성균관대학교	202410134	무니비파키르마 하마드아타르	한국표준과학연구원
202410213	백승우	성균관대학교	202410043	유서현	한양대학교
202410169	최재성	금오공과대학교	202410046	이정훈	홍익대학교
202410181	김민성	서울과학기술대학교	202410096	임태은	전남대학교
202410211	유진호	국립순천대학교	202410208	권동욱	경북대학교
202410206	김도연	부산대학교	202410077	이선희	세종대학교
202410179	통탕	과학기술연합대학원대학교(UST)	202410116	이학준	인하대학교
202410103	김찬영	연세대학교	202410117	안세응	인하대학교
202410146	김병민	홍익대학교	202410136	강동인	한국과학기술원
202410084	이기훈	연세대학교	202410073	이백기	연세대학교
202410100	김태성	연세대학교	202410055	하승우	부경대학교
202410082	박지수	금오공과대학교	202410132	신민승	부산대학교
202410145	김준호	한국생산기술연구원	202410133	김대호	부산대학교
202410144	조현호	한국생산기술연구원	202410131	이수미	부산대학교
202410142	최민서	부산대학교	202410112	이상윤	건국대학교
202410127	김명서	국립창원대학교	202410032	김태현	서울대학교
202410143	조다영	부산대학교	202410058	이혜영	중앙대학교
202410114	임종한	금오공과대학교	202410047	차민선	서울대학교
202410210	이건휘	중앙대학교	202410137	Hieu Tran	UST
202410188	원영배	경북대학교	202410024	김동현	동아대학교
202410147	김승한	영남대학교	202410031	박영건	KAIST
202410092	이지희	고려대학교	202410029	노성인	KAIST
202410170	이성종	연세대학교	202410120	윤서나	국립창원대학교
202410185	안형진	한국생산기술연구원			
202410081	정민규	전북대학교			
202410158	김영민	국립금오공과대학교			

회원번호	이름	소속	회원번호	이름	소속
202410078	김상무	서울과학기술대학교	202410053	연소현	세종대학교
202410072	안규리	연세대학교	202410123	조준현	한국생산기술연구원
202410190	김재영	부산대학교	202410085	한정호	연세대학교
202410200	이지민	부산대학교	202410149	한대희	한양대학교
202410175	김도윤	영남대학교	202410129	정진우	부산대학교
202410192	한정아	창원대학교	202410023	김재훈	순천향대학교
202410156	배준한	금오공과대학교	202410062	신승우	국립한국교통대학교
202410173	김세훈	금오공과대학교	202410030	천석범	KAIST
202410159	엄성준	금오공과대학교	202410183	한정호	한국교통대학교
202410157	서민관	금오공과대학교	202410086	최준환	금오공과대학교
202410172	김창성	국립금오공과대학교	202410201	최유신	한양대학교
202410066	김세리	연세대학교	202410101	임성택	한양대학교
202410067	이형빈	연세대학교	202410162	박지원	전남대학교
202410216	양은주	부산대학교	202410153	노재관	포항공과대학교
202410215	최은지	부산대학교	202410121	김보경	인하대학교
202410178	임종혁	서울대학교	202410166	김석진	한국생산기술연구원
202410071	이유리	한국생산기술연구원	202410198	김수환	명지대학교 자연캠퍼스
202410194	김유민	원광대학교			

2024년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

민병권(연세대학교)

수석부회장

안성훈(서울대학교)

부회장

이상원(성균관대학교)

박상후(부산대학교)

오정석(한국기계연구원)

최영재(한국생산기술연구원)

류상문(DN솔루션즈)

김정(KAIST)

이인환(충북대학교)

감사

송창규(한국기계연구원)

이경창(부경대학교)

총무이사

김동성(POSTECH)

김보현(숭실대학교)

신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원)

송용남(고려대학교)

정영훈(경북대학교)

편집이사

강봉철(국민대학교)

김남근(서강대학교)

김영진(KAIST)

박영빈(UNIST)

이광일(경일대학교)

장진아(POSTECH)

천두만(울산대학교)

강현욱(UNIST)

