

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 1

JANUARY 2024

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

취임사



민병권
연세대학교

2024년 갑진년 새해를 맞아 회원 여러분께 행복과 평안이 가득하기를 기원합니다.

우리 학회는 지난 40년간 전임 회장님들과 전현직 임직원, 그리고 회원 여러분의 헌신적인 노력으로 눈부시게 발전하였으며, 우리나라 정밀공학 발전에 많은 발자취를 남겼습니다. 이렇게 훌륭한 학회의 회장직을 맡게 되어 큰 영광으로 생각하며 막중한 책임감을 느낍니다.

우리 학회는 4종의 우수 학술지를 국내외에 발행하고 있으며, 춘·추계학술대회와 PRESM 국제학술대회를 매년 개최하고 있습니다. 최고의 전문가로 이루어진 10개의 부문 위원회에서 워크숍 개최 등 전문화된 학술활동을 담당하고 있습니다. 우리 학회는 회원 여러분의 적극적인 참여와 특별회원사들의 지원으로 질과 양에 있어서 지속적인 성장을 이어오고 있습니다. 우리는 이러한 성과에 만족하지 않고 2020년도에 “Vision 2030: 영원히 지속 가능하고 풍요로운 삶을 위한 정밀공학”이라는 비전을 수립하고, 분야별 발전전략에 따라 국가 산업 및 국제 사회에 기여할 수 있는 학회가 되기 위해 노력하고 있습니다. 2024년에는 학회 발전전략 중 다음 목표에 힘을 기울이겠습니다.

학술지의 질적 향상을 추진하겠습니다. 우리 학회는 기존 학술지 3종에 더하여, 2023년 IJPEM-Smart Technology (IJPEM-ST)를 창간하였습니다. Full Open Access 저널인 IJPEM-ST를 통해 학술지의 새로운 방향을 모색하고 향후 모든 학술지를 Open Access로 전환하는 준비를 시작하고자 합니다. 편집위원회의는 지난 24년간의 국제 학술지 운영을 돌아보고, 우리 학술지의 기여도와 국제적 위상을 높이기 위한 방향을 설정하겠습니다.

학회의 국제화에 노력하겠습니다. PRESM을 통하여 일본, 대만은 물론 세계 우수학회와의 협력을 확대하고, 최근 중요성이 높아지고 있는 ASEAN 국가와의 교류도 추진하겠습니다. 신설된 MAKER Korea 위원회는 우리 학회 회원과 해외에서 활약하고 있는 재외 연구자를 연결하는 허브 역할을 하겠습니다. 이러한 활동들을 통하여 우리 학회의 국제적 인지도를 높이고, 글로벌 사회에서 주도적인 역할을 할 수 있는 발판을 마련하겠습니다.

신진 회원의 활동을 적극적으로 지원하겠습니다. 젊은 연구자가 학회 활동을 통하여 성장할 수 있는 환경을 만드는 것은 학회의 중요한 임무이며, 이를 통해서 학회도 지속적인 발전을 이룰 수 있습니다. 부문위원회와 각종 위원회의 활동을 활성화하여 학교, 연구소 및 산업체에 속한 모든 신진 회원께 다양한 활동 기회를 제공하겠습니다.

지난 수년간 많은 임직원이 노력한 결과 사무국 업무의 체계화 및 전산화가 거의 완성되고 있습니다. 올해는 이를 활용하여 사무국의 운영을 안정화하고, 연구 및 교육 분야의 수익사업을 준비하겠습니다. 사무국의 업무 효율화와 수익 다변화를 통해, 학회의 지속적인 발전과 회원 여러분에 대한 서비스 향상을 기대합니다.

2024년도에도 우리 학회의 훌륭한 전통을 이어서 정밀공학을 선도하며 양질의 서비스를 제공하여, 학회가 모든 회원이 참여하는 교류의 장이 되도록 노력하겠습니다. 회원 여러분께도 더욱 활발한 참여와 활동을 부탁드립니다. 학회의 발전을 위한 의견이 있으시면 언제라도 알려 주시기 바랍니다. 저와 임직원들은 회원 여러분의 학술 활동을 위해 작게라도 보탬이 되도록 최선을 다하겠습니다. 감사합니다.

2024년 1월
사단법인 한국정밀공학회 2024년 회장 민병권

K-Precision, Smart & Green!!

이 임 사



이 석 우

한국생산기술연구원

2024년 푸른 용의 해인 갑진년(甲辰年)을 맞아 건강하고 행복한 한 해가 되시길 기원합니다. 2023년 한국정밀공학회 회장의 임기를 마무리하게 되니 기쁨과 안도와 아쉬움이 함께 교차합니다. 2023년은 회원분들의 적극적인 참여와 임직원들과 사무국 직원들의 헌신적인 노력으로 학회가 많이 안정되었으며 COVID-19 환경을 극복하고 예전의 학회 활동을 회귀하는 기반이 되는 한 해였다고 생각합니다. PRESM 780여 명, 춘·추계 학술대회 2,600여 명이 참석한 역대 최대 규모의 학술대회를 성황리에 주최하였습니다. 학술대회에 관심을 갖고 참석해 주신 모든 회원분들께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

1984년에 창립한 우리 학회는 산업 환경의 변화와 발전에 대응하여 지속적이고 비약적인 발전을 거듭해 오면서 2024년에 40주년을 맞이하게 됩니다. 그간 한국 정밀공학분야에서 가장 열정적이면서도 선도적인 연구 활동을 수행하는 학회로서 전통적인 분야뿐 아니라 스마트생산시스템, 바이오헬스 부문 등 산업에서 요구하는 분야에 적극적으로 대응하여 많은 연구자가 참여하여 연구 동향과 미래 기술 등을 토론할 수 있는 국내·외 학술대회를 적극적으로 개최하여 학회 회원들에게 다양한 학술 활동 무대를 제공하고자 노력해 왔습니다.

첫째, IJPEM-ST는 2023년 1월 창간호를 발간하고 연 2회 발간을 진행하고 있습니다. Smart Technology는 기존의 생산, 가공 등의 전통정밀공학에 IT 기술을 접목하여 지속가능한 미래생산시스템을 구현하는 기본이 되는 기술로 자리매김할 것입니다.

둘째, 산업 환경의 변화에 정밀공학 분야의 선도 기술을 리드하기 위한 기반을 마련하고자 하였습니다. '생체공학부문'을 '바이오헬스부문'으로 변경하여 연구 분야를 확대하였으며, 최근 정책적으로 화두가 되고 있는 반도체 분야에 정밀공학을 접목하기 위하여 "반도체 제조 공정장비 위원회"를 창설하여 학술대회에서 관련 연구자들 간의 교류를 활성화하는 계기를 마련하였습니다. 또한 국제협력사업을 강화하기 위하여 재미 한인교수들 모임인 MAKER-USA와 협력분야를 논의할 MAKER-KOREA를 신설(하여) 운영하고 있습니다.

셋째, 학회 업무를 전산화하고 투명하게 진행하고자 하였습니다. 2021년부터 학회가 회계 감사 기관으로 등록이 되어 감사에 대비하여 회계 항목을 재정리하고 시스템화하여 회계 관리의 안정화, 전자결재 및 전자문서관리 등을 도입하여 2023년부터 재무 업무를 전산화하여 투명성 있게 운영하고 있습니다. 총무 분야도 규정 변경과 업무 분장 및 결재선 등을 정의하였으며 2024년부터 운영을 전산화하고자 준비 중입니다.

넷째, 학회 수익사업을 위한 규정 변경과 인가 절차를 진행하고 있습니다. 기부금을 받을 수 있는 기관으로 신고하여 2024년 1월 경 확정될 예정이며, 학술대회 부스설치와 같은 수익 사업에 대한 법적인 검토를 통해 2024년 춘계학술대회에 맞추어 수익사업을 위한 사업자등록증을 신고 할 예정입니다. 또한 한국정밀공학회 내에 연구소 설립을 추진하여 정책 용역, 연구개발 및 교육 등의 사업을 할 수 있는 근거를 만들었습니다.

오랫동안 평의원과 이사, 부문화장과 부회장을 거쳐 회장직을 수행하는 동안 결코 쉽지만은 않은 여정이었지만, 학회를 통한 수많은 선후배 및 동료들과의 인연은 제게 큰 자산이 되었으며 즐거운 연구 활동을 통해 인생에서 보람되고 자부심 있는 학회 활동을 할 수 있었습니다. 제가 회장직을 맡은 2023년을 잘 마무리할 수 있었던 것은 학회를 사랑하는 회원분들과 학회 회장단, 총무, 재무이사 및 학회 사무국 직원들의 저에 대한 믿음과 학회를 발전시키기 위한 열정 덕분인 것 같습니다. 2023년 학회 실무를 진행해 주신 학회 임직원 여러분들께 깊은 감사의 말씀을 드리며, 항상 격려와 조언을 아끼지 않으신 전임회장님 등 많은 선배 회원님들께 진심으로 감사드립니다. 또한 2024년 신입 임원 여러분의 더욱 열정적인 활동을 기원합니다.

마지막으로 2023년의 모든 일에 감사드리며 회원 여러분의 건강과 행복을 마음 깊이 기원합니다. 감사합니다.

2024년 1월

사단법인 한국정밀공학회 2023년 회장 이 석 우

K-Precision, Smart & Green!!

사단법인 한국정밀공학회 2024년 임원



회장 **민병권**
연세대학교



수석부회장 **안성훈**
서울대학교



부회장 **이상원**
성균관대학교



부회장 **오정석**
한국기계연구원



부회장 **배규호**
(주)DN솔루션즈



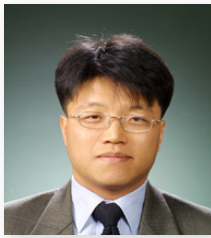
부회장 **김정**
KAIST



부회장 **이인환**
충북대학교



부회장 **박상호**
부산대학교



부회장 **최영재**
한국생산기술연구원



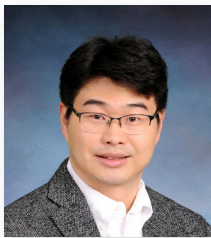
감사 **송창규**
한국기계연구원



감사 **이경창**
부경대학교



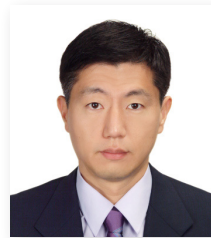
총무이사 **김동성**
POSTECH



총무이사 **김보현**
송실대학교



총무이사 **신현정**
KAIST



재무이사 **김창주**
한국기계연구원



재무이사 **송용남**
고려대학교



재무이사 **정영훈**
경북대학교



편집이사 **강봉철**
국민대학교



편집이사 **강현욱**
UNIST



편집이사 **고승환**
서울대학교



편집이사 **박문규**
경북대학교



편집이사 **김규만**
경북대학교



편집이사 **김남근**
서강대학교



편집이사 **김동림**
한양대학교



편집이사 **김산하**
KAIST



편집이사 **김석민**
중앙대학교



편집이사 **김양진**
부산대학교



편집이사 **김영진**
KAIST



편집이사 **김종백**
연세대학교



편집이사 **김효영**
한국공학대학교



편집이사 **문두환**
고려대학교



편집이사 **박근**
서울과학기술대학교



편집이사 **박영빈**
UNIST



편집이사 **손정우**
금오공과대학교



편집이사 **안지환**
POSTECH



편집이사 **안형준**
송실대학교



편집이사 **윤준영**
연세대학교



편집이사 **이광일**
경일대학교



편집이사 **이동원**
전남대학교



편집이사 **이동훈**
송실대학교



편집이사 **이창우**
건국대학교



편집이사 **이호원**
서울대학교



편집이사 **장진아**
POSTECH



편집이사 **정구현**
울산대학교



편집이사 **정훈익**
UNIST



편집이사 **주백석**
금오공과대학교



편집이사 **진종한**
한국표준과학연구원



편집이사 **천두만**
울산대학교



편집이사 **추원식**
경상국립대학교



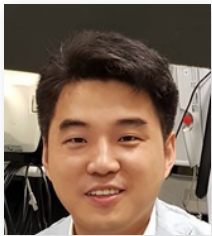
편집이사 **황지흥**
서울과학기술대학교



사업이사 **강태준**
인하대학교



사업이사 **권지연**
동국대학교



사업이사 **김무림**
한국로봇융합연구원



사업이사 **김승중**
고려대학교



사업이사 **김진호**
영남대학교



사업이사 **김흥수**
한국생산기술연구원



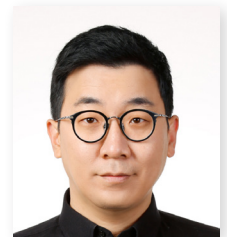
사업이사 **김태곤**
한국생산기술연구원



사업이사 **김현준**
경북대학교



사업이사 **박석희**
부산대학교



사업이사 **박용재**
강원대학교



사업이사 **서진호**
부경대학교



사업이사 **안상훈**
한국기계연구원



사업이사 **오기용**
한양대학교



사업이사 **윤주성**
경남대학교



사업이사 **이문구**
아주대학교



사업이사 **이봉기**
전남대학교



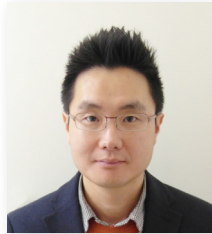
사업이사 **이원균**
충남대학교



사업이사 **이지혜**
한국기계연구원



사업이사 **이현섭**
동아대학교



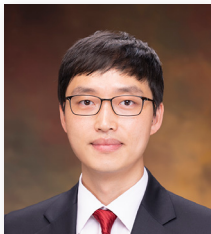
사업이사 **임지석**
영남대학교



사업이사 **조영삼**
원광대학교



사업이사 **주기남**
조선대학교



사업이사 **최정욱**
중앙대학교



사업이사 **현승민**
한국기계연구원



기획홍보이사 **노유정**
부산대학교



기획홍보이사 **류시형**
전북대학교



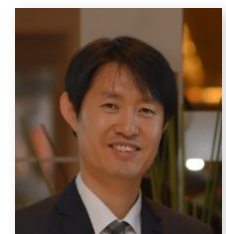
기획홍보이사 **이주연**
서울과학기술대학교



기획홍보이사 **허세곤**
한국기계연구원



국제이사 **남정수**
한국생산기술연구원



국제이사 **이동진**
건국대학교



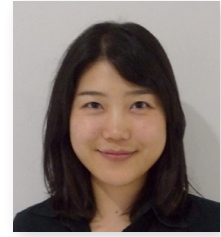
국제이사 **전용호**
아주대학교



국제이사 **조영태**
창원대학교



국제이사 **차석원**
서울대학교



국제이사 **허윤정**
경희대학교



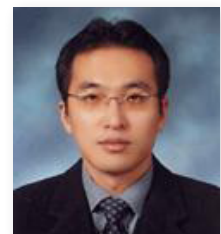
국제이사 **홍성태**
울산대학교



대외협력이사 **권석진**
한국철도기술연구원



대외협력이사 **김경동**
한국공작기계산업협회



대외협력이사 **김종혁**
(주)현대위아



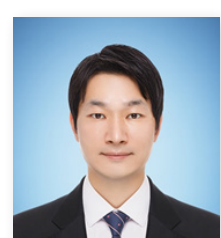
대외협력이사 **장원석**
한국기계연구원



대외협력이사 **조영환**
LIG넥스원(주)



정밀가공 부문회장
김건희
한밭대학교



정밀측정 부문회장
이현욱
한국철도기술연구원



로봇제어자동화 부문회장
정재일
국민대학교



스마트생산시스템 부문회장
이동윤
한국생산기술연구원



설계 및 재료 부문회장
박형욱
UNIST



공작기계 부문회장
이강재
DN솔루션즈



나노마이크로기술 부문회장
조정대
한국기계연구원



바이오헬스 부문회장
엄광문
건국대학교



적층제조시스템 부문회장
김호찬
안동대학교



녹색생산기술 부문회장
김영범
한양대학교

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

Howun 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 1 / January 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 January 1, 2024 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Byung-Kwon Min (President, KSPE)

Managing Editor Bo Hyun Kim

Manuscript Editor Su-Hyun Kang

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

- 11 비색 종이 센서를 이용한 현장형 황화수소 분석 장치 개발
이기자, 나유리, 이재철
- 19 소수력 발전소 건립을 위한 경제성 검토: 삼천포 인근
이동욱, 노창일, 추원식, 송철기
- 31 CFRP와 접합된 Al6061-T6 시편의 쇼트피닝 커버리지에 따른 전단 특성 연구
김홍석, 박준형, 성강민, 강범준, 정성균, 신기훈
- 37 산업근로자를 위한 웨어러블 고관절 보조 로봇의 보행 효율성 검증: 예비연구
장윤희, 강정선, 정보라, 임복만, 최병준, 이연백
- 47 중량물 들어올리기 작업 중 근육 활동에 대한 착용형 보조 작업복의 효과
이광희, 홍철운, 유미, 권대규
- 55 선형 모터 스테이지의 주파수 영역 모델기반 모션 제어 설계
전희원, 안형준
- 61 유연판재 조립 자동화를 위한 협동로봇 기반 볼트체결 시스템 개발
김태훈, 정주노, 김휘수, 최태용, 경진호, 이대국
- 71 Press Forming/Drawing Molding in the Radiator Support Mold Process of 440 MPa High Strength Steel Sheets
Dong-Hwan Park, Tae-Gil Lee, and Hyuk-Hong Kwon
- 79 Implementation and Verification of Fresnel Zone Plate Patterns Designed by Optimization of Surface Phase
Huy Vu, and Joohyung Lee

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 1 / January 2024

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

CONTENTS

REGULAR

- 11 Development of On-site Analytical Device for Hydrogen Sulfide Using Colorimetric Paper Sensor
Gi-Ja Lee, Yoo-Ri Na, and Jae-Chul Lee
- 19 Economic Feasibility Study for Small Hydropower Plant Construction: in Samcheonpo Area
Dong Oak Lee, Chang Il Roh, Won-Shik Chu, and Chul Ki Song
- 31 A Study on the Shear Characteristics based on the Coverage of Shot-peened Al6061-T6 Bonded with CFRP
Hong Seok Kim, Joon-Hyung Park, Gang-Min Sung, Beom-Joon Kang, Seong-Kyun Cheong, and Ki-Hoon Shin
- 37 Verification of Walking Efficiency of Wearable Hip Assist Robot for Industrial Workers: A Preliminary Study
Yun Hee Chang, Jung Sun Kang, Bo Ra Jeong, Bok Man Lim, Byung June Choi, and Youn Baek Lee
- 47 Effects of the Wearable Assistive Suit on Muscle Activity during Lifting Tasks
Kwang Hee Lee, Chul Un Hong, Mi Yu, and Tae Kyu Kwon
- 55 Model-based Motion Control Design of a Linear Motor Stage in Frequency Domain
Hee Won Jeon and Hyeong-Joon Ahn
- 61 Screwing Automation System Using a Collaborative Robot for Steel Plate Assembly
Taehoon Kim, Joono Cheong, Hwi-Su Kim, Taeyong Choi, Jinho Kyung, and Dae-Kug Lee
- 71 Press Forming/Drawing Molding in the Radiator Support Mold Process of 440 MPa High Strength Steel Sheets
Dong-Hwan Park, Tae-Gil Lee, and Hyuk-Hong Kwon
- 79 Implementation and Verification of Fresnel Zone Plate Patterns Designed by Optimization of Surface Phase
Huy Vu, and Joohyung Lee

비색 종이 센서를 이용한 현장형 황화수소 분석 장치 개발

Development of On-site Analytical Device for Hydrogen Sulfide Using Colorimetric Paper Sensor

이기자^{1,2}, 나유리^{2,3}, 이재철^{3,#}
Gi-Ja Lee^{1,2}, Yoo-Ri Na^{2,3}, and Jae-Chul Lee^{3,#}

¹ 경희대학교 의공학교실 (Department of Biomedical Engineering, Kyung Hee University)

² 경희대학교 일반대학원 생체의과학협동과정 (Department of Medical Engineering, Graduate School, Kyung Hee University)

³ 한국생산기술연구원 소재부품융합연구부 (Material & Component Convergence R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)

Corresponding Author / E-mail: jc2@kitech.re.kr, TEL: +82-31-8040-6244

ORCID: 0000-0003-3191-6014

KEYWORDS: Hydrogen sulfide (H₂S, 황화수소), Colorimetric paper sensor (비색 종이 센서), Highly sensitive detection (고감도 검출), On-site analytical device for hydrogen sulfide (현장형 황화수소 분석 장치)

In this study, a highly sensitive analysis device for hydrogen sulfide that could be used quickly and easily on site was developed using a colorimetric paper sensor. To optimize analysis conditions, tests were performed for each function. Performances of the method using laboratory equipment and tools and the method using the developed device for hydrogen sulfide analysis were compared. The trend line of changes in parameter b of the image acquired by the on-site analytical device for hydrogen sulfide was calculated as $y = 0.517x - 0.141$ with a coefficient of determination (R²) of 0.9874. It was comparable to the method performed at the laboratory level, showing an excellent linearity. Using the calculated trend line as a calibration curve, the detection limit and quantification limit were found to be 2.386 μ M and 7.952 μ M, respectively. A reproducibility test showed a relative standard deviation of 5.7%, indicating a low dispersion of results.