김동립(한양대학교)

김종백(연세대학교)

손정우(금오공과대학교)

이동원(전남대학교)

정구현(울산대학교)

추원식(경상국립대학교)

고승환(서울대학교)

김산하(KAIST)

김효영(한국공학대학교)

안지환(POSTECH)

이동훈(숭실대학교)

정훈의(UNIST)

황지홍(서울과학기술대학교)

곽문규(경북대학교)

김석민(중앙대학교)

문두환(고려대학교)

안형준(숭실대학교)

이창우(건국대학교)

주백석(금오공과대학교)

김규만(경북대학교)

김양진(부산대학교)

박근(서울과학기술대학교)

윤준영(연세대학교)

이호원(서울대학교)

진종환(한국표준과학연구원)

사업이사

강태준(인하대학교)

김충수(한국생산기술연구원)

서진호(부경대학교)

이봉기(전남대학교)

조영삼(원광대학교)

권지연(동국대학교)

김태곤(한국생산기술연구원)

안상훈(한국기계연구원)

이원균(충남대학교)

주기남(조선대학교)

김무림(한국로봇융합연구원)

김현준(경북대학교)

오기용(한양대학교)

이지혜(한국기계연구원)

최정욱(중앙대학교)

김승종(고려대학교)

박석희(부산대학교)

윤주성(경남대학교)

이현섭(동아대학교)

현승민(한국기계연구원)

김진호(영남대학교)

박용재(강원대학교)

이문규(아주대학교)

임지석(영남대학교)

기획홍보이사

노유정(부산대학교)

류시형(전북대학교)

이주연(서울과학기술대학교)

허세곤(한국기계연구원)

국제이사

남정수(한국생산기술연구원)

허윤정(경희대학교)

이동진(건국대학교)

홍성태(울산대학교)

전용호(아주대학교)

조영태(창원대학교)

차석원(서울대학교)

대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원)

김경동(한국공작기계산업협회)

김종혁(썬대위아)

장원석(한국기계연구원)

조영환(LIG넥스원(주))

부문회장

김건희(한밭대학교)

이강재(DN솔루션즈)

이현욱(한국철도기술연구원)

조정대(한국기계연구원)

정재일(국민대학교)

엄광문(건국대학교)

이동윤(한국생산기술연구원)

김호찬(안동대학교)

박형욱(UNIST)

김영범(한양대학교)

특별회원사

다이아몬드

DN솔루션즈
(주)케이씨텍
화천기공(주)

LIG넥스원(주)
(주)키슬러코리아

(주)스맥
한국화낙(주)

신도리코(주)
현대위아(주)

(주)이수페타시스
(주)화신정공

골드

(주)마리알로
지엔피테크놀로지(주)

(주)에비던트코리아
(주)프로토텍

(주)어드밴테크코리아
헥사곤

(주)에이스나노켄

(주)엔도로보틱스

실버

(주)웨이퍼펍

한국공작기계산업협회

패밀리

(주)넥스페이스
(주)미터랩
(주)스포스
(주)이엠엘

(주)디엔디이
BIOPAC Systems KOREA
에이비씨무역
(주)캐리마

디케이에스에이치코리아(주)
(주)비솔
(주)에이엠코리아
(주)케이랩스

리파인(주)
삼성SDI
(주)에임즈
하비스탕스(주)

맥스트레이딩
(주)스팀솔루션
위즈윅스
한국데베소프

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구카톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김무림
한국로봇융합연구원

김양진
부산대학교

문두환
고려대학교

박민수
서울과학기술대학교

박형욱
UNIST

손정우
금오공과대학교

송철기
경상국립대학교

안지환
POSTECH

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

이종길
안동대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

강봉철
국민대학교

강현욱
UNIST

김기주
동명대학교

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

배장호
경성대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이동훈
송실대학교

이봉기
전남대학교

이호원
서울대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

김갑용
Iowa State Univ.