Manuscript received: June 21, 2023 / Revised: August 11, 2023 / Accepted: August 17, 2023

NOMENCLATURE

σ	=	Standard Deviation
S	=	Slope of Calibration Curve
LOD	=	Limit of Detection
LOQ	=	Limit of Quantitation

1. 서론

황화수소(Hydrogen Sulfide, H₂S)는 무색의 인화성 가스로, 고농도 황화수소는 독성을 가지는 것으로 알려져 있다. 반면에, 저농도 황화수소는 맛과 향에 관련된 식품의 숙성도를 파악하는

유제품의 발효 정도, 육류 및 와인의 숙성도, 그리고 맥주 발효 정도 측정에 활용된다[1-4]. 또한 호기 가스에서 검출되는 구강 내 황화수소는 구취의 원인으로 알려져 황화수소의 농도 모니터링이 구취의 진단과 정도를 파악하는 데 가장 일반적으로 사용되고 있다[5-7]. 현재 치과병원에서 사용하는 구취 측정 장치인 트윈브리서 II (TWIN BREASOR II, 아이센랩, 대한민국)의 기준에 따르면, 224 ppb(7.5 μ M) 이상의 황화수소를 악취로 판정하며 896 ppb(30 μ M) 이상에서는 매우 강한 악취로 판정한다.

황화수소 분석 장비에 사용되는 센서는 전기화학식, 광학식, 저항식, 반도체식, 비색식 등으로 개발되어 왔다. 그중 전기화학식, 광학식, 저항식 센서는 선택성 및 감도가 높다는 장점이 있으나, 이를 구동하기 위해서는 복잡한 장치 구성이 필요하여

전체적으로 장비가 크고, 고가라는 단점이 있다[8-11]. 반면에 비색 센서는 가스 반응의 정도에 따라 특정 색상으로 변화하는 특성이 있고, 이러한 특성을 활용한 검출장치는 저렴하고, 장비의 소형화가 용이해 현장형 장비로 활용할 수 있다는 장점이 있다[12,13]. 하지만 저농도 황화수소 분석 장비에서 비색 센서를 활용한 사례는 미비한 상태이고, 특히 현장에서 사용하는 장비에 적용한 사례는 찾아보기 어렵다.

은 나노 프리즘(Silver Nanoprism, Ag NPR)은 독특한 광학적 특성으로 인해 화학 및 바이오센서 분야에 다양하게 활용되고 있다. 특히, 은 나노프리즘의 국소 표면 플라즈몬 공명(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR) 흡수 파장은 은 나노 프리즘의 크기나 형태에 매우 민감하여 가시광선 영역부터 근적외선 영역까지 변화할 수 있기 때문에, 비색 분석의 민감도 향상을 위해 활용되고 있다[14-16]. Ahn 등[15]은 황화수소와 은 나노 프리즘이 반응하면, 염화 이온(Chloride Ion, Cl⁻)에 의한 은 나노 프리즘의 삼각형 모서리 식각(Etching) 효과를 방해하는 원리를 이용하여 1.03-32.9 μM의 황화수소를 검출하였다(가스 반응시간 1분). 또한, Jiang 등[16]은 은 나노 프리즘이 코팅된 섬유를 황화수소의 비색 분석에 활용하여 1.25 μM의 검출한계를 확인하였다(가스 반응시간 2 h). 하지만 기존 방법들은 모두 실험실 수준에서 황화수소 검출이 이루어졌다.

본 연구에서는 저농도의 황화수소를 고감도로 검출할 수 있는 현장형 분석 장치를 개발하였다. 해당 장치는 은 나노 프리즘(Silver Nanoprism, Ag NPR) 입자를 이용한 비색 종이 센서를 적용하였다. 비색 종이 센서의 색 변화를 확인하는 데 필요한 기능은 가스 수집, 가스 반응 유도, 염화칼륨(Potassium Chloride, KCl) 용액 주입 및 건조, 이미지 획득이다. 개발된 장치는 가스 수집을 위한 내장형 포집백, 가스 반응을 위한 일정한 유속을 유도하는 소형팬, 일정량의 염화칼륨 용액을 주입하는 탄성체 튜브와 주삿바늘로 이루어진 소형 부품들로 구성되었다. 그리고 개발된 장치의 사용 조건을 최적화하기 위해 조건별 실험을 수행하였다. 최종적으로, 실험실 장비와 도구를 이용하여 황화수소의 농도를 분석하는 방법과, 본 연구에서 개발된 분석 장치를 이용한 현장형 분석 방법의 결과를 비교하여 개발된 분석 장치의 성능을 확인하였다.

2. 실험방법

2.1 현장형 황화수소 분석 장치의 설계

현장형 황화수소 분석 장치는 선행 연구[15]에서 개발된 비색 종이 센서를 현장에서 사용할 수 있도록 설계하였다. 개발된 분석 장치는 비색 종이 센서가 배치되고, 비색 종이 센서와 일정한 반응이 유도되도록 장치에 의해 수집한 황화수소 가스가 일정한 유속으로 공급된다. 가스 반응 후 비색 종이 센서에 염화칼륨 용액이 일정량 주입되며, 스마트폰의 카메라를 이용한 이미지 촬영과 분석이 가능하다.

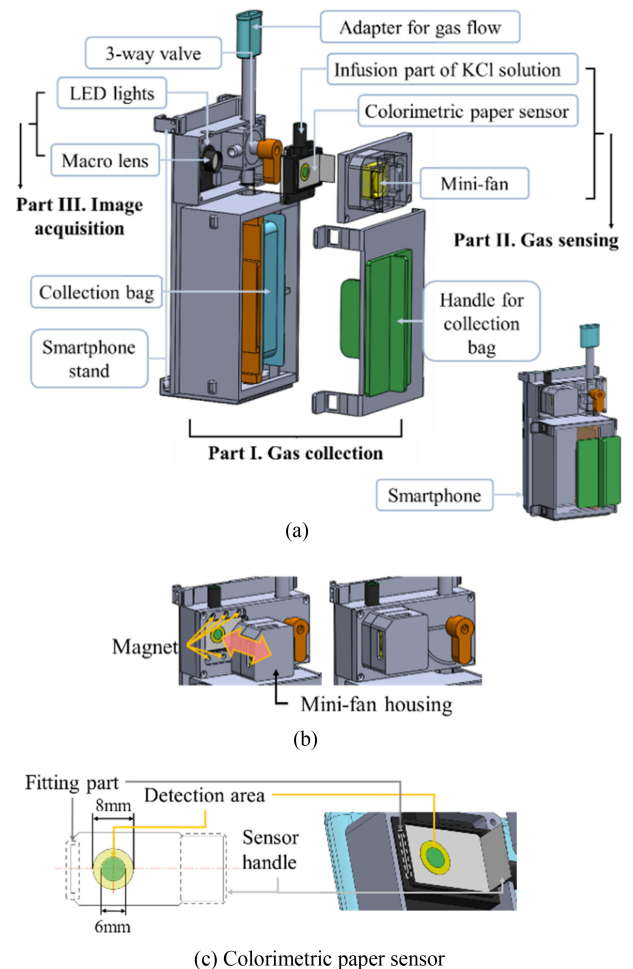


Fig. 1 On-site analytical device for hydrogen sulfide; (a) exploded view and part designation, (b) attachment/detachment of sensor cover using magnet, (c) colorimetric paper sensor and its assembly method

황화수소 분석 장치에 필수적인 기능에 따라서 크게 세 파트-가스 수집부, 가스 검출부, 이미지 획득부-로 구성되었으며, 각각 설치된 부품은 Fig. 1(a)와 같다.

먼저, 가스 수집부는 수집백(Collection Bag)과 연결된 손잡이(Handle)로 구성되어 손잡이를 옆으로 밀면 가스가 유입될 수 있도록 하였다. 둘째, 가스 검출부는 비색 종이 센서, 소형팬 하우징, 염화칼륨 용액 주입부로 구성하였다. 비색 종이 센서의 탈부착을 용이하게 하기 위해 소형팬 하우징과 본체를 자석을 이용하여 탈부착되도록 설계하였다(Fig. 1(b)). 황화수소 이동 경로는 3-way 밸브(3-way valve, S11-2-111, Buerkle Inc., USA)를 사용하여 변경되도록 설계하였고, 비색 종이 센서와 가스 반응 유도는 소형팬(Mini-fan, D2006V12H 12K, Sybang Inc., 대만)을 활용하였다. 비색 종이 센서에 황화수소를 반응시킨 후 색 변화를 명확하게 하기 위하여, 물 농도가 1인 염화칼륨 용액 7 μL를 주입하기 위한 주입부가 추가되었다. 마지막으로, 이미지 획득을 위하여 암실이 유지된 공간에 LED (Light Emitting Diode) 조명과 접사렌즈(Macro Lens, APEXEL 100x, APEXEL,

중국)를 위치시켰다. 이를 통해 이미지 획득 시마다 동일 조건의 이미지를 획득할 수 있도록 하였다. 비색 종이 센서의 색 변화 분석을 위한 이미지 촬영은 4,800만 화소 카메라가 탑재되어 있는 삼성 스마트폰 갤럭시 A42 (Smartphone, Galaxy A42, SAMSUNG, 대한민국)를 사용하였다.

비색 종이 센서는 선행 연구에서 사용된 형태를 변형하여 사용하였다. 와트만 필터 종이(Whatman Filter Paper, GE Healthcare Life Science, 미국)에 왁스 프린터(Xerox Color Cube 8570 N Printer, Fuji Xerox, 일본)를 사용하여 외경 8 mm, 내경 6 mm의 왁스 장벽을 인쇄하였다. 그리고 그 중앙에 은 나노프리즘을 코팅하여 비색 종이 센서의 검출부를 제작하였다. 현장형 황화수소 분석 장치에 사용되는 비색 종이 센서는 장치 내 탈부착이 편리하고, 이미지 촬영 시 위치가 일정하도록 설계하였다. 검출 영역이 아닌 부분은 사각형 형태이며, 접히는 형태를 구현하여 손잡이의 기능이 가능하도록 설계하였다(Fig. 1(c)).

2.2 실험실형 황화수소 분석

은 나노프리즘이 코팅된 비색 종이 센서를 이용하여 실험실 장비와 도구로 황화수소를 분석하는 방법은 다음과 같다.

농도별 황화수소는 대표적인 황화수소 공여체인 황화나트륨(Sodium Sulfide, Na₂S) 표준용액 10 mL를 500 mL 둥근 바닥 플라스크에 넣고 고무마개로 밀폐한 뒤, 20분 후 플라스크에 모인 가스를 주사기로 수집하여 사용하였다(Fig. 2(a)). 이 때, 황화나트륨 표준용액은 pH 7.4 인산염 완충염(Phosphate Buffered Saline, PBS)에 황화나트륨 시약을 각각의 물 농도로 희석시켜서 제조하였다[17].

원형의 비색 종이 센서는 실린지 필터 홀더(Syringe Filter Holder)에 고무 오링(O-ring)을 이용하여 밀폐시켜 준비하였다. 준비된 실린지 필터 홀더는 황화수소 가스가 수집된 실린지와 결합하였고, 이는 실린지 펌프와 체결되었다. 실린지 펌프를 작동시켜 1분 동안 6 mL의 황화수소가 비색 종이 센서와 반응하도록 세팅하였다(Fig. 2(b)).

가스 반응이 완료된 종이 센서에 마이크로피펫(Micropipette)을 이용하여 1 M 염화칼륨 용액을 7 μL 주입하여 색 변화를 발생시켰다(Fig. 2(c)).

주입된 용액을 25분 동안 자연 건조시킨 후에 복합기(Multifunction Printer, Apeos Port C2660, Fuji Xerox, 일본)의 스캐너를 사용하여 이미지를 획득하였다(Fig. 2(d)).

획득된 이미지의 색 분석은 국제조명위원회(International Commission on Illumination, CIE)에서 규정한 L*a*b* 색 표시계의 매개변수 b 값(Parameter b Intensity)을 도출하여 정량적으로 분석하였다.

여기서 CIELAB 색표시계는 Fig. 2(e)와 같이 L*, a*, b* 채널로 구성되어 있으며, 매개변수 b 값은 양의 값으로 갈수록 노란색을, 음의 값으로 갈수록 파란색을 나타낸다[18-20]. 획득된 이미지의 매개변수 b 값을 도출하는 데에는 Image J 소프트웨어(Image J software, NIH, 미국)를 사용하였다.

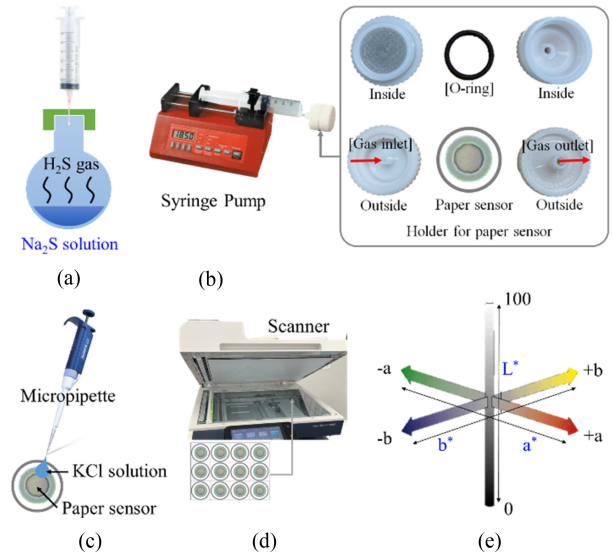


Fig. 2 Analysis method for hydrogen sulfide in laboratory using a syringe filter holder, syringe pump, micropipette, and scanner; (a) generation and collection of hydrogen sulfide gas using sodium sulfide standard solution, (b) assembling syringe filter holder and gas reacting using syringe pump, (c) injection of potassium chloride solution using a micropipette, (d) image acquisition using multifunction scanner, (e) color table in CIELAB

2.3 현장형 황화수소 분석

본 연구에서 개발한 황화수소 분석 장치를 이용하여 현장에서 황화수소를 분석하는 방법은 다음과 같다.

농도별 황화수소 가스는 실험실 방법과 동일하게 제조하여 수집하였다. 수집된 가스는 개발된 현장형 황화수소 분석 장치의 어댑터와 연결하고, 3-way 밸브는 수직 방향으로 놓았다. 그리고 수집백(Collection Bag)과 연결된 손잡이(Handle)을 옆으로 밀어 수집백을 팽창시켰다(Fig. 3(a)).

수집백이 팽창되면서 황화수소 가스가 수집백으로 이동하였고, 이때 수집백에 수집된 가스는 20 mL 이상이였다(Fig. 3(b)).

수집백에 황화수소 가스의 수집이 완료된 후에, 3-way 밸브의 방향을 시계방향으로 90도로 회전시켜 수집백 내의 황화수소 가스가 비색 종이 센서로 이동할 수 있도록 가스 유로를 변경시켰다(Fig. 3(c)).

가스 유로가 변경된 다음, 소형팬을 구동시켜 수집백 내의 황화수소 가스를 암실 내에 있는 비색 종이 센서에 통과시켰다. 이 때 황화수소의 유량은 6 mL/min이며, 소형팬의 작동 시간은 1분이였다(Fig. 3(d)).

이렇게 비색 종이 센서의 은 나노프리즘과 황화수소 가스를 반응시킨 후, 색 변화를 유도하기 위해 분석 장치의 용액주입부를 통해 1 M 염화칼륨 용액 7 μL를 주입하였다. 여기서, 염화칼륨 용액이 비색 종이 센서의 검출부에 분주될 수 있도록 주사바늘을 센서 검출부의 상단 중앙에 위치하도록 재가공하였다. 그리고 미리 준비된 염화칼륨 용액을 탄성체 튜브에 넣어 Fig. 4와

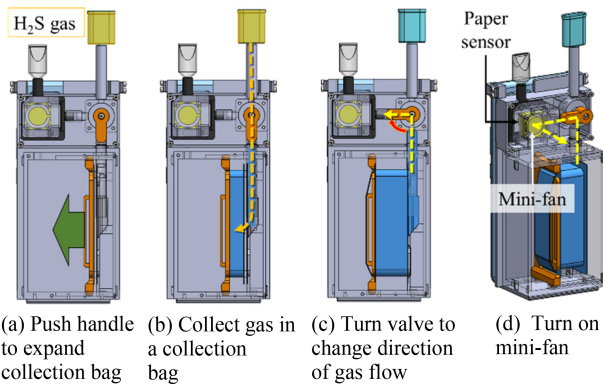


Fig. 3 Flow diagram of hydrogen sulfide gas within on-site analytical device

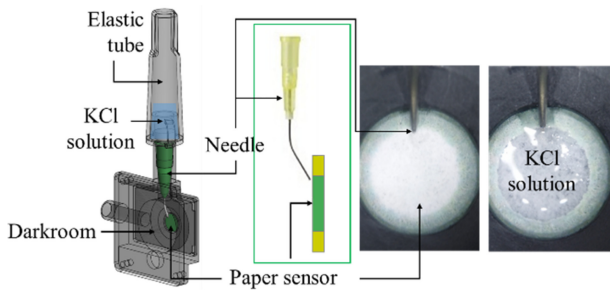


Fig. 4 Injection of KCl solution using a solution injection part of on-site analytical device

같이 조립하였다. 이를 통해 주입된 염화칼륨 용액은 Fig. 4와 같이 센서의 왁스 방벽으로 인해 센서 검출부를 벗어나지 않았다. 용액 주입 후 3-way 밸브를 시계방향으로 90도 회전시켜 외부 공기가 유입되도록 가스 유로를 변경시켰다. 그리고 소형팬을 작동시켜 외부 공기로 염화칼륨 용액을 건조했다.