김범준
Univ. of Tokyo

김우균
Univ. of Cincinnati

민상기
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 11/ November 2024

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

월간 · 제41권 제11호 [통권 제404호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2024년 10월 25일

발행일 2024년 11월 1일

발행인 민병권

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 박은희 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpep.st@kspe.or.kr

IJPEM(GT) 김민경 / (02)518-0723 / ijpep@kspe.or.kr

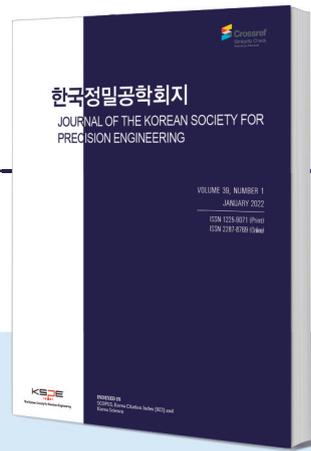
국내학술대회(춘·추계) 이성경 / (02)518-0725 / conf@kspe.or.kr

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. * 특별화원사: 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

IJPEM-ST

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-SMART TECHNOLOGY

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

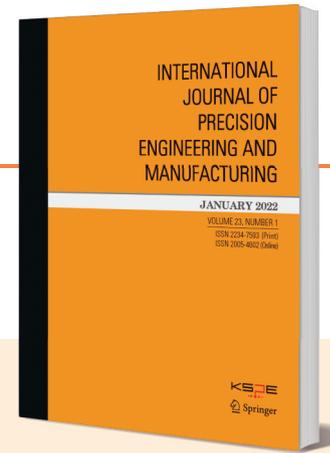
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality
- Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- Autonomous Things

WEBSITE

www.ijpem-st.org

IJPEM

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



2021 Impact Factor: 2.041

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

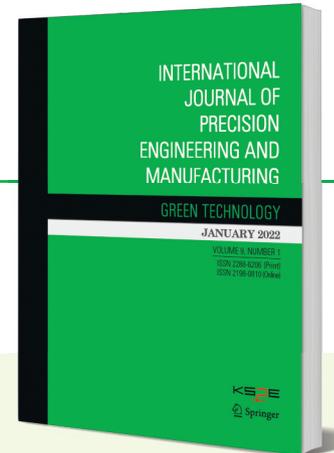
- Precision Manufacturing Processes
- Machine Tools
- Measurements and Control
- Nano/Micro Technology
- Robotics and Automation
- Bio Health
- Manufacturing Systems
- Additive Manufacturing
- Design and Materials

SPECIAL ISSUE

TOPIC | 2023: Robots for Manufacturing Processes and Systems

IJPEM-GT

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY



2021 Impact Factor: 4.660

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
- Design and Manufacturing of Green Products
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- 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

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY

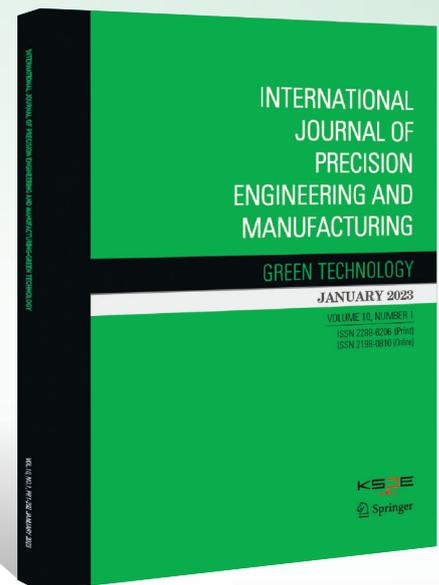
About IJPEM-GT

IJPEM-GT is co-published by the Korean Society for Precision Engineering and Springer Nature.

The journal is published bimonthly, and JCR 2023 impact factor is 5.3, which ranks it top 9.5% (17/180) journal in the category of Engineering-Mechanical and top 23.5% (16/68) journal in the category of Engineering-Manufacturing.