개발된 황화수소 현장형 분석 장치는 이미지 촬영을 위한 암실이 구성되어 있다. 암실로 유입된 황화수소가 비색 종이 센서의 검출부로부터 통과하여 외부로 빠져나가기도록 설계되어 있으며, 접사렌즈가 있는 방향으로만 투명 아크릴로 밀봉되어 있고, 나머지 부분은 검은색으로 만들어졌다(Fig. 5(a)). 그리고 설치된 LED 조명과 접사렌즈를 통해 비색 종이 센서의 검출 부분을 스마트폰의 카메라로 촬영하였다. 이렇게 스마트폰의 카메라로 획득한 이미지는 Image J 소프트웨어를 이용하여 실험실형 황화수소 분석 방법과 동일하게 분석하였다. 이때 색 분석 영역은 비색 종이 센서 검출부의 내부 직경 4.5 mm 영역으로 제한하였다. 이는 커피링 효과를 최소화하기 위함이다(Fig. 5(b)).

2.4 현장형 황화수소 분석 장치의 이미지 획득 시간

실험실 방법에서 스캐너를 이용한 센서의 이미지 획득을 위해서는 염화칼륨 용액을 완전히 건조해야 하는데, 자연건조 방법을 사용하는 경우 상온 20°C, 습도 35%에서 25분 이상의 시간이 요구된다. 이에 비해, 개발된 현장형 황화수소 분석 장치는 염화칼륨 용액이 주입된 직후부터 이미지 획득이 가능할 뿐

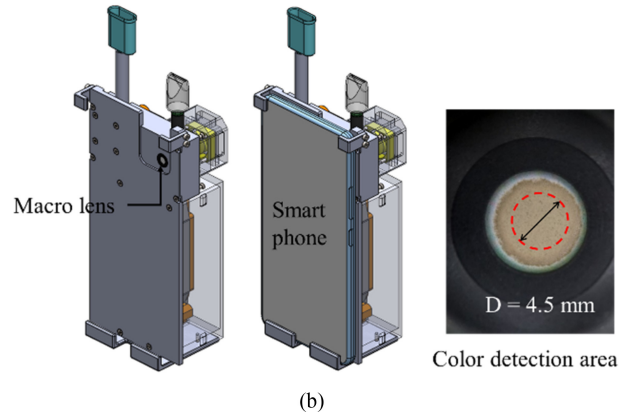
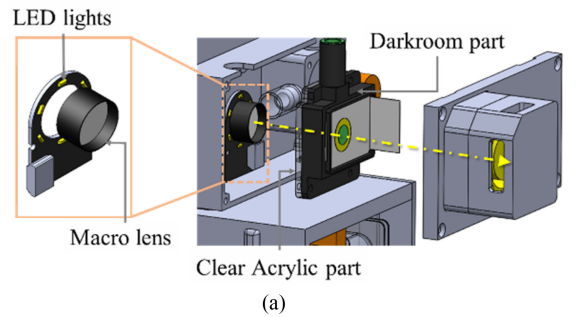


Fig. 5 (a) Image capture configuration within on-site analytical device and (b) image acquisition using a smartphone

아니라 장치 내 소형팬을 가동하면 염화칼륨 용액의 건조 시간을 수분 이내로 단축할 수 있다. 하지만 정확한 분석 결과를 얻기 위해서는 정형화된 시험 규정이 필요하다. 따라서 개발된 현장형 황화수소 검출 장치의 적절한 이미지 획득 시간을 확인하기 위해 비색 종이 센서에 염화칼륨 용액을 주입한 후부터 매분 이미지를 획득하여 색 변화를 관찰하였다.

2.5 현장형 황화수소 분석 장치의 분석 성능

실험실 방법에서 스캐너를 통해 획득한 이미지와 현장형 황화수소 분석 장치로 획득한 이미지를 비교 분석하여 개발 장치의 성능을 확인하였다. 또한, 산출된 검량선(Linear Regression)을 이용하여 황화수소의 유무를 확인할 수 있는 최소 검출농도인 검출한계(Limit of Detection, LOD)와 신뢰성을 가지는 정량적 측정 결과를 산출할 수 있는 최소 검출농도인 정량한계(Limit of Quantitation, LOQ)를 다음과 같은 식(1)과 식(2)로 확인하였다[21].

$$LOD = 3 \times \sigma_{bl} / S \tag{1}$$

$$LOQ = 10 \times \sigma_{bl} / S = 3.3 \times LOD \tag{2}$$

여기서, σ_{bl} 는 바탕용액 측정값의 표준편차, S 는 검량선의 기울기이다.

그리고 현장형 황화수소 분석 장치의 반복 시험을 통해 개발 장치의 재현성을 확인하였다. 반복 시험은 본 장치에서 일회용으로

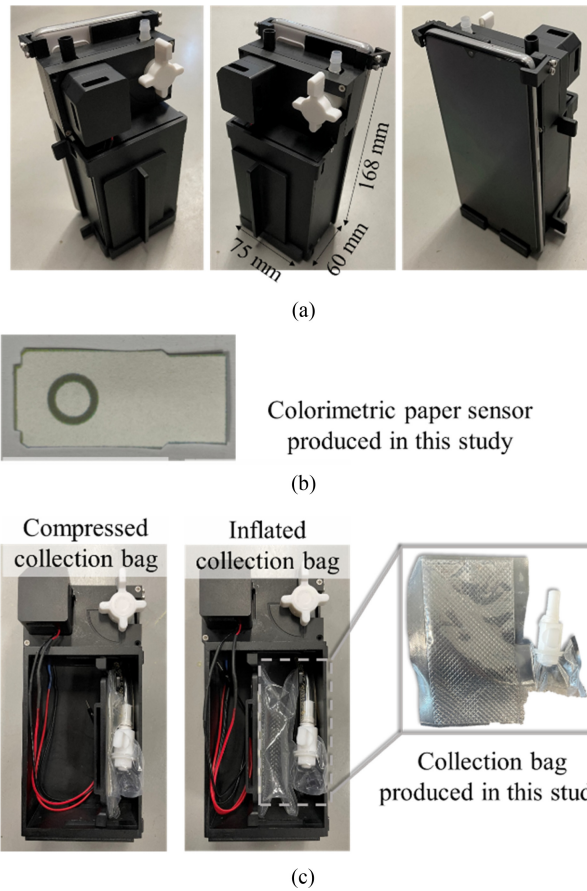


Fig. 6 Fabricated on-site analytical device for hydrogen sulfide; (a) overall shape, (b) colorimetric paper sensor, (c) collection bag mounted on the device (compression and expansion)

사용되는 수집백 10개를 사용하여 1개의 수집백마다 3회의 반복 실험을 수행하였고, 그 결과를 비교 분석하여 재현성을 평가하였다.

3. 실험 결과

3.1 현장형 황화수소 분석 장치의 제작

현장형 황화수소 분석 장치는 Fig. 6(a)와 같이 가로 75 mm, 세로 60 mm, 높이 168 mm의 크기로 손으로 쉽게 짚 수 있게 제작되었고, 제작된 장치의 무게는 약 258 g으로 이동에 용이하다. 또한 장치에 장착되는 비색 종이 센서는 Fig. 6(b)와 같고, 제작된 수집백이 장치에 조립되어 압축과 인장된 모습은 Fig. 6(c)와 같다.

3.2 현장형 황화수소 분석 장치의 이미지 획득 시간

현장형 황화수소 검출 장치의 이미지 획득 시간을 확인하기 위해, 황화수소와 반응하지 않은 비색 종이 센서에 1 M 염화칼륨 용액을 7 μL를 주입한 후 1분부터 10분까지 매분에 대한 이미지를 획득하였다. 획득된 이미지를 분석하여 매개변수 b값을

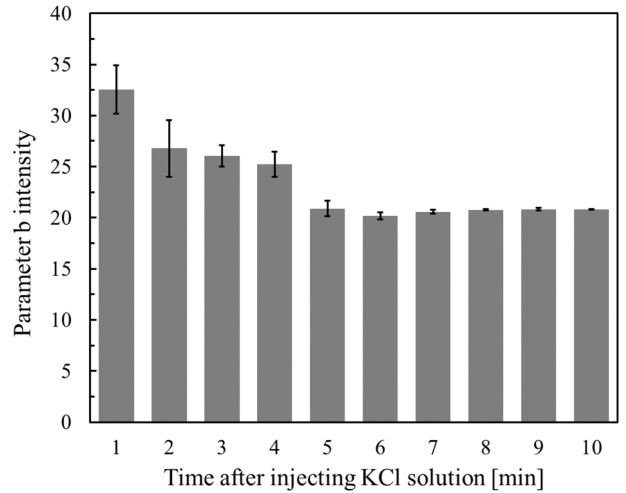


Fig. 7 Intensity of parameter b for elapsed time after injecting KCl solution into the colorimetric paper sensor

확인하였고, 확인된 값들의 표준 편차(Standard Deviation, S.D.)를 산출하였다. 그 결과, 산출된 표준편차는 1분일 때 2.37, 2분일 때 2.78, 5분부터 10분 사이의 평균 표준편차는 0.35로 나타났다(Fig. 7). 이에 염화칼륨 용액 주입 후 경과 시간이 5분 이후 일 때의 매개변수 b값의 표준 편차가 가장 작은 것으로 확인되었다.

염화칼륨과 반응시킨 후 1분 내 용액상의 이미지는 이후 경과시간에서 획득한 이미지에 비해 비교적 뚜렷한 색이 나타나 민감도가 향상되는 것으로 보였다. 하지만, 용액이 건조되지 않은 상태의 이미지는 빛의 균일한 분산을 방해하여 편차를 높이는 것으로 생각되었다. 따라서 매개변수 b값의 편차가 작은 이미지의 획득을 위해서는 소형팬을 통해 5분 이상 건조한 후에 이미지를 촬영하는 것이 적합하다고 판단되었다.

3.3 현장형 황화수소 분석 장치의 분석 성능

실험실 방법으로 획득한 이미지와 현장형 황화수소 분석 장치로 획득한 이미지를 분석하여 황화수소 농도별 매개변수 b값을 나타낸 그래프는 Fig. 8과 같다. 여기서 황화수소 농도 범위는 2.1-32.9 μM이며, 황화수소 농도가 증가함에 따라 매개변수 b의 변화량이 증가하는 것을 확인하였다. 실험실 방법으로 획득한 이미지의 매개변수 b의 변화량 추세선은 $y = 0.463x + 1.218$ 로 산출되었고, 이때의 결정계수는 0.9816으로 우수한 선형성을 나타냈다. 현장형 황화수소 분석 장치로 획득한 이미지의 매개변수 b의 변화량 추세선은 $y = 0.514x - 0.065$ 로 산출되었고, 이때의 결정계수는 0.9892로 실험실 방법과 마찬가지로 우수한 선형성을 나타냈다. 산출된 추세선을 검량선으로 하여 검출한계를 계산하면 실험실 방법은 0.649 μM, 현장형 황화수소 분석 장치 방법은 1.226 μM로 0.577 μM의 차이를 보였다. 또한 산출된 추세선을 검량선으로 하여 정량한계를 계산하면 실험실 방법은 2.14 μM, 현장형 황화수소 분석 장치 방법은 4.046 μM로 실험실 방법보다 1.905 μM 더 높았다. 검출한계와 정량한계에

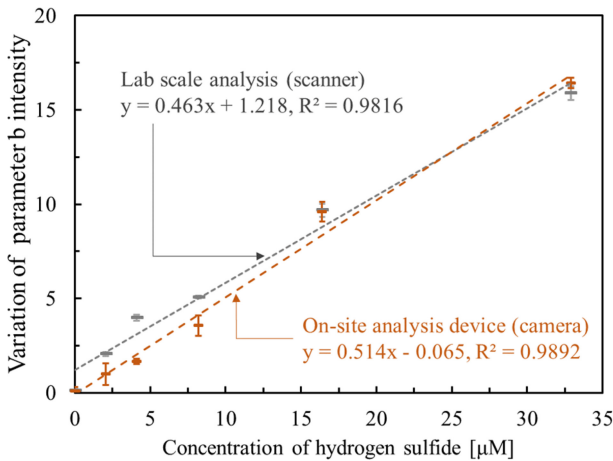


Fig. 8 Comparison of change in parameter b intensity versus concentration of hydrogen sulfide of the on-site analytical device with that of lab scale analysis (n = 3)

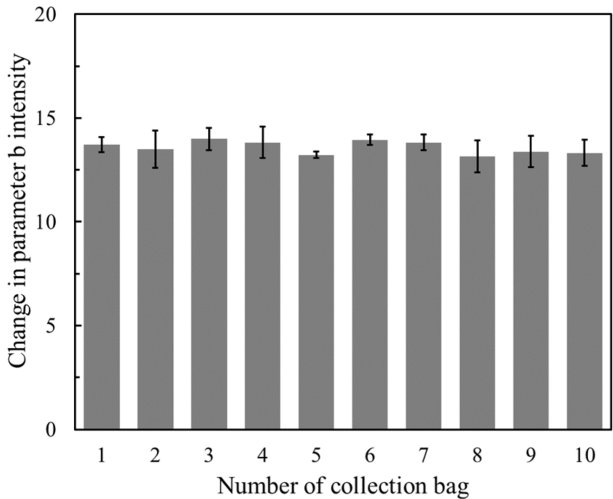


Fig. 9 Change in parameter b intensity of 10 individual collection bag using the on-site analytical device for hydrogen sulfide

대해서는 실험실 방법이 현장형 황화수소 분석 장치 방법보다 우수하였다. 하지만 현장형 황화수소 분석 장치의 민감도(0.514 매개변수 b 변화량 / µM 황화수소)는 실험실 방법(0.463 매개변수 b 변화량 / µM 황화수소)에 비해 1.11배 높았다. 이는 두 방법에서 황화수소 가스와 종이 센서 간에 직접적인 반응이 일어나는 반응부의 크기 차이에서 기인된 것으로 생각된다. 현장형 분석 장치 방법은 실험실 방법에 비해 반응부가 커서 낮은 농도의 황화수소에 대한 종이 센서의 감응이 다소 감소하였으나 높은 농도에서는 유사한 수준으로 검출하였다.

따라서, 개발된 황화수소 분석 장치는 현장에서의 사용성을 향상시켰을 뿐 아니라, 미량의 황화수소 농도 분석에 사용될 수 있는 우수한 민감도를 가지며, 적정 수준의 결정계수, 검출한계, 정량한계를 보여주었다.

제작된 10개의 수집백을 각 수집백당 3번씩 16.4 µM 황화수소와

반응시켰을 때, 비색 종이 센서의 색 변화에 대한 매개변수 b의 변화량 평균은 13.58±0.31로 확인되었으며, 이때의 상대 표준 편차(Coefficient of Variation, CV)는 5.7%로 결과 데이터의 산포도가 크지 않음을 확인하였다(Fig. 9).

4. 결론

본 연구에서는 비색 종이 센서를 이용하여 고감도 황화수소 검출을 위한 현장형 분석 장치를 개발하였다. 개발 장치의 주요 기능은 염화칼륨 용액 주입 및 건조, 가스 수집, 가스 반응 유도, 그리고 가스 반응된 비색 종이 센서의 이미지 획득이다. 개발 장치의 기능별 평가를 진행하여 각 기능의 적합 조건을 확인하였고, 적합 조건을 적용한 개발 장치를 사용하여 황화수소 농도가 현장에서 바로 분석될 수 있음을 확인하였다.

개발된 장치는 장소에 구애받지 않고 현장에서 바로 사용할 수 있도록 소형화하였으며, 가스 수집부터 분석까지 하나의 장치에서 구현되도록 하였다. 이를 통해 일정한 염화칼륨 용액 주입과 동일한 조건의 이미지 획득, 그리고 이미지 획득 시간의 단축을 이루었다. 사용 적합 조건에 따라 개발 장치로 농도별 황화수소 반응을 통한 민감도를 확인하였고, 황화수소의 농도를 나타내는 매개변수 b의 변화량에 대한 황화수소 농도를 나타내는 추세선을 산출하였다. 선형성을 보이는 황화수소 농도 범위는 구취 판정을 위해 요구되는 황화수소 농도를 포함하므로 임상현장에 적용 가능할 것으로 판단하였다. 또한, 재현성 실험에서는 일정한 황화수소 농도에 대해 매개변수 b 변화량의 상대 표준 편차가 5.7%를 나타내어 개발 장치의 재현성을 확인하였다.

본 연구에서는 개발한 현장형 황화수소 분석 장치를 스마트폰과 연계하여 이미지를 획득하였으나, 이미지 분석은 스마트폰이 아닌 컴퓨터 소프트웨어를 이용해 진행되었다. 현장에서 바로 적용하기 위해서는 이미지를 획득한 스마트폰에서 바로 색 변화 분석이 가능한 어플리케이션을 통해 분석이 진행되어야 하므로 관련 연구는 다음 연구에서 진행될 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처전주기의료기기개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(Nos. 1711174359, RS-2020-KD000023).

REFERENCES

1. Koskela, J., Sarfraz, J., Ihalainen, P., Määttänen, A., Pulkkinen, P., Tenhu, H., Nieminen, T., Kilpelä, A., Peltonen, J., (2015),

- Monitoring the quality of raw poultry by detecting hydrogen sulfide with printed sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 218, 89-96.
- Hu, Y., Shang, Z., Wang, J., Hong, M., Zhang, R., Meng, Q., Zhang, Z., (2021), A phenothiazine-based turn-on fluorescent probe for the selective detection of hydrogen sulfide in food, live cells and animals, *Analyst*, 146(24), 7528-7536.
 - Ferreira, V., Franco-Luesma, E., Vela, E., López, R., Hernández-Orte, P., (2017), Elusive chemistry of hydrogen sulfide and mercaptans in wine, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(10), 2237-2246.
 - Kim, Y.-R., Moon, S.-T., Park, S.-K., (2008), Effects of yeast strains and fermentation temperatures in production of hydrogen sulfide during beer fermentation, *Korean Journal of Food Science and Technology*, 40(2), 238-242.
 - Cha, J.-H., Kim, D.-H., Choi, S.-J., Koo, W.-T., Kim, I.-D., (2018), Sub-parts-per-million hydrogen sulfide colorimetric sensor: Lead acetate anchored nanofibers toward halitosis diagnosis, *Analytical Chemistry*, 90(15), 8769-8775.
 - Choi, S.-J., Jang, B.-H., Lee, S.-J., Min, B. K., Rothschild, A., Kim, I.-D., (2014), Selective detection of acetone and hydrogen sulfide for the diagnosis of diabetes and halitosis using SnO₂ nanofibers functionalized with reduced graphene oxide nanosheets, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(4), 2588-2597.
 - Van den Broek, A. M., Feenstra, L., de Baat, C., (2007), A review of the current literature on aetiology and measurement methods of halitosis, *Journal of Dentistry*, 35(8), 627-635.
 - Donarelli, M., Ottaviano, L., (2018), 2D materials for gas sensing applications: A review on graphene oxide, MoS₂, WS₂ and phosphorene, *Sensors*, 18(11), 3638.
 - Li, W., Zhao, D., (2013), An overview of the synthesis of ordered mesoporous materials, *Chemical Communications*, 49(10), 943-946.
 - Seiyama, T., Kagawa, S., (1966), Study on a detector for gaseous components using semiconductive thin films, *Analytical Chemistry*, 38(8), 1069-1073.
 - Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., Gao, R., (2010), Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors, *Sensors*, 10(3), 2088-2106.
 - Chen, H., Wu, X., Yang, S., Tian, H., Liu, Y., Sun, B., (2019), A visible colorimetric fluorescent probe for hydrogen sulfide detection in wine, *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2173671>
 - Kaushik, R., Ghosh, A., Singh, A., Jose, D. A., (2018), Colorimetric sensor for the detection of H₂S and its application in molecular half-subtractor, *Analytica Chimica Acta*, 1040, 177-186.
 - Ahn, Y. J., Gil, Y.-G., Lee, Y. J., Jang, H., Lee, G.-J., (2020), A dual-mode colorimetric and SERS detection of hydrogen sulfide in live prostate cancer cells using a silver nanoplate-coated paper assay, *Microchemical Journal*, 155, 104724.
 - Ahn, Y. J., Han, S. H., Lee, G.-J., (2021), Rapid and simple colorimetric detection of hydrogen sulfide using an etching-resistant effect on silver nanoprisms, *Microchimica Acta*, 188(4), 1-12.
 - Jiang, S., Cui, C., Bai, W., Wang, W., Ren, E., Xiao, H., Zhou, M., Cheng, C., Guo, R., (2022), Shape-controlled silver nanoplates colored fabric with tunable colors, photothermal antibacterial and colorimetric detection of hydrogen sulfide, *Journal of Colloid and Interface Science*, 626, 1051-1061.
 - Platonov, I., Ismagilov, D., Kudryashov, S. Y., Smygina, I., Onuchak, L., Berezkin, V., (2006), Generating gas flows with a constant trace concentration of hydrogen sulfide, *Journal of Analytical Chemistry*, 61(1), 52-57.
 - Kim, T.-H., Kim, N.-J., Youn, J.-I., (2015), Evaluation of wavelength-dependent hair growth effects on low-level laser therapy: An experimental animal study, *Lasers in Medical Science*, 30(6), 1703-1709.
 - Tzung, T. Y., Yang, C. Y., Huang, Y. C., Kao, F. J., (2009), Colorimetry provides a rapid objective measurement of de novo hair growth rate in mice, *Skin Research and Technology*, 15(4), 459-463.
 - Singh, B., Parwate, D., Shukla, S., (2009), Radiosterilization of fluoroquinolones and cephalosporins: Assessment of radiation damage on antibiotics by changes in optical property and colorimetric parameters, *AAPS PharmSciTech*, 10(1), 34-43.
 - Taverniers, I., De Loose, M., Van Bockstaele, E., (2004), Trends in quality in the analytical laboratory. II. Analytical method validation and quality assurance, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 23(8), 535-552.

**Gi-Ja Lee**

Professor in the Department of Biomedical Engineering, Kyung Hee University. Her research interests are nano-biosensors, chemical and gas sensors, gasotransmitter, and *in vitro* medical device.

E-mail: gjlee@khu.ac.kr

**Yoo-Ri Na**

B. Eng. candidate in the Department of Biomedical Engineering, Kyung Hee University and Student Research Assistant in the Material & Component Convergence R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). Her research interest is biomedical engineering.

E-mail: yooracon27@gmail.com

**Jae-Chul Lee**

Senior Researcher in the Material & Component Convergence R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests are mechanical design, composites, and numerical analysis.

E-mail: jc2@kitech.re.kr

소수력 발전소 건립을 위한 경제성 검토: 삼천포 인근

Economic Feasibility Study for Small Hydropower Plant Construction: in Samcheonpo Area

이동옥¹, 노창일², 추원식^{3,4}, 송철기^{2,4,#}
Dong Oak Lee¹, Chang Il Roh², Won-Shik Chu^{3,4}, and Chul Ki Song^{2,4,#}

¹ 한국남동발전주 (Korea South-East Power Co., Ltd.)

² 경상국립대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University)

³ 경상국립대학교 기계융합공학과 (Department of Mechanical Convergence Engineering, Gyeongsang National University)

⁴ 경상국립대학교 공학연구원 (Engineering Research Institute, Gyeongsang National University)

Corresponding Author / E-mail: cksong@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1633

ORCID: 0000-0003-0250-1813

KEYWORDS: Small hydropower (소수력), Loss head (손실수두), Power generation output (발전출력), Energy (에너지), Economic feasibility study (경제성 검토)

With global warming leading to abnormal weather phenomena and increasing carbon emissions, countries are implementing carbon emission reduction policies. Europe's Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) aims to promote environmentally responsible practices while maintaining industrial competitiveness. To avoid potential tariffs in the European market, Korea must vigorously pursue carbon emission reduction. Emphasizing renewable energy adoption is crucial for achieving eco-friendly and sustainable energy production. This study conducted an economic feasibility assessment for constructing small hydroelectric power plants using discharged energy from Goseong Green Power Plant. By evaluating economic viability, decision-makers could assess potential benefits and costs to support effective planning and implementation. Findings of this study could encourage investments in renewable energy projects, fostering a greener and more sustainable energy landscape for the future.

Manuscript received: July 25, 2023 / Revised: October 13, 2023 / Accepted: December 4, 2023

This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2023

NOMENCLATURE

P	=	Power Generation Output
ρ	=	Density of Seawater
h	=	Effective Aberration
Q	=	Flow Rate per Unit Time
η_T	=	Turbine Efficiency
η_G	=	Generator Efficiency
q	=	Average Water Discharge per of a Conventional Water Pump
n_i	=	Number of CWP Operations by Season
h_{loss}	=	Head Loss
h_e	=	Loss Head due to Inlet Inflow

h_f	=	Friction Loss Head from the Inlet to the Water Wheel Inlet
h_b	=	Head Loss in Bending near the Inlet
f_e	=	Inflow Loss Factor
f_f	=	Friction Loss Factor
f_b	=	Bending Loss Factor
v	=	Average Flow Rate
L	=	Center Line Distance from Inlet to Water Inlet
D	=	Tube Diameter
C_0	=	Initial Investment Cost for Hydropower Development
A	=	Estimated Annual Maintenance Cost at the Time of N Years
r	=	Annual Interest Rate
r_m	=	Operation Maintenance Ratio

E_a	=	Annual Power Production
C_i	=	Electricity Sales Unit Price by Year
$C_{SMP,i}$	=	SMP Electricity Unit Price by Year
$C_{REC,i}$	=	REC Power Unit Price
μ	=	REC Weight for Hydropower

1. Introduction

The average global temperature has been continuously rising, leading to more frequent occurrences of abnormal weather phenomena due to global warming. In 2022, several European countries, including the UK and France, experienced record-breaking high temperatures. Meanwhile, in Pakistan, heavy rainfall resulted in flooding, submerging one-third of the country's territory and causing various disasters.

A severe cold wave struck Wyoming, USA, causing temperatures to plummet by 20°C in just 30 minutes. According to the announcement from Copernicus Climate Change Service, a branch of the European Union, the global average temperature in 2022 ranked within the top 5 since 1959, and the recent eight years (2015 to 2022) were analyzed as the warmest period in recorded history [1].

Currently, we are directly experiencing the disasters caused by global warming. In response, major countries around the world are implementing various carbon emission reduction policies to mitigate global warming. Among these efforts, Europe is introducing a policy called Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) [2]. This policy aims to enhance the industrial competitiveness of companies within the EU and address the issue of Carbon Leakage. Starting in 2026, CBAM will impose a carbon levy on products imported into EU countries based on the carbon emissions associated with their production in the exporting country. This measure is expected to provide economic incentives for countries and companies with lower carbon emissions and, at the same time, promote environmentally friendly economic activities [3]. By implementing CBAM, Europe aims to support environmentally responsible practices while maintaining its industrial competitiveness and reducing carbon leakage. This policy serves as part of the global efforts to combat climate change and foster a sustainable future [4].

Korea, being heavily reliant on manufacturing and exports, has a high carbon emission rate in the world, which could lead to critical consequences on the international stage. Therefore, Korea must vigorously pursue carbon emission reduction to avoid the potential imposition of tariffs in the European market. To achieve this, the widespread adoption of renewable energy should be set as the

nation's top priority. Korea should actively promote the transition from fossil fuels to renewable energy sources. Expanding the use of renewable energy is crucial for fostering an eco-friendly and sustainable energy sector, thereby reducing carbon emissions. Embracing technologies such as solar power, wind energy, hydroelectricity, and biomass can drive continuous improvements in electricity generation and energy consumption across various industries. By implementing these measures, Korea can mitigate the risk of facing carbon-related tariffs and other trade barriers in the global market while advancing economic growth in an environmentally responsible manner. Renewable energy sources like wind and solar can be intermittent, relying on weather conditions for generation. This unpredictability can affect stable power supply and grid frequency. Energy storage, smart grid tech, and demand response programs are essential for managing these challenges and ensuring a reliable transition to cleaner energy.

The Climate Change Division of the Korea Meteorological Administration conducted a comprehensive analysis of the occurrence and frequency of major abnormal weather phenomena both domestically and internationally in 2022. Based on this analysis, they observed a significant increase in the frequency of recent abnormal weather events and evaluated their potential impacts in the future [1]. Orawan Jantasuto conducted research on the potential of hydropower systems as a renewable energy source. The study analyzed the low environmental impact and high efficiency that can be achieved with hydropower generation [5]. Bernd Spanhoff [6], Oliver Paish [7], and the Korea Energy Agency [8] have also conducted research on the current status and future prospects of hydropower development, highlighting its higher ease of installation and environmental friendliness compared to traditional hydropower plants.

Korea South-East Power Co., conducted a topographic analysis to establish design criteria for the construction of Units 3 and 4 at the Samcheonpo Power Plant, Gyeongnam Province. Harmonic analysis and the Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) model, which was developed by US Army Corps. of Engineers, were utilized to determine the water level, dam height, and maintenance water level. Meanwhile, the Korea Institute of Energy Research [9] researched a formula for evaluating investment costs and total revenue based on the operating period of hydropower plants. They adopted the cost-benefit analysis method to assess the economic viability of the hydropower plant. In evaluating the profitability of the project, the projected System Marginal Price (SMP), Renewable Energy Certificates (REC), and REC weighting were selected based on the revised enforcement in Korean government [10] and the report by the Korea Electrotechnology Research Institute.

Kim et al. [11] and Jeoune et al. [12] conducted research on the economic analysis of renewable energy generation. They attempted to develop tools for evaluating the economic viability of renewable energy facilities based on their interpretation and operational revenue. This study focuses on conducting an economic feasibility assessment for the construction of small hydroelectric power plants, aiming for environmentally friendly and sustainable energy production. The goal is to promote the establishment of small hydroelectric power plants to contribute to a more eco-friendly and sustainable energy generation process. Conducting an economic feasibility assessment for the additional construction of small hydroelectric power plants, utilizing the discharged near the Samcheonpo Power Plant, can provide a solid basis for supporting effective planning and implementation of future additional small hydroelectric power plants. By evaluating the economic viability, the decision-makers can assess the potential benefits and costs associated with the new project. This assessment will offer valuable insights into the financial viability and sustainability of the proposed small hydroelectric power plant, helping to ensure its successful planning and implementation.

Moreover, the findings of the economic evaluation can serve as crucial evidence and support when seeking financial investments or gaining approval from relevant authorities. The information obtained from the evaluation can play a vital role in encouraging further investments in renewable energy projects and contribute to achieving a greener and more sustainable energy landscape.

2. Small Hydropower Technology

2.1 Hydroelectric Energy

Due to the limited reserves of fossil fuels and heavy reliance on imports, Korea faces a vulnerable situation with an increasing energy dependency on foreign sources each year. As the country experiences rapid economic growth and improvements in the standard of living, the electricity demand is rising, leading to a shift from petroleum-centered energy consumption to alternatives such as coal (bituminous coal) thermal power, nuclear, hydro, and other renewable energies.

Water is classified as a clean resource in the field of alternative energy development. It falls under the category of recyclable resources, along with wind, hydro, tidal, solar, and geothermal energies. Moreover, the water used as cooling water in power plants can undergo a circulation process and be recycled. Promoting the development and utilization of these alternative and clean energy sources is essential for Korea to secure a stable energy supply and reduce its reliance on overseas energy imports.

It would contribute to a more sustainable energy future and mitigate the risks associated with energy supply vulnerabilities. The types of hydroelectric energy are as follows:

- (1) (Small) Hydropower energy: It produces electricity based on the difference in water level.
- (2) Tidal energy (Flow energy): It utilizes the rapid flow of tides to generate electricity.
- (3) Tidal energy (Tidal range energy): It converts potential energy due to tidal level differences into kinetic energy and then generates electricity.
- (4) Wave energy (Wave power energy): It harnesses the energy from incoming waves to generate electricity.
- (5) Salinity gradient energy (Salinity power energy): It generates electricity from the pressure difference resulting from the meeting of freshwater and seawater.

2.2 Status of Domestic

Hydropower generation is significantly influenced by local geographical conditions. It is a small-scale and technically simple hydropower facility that blocks rivers with dams and artificially induces water flow into the reservoir to rotate low-head turbines for electricity generation. Hydropower generation is a facility that utilizes hydropower resources to produce electricity. Compared to other energy sources, such as nuclear or thermal power generation, it may have higher unit investment costs, but it has a longer lifespan and lower operation and maintenance costs.

Moreover, it is a clean energy facility with simple operation and control and has a minimal environmental impact. Since hydropower generation suitability varies based on local conditions, the installation and operation should be decided considering the specific conditions and requirements of each region. This way, it can contribute to sustainable and environmentally friendly energy production while supporting the development of local communities.

2.2.1 Classification by Scale

In Korea, small hydropower generation typically refers to power facilities with a capacity of 10,000 kW or less. In the United States, facilities with a capacity of 15,000 kW or less are classified as small hydropower, while in China, facilities with a capacity of 25,000 kW or less fall into the small hydropower category. However, according to the classification by the American Society of Civil Engineers (ASCE), the categorization is as follows:

- (1) Small hydropower: capacity up to 10 MW (10,000 kW)
- (2) Mini hydropower: capacity up to 1 MW (1,000 kW)
- (3) Micro hydropower: capacity up to 100 kW.

And, the classification based on head (or fall) for hydropower generation is as follows:

- (1) High: higher than 50 m
- (2) Medium: 15-50 m
- (3) Low: 2-15 m

2.2.2 Classification by Generating Type

Hydropower generation aims to utilize the highest possible head (fall) for ideal efficiency. Therefore, selecting and developing the most favorable generation method based on site conditions is crucial. Hydroelectric power generation can be broadly classified according to terrain and watercourse conditions as follows:

- (1) Run-of-river type: The method utilizes the swift current in the upstream region of a river to rotate the turbines and generate power. It is commonly used in areas with steep river gradients.
- (2) Storage type (Dam type): Dams are installed in rivers with lower gradients in the middle and downstream regions. Abundant water flow is harnessed by creating a reservoir (impoundment), and the head produced by the water level difference in the reservoir is used to rotate the turbines for electricity generation.
- (3) Dam-waterway type: This involves constructing dams in areas with significant bends in the river. Water from the reservoir is guided through a waterway (tunnel, etc.) to a lower elevation, utilizing the generated head for electricity production.

2.2.3 Analysis of Site Conditions and Characteristics

The government-initiated small hydropower technology development project began with the site survey for small hydropower generation in 1974, following the first oil crisis.

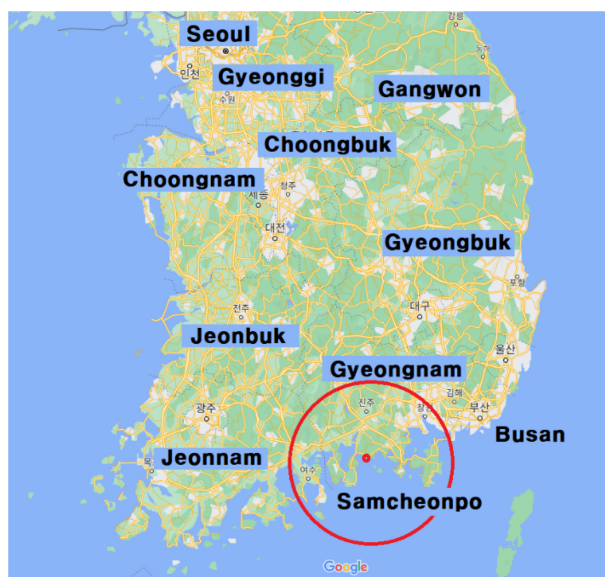
In 1975, a research survey and design for a pilot hydropower plant were conducted, and Korea Electric Power Corporation (KEPCO) constructed a 450 kW small hydropower plant in Anheung, Gangwon Province, setting a pioneering example of domestic small hydropower development.

However, significant development of small hydropower plants started after the second oil crisis when the importance of alternative energy development was recognized, encouraging private investment in small hydropower plants and supporting related technology research. Table 1, obtained through a small hydropower site survey by the Ministry of Science and Technology and the Korea Atomic Energy Research Institute in 1974, shows 2,400 potential development areas with a total estimated capacity of 582.5 MW in South Korea. And Fig. 1 shows several provinces in Korea.

Currently, most operating small hydropower plants in the country have a capacity of less than 3,000 kW and are

Table 1 Predictions of the small hydroelectric power in Korea

Province	No.	Power [MW]
Gangwon	869	259.8
Gyeongbuk	584	110.6
Gyeongnam	245	46.9
Choongbuk	208	71.8
Jeonbuk	156	27.4
Choongnam	118	26.1
Gyeonggi	114	22.9
Jeonnam	106	17
Total	2,400	582.5



(a)



(b)

Fig. 1 Several provinces in Korea

predominantly located in areas with significant heads (falls).

However, the availability of high-head sites is decreasing, necessitating the development of technologies to effectively

harness low-head small hydropower resources in the future.

To maximize the economic viability of small hydropower plants, the government should actively develop optimal design and operation techniques.

This includes advanced turbine configurations, efficient reservoir management, smart grid integration, and demand response mechanisms to enhance overall performance and sustainability. These efforts will contribute to a more resilient energy system with economic benefits for the country and local communities.

2.3 Status of Advanced Countries

In many countries, including advanced nations and China, the social and economic importance of small hydropower development is recognized. They collect hydrological data and basic statistical information, putting efforts into technological development and widespread adoption to promote small hydro-power as a significant energy source.