Impact Factor

5.3 by JCR in 2023



Topics of the Special Issue cover novel research contributions of “**Green**” precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Autonomous Manufacturing with Green Technology

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- ◆ **AI-driven Process**
- ◆ **Digital Twin**
- ◆ **Automations in Green Manufacturing**
- ◆ **Environment-conscious Intelligent Manufacturing**

Guest Editors

- Professor Martin B.-G. Jun
Purdue University, USA
- Professor Young Tae Cho
Changwon National University, Korea
- Professor Sanha Kim
KAIST, Korea
- Professor Seok Kim
Changwon National University, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date:

November 30, 2024

Publication Date: **May 1, 2025**

Volume, Number: **Vol. 12, 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 4th 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. 2 No. 1 January 1, 2024
Vol. 2 No. 2 July 1, 2024

• 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

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

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, 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

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

Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

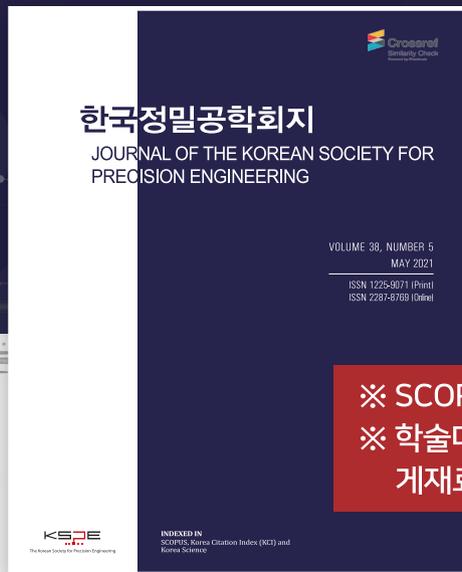
David Rosen / Agency for Science, Technology and Research, Singapore

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea

한국정밀공학회지(JKSPE) 투고 안내

귀 회원님의 건승을 기원합니다.

한국정밀공학회지(Journal of the Korean Society for Precision Engineering, JKSPE)는 정밀공학과 관련된 우수한 논문을 게재하고 있으며 특히 기계공학뿐만 아니라 다학제적 학문을 바탕으로 정밀공학 분야에서 새롭고 독창적인 연구결과를 소개함으로써 정밀공학의 발전에 기여하는 것을 목표로 합니다. 한국정밀공학회지(JKSPE)에 대한 투고 안내를 드리오니 적극적인 관심과 참여 부탁드립니다.



※ SCOPUS, KCI 등재 학술지
 ※ 학술대회 Full Paper 논문, 영문 논문 제출 시
 게재료 면제

한국정밀공학회지(JKSPE)

- | | |
|--------------|---|
| 발행간기 | 월간 (매월 1일 발행) |
| 등재여부 | SCOPUS, KCI 등재지 |
| 투고방법 | <ul style="list-style-type: none"> • 온라인 투고 (http://article.kspe.or.kr/) • JKSPE 저널 홈페이지 (http://jkspe.kspe.or.kr/) |
| 투고자격 | 학회 회원 |
| 제출분야 | 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계및재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 |
| 관련 상훈 | <ul style="list-style-type: none"> • JKSPE Award (상장, 상금) • 백암논문상 (상장, 상금) • 학술상 (상장, 상금) |



SCOPUS, KCI 등재 학술지

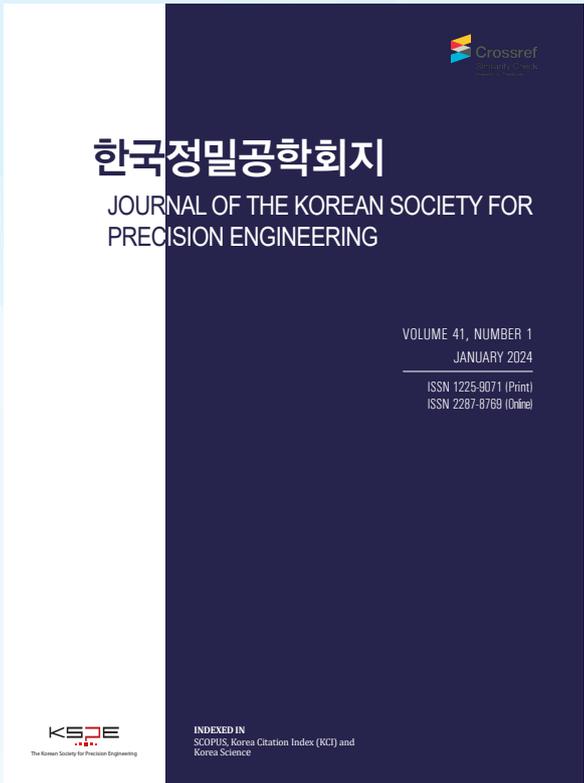
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