Moreover, they have been working on developing resource feasibility assessment methods, optimal design techniques for power plants, standardization of small hydropower systems, automatic control systems, development of civil engineering materials, and optimal operation techniques to enhance the economic viability of small hydropower plants. As a result, numerous pilot small hydropower plants have been developed, and many small hydropower plants are currently in operation worldwide, as shown in Table 2.

Internationally, the average power capacity per small hydropower plant is around 1,000 kW, while in Korea, it is about 1,800 kW, which is relatively high compared to foreign counterparts. This is due to the tendency for increased power capacity in small hydropower plants to improve economic viability. However, foreign countries have developed and promoted low-head, small-capacity systems that maintain economic viability, even with lower-head conditions. For instance, Germany has an average power capacity of only 58 kW per small hydropower plant but actively utilizes small hydropower resources through effective development and utilization

3. Calculation of Small Hydropower Systems

3.1 Power Output P

The power output, or electrical power P , is calculated as follows [13,14].

$$P = 9.81 \rho h_{eff} Q \eta_T \eta_G \text{ [W]} \quad (1)$$

where, ρ , h_{eff} , Q , η_T , and η_G represent the density of seawater

Table 2 Small hydropower plants

Country	Number of Power Plants	Power [MW]
China	58,000	13,250
Germany	5,882	341
USA	1,715	3,420
France	1,479	1,646
Italy	1,420	1,969
Sweden	1,346	8,406
Austria	1,200	320
Spain	1,102	1,010
Czech Rep.	661	201
Japan	600	538
Canada	321	1,056
Romania	295	311
Brazil	232	483
Norway	227	806
Finland	156	313
India	100	53
Pakistan	76	20
Peru	75	50
Indonesia	66	58
Argentina	55	400
Turkey	53	83
Korea	30	43

[kg/m³], effective head [m], flow rate [m³/s], turbine efficiency, and generator efficiency, respectively. Additionally, the effective head h_{eff} refers to the net head, which is the total head h_{total} minus the head loss h_{loss} .

3.2 Total Flow Rate Q

This study aims to evaluate the economic feasibility of additional small hydropower generation using the energy. The total flow rate Q is either the rated flow rate or the measured flow rate like Eq. (2).

$$Q = q \cdot n_i \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (2)$$

where, q and n_i represent the average discharge rate (11.3 m³/s) of a cooling water circulation pump (CWP) at the Goseong Green Power Plant and the number of operating CWPs during each season ($n_{summer} = 8$, $n_{spring,fall} = 6$, $n_{winter} = 4$), respectively.

3.3 Total Head h_{total}

3.3.1 Selection of Water Level

Explanation of various terms represented in the tide chart for

selecting effective water level:

- Mean Sea Level (MSL): The sea level that would exist in the absence of tides, defined as the average of tide levels observed during a specific period. Mean Sea Level can vary monthly and gradually changes over the course of a year, so it is often determined by averaging the tide levels over multiple years, although sometimes the average of tide levels over one year is used.
- Approximate Lowest Astronomical Tide (Datum Level, DL) / Approximate Highest Astronomical Tide: The level that is located below/above Mean Sea Level by the sum of the half range of the major four tides. The DL is used as a reference for measuring the height of the sea level, and the Approximate Highest Astronomical Tide is used as a standard for determining the coastline. To calculate these levels, a minimum of 30 days of hourly tide observations is required.
- Mean Low Water (MLW) / Mean High Water (MHW): The sea level averaged over the entire period during the tidal cycle, positioned below/above Mean Sea Level by the half range of the M2 constituent tide. The difference between MHW and MLW is called the mean tidal range, and the difference between MHW and the datum level is known as the mean tidal level.

The reason for conducting harmonic analysis and estimating tide levels is that it provides a more convenient and accurate method compared to using statistical data from observed tide levels. Utilizing the estimated tide curves and tidal constants derived from harmonic analysis is more practical and facilitates the assessment of power generation and the economic viability of the project. For determining the effective head, the tide levels in the vicinity of the Samcheonpo Power Plant's discharge outlet can be analyzed and calculated. The average sea level (EL) is -0.03 m, the highest astronomical tide is 2.13 m, the lowest astronomical tide is -2.22 m, the mean spring high water is 1.28 m, and the mean spring low water is -1.34 m. The tidal range is 2.62 m, the mean tidal range is 1.79 m, and the neap tidal range is 0.97 m.

In the determination of the Samcheonpo Small Hydroelectric Power Plant's head, the tide levels at the nearby Tongyeong tide gauge station are used. By analyzing the relationship between the observed tide levels at the Tongyeong tide gauge station and the downstream observed tide levels at the discharge outlet for six years (1998-2003), the observed tide levels at the Tongyeong tide gauge station are transferred to the downstream location for application. Fig. 1(b) shows the location of Goseong, Tongyeong, and Samcheonpo.

To transfer the tide levels from the reference point to an

arbitrary point, harmonic constants known as "harmonic ratios" and "harmonic factors" are used. The harmonic ratio represents an additive factor to the harmonic constituent at the standard port, allowing the approximation of the tide level at the arbitrary point to the standard time. On the other hand, the harmonic factor (ratio) is used to multiply the tide level at the standard port, thus obtaining an approximation of the tide level at the arbitrary point.

- Harmonic Ratio: The harmonic ratio represents the time difference between high and low tides at two different locations. In this study, when using the height difference between the dam's maintenance level and the tide level, the time difference of high or low tides does not significantly affect the analysis results, so it was not considered.
- Harmonic Factor: The procedure for transferring the tide level from the reference point to the arbitrary point using the harmonic factor involves subtracting the average sea level at the reference point and multiplying it by the harmonic factor. The resulting value is then added to the average sea level at the arbitrary point to obtain the transferred tide level. In this study, the harmonic factor was determined using actual tide level data between two points. The observed tide level data between the two points during the period from '04. 1. 31 to '04. 2. 16 were used. After removing the average sea level from the observed data at both points and aligning them to the same average sea level, the harmonic factor was determined by comparing the two values at high or low tides that best represented the tide level difference. The resulting harmonic factor was found to be 1.19

3.3.2 Determination of Dam Height and Maintenance Water Level

The procedure for determining the dam height involves conducting calibration of the HEC-RAS model based on existing water level measurement data. Subsequently, the water level at the dam construction stage during the maximum flow condition and the water level after dam construction, when the operation of the power generators is interrupted due to dam overflow, are compared. This comparison helps identify a suitable dam height that ensures no adverse impacts at critical evaluation points. The calibrated HEC-RAS model is input with the design flow of the maximum flow rate (156.2 m³/s) and the baseline water level of approximately the highest astronomical tide (EL. 1.585 m). Then, the water surface profiles before and after dam construction are calculated, and the effect of drainage water level is reviewed to determine the final dam height. The total length of the dam, located downstream of the powerhouse, is approximately 110 meters.

Table 3 Water level before/after the dam construction (EL, m)

	Height [EL. m]	Water Lever [m]		
		Position 1	Position 2	Position 3
Before const.	-	2.95	4.84	5.83
After const.	3.70	4.51	4.83	5.83
	3.80	4.61	4.84	5.83
	3.90	4.72	4.88	5.85
	4.00	4.82	4.94	5.89
	4.10	4.92	5.03	5.95

Table 4 Calculation of the output power

Season	Quantity	Output power [kW]
Summer (3 months)	90.6	3,705
Spring, autumn (4 months)	68.0	2,781
Winter (5 months)	45.4	1,857
Average	-	2,627

Considering overall design safety aspects, the length of the spillway is set at around 90 meters, which is about 80% of the total length.

During the review of drainage water level impacts, it is essential to ensure that the existing upstream areas are not affected, particularly in the circulation pump system.

Additionally, the condition that the water level at the seal well in the upstream circulation water outlet should not exceed EL. 5.965 meters must be strictly satisfied.

The water surface profiles were calculated for five different dam heights in the range of EL. 3.70 to 4.10 meters before and after dam construction, and the results are shown in Table 3.

To avoid any adverse impact on the upstream areas, the maximum dam height without affecting the existing upstream areas was selected as EL. 3.80 meters. At this dam height, the water level at the dam crest was found to be EL. 4.65 meters.

The upstream water level of the dam is a crucial factor in determining the head difference and varies depending on the type of head difference used.

It is preferable to adopt a head difference type that can maintain the dam's upstream water level as constant and high as possible. Moreover, for cases like the small hydropower plant near Samcheonpo, where water is discharged into the sea, it is necessary to consider the relationship with the tidal level and additionally review the 24-hour power generation feasibility.

Considering these factors, the adjustable axial Kaplan head difference was primarily considered, and based on the dam height of EL. 3.80 meters, the upstream water level was determined as EL. 3.60 meters.

3.4 Head Loss h_{loss}

The calculation of the head loss h_{loss} is aimed at determining the net head (net elevation difference) required for the power generation calculation. It is obtained by subtracting the headwater elevation (forebay elevation) from the tailwater elevation (downstream elevation) at the downstream side, considering the total gross head. The head loss is calculated as the sum of three major components, as shown in Eq. (3) [15].

$$h_{loss} = h_e + h_f + h_b \quad [m] \quad (3)$$

where h_e , h_f , h_b are head loss due to inlet flow (inlet losses), head loss due to friction from inlet to the penstock entrance (friction losses) and head loss due to bending near the inlet (bend losses), respectively.

Each of these components is expressed by the following equations: [15]

$$h_e = f_e \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad (4)$$

$$h_f = f_f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad (5)$$

$$h_b = f_b \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad (6)$$

where f_e , f_f , and f_b are the inlet loss coefficient, the friction loss coefficient, and the bend loss coefficient, respectively.

And v is average flow velocity, L is the centerline distance from the inlet to the weir, and D is the diameter of the pipe.

3.5 Power Generation Output P

By applying the previously obtained variables to Eq. (1), the seasonal average power generation output is estimated to be 2,627 kW as shown in Table 4. Therefore, the expected total annual generation is 23,013 MWh. Taking into account the internal efficiency of 2.5% for the Goseong power plant's ocean tidal power over the last year (April 2022 to March 2023), and the existing operational efficiency of 70.0% for the Samcheonpo power plant's ocean tidal power, the estimated annual transmission amount is 15,706 MWh

3.6 The Selection of the Turbine

In hydropower generation, various types of turbines are used, including the Pelton turbine, Francis turbine, and Propeller turbine, each with its distinct characteristics:

(1) Pelton turbine: The Pelton turbine operates at high water heads (the difference in water levels) and is commonly used in mountainous areas. The core component of this turbine is the

Pelton wheel, which consists of one or more separate nozzles. The wheel has multiple cup-shaped blades, and as the water stream from the nozzles hits the blades, it changes direction and causes the wheel to rotate. The Pelton turbine exhibits high efficiency and can generate significant torque even at low flow rates.

(2) Francis turbine: The Francis turbine utilizes both water pressure and velocity to operate. It typically works at medium water heads and is the most widely used type of turbine. The Francis turbine comprises a rotating runner and a fixed stator. Water flows through the stator's guide vanes, gaining pressure and velocity, and then imparts energy to the rotating runner, causing it to spin. The Francis turbine can efficiently operate across a wide range of water heads and flow rates.

(3) Propeller turbine: The Propeller turbine, unlike other turbine types, has a large-diameter propeller-like rotor and is suitable for effectively operating with high flow rates and low water heads. As a result, it is considered suitable for the subject of this study, the tidal power plant in Samcheonpo.

The main characteristics of the Propeller turbine are as follows:

High flow capacity: The Propeller turbine is specialized in handling large volumes of water and is commonly used in water supply power plants and pumping stations.

Low water head suitability: The Propeller turbine operates effectively at low water heads. It can efficiently extract the energy from the water even when the difference in water levels is not significant.

Low rotational speed: The Propeller turbine operates at relatively low rotational speeds compared to other turbine types. This is achieved by using a large-diameter propeller rotor.

Relatively lower efficiency: In some cases, the Propeller turbine may have relatively lower efficiency compared to other turbine types. Hence, for this study, the suitable type of penstock is considered to be the Propeller penstock

4. Economic Analysis

In this study, the economic analysis of the small hydropower plant under consideration will be conducted using the benefit-cost analysis method for hydropower plants adopted by the Korea Institute of Energy Research [10]. Long-term investment projects such as hydropower development often rely on the benefit-cost ratio, which calculates the present value of the cash flow of benefits obtained from the investment costs over the operation period of the power plant. If the total benefits exceed the total

costs, the project is deemed to be beneficial. Through this analysis, factors such as benefit-cost ratio and payback period can be determined, aiding in the assessment of the project's feasibility based on various parameters, including the installed capacity and construction costs.

The initial investment cost C_0 for hydropower development can be divided into direct costs and indirect costs. Direct costs include expenses related to civil works, mechanical and electrical equipment, and auxiliary buildings for the power plant, while indirect costs include design fees, permits, and construction supervision fees, among others. If the small hydropower plant is operated for N years, the total investment cost includes the initial investment cost C_0 and the financial costs incurred over N years, as well as the annual operation and maintenance expenses for the power plant. Therefore, when assuming the operating period of the hydropower plant as N years, the total investment cost C_{input} after N years can be calculated using Eq. (7):

$$c_{input} = C_0(1+r)^N + \sum_{i=1}^N \frac{A}{(1+r)^i} \quad [\text{KRW}] \quad (7)$$

where A represents the predicted annual operation and maintenance expenses (OM) at the N -year point, r is the annual interest rate. The annual operation and maintenance expenses A should include costs for operational and maintenance activities. However, predicting these costs precisely can be challenging. Therefore, in the study, the research applied the operation and maintenance cost ratio for renewable energy facilities provided by the Korea Institute of Energy Research. Therefore, the total investment cost C_{input} at the N -year point can be calculated using Eq. (8) as follows:

$$C_{input} = C_0 \left\{ (1+r)^N + \sum_{i=1}^N \frac{r_m}{(1+r)^i} \right\} \quad [\text{KRW}] \quad (8)$$

where the initial investment cost C_0 is assumed to be 25 billion KRW, and the annual interest rate r is set at 4.0% based on the Bank of Korea's benchmark rate for the past 15 years. The operation and maintenance cost ratio r_m is applied as 2% of the initial investment cost. To calculate the revenue generated through the operation of the hydropower plant, factors such as the generated electricity and the selling price of electricity must be considered. Therefore, the total revenue over N years C_{output} is calculated as shown in Eq. (9).

$$C_{output} = E_a \cdot \sum_{i=1}^N C_i (1+r)^{i-1} \quad [\text{KRW}] \quad (9)$$

where E_a is the annual electricity production [MWh], which is calculated to be 15,706 MWh based on the hydropower generation estimation from section 3.5. Additionally, C_i represents the annual

Table 5 Expected SMP cost and REC cost unit : KRW/MWh

Year	$C_{SMP,i}$	$C_{REC,i}$
2022	89,730	98,140
2023	96,170	92,730
2024	99,060	92,360
2025	102,270	88,250
2026	108,350	82,000
2027	108,340	83,080
2028	109,630	81,370
2029	114,420	76,280
2030	116,550	75,160
2031	116,480	74,880
2032	118,780	73,270
2033	119,920	72,570
2034	122,360	71,460
2035~	123,770	70,280

electricity selling price [KRW/MWh], which can be expressed as shown in Eq. (10).

$$C_i = C_{SMP,i} + \mu \cdot C_{REC,i} \text{ [KRW/MWh]} \quad (10)$$

where $C_{SMP,i}$, $C_{REC,i}$ represent the annual SMP (System Marginal Price) electricity price and REC (Renewable Energy Certificate) electricity price for each year, respectively. μ is the REC weight for hydropower generation, which is given as 1.2. The annual SMP electricity price and REC electricity price are based on the forecasts conducted by the Korea Electric Power Corporation (KEPCO), as shown in Table 5.

Additionally, the Return on Investment (ROI) for the proposed hydropower plant can be defined as shown in Eq. (11).

$$ROI = \frac{C_{output}}{C_{input}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (11)$$

When the Return on Investment (ROI) for the hydropower plant is greater than 100%, it is considered economically feasible. The ROI represents the ratio of the total revenue to the total investment cost for the hydropower plant.

The point at which the ROI reaches 100% can be defined as the Payback Period, which is the time it takes for the total revenue to equal the total investment cost for the hydropower plant.

Table 6 compares the N -year total investment cost C_{input} calculated using equation (8), the total revenue over N years C_{output} calculated using equation (9), and the ROI for each year. And Fig. 2 is a graph representing the C_{input} and the C_{output} from Table 6.

Table 6 Total input cost, total output income, and ROI

Year	C_{input} (10^8 KRW)	C_{output} (10^8 KRW)	ROI [%]
0	250	0	0
1	265	35	13
2	280	72	26
3	295	109	37
4	311	147	47
5	326	188	58
6	343	229	67
7	359	272	76
8	376	318	85
9	393	365	93
10	411	415	101
11	429	466	109
12	447	522	117
13	466	578	124
14	485	636	131
15	506	696	138
16	527	759	144
17	548	824	150
18	570	892	156
19	592	962	162

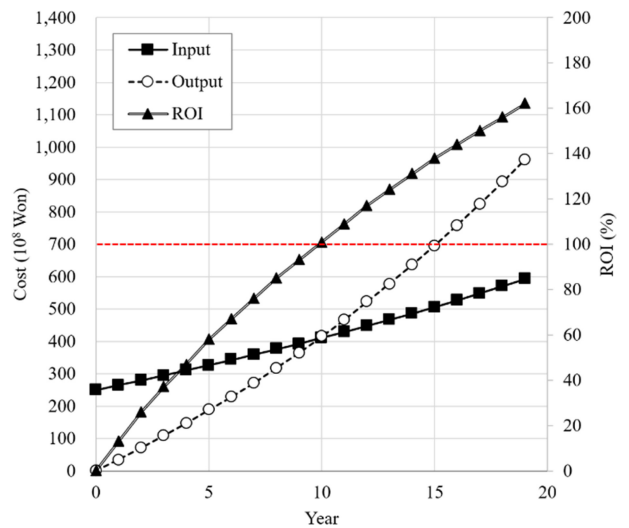


Fig. 2 The input cost and the output income (red line indicates the ROI 100%)

From 10 years after construction, the total revenue starts to exceed the total investment cost, meaning $C_{output} > C_{input}$. Therefore, it takes 10 years after the new construction and normal operation to begin recovering the investment cost, and after that,

profit is generated. After 15 years, the project starts to generate more than 50% profit of the initial investment cost. Thus, based on this study, the payback period for the construction cost of 250 billion won is 10 years.

5. Conclusion

We conducted an economic feasibility analysis study on the additional construction of a small hydropower plant, utilizing the head energy of the discharged near the Samcheonpo Power Plant's area. It is determined that the economic analysis of the hydropower plant is achieved, with a Return on Investment (ROI) exceeding 100% starting from the 10th year of its normal operation. The results of the economic analysis can serve as fundamental data for future site selection and design decisions regarding small hydropower projects.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korean Government (MOTIE) (No. 20214000000520, NZM).

REFERENCES

1. Korea Meteorological Administration, (2023), 2022 An Abnormal Climate Report, (ISSN 2765-2750). <https://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=40408>
2. Lim, B., Hong, K., Yoon, J., Chang, J.-I., Cheong, I., (2021), Pitfalls of the EU's carbon border adjustment mechanism, *Energies*, 14(21), 7303.
3. Bacchus, J., (2021), Legal issues with the European carbon border adjustment mechanism, *CATO Briefing Paper*, 125, 3-6.
4. Kulovesi, K., van Asselt, H., (2020), Three decades of learning-by-doing: the evolving climate change mitigation policy of the European Union, *Climate and Energy Policies in the EU, China and Korea-Transition, Policy Cooperation and Linkage* (Edward Elgar Forthcoming). <https://ssrn.com/abstract=3859498>
5. Jantasuto, O., (2015), Review of small hydropower system, *International Journal of Advanced Culture Technology (IJACT)*, 3(1), 101-112. <https://www.earticle.net/Article/A253533>
6. Spänhoff, B., (2014), Current status and future prospects of hydropower in Saxony (Germany) compared to trends in Germany, the European Union and the World, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 518-525.
7. Paish, O., (2002), Small hydro power: Technology and current status, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 537-556.
8. Korea Energy Agency New Renewable Energy Center, (2008), Presentations of the second initiative meeting on the supply of new renewable energy to local areas. <https://www.knrec.or.kr/biz/pds/pds/view.do?no=182>
9. Korea Ministry of Strategy and Finance-Korea Institute of Energy Research, (2007), Economic analysis of renewable energy (final report) (UCL G701:E-00067372697). <https://www.nl.go.kr/NL/onlineFileIdDownload.do?fileId=FILE-00008503101>
10. Lee, Y., Seo, I., (2019), Sustainability of a policy instrument: Rethinking the renewable portfolio standard in South Korea, *Sustainability*, 11(11), 3082.
11. Kim, C.-M., Kim, K.-Y., (2008), A study on economic analysis of new renewable energy power (photovoltaic, wind power, small hydro, biogas), *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 28(6), 70-77.
12. Jeoune, D.-S., Kim, J.-Y., Kim, H.-G., Kim, J., Youm, C., Shin, K.-Y., (2019), Development of economic evaluation solution and power prediction of renewable energy system, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 39(6), 93-112.
13. Zema, D. A., Nicotra, A., Tamburino, V., Zimbone, S. M., (2016), A simple method to evaluate the technical and economic feasibility of micro hydro power plants in existing irrigation systems, *Renewable Energy*, 85(1), 498-506.
14. Ozigis, I. I., Oodo, S., Muhammad, I., (2019), A feasibility study of mini-hydroelectric power plant for seasonal base load, *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, 15(SPI2), 124-145.
15. White, F., (2021), *Fluid Mechanics 9th Edition*, McGraw-Hill.



Dong Oak Lee

Assistant manager in the Gosung Generation Division, Plant Management Team, Korea South-East Power Co., Ltd.. His research interest is renewable energy and physics.
E-mail: dongoak17@koenergy.kr



Chang Il Roh

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is machinery design and structural analysis.
E-mail: gnurci7@naver.com



Won-Shik Chu

Associate Professor in the Department of Mechanical Convergence Engineering, and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University. His research interest is manufacturing processes, 3D printing, machining, and soft actuators/robots.
E-mail: wschu@gnu.ac.kr



Chul Ki Song

Professor in the School of Mechanical Engineering, and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University. His research interests are vibration control, system dynamics, and power train.
E-mail: cksong@gnu.ac.kr

CFRP와 접합된 Al6061-T6 시편의 쇼트피닝 커버리지에 따른 전단 특성 연구

A Study on the Shear Characteristics based on the Coverage of Shot-peened Al6061-T6 Bonded with CFRP

김홍석¹, 박준형¹, 성강민¹, 강범준¹, 정성균¹, 신기훈^{1,#}
Hong Seok Kim¹, Joon-Hyung Park¹, Gang-Min Sung¹, Beom-Joon Kang¹, Seong-Kyun Cheong¹, and Ki-Hoon Shin^{1,#}

¹ 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: shinkh@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6320
ORCID:0000-0001-9081-9455

KEYWORDS: CFRP (탄소섬유 강화 플라스틱), Shot peening coverage (쇼트피닝 커버리지), Bonding strength (접합강도), Surface roughness (표면 거칠기)

In this study, a new method of bonding CFRP and Al6061-T6 with epoxy adhesive after shot-peening treatment on the surface of Al6061-T6 specimens was proposed to improve bonding strength of a single lap joint between CFRP and Al6061-T6. More specifically, correlation between shot peening coverage on the Al6061-T6 surface and bonding strength with CFRP was experimentally analyzed. Experimental results showed that the surface roughness and the bonding strength increased as the peening time on the surface of Al6061-T6 increased up to a specific peening time (or coverage). However, the surface roughness and bonding strength decreased again under an over-peening condition of 480 seconds (300% coverage) or more. Therefore, it is necessary to search for the optimal peening time that can maximize bonding strength as well as the fatigue life of parts at a peening time between 320 (200%) and 480 s (300%) through additional experiments in future studies.

Manuscript received: July 28, 2023 / Revised: October 16, 2023 / Accepted: October 19, 2023
This paper was presented at KSPE Spring Conference 2023

1. 서론

최근 탄소배출 규제와 환경오염 규제로 인해 자동차 산업 또한 내연기관 자동차에서 전기차로 빠르게 변화하고 있다. 하지만 전기차는 일반적으로 배터리, 전기모터 때문에 내연기관 자동차보다 24% 무겁다. 무게 증가에 따른 타이어 마모 증가로 인해 미세먼지가 추가적으로 발생하여 차량 경량화를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 일반적으로 자동차나 항공산업에서는 경량화를 위해 탄소섬유강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)이 널리 사용되고 있다. 이러한 CFRP로 제작된 부품은 또한 금속 부품과 직간접적으로 연결될 필요가 있기 때문에 CFRP와 금속 부품과의 접합이 점점 중요해지고 있다. CFRP와 금속 부품을 접합하는 방법으로는 리벳팅

(Riveting), 접착 결합(Adhesive Bonding) 및 하이브리드 방법 등 다양한 연구가 진행되고 있다[3-5].

Matsuzaki [3] 등은 알루미늄 합금 A5052-F와 니트 직물 유리 에폭시 복합재료를 볼트와 경화(Curing) 두 가지 방법을 복합적으로 적용하여 접합연구를 수행하였다. 이러한 하이브리드 방법으로 일반적인 경화 접합에 비해 접합 전단강도를 1.84배 정도 향상시킨 결과를 발표하였다.

Kim [4] 등의 연구에서는 CFRP의 표면에 강력한 펄스 광(Intense Pulsed Light)을 조사하는 기계적이고 화학적인 표면처리를 통하여 CFRP와 Al6061-T6의 접합 전단강도가 최대 1.59배 향상되는 결과를 확인하였다.

Chen [5] 등은 리벳, 접착 접합, 하이브리드 접합에서의 중요한 설계 요소(겹침길이, 리벳 직경, 접착제 두께)가 CFRP/

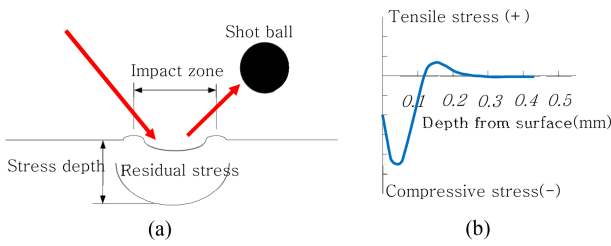


Fig. 1 Shot-peening process (a) Impact zone, (b) Residual stress

Al6061-T6 단일 랩 조인트(Single Lap Joint)의 진행성 파손 프로세스에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 CFRP와 경량금속인 Al6061-T6간의 단일 겹침 조인트 접합강도를 향상시킬 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 자동차, 항공기 등의 경량화 및 피로수명 향상기술로 널리 알려진 쇼트 피닝(Shot Peening) 기술을 적용한 Al6061-T6 시편을 CFRP와 접착하여 접합강도를 개선하였다. 이 때 Al6061-T6의 쇼트피닝처리 정도[6-10]에 따른 접합강도[3,4,11-15]를 커버리지(Coverage)를 변수로 하여 실험적으로 비교분석하였다.

쇼트피닝은 Fig. 1(a)와 같이 쇼트볼(Shot Ball)이라고 불리는 강구를 금속 표면에 투사하여 햄머링(Hammering)하는 냉간단조 가공으로 금속의 극표면 부위에 Fig. 1(b)와 같은 압축잔류응력(Compressive Residual Stress)을 생성하여 내피로를 받는 부품의 피로수명을 증가시키는 가공방법이다. 쇼트볼이 금속에 고속으로 충돌할 때의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성변형을 일으키며, 소성변형에 의해 늘어난 표면층에는 이전의 상태로 돌아가려는 힘이 작용하여 형성된 압축잔류응력이 내부의 인장응력(Tensile Stress)과 평형을 이루게 된다.

궁극적으로는 본 연구에서와 같이, CFRP와 Al6061-T6 간의 이중접합에서 Al6061-T6 표면에 쇼트피닝 처리를 함으로써 접합강도뿐만 아니라 Al6061-T6 부품의 피로수명도 동시에 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 시편제작

CFRP 적층판은 오토클레이브(Autoclave)를 사용하여 5.0 kgf/cm²의 압력하에서, 120°C로 90분 동안 가열한 후 냉각하여 제작하였다. 제작된 CFRP 적층판은 ASTM D1002 규격에 의한 전단시험 규격에 적합하게 절단한 후 접착부위에 사포(#220)로 0, 45, 90, -45° 각도로 일정하게 10회씩 연마하였다. Al6061-T6 시험편도 절단한 후 아래의 시험편 Type 1-3별로 표면처리를 하였다.

쇼트피닝 커버리지가 접합강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 접착 전에 CFRP와 Al6061-T6 시편 표면처리에 따른 세가지 형태의 시험편을 제작하였다. CFRP 표면은 사포로 연마하고, Al6061-T6 표면은 미처리한 시편을 Type 1, CFRP 표면은 사포로

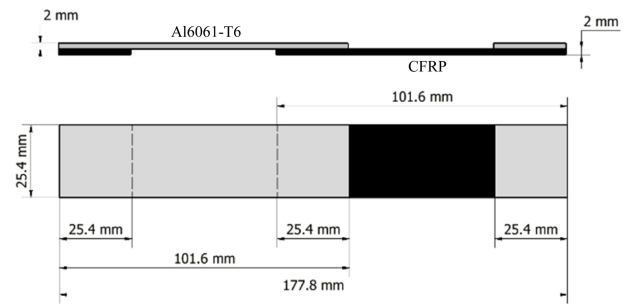


Fig. 2 Dimension of test specimens (ASTM D1002)

연마하고, Al6061-T6 표면도 사포로 연마한 시편을 Type 2, CFRP 표면은 사포로 연마하고, Al6061-T6 표면은 쇼트피닝 가공한 시편을 Type 3로 정의하였다. 쇼트피닝 가공한 Al6061-T6의 경우 피닝시간(Peening Time)을 각기 달리하여 피닝 처리하였다. 쇼트피닝 처리에는 직경 0.8 mm의 컷 와이어 타입의 쇼트볼과 임펠러 회전식 쇼트피닝머신(PMI-0608)을 사용하였다. 피닝시편의 경우 피닝시간에 따른 표면거칠기를 분석하기 위하여 Carl Zeiss 사의 LSM800 모델의 공초점현미경(Confocal Microscope)을 사용하여 3차원 형상을 획득하였으며, 각 조건별로 중심평균거칠기(Ra, μm)를 사전에 측정하였다.

각기 다른 조건으로 표면처리된 Al6061-T6와 CFRP 시편 접착면을 알코올로 세척한 후, 3M 사의 DP460 에폭시 접착제를 사용해서 24시간 경화하여 Fig. 2와 같이 각 조건별로 5개씩의 인장시편을 제작하였다.

각각의 표면처리 조건별로 접착 강도를 확인하기 위해 만능인장시험기(UTM)를 사용하여 인장시험을 진행하였다. ASTM D1002 규격에 따라 1.3 mm/min 인장속도로 시편이 파단될 때의 하중을 측정하고, 접착면적(25.4 × 25.4 mm)으로 나누어 최종 접합 전단강도를 측정하였다.

2.2 쇼트피닝 커버리지(Shot-peening Coverage) 계산

Al6061-T6 표면에서의 쇼트피닝 커버리지가 CFRP와의 접합강도에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 피닝시간과 커버리지 간의 상관관계식 유도가 필요하다.

초기 쇼트피닝 처리되지 않은 전체 표면적을 S, 피닝 가공 면적을 A라고 하면, 기준시간 t₁ 동안의 쇼트볼 충돌에 의한 커버리지 C₁ (0 ≤ C₁ ≤ 1)은 식(1)과 같이 간단히 계산되며, 기준시간의 2배에 해당하는 t₂(= 2t₁) 동안의 커버리지 C₂는 식(2)와 같이 아직 가공되지 않은 표면을 가공할 확률로부터 유도할 수 있다[6,7].

$$C_1 = \frac{A}{S} \tag{1}$$

$$C_2 = C_1 + (1 - C_1)C_1 \tag{2}$$

같은 원리로 기준시간의 n배에 해당하는 t_n(= nt₁) 동안 쇼트볼 충돌에 의한 커버리지 C_n은 식(3)과 같이 일반화하여 계산된다.

$$C_n = C_{n-1} + (1 - C_{n-1})C_1 = 1 - (1 - C_1)(1 - C_{n-1}) \quad (3)$$

식(3)의 C_n 은 식(4)과 같이 최종적으로 유도될 수 있다.

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n \quad (4)$$

3. 실험결과 및 고찰

피닝시간과 커버리지의 상관관계식을 계산하기 위해서, Al6061-T6 시편(177.8 × 25.4 × 2 mm)을 (주)세명 쇼트기계의 임펠러식 쇼트피닝 머신(PMI-0608)으로 단위 시간별(10, 20, 30 sec)로 노출하여 쇼트피닝 가공처리하였다. 구체적으로 직경 0.8 mm 컷 와이어 쇼트볼을 40 m/sec의 속도로 상, 하 2개의 임펠러에 의해 24 kg/min의 공급속도로 투사하여 가공하였다. 쇼트피닝 가공시간 동안 턴 테이블(Turntable)은 12 RPM의 일정한 속도로 회전하게 된다. Fig. 3은 쇼트피닝 머신의 내부 챔버를 보여주고 있다.

피닝처리된 시편표면의 이미지를 광학현미경(Optical Microscope)으로 획득한 후, 일본 Mitani 사의 WinRoof 2021 소프트웨어를 이용하여 가공된 표면의 면적 비율을 계산하였다. Fig. 4에서 왼쪽 그림은 각 단위시간별로 피닝처리된 표면을 보여주고 있으며, 오른쪽 그림은 WinRoof 소프트웨어에서 계산된 유효 피닝면적을 녹색으로 보여주고 있다.

Fig. 5의 파란색 그래프는 기준시간 $t_1 (= 10 \text{ sec})$ 에서 WinRoof 소프트웨어로 평가된 $C_{1_exp} = 0.24868$ 을 식(4)에 대입하여 계산된 이론적인 피닝시간별 커버리지를 보여주고 있다. 이론적인 $C_2 = 0.43552$, $C_3 = 0.57589$ 은 Figs. 4(b), 4(c)의 실험 값 ($C_{2_exp} = 0.42005$, $C_{3_exp} = 0.55727$)보다 다소 큰 값으로 계산되나, 거의 일치함을 확인할 수 있다. 즉 $C_{1_exp} = 0.24868$ 로부터 계산된 이론적인 커버리지가 실제 실험으로 얻어지는 커버리지 (빨간색 그래프)보다 다소 과대평가될 수는 있다. 실제 기준시간 t_1 의 16배인 $t_{16} = 160 \text{ sec}$ 에서 이론적인 커버리지는 99%에 도달하기 때문에, 본 연구에서는 $t_{16} = 160 \text{ sec}$ 를 기준(커버리지 100%로 가정)으로 언더피닝(Under-peening)된 시편 및 오버피닝(Over-peening)된 시편들을 제작하고 공초점현미경을 이용하여 중심평균 표면거칠기 측정하였다.

구체적으로 커버리지 25, 50, 75, 99% (160 s)의 언더피닝 시편 및 200% (320 s), 300% (480 s), 450% (720 s), 600% (900 s)의 오버피닝 시편들을 제작하였다. 식(4)로부터 커버리지 25, 50, 75%에 해당하는 피닝시간은 초단위로 $C_1 = 10$, $C_{2.4} = 24$, $C_{4.8} = 48 \text{ sec}$ 로 계산되었다.