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)

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)

Duhwan Mun (Korea University)

Jihong Hwang (Seoul National University of Science & Technology)

Jonghan Jin (Korea Research Institute of Standards & Science)

Maolin Jin (Korea Institute of Robotics & Technology Convergence)

Dong Sung Kim (POSTECH)

Yang Jin Kim (Pusan National University)

Seung Hwan Ko (Seoul National University)

Moonkyu Kwak (Kyungpook National University)

Sung-Mook Kang (Daegu Catholic University)

Changwoo Lee (Konkuk University)

Chang-Whan Lee (Seoul National University of Science & Technology)

Hyunseop Lee (Dong-A University)

Jongkil Lee (Andong National University)

Hyung Wook Park (UNIST)

Min Soo Park (Seoul National University of Science & Technology)

Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology)

Chul Ki Song (Gyeongsang National University)

Duck Hyun Wang (Kyungnam University)

Sung Ho Yoon (Kumoh National Institute of Technology)

AWARDS

한국정밀공학회지최우수논문상

– 한국정밀공학회지에 발표된 논문 중 가장
탁월한 가치의 논문저자에게 포상

INDEXED IN

- SCOPUS
- Korea Citation Index (KCI)
- Korea Science

Submission to JKSP Search for JKSP

- <http://article.kspe.or.kr>
- <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

이토록 정밀하고 아름다운 세계

금속은 거짓말을 모르니까

1micron

만져도 느낄 수 없는 차이에도
결과는 명백히 달라진다

그래서 우리는

시작에서 그 차이를 만든다

우리가 더 정밀한 기계를 만들어 낼 때,
자동차는 더 안전한 자동차가
더 멀리 우주탐험이 가능한 우주선이
더 섬세한 수술이 가능한 의료장비가
될 테니까

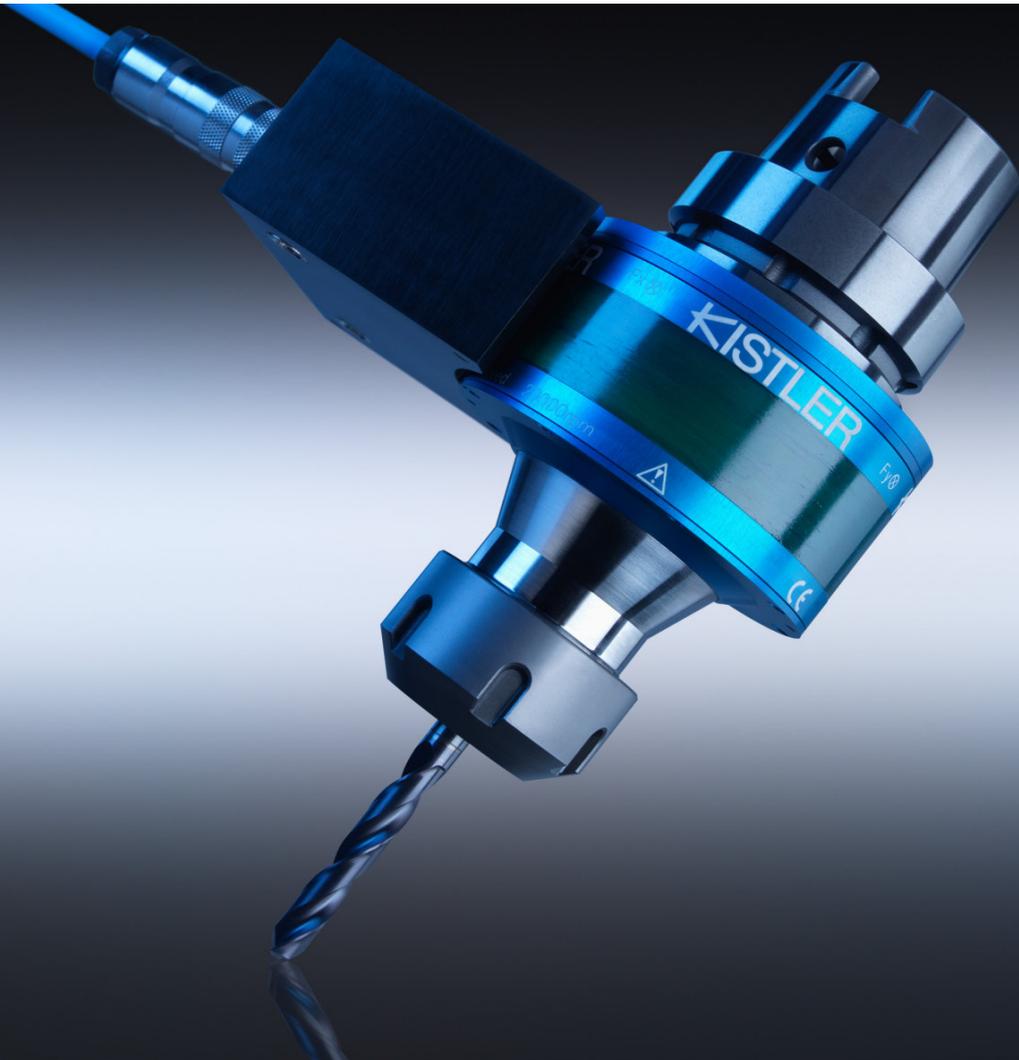
그렇게

시작에서 솔루션을 찾다

DN 솔루션즈

KISTLER

measure. analyze. innovate.



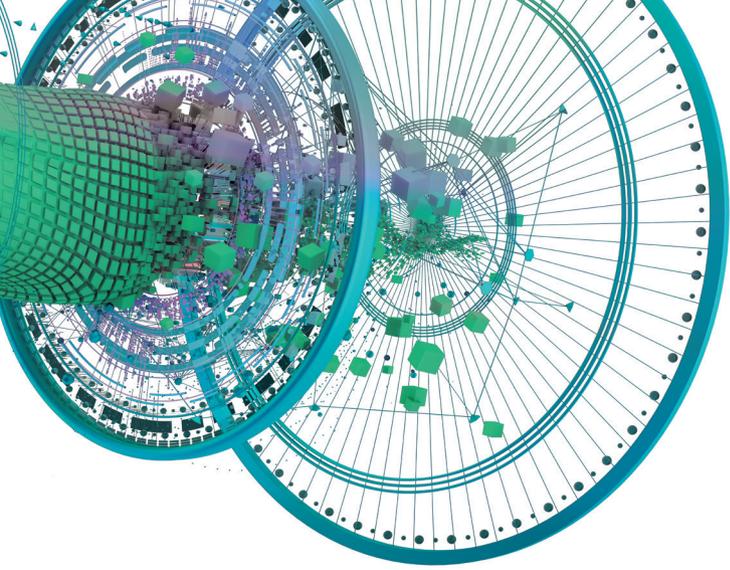
절삭력측정을위한공구동력계

Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement



경기도 성남시 분당구 판교로 253 판교이노밸리 C동 702호 < Tel: 031-8045-0907 >

담당자: 최 장원 과장 , 010-2675-9466 www.kistler.com



Reinvent the wheel. And how you make it.