Fig. 6은 피닝시간별로 Al6061-T6 표면에서 요철의 변화를 확인할 수 있는 3D 공초점현미경 이미지를 보여주고 있다. 피닝 시간이 증가함에 따라 쇼트볼에 의해 생성되는 요철 형상의 변화를 쉽게 확인할 수 있다. 즉, 피닝시간에 따라 요철은 증가하다가 특징시간(480 s) 이후의 오버피닝 조건에서는 다소 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

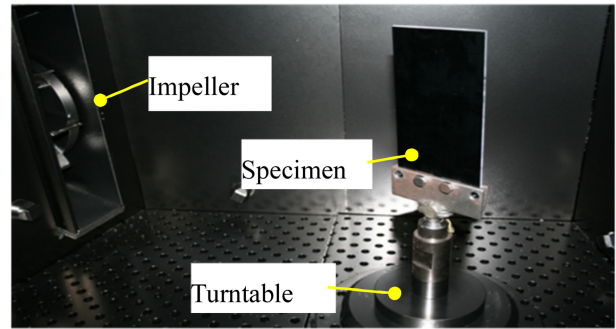


Fig. 3 Inner chamber of shot-peening machine (PMI-0608)

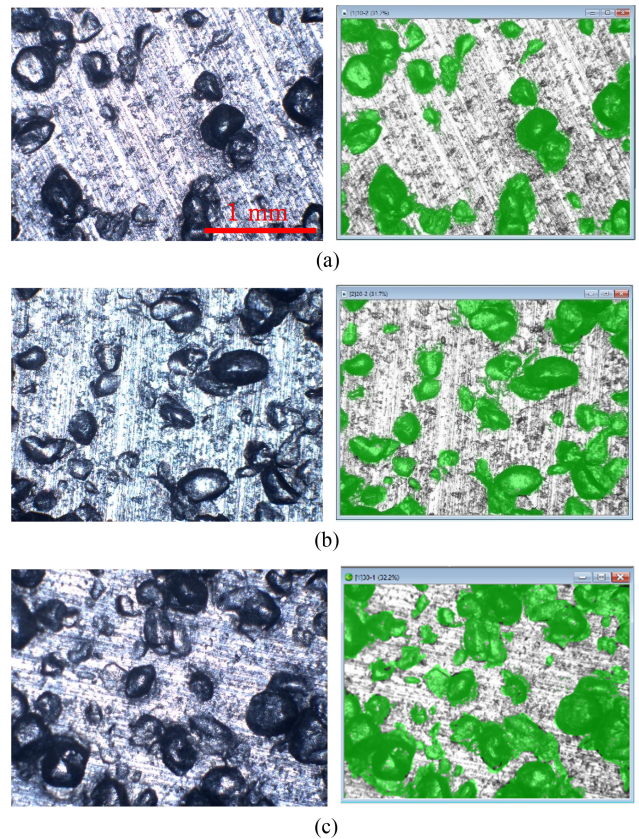


Fig. 4 Coverage obtained from optical images of shot-peened Al6061-T6 surfaces (a) 24.868% at 10 sec, (b) 42.005% at 20 sec, (c) 55.727% at 30 sec

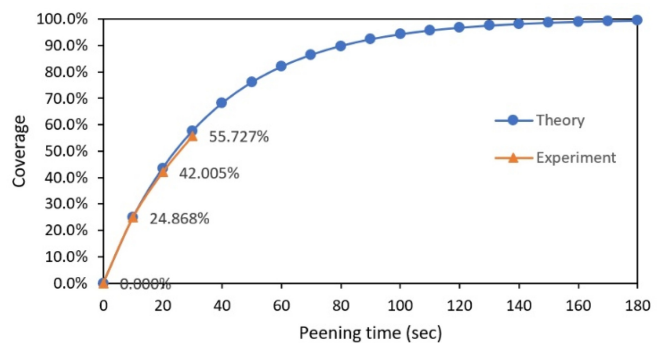


Fig. 5 Shot-peening coverage vs. shot-peening time

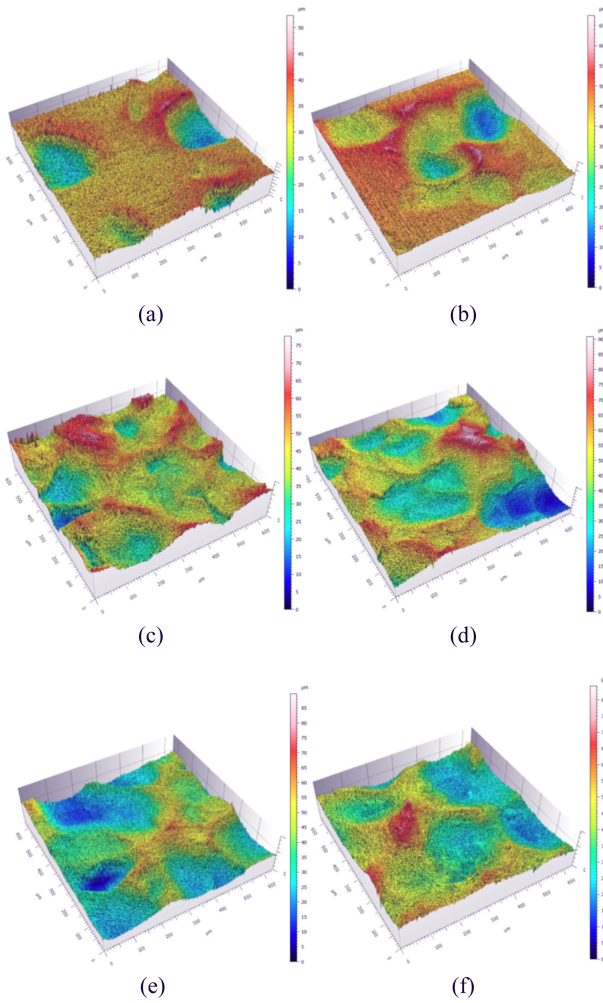


Fig. 6 3D surface images (600 × 600 μm) of Al6061-T6 specimens obtained by confocal microscope (a) 10 sec-0~50 μm scale, (b) 24 sec-0~65 μm scale, (c) 160 sec-0~75 μm scale, (d) 480 sec-0~90 μm scale, (e) 720 sec-0~85 μm scale, (f) 960 sec-0~80 μm scale

Fig. 7은 피닝시간별 Al6061-T6 시편의 3개 지점에서 공초점 현미경으로 측정된 중심선평균거칠기 평균값의 변화를 보여주고 있다. 언더피닝과 480 s 이하의 오버피닝 조건에서는 피닝시간이 증가함에 따라 쇼트볼에 의해 생성되는 Al6061-T6 표면상의 요철도 같이 증가하다가 480 s에서 최대가 되고, 더 이상의 오버피닝 조건에서는 다시 요철이 감소하는 것으로 나타났다. 10 s (25%) 피닝시간과 비교하여 480 s (300%)에서 표면거칠기가 거의 2배(1.92→3.76 μm) 증가하는 것으로 측정되었다.

Fig. 8은 Type 1 (Not-treated), Type 2 (Sand Paper-treated), 및 Type 3 (Al6061-T6 표면을 피닝시간을 달리하여 처리) CFRP/Al6061-T6 접합시편들의 전단강도 측정결과를 보여주고 있다.

Figs. 7과 8을 종합적으로 분석하면, Type 1 (Not-treated) 시편, Type 2 (Sand Paper-treated) 시편, Al6061-T6 커버리지 75% (48 s) 이하의 Type 3 시편들은 표면거칠기가 선형적으로

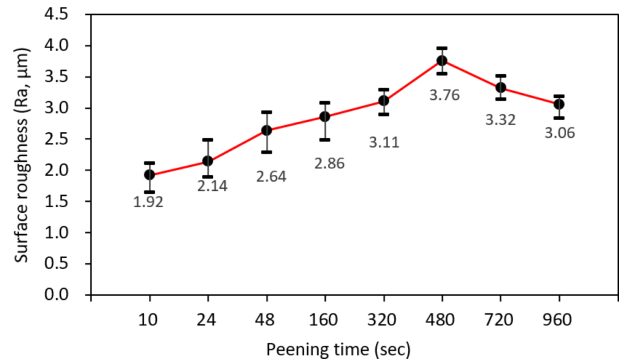


Fig. 7 Surface roughness (Ra, μm) by shot-peening time (sec)

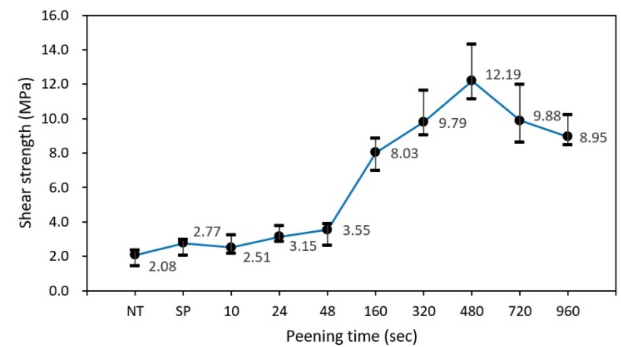


Fig. 8 Shear strength (MPa) by shot-peening time (sec)

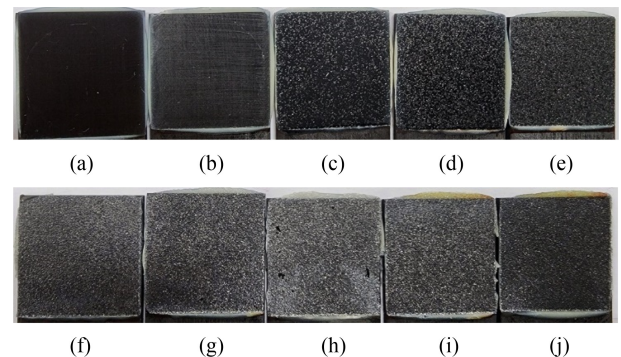


Fig. 9 2D Images of fractured surfaces of composite side (width 25.4 mm) (a) Not- treated, (b) Sand paper treated, (c) 10 sec, (d) 24 sec, (e) 48 sec, (f) 160 sec, (g) 320 sec, (h) 480 sec, (i) 720 sec, (j) 960 sec

증가하지만 접합강도 증가는 거의 미미한 것으로 나타났다. 커버리지 75% 이상의 Type 3 시편의 경우 피닝시간이 증가하면 표면거칠기가 증가하고, 전단강도도 증가하다가 480 s (300%)에서 최대가 되며, 480 s 이상의 오버피닝 조건에서는 표면거칠기 및 전단강도가 다시 감소하는 경향을 보였다.

Figs. 9, 10은 전단시험 결과 파단된 시편에서 CFRP 쪽 파단면을 보여주고 있다. Fig. 10은 CFRP 파단면의 200배 확대 이미지를 보여주고 있다.

모든 시편에서 파단은 에폭시와 Al6061-T6 경계면에서 발생하였다. 즉, Al6061-T6 표면에는 접착제가 거의 남아있지 않고,

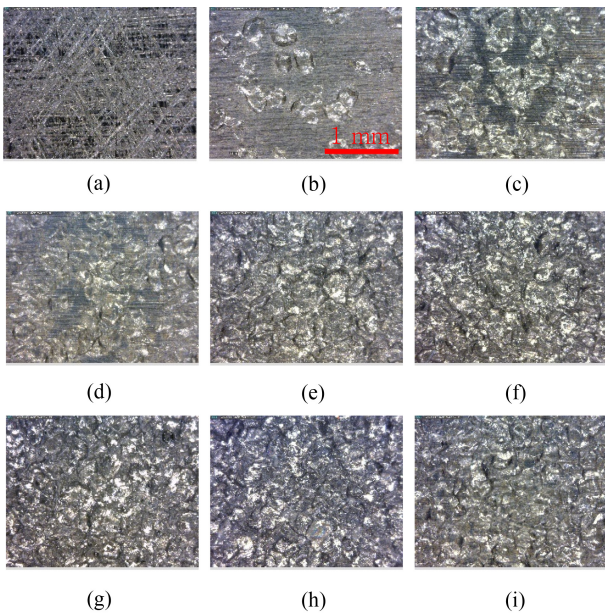


Fig. 10 Microscopic images (200 x) of fractured surfaces of composite side (a) Sand paper-treated, (b) 10 sec, (c) 24 sec, (d) 48 sec, (e) 160 sec, (f) 320 sec, (g) 480 sec, (h) 720 sec, (i) 960 sec

CFRP의 표면에 대부분의 접착제가 남아있는 접착파괴(Adhesive Failure)가 관찰되었다. 이는 CFRP와 Al6061-T6 간의 이종접합에서 접합강도는 에폭시와 Al6061-T6의 접합강도에 좌우됨을 의미한다. 이런 측면에서 Al6061-T6의 표면을 쇼트피닝 처리하여 접합강도와 피닝 시간에 따른 상관관계를 분석한 본 연구는 의미가 있다고 할 수 있다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 쇼트피닝 시간이 증가함에 따라 파단면에서 관찰되는 Al6061-T6 입자(Particle)의 양이 증가하다가 480 s 이후에는 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉 언더피닝 조건에서는 에폭시와 Al6061-T6 경계에서 정확하게 파단이 발생하지만, 160 s 이상의 오버피닝 조건에서는 쇼트피닝에 의해 생성된 Al6061-T6 표면 요철의 일부가 입자형태로 에폭시와 같이 파단되면서 전단강도가 증가하는 것으로 판단된다. 즉, Al6061-T6에 쇼트피닝 처리를 함으로써 CFRP와 접합되는 Al 합금 부품의 피로수명을 증가시키는 동시에 접합강도도 향상시킬 수 있다고 판단된다.

Figs. 7과 8에서 Type 1 (Not-treated) 시편, Type 2 (Sand Paper-treated) 시편, Al6061-T6 커버리지 75% (48 s) 이하의 Type 3 시편들은 표면거칠기가 선형적으로 증가하지만 접합강도 증가는 거의 미미한 것으로 나타났다. 이러한 결과의 원인은 이들 시편에서는 Al6061-T6 표면에 에폭시 접착제와의 접합강도를 증가시키기 위해 충분한 요철(에폭시로 채워지는 Al6061-T6 표면에서의 절대 접착면적)이 생성되지 않기 때문으로 판단된다.

Type 3 시편만을 고려할 때, 10 s (25%) 대비 480 s (300%) 피닝 조건에서 표면거칠기는 대략 2배(1.92→3.76 μm)로 증가하지만, 전단강도는 5배 (2.51→12.19 MPa) 향상되었다. 이는 쇼트피닝에 의해 생성된 Al6061-T6 표면 요철의 일부가 같이

전단 파단되면서 전체적인 전단강도가 증가하기 때문에 판단된다. 한편 480 s 이상의 오버 피닝 조건에서는 Al6061-T6 시편의 표면거칠기와 접합강도가 다시 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 480 s 이상의 피닝 조건에서는 에폭시와의 접합강도를 향상시키는 Al6061-T6 시편의 표면 요철이 Fig. 6의 공초점현미경 이미지에서와 같이 다시 감소하기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 CFRP와 대표적인 경량금속인 Al6061-T6 간의 단일 겹침 조인트의 접합강도를 향상시킬 수 있는 새로운 방법으로 쇼트 피닝 표면 처리한 Al6061-T6 시편을 CFRP와 에폭시로 접착하고 Al6061-T6 표면에서의 쇼트피닝 커버리지와 접합강도 간의 상관관계에 대한 분석을 실험적으로 수행하였다.

실험 결과 Al6061-T6 표면에서의 피닝시간이 증가할수록 표면거칠기가 증가하여 CFRP와의 접합강도가 동시에 증가하는 경향을 확인하였다. 하지만 480 s (300%) 이상의 오버피닝 조건에서는 표면거칠기와 접합강도가 다시 감소함을 확인하였다. 일반적으로 피닝에 의한 피로수명은 200% 커버리지까지 증가하다가 더 이상의 피닝 조건에서는 감소하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 향후 추가적인 실험을 통해 320 (200%)-480 s (300%) 사이의 피닝 시간에서 부품의 피로수명과 접합강도를 극대화할 수 있는 최적 피닝 시간의 탐색 연구가 필요하다. 또 다른 방법으로 비접합부위와 접합부위의 피닝 시간을 달리하여 금속부품의 피로수명과 CFRP와의 접합강도 모두를 극대화할 수도 있는 방법에 대한 추가 연구도 필요하다고 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the Research Program funded by the SeoulTech (Seoul National University of Science and Technology).

REFERENCES

1. Chen, Y., Yang, X., Li, M., Mei, M., (2019), Influence of working temperatures on mechanical behavior of hybrid joints with carbon fiber reinforced plastic/aluminum lightweight materials for automotive structure, *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 392-407.
2. Sun, G., Chen, D., Zhu, G., Li, Q., (2022), Lightweight hybrid materials and structures for energy absorption: A state-of-the-art review and outlook, *Thin-Walled Structures*, 172, 108760.
3. Matsuzaki, R., Shibata, M., Todoroki, A., (2008), Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/

co-cured hybrid method, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(2), 154-163.

4. Kim, J.-H., Lee, C.-J., Min, K. D., Hwang, B.-U., Kang, D. G., Choi, D. H., Joo, J., Jung, S.-B., (2021), Intense pulsed light surface treatment for improving adhesive bonding of aluminum and carbon fiber reinforced plastic (CFRP), *Composite Structures*, 258, 113364.
5. Chen, Y., Li, M., Yang, X., Luo, W., (2020), Damage and failure characteristics of CFRP/aluminum single lap joints designed for lightweight applications, *Thin-Walled Structures*, 153, 106802.
6. Kirk, D., (2005), Theoretical principles of shot peening coverage, *Shot Peener*, 19(2), 24-26.
7. Shin, K.-H., (2014), Simulation of surface coverage made by impeller type shot-peening machines, *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, 19(1), 12-18.
8. Lin, Q., Liu, H., Zhu, C., Parker, R. G., (2019), Investigation on the effect of shot peening coverage on the surface integrity, *Applied Surface Science*, 489, 66-72.
9. Wu, J., Liu, H., Wei, P., Lin, Q., Zhou, S., (2020), Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel, *International Journal of Mechanical Sciences*, 183, 105785.
10. Qian, W., Wang, Y., Liu, K., Yin, X., He, X., Xie, L., (2023), Experimental study on the effect of shot peening and re-shot peening on the residual stress distribution and fatigue life of 20CrMnTi, *Coatings*, 13(7), 1210.
11. Choi, D. C., Han, Y. G., Hong, M. C., Cheong, S. K., Shin, K. H., Na, K. J., Jeong, J. S., Ryu, H. H., (2022), A study on the shear characteristics of the welding zone in the laser transmission welding of heterogeneous polymer materials, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(6), 417-423.
12. Choi, D., Shin, K., Han, Y., Hong, M., Cheong, S., Jeong, J., Na, K., Ryu, H., (2021), Experimental evaluation of defects in laser-transmission welding of heterogeneous polymer materials, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 30(2), 134-141.
13. Kim, H. S., Shin, K.-H., (2014), Material pixel-based process planning for layered manufacturing of heterogeneous objects, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(11), 2421-2427.
14. Shin, K.-H., (2019), A method for representation and analysis of conformal cooling channels in molds made of functionally graded tool steel/Cu materials, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(4), 1743-1750.
15. Wang, H., Shin, K.-H., Kim, H. S., (2023), Development and characterization of Ni60 alloy and SiC ceramic reinforced metal matrix composite coating on Ti-6Al-4V using laser cladding with coaxial powder feeding system, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(5-6), 2705-2718.



Hong Seok Kim

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is laser applications.
E-mail: hongseok@seoultech.ac.kr



Joon-Hyung Park

B.Sc. student in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology.
E-mail: hyeong7171@daum.net



Gang-Min Sung

B.Sc. student in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology.
E-mail: eksvndskan97@naver.com



Beom-Joon Kang

B.Sc. student in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology.
E-mail: qep5889@naver.com



Seong-Kyun Cheong

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is composite materials.
E-mail: skjung@seoultech.ac.kr



Ki-Hoon Shin

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is laser-aided metal 3D printing.
E-mail: shinkh@seoultech.ac.kr

산업근로자를 위한 웨어러블 고관절 보조 로봇의 보행 효율성 검증: 예비연구

Verification of Walking Efficiency of Wearable Hip Assist Robot for Industrial Workers: A Preliminary Study

장윤희^{1,#}, 강정선¹, 정보라¹, 임복만², 최병준², 이연백²
Yun Hee Chang^{1,#}, Jung Sun Kang¹, Bo Ra Jeong¹, Bok Man Lim², Byung June Choi², and Youn Baek Lee²

¹ 근로복지공단 재활공학연구소 (Korea Compensation and Welfare, Rehabilitation Engineering Research Institute)

² (주)위로보틱스 (WIRobotics Incorporation)

Corresponding Author / E-mail: yhchang2@comwel.or.kr, TEL: +82-32-509-5249

ORCID: 0000-0001-7331-8595

KEYWORDS: Wearable hip assist robot (착용형 고관절 보조 로봇), Industrial workers (산업 근로자), Treadmill walking (트레드밀 보행), Up-stair walking (상행계단보행), Muscle fatigue (근피로), Metabolic energy cost (대사 에너지 비용)

In highly mobile workplaces, wearable walking assistant robots can reduce muscle fatigue in the lower extremities of workers and increase energy efficiency. In this study, walking efficiency according to the development of an ultralight wearable hip-assist robot for industrial workers was verified. Five healthy adult males participated in this study. Their muscle fatigue and energy consumption were compared with and without the robot while walking on a flat treadmill and stairs. When walking on the treadmill while wearing the robot, muscle fatigue in the rectus femoris and gastrocnemius decreased by 90.2% and 37.7%, respectively. Oxygen uptake and energy expenditure per minute also decreased by 8.9% and 13.1%, respectively. When climbing stairs while wearing the robot, fatigue of the tibialis anterior, semitendinosus, and gastrocnemius muscles decreased by 18.2%, 33.3%, and 63.6%, respectively. Oxygen uptake and energy expenditure per minute also decreased by 3.6% and 3.7%, respectively. Although wearing a hip-assist robot could reduce muscle fatigue and use metabolic energy more efficiently, it is necessary to further increase the energy efficiency while climbing stairs. This study is intended to provide basic data to improve the performance of robots.