HP Jet Fusion 3D 프린팅 솔루션

HP Jet Fusion 5200 시리즈 3D 프린팅 솔루션



제조 예측 가능성



획기적인 경제성



새로운 응용 분야
및 시장으로 확장

HP Jet Fusion 4200 시리즈 3D 프린팅 솔루션



제조비용 최적화



높은 생산성



고품질 기능성 부품

HP Jet Fusion 500 시리즈 3D 프린팅 솔루션



설계 속도 향상 -
단시간에 제작
및 테스트
반복 수행 가능



복셀 제어를 사용
한 풀 스펙트럼 컬러
러 부품



정밀한 기능성 부품
을 정확하게 제작

이제 이와 동일한 기술로 시제품을 제작하고 생산할 수 있습니다.
비즈니스의 경쟁력을 높이는 방법을 확인하세요: hp.com/go/3DPrint

제 9 회 정밀공학 창의경진대회

The 9th Precision Engineering Creativity Competition

공모주제

디지털 대전환 시대의 Smart & Green 정밀공학 기술

첨단모빌리티(무인자동차, 드론, 친환경자동차), 자율시스템(빅데이터, 인공지능), 메타버스(로보틱스, 사물인터넷),
첨단제조(3D프린팅, 디지털트윈, 탄소저감), 첨단바이오(나노-바이오, 디지털헬스) 등 정밀공학 전 분야

접수기간

2024. 7. 1. 월 - 26. 금

최종 발표 및 시상

2024. 11. 15. 금 / 경주 HICO

주요일정

07. 01.(월) - 26.(금)	연구 아이디어 제안서 접수
07. 29.(월) - 8. 23.(금)	중간보고서 접수
09. 06.(금)	본선 진출팀 통보
09. 30.(월) - 10. 25.(금)	최종보고서 접수(본선 진출팀)
11. 15.(금)	최종 발표 및 시상

※ 최종보고서 제출 및 발표는 본선 진출팀만 해당됩니다.

※ 위 일정은 사정에 따라 변경될 수 있습니다.

※ 각종 양식 및 세부 안내 사항은 학회 홈페이지(www.kspe.or.kr)를 참조해 주시기 바랍니다.

• 문의 한국정밀공학회 사무국

Tel. 02-518-0722

E-mail. contest@kspe.or.kr

Homepage. www.kspe.or.kr

참가자격

- 전국 대학(원)생(2~4년제 포함, 대학원생은 팀원으로 참여 가능하나 전체 팀원의 1/3을 넘어서는 안됨)
- 2~6인 이하의 대학(원)생과 1인의 지도교수로 구성된 팀
- 단, 교외 경진대회에서 이미 입상한 주제에 대하여는 경연 자격이 부여되지 않음을 원칙으로 함(개량·보완된 것은 심사 후 결과에 따라 허용 가능함).
- 연구 아이디어 제안서 접수 이후 타 경진대회 등에서 동일 주제로 수상을 할 경우 즉시 학회에 해당 사실을 통보하여야 하며, 이를 위반할 경우 상훈이 취소될 수 있음.

시상내역

대상	1팀	한국정밀공학회장상	상장, 상금 100만원
최우수상	3팀	한국기계연구원장상 한국생산기술연구원장상 한국공작기계산업협회장상	상장, 상금 50만원
우수상	4팀	특별회원기업 대표이사상	상장, 상금 25만원
장려상	8팀	한국정밀공학회장상	상장, 상금 10만원

※ 위 시상 내역은 대회 준비 및 사정에 따라 변경될 수 있습니다.

※ 수상 이후라도 기존 연구와의 표절 및 중복의 사유가 발생할 경우 수상을 취소할 수 있습니다.

• 주최  한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

• 주관 한국정밀공학회 교육위원회

• 후원  한국기계연구원  KITECH 한국생산기술연구원  Komma 한국공작기계산업협회  DN 슬루션즈

 Sindoh  LIG 넥스원  FANUC 한국파나주식회사

2024 **KSPE 2024**
AUTUMN CONFERENCE

한국정밀공학회 추계학술대회

2024. 11. 13. Wed. -15. Fri.

경주 화백컨벤션센터(HICO)
(경북 경주시)

주요일정

200단어 초록마감 **2024. 9. 23. Mon**

초록채택통지 **2024. 10. 2. Wed**

사전등록마감 **2024. 10. 7. 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

한국정밀공학회

Korean Society for Precision Engineering

2025년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2025

KSPE 2025
Spring
Conference

춘계학술대회

KSPE 시정
합한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2025.
5.14(수)-16(금)

제주 신화월드
(제주도 서귀포시)

International Conference on
PRrecision Engineering and Sustainable Manufacturing

PRESM 2025

2025.7.6(일)-11(금)

Chiang Mai Marriott Hotel
Chiang Mai, Thailand

KSPE 시정
합한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering



한국정밀공학회

2025

KSPE 2025
Autumn
Conference

추계학술대회

KSPE 시정
합한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2025.
11.12(수)-14(금)

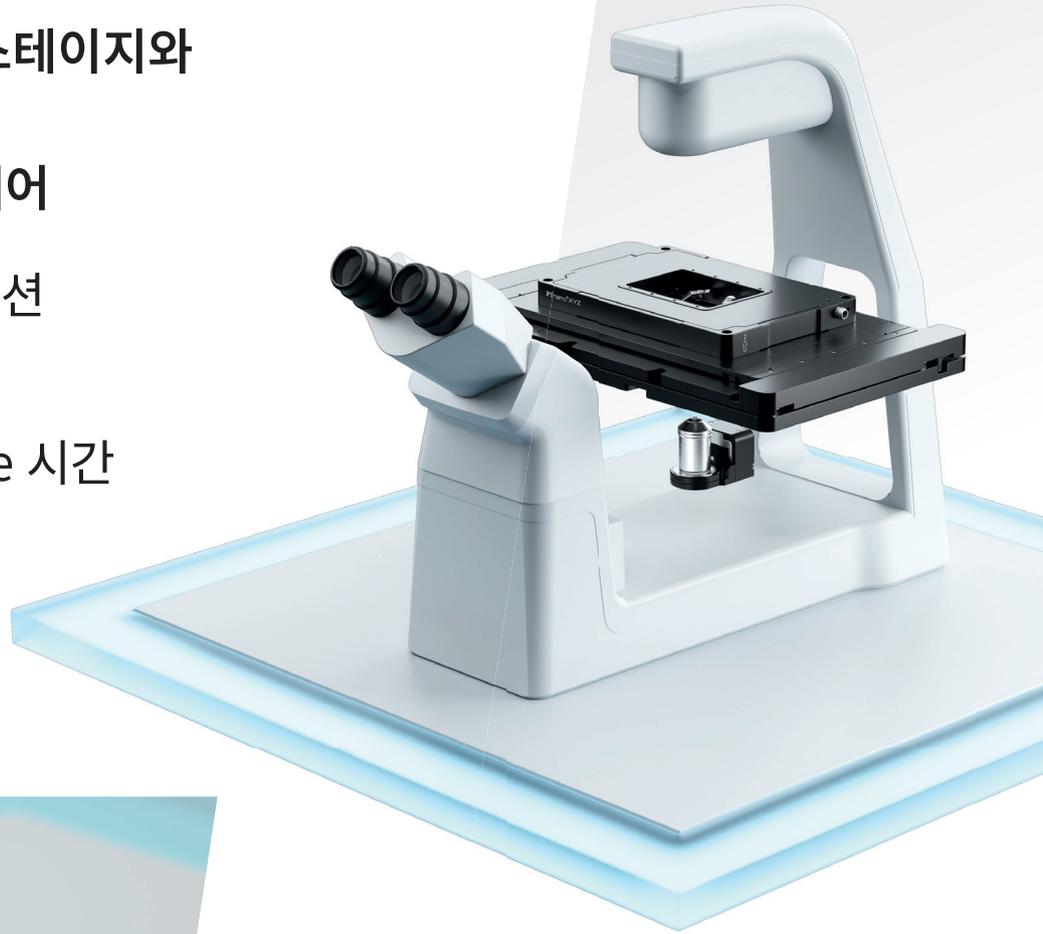
여수 EXPO
(전라남도 여수시)



정밀하고 경제적인 현미경 솔루션

피에조 초음파 XY 샘플 스테이지와
PIFOC 포커스 스캐너로
대물렌즈 및 샘플 위치 제어

- 소음 없이 부드러운 모션
- 낮은 드리프트
- 짧은 step-and-settle 시간



Learn
more!