Manuscript received: August 29, 2023 / Revised: November 23, 2023 / Accepted: November 29, 2023
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2023

1. 서론

지금까지 웨어러블 로봇 시장은 노약자 및 장애인을 위한 의료재활 분야를 중심으로 높은 성장률을 보였지만, 최근에는 산업현장에서의 생산성 향상을 목적으로 로봇 수요가 크게 증가하고 있다. 산업현장 내 근골격계 질환 예방, 피로감소 및 생산성 향상을 위해 웨어러블 로봇의 적용에 대한 관심이 증가하면서 물류, 제조, 건설, 서비스 등 산업 전반으로 그 영역이 확산되고 있다[1,2].

산업현장 근로자의 작업지원을 위한 웨어러블 로봇은 상지,

하지 및 허리 보조로봇으로 나뉜다. 허리 보조 로봇은 반복적인 들기, 내리기 작업을 보조함으로써 요통과 같은 근골격계 질환 예방에 효과적이며[3,4], 상지 보조 로봇은 물류 및 제조업 분야에서 상향작업을 보조함으로써 어깨 통증이나 근피로를 줄일 수 있다[5]. 또한 보행을 보조하는 하지보조로봇은 의료재활분야에서 많이 활용하고 있으며 하지의 근력을 보조하여 근피로 감소 및 에너지 효율성을 향상시킨다고 보고되었다[6-8].

대표적인 하지 외골격형 보행보조로봇으로는 Ekso Bionics사의 EksoGT [9], Rewalk Robotics사의 Rewalk [10], Parker Hannifin의 Indego [11] 등이 대표적이다. 그러나 외골격 기술의

놀라운 발전에도 불구하고 외골격은 여전히 연구실이나 값비싼 재활 치료에만 사용되고 있다. 이렇듯 외골격 로봇의 접근성이 제한되는 가장 큰 이유는 로봇의 복잡성으로 인한 비용, 무게 및 크기의 증가 때문이다. 로봇의 복잡성은 인간의 팔다리와 관절의 복잡한 움직임을 정확하게 수반하는 견고한 외골격의 필요성에서 비롯된다[12]. 외골격 관절과 사용자 관절 사이의 정렬 불량은 통제되지 않은 상호 작용력을 발생시켜 착용자의 이동성과 신진대사에 부정적인 영향을 미치고[13], 불편함을 유발하는 것으로 알려져 있다[14].

대부분의 외골격형 보행보조 로봇은 힘으로 이동을 보조하기 때문에 무겁고 단단해 착용자의 자연스러운 움직임을 방해할 수 있으며, 특히 힘이 차단된 경우 부담으로 작용하는 경우가 많다. 결과적으로 로봇 착용 후 피로도가 많이 발생하여 적극적인 신체활동이 요구되는 산업 현장이나 일상생활의 적용에는 한계가 있다[15,16]. 이러한 이유로 산업 현장에 적용할 수 있는 외골격 장치는 가볍고, 유연하며, 착용이 용이하고, 소음이 적어야 하며, 전원이 차단되더라도 착용자의 움직임을 방해하지 않도록 설계되어야 한다.

최근에는 이러한 요구사항을 반영하여 좀 더 가볍고 유연한 외골격 장치들이 개발되고 있다. 최근 연구에서 Lee 등(2017)은 Rigid 타입의 중량 2.8 kg 고관절 외골격(GEMS) 제품을 소개하였으며[6], Kim 등(2022)의 연구에서는 중량 2.31 kg의 소프트 타입 엑소 슈트가 소개된 바 있다[17].

앞서 언급한 바와 같이 외골격 장치가 산업현장에서 효율적으로 사용된다면 외골격의 경량화는 필수이며, 더불어 에너지 효율성 측면의 보조 성능도 우수하여야 한다. 이러한 점을 반영하여 대한민국의 (주)위로보틱스는 산업현장 근로자의 이동 지원을 위해 휴대가 용이하고 착탈의 편의성을 개선한 초경량(1.4 kg) 고관절 외골격 장치(We Innovate Mobility, WIM)를 개발하였으며, 이에 장치개발에 따른 효과성 검증이 요구된다.

보행보조로봇의 효과와 관련된 선행 연구에서는 대부분 하지의 근활성도[6,7]나 근피로도[18], 보행 중 에너지 효율성을 검증하였다. Lee 등(2017)은 고관절 보조 로봇이 노인의 보행 기능과 심폐대사 효율성을 향상시킨다고 하였으며[6], Kim 등(2018)은 고관절 보조 로봇이 계단보행에서 심폐대사 소비를 감소시킨다고 보고하였다[7].

따라서 본 연구에서는 산업용 초경량 웨어러블 보행보조 장치의 효과성을 검증하고자, 건강한 성인 남성을 대상으로 트레드밀과 계단을 보행하는 동안 로봇 착용 유무에 따른 근활성도, 근피로도 및 에너지 대사 효율성을 검증하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상자

본 연구에는 건강한 성인 남성 5명이 참여하였다. 연구대상자의 평균 연령은 41.8±8.9세, 신장은 176.3±6.9 cm, 체중은

Table 1 WIM size dimensions and hardware specifications

Overall size [cm]	23.8 × 10.0 × 5
Weight [kg]	1.4 (Including battery, fastener)
Operating time per charge [hr]	Approximately 2 (Assist mode)
Battery	Lithium-ion battery, 14.4V DC, 3.35Ah
Applicable body size	Main Body - 1 Size
	Waist/Thigh fastener - 2 Size (Waist 26"-36")
Adaptive thigh frame's stroke [mm]	160-350

78.0±8.0 kg이며, 체질량지수는 25.2±3.7 kg/m²이다. 대상자 선정 기준은 건설업 작업이 가능한 만 20-55세 사이의 건강한 남성을 대상으로 최근 6개월 이내에 근골격계 질환으로 치료받은 사실이 없고 본 실험 내용을 이해하는데 문제가 없는 자로 선정하였다. 모든 참여자들에게 실험의 목적과 과정을 설명하고 자발적인 서면 동의를 받아 진행하였다.

2.2 고관절 보조 웨어러블 로봇 제품 개요

본 연구에 사용된 보행보조로봇은 무게 1.4 kg의 초경량 고관절 외골격(WIM, Wirobotics Inc., Yongin, Korea)으로 사용자의 보행이동을 지원하기 위해 개발되었다.

WIM의 크기 치수와 하드웨어 사양은 Table 1과 같다.

허벅지 프레임을 접었을 때 본체 부피 크기는 23.8 × 10.0 × 5 cm이다. 본체에는 단일 전기 모터, 배터리, 컨트롤러가 위치하며, 배터리 용량은 3.35 Ah, 피크 어시스트 토크는 4 Nm로 약 2시간 연속 사용이 가능하다. 본체는 프리 사이즈이며, 허리 벨트 부착부와 허벅지 부착부는 소/중 사이즈 선택이 가능하다. 적응형 프레임의 스트로크 길이는 최소 길이 160 mm부터 최대 길이 350 mm까지 확장이 가능하며, 이를 통해 다양한 키와 다리 길이에 대응할 수 있다. 고관절 외골격 WIM은 기계적으로 총 11도의 자유도를 가지고 있으며, 고관절 3자유도, 적응형 프레임 2자유도, 허벅지 커넥터 6자유도로 구성된다. 이 중 1개의 자유도만이 고관절의 활성 관절이다. 시상면의 허벅지 프레임은 넓어지는 방향과 좁아지는 방향으로 구동되며, 보조 토크 제어는 토크 센서 없이 전류 감지를 사용하여 수행되며 역구동 가능한 액추에이터를 기반으로 한다[19]. 백드라이브가 가능한 액추에이터는 드라이브 마찰과 저항이 최소화된 유연한 드라이브로, 장치의 토크가 꺼져 있는 경우에도 원활하게 움직일 수 있다. 보조 토크의 생성은 보행 시 정현파로 감지되는 엉덩이 각도의 차이를 기반으로 하며, 이 정보를 사용하여 양쪽 엉덩이에 보행 보조 형태의 대칭 토크가 생성된다.

Fig. 1과 같이 단일모터가 장착된 메인 바디를 전면부에 위치시킨 폼팩터(Form Factor) 디자인은 기존의 듀얼 액추에이터를 고관절 측면에 배치한 착용형 로봇의 단점을 보완하여 사용자가 좁은 공간에서도 이동이 불편하지 않도록 편의성을 개선시켰다. 또한 컴팩트한 사이즈의 WIM은 소프트한 허리벨트를

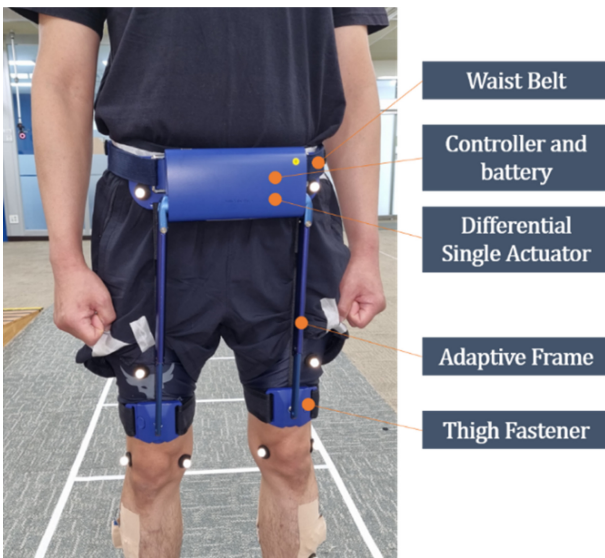


Fig. 1 Hip-assisted wearable robot used in the study

사용함으로써 착용성을 강화하였으며, 접이식 보관형태로 장치 볼륨이 기존 Rigid 타입의 외골격 프레임 로봇보다 최소 5배 이상 감소하는 것을 특징으로 한다[8].

2.3 실험방법

2.3.1 측정장비

근전도 측정을 위해 무선 송신기, EMG 센서 및 근전도 측정용 Ag/AgCl 전극으로 구성된 무선 표면근전도(Surface Electromyography, sEMG) 측정 시스템(Ultium EMG, Noraxon Corp., Scottsdale, Arizona, USA, 2022)을 사용하였다. 측정근육으로는 고관절과 슬관절의 굴곡과 신전을 담당하는 대표 근육인 대퇴직근(Rectus Femoris, RA)과 반건양근(Semi-Tendinosus, ST), 족관절의 배굴과 저굴을 담당하는 전경골근(Tibialis Anterior, TA)과 내측 가자미근(Gastrocnemius, GCM)을 선정하였다. 양측 하지에 총 8개의 근전도 전극을 부착하였으며, 평균 근활성도와 중앙 주파수(Median Frequency) 값을 분석하였다. 중앙 주파수는 EMG 전력 스펙트럼이 동일한 양의 전력으로 두 영역으로 나뉘는 주파수이다. 중앙 주파수 분석은 피로 분석 중에 EMG 신호를 처리하는 가장 효과적인 방법 중 하나인데, 근육피로는 시간이 증가함에 따라 EMG 주파수 스펙트럼이 하향 이동하는 특성을 보이기 때문이다[20]. 본 연구에서는 중앙 주파수 스펙트럼의 예상 감쇠 패턴을 예측할 수 있는 2차 다항식 곡선의 기울기 값을 분석하였으며, 기울기가 음의 방향으로 커질수록 근 피로가 심하다는 것을 의미한다.

에너지 소모도 분석을 위해 휴대용 O₂/CO₂ 가스분석기, 유량계, 데이터 송수신기, 마스크 및 심박수 측정기로 구성된 인체 폐활량 측정 시스템(K4b², Cosmed Corp., Rome, Italy)을 사용하였다. 측정변수는 산소섭취량(VO₂/kg), 심박수(Beats per Min), 분당 에너지소비량(Energy Expenditure per Min, EEm, kcal/min), 총 에너지 소비량(Total Energy Expenditure, EEtot,

kcal)을 분석하였다. 산소섭취량은 산소를 흡수하여 작업 조직으로 전달하는 사람의 능력과 작업 조직이 산소를 사용하는 능력을 측정하는 것으로 최대 산소섭취량을 통해 심폐 능력을 정의할 수 있다[21]. 총 에너지 소비량은 간접 열량계를 통해 측정된 산소와 이산화탄소의 기체 교환으로부터 계산되며, 열 생산 및 작업 출력(Work Output)을 위한 신체의 총 에너지 소비를 의미한다[22].

2.3.2 실험절차

본 연구의 실험절차는 Fig. 2와 같다. 보행보조로봇의 효율성 검증에 위해 트레드밀 보행과 5층 높이의 계단을 오르는 동안 근 피로도와 에너지 소모도를 분석하였다(Fig. 3).

연구진은 임상시험 시작에 앞서 참가자들이 WIM을 편안하게 착용할 수 있도록 외골격의 크기를 조정했고, 장비를 착용한 채 실험실 내 런닝머신과 6단 맞춤형 계단에서 각각 10분간 적응훈련을 진행했다. 적응 훈련 단계에서 개인이 선호하고 가장 편안한 WIM의 저항 토크가 결정되었다. 적응 훈련 후 피험자의 하지에는 sEMG 전극을 붙이고, 가슴에는 심박수 모니터 장치를 장착하였으며, 코와 입에는 안면 마스크를 착용하였다. 참가자들은 실험 중에 말을 하지 않도록 지시 받았다. 본 실험에서는 먼저 트레드밀 걷기를 실시하고, 호흡을 안정시키기 위한 충분한 휴식 시간(약 10분) 후에 계단 오르기를 실시하였다. 트레드밀 실험은 4 km/h의 속도로 6분 동안 걸었으며, 6분 보행 검사는 심폐능력을 측정하기 위해 임상에서 주로 사용하는 기능적 테스트 방법 중 하나이다.

트레드밀 걷기는 WIM을 착용한 상태(WIM)와 착용하지 않은 상태(noWIM)의 두 가지 조건으로 진행되었으며, 조건 순서는 무작위로 제공되었다. 각 조건 후에 참가자들은 대사율을 기준선으로 복원하기 위해 10분 동안 휴식을 취했다. 계단 오르기 실험은 트레드밀 걷기와 마찬가지로 WIM과 noWIM 조건에 대해 무작위 순서로 진행되었다. 참가자들은 두 조건 사이에 10분의 휴식 시간을 두고 자신이 선택한 보행 속도로 멈추지 않고 총 5층 높이의 계단을 올랐다. 계단을 오르는 동안 두 조건의 속도 차이를 비교하기 위해 수행 시간을 스톱워치로 기록하였다.

2.3.3 데이터 분석

근전도 신호 분석 방법은 Fig. 4와 같다. sEMG 데이터는 장비에서 제공하는 소프트웨어(MR 3.18, Ultium EMG, Noraxon, USA)를 사용하여 처리되었다. 데이터는 1,000 Hz에서 샘플링되었으며, 다음 10-350 Hz 대역의 6th Butterworth Band-pass 필터를 통과한 후 전파 정류되었다. 또한 신호의 제곱 평균 제곱근(Root Mean Square, RMS)은 슬라이딩 100 ms Window를 사용하여 계산되었으며[23], sEMG 신호는 개인의 최대 자발적 수축(Maximum Voluntary Contraction, MVC) 데이터로 정규화되었다. 근육 피로도 분석을 위해 Ultium 소프트웨어를 이용하여 중앙 주파수 값을 분석하였다. sEMG 원시 신호의 수축 구간을 푸리에 변환(Fourier Transform)하여 주파수 특성을 분석한

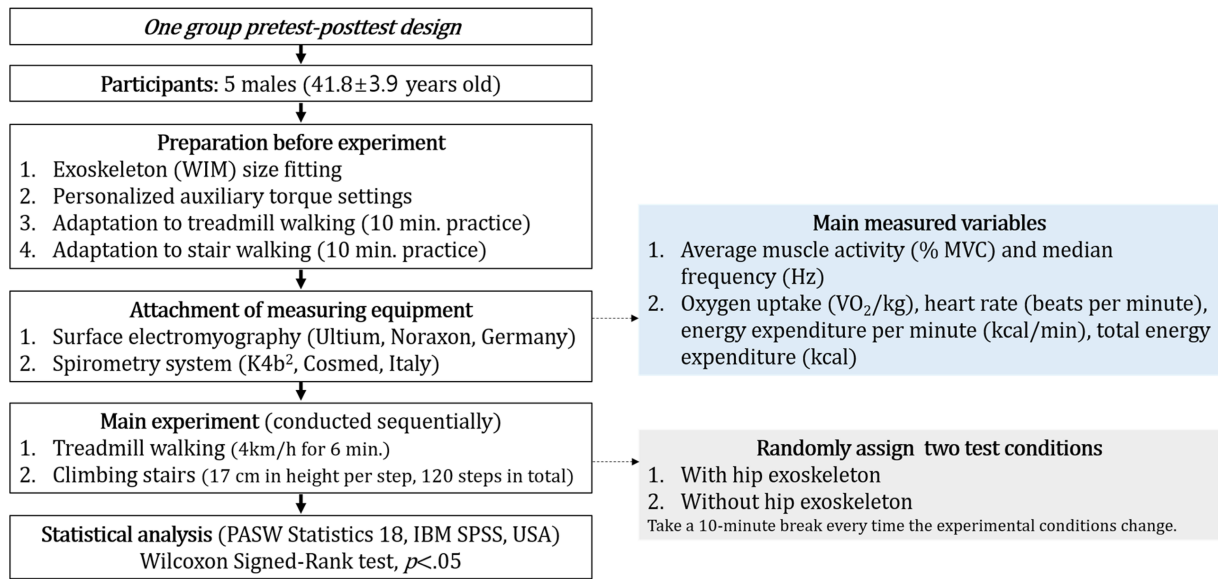


Fig. 2 Experimental flow chart of this study



Fig. 3 Treadmill (left) and ascending stairs (right)

후 선형 회귀 알고리즘을 사용하여 중앙 주파수의 변화를 기울기로 표현하였다. 기울기가 클수록 근육 피로가 누적되는 속도가 높아지는 것을 의미한다[24]. 6분 트레드밀 보행과 계단 오르기 실험에서 획득한 sEMG 데이터는 실험 시작부터 종료 지점까지 모든 구간의 데이터를 분석하였다.

에너지 대사는 동일한 시간 동안 소비되는 대사 에너지량을 비교하기 위해 각 조건의 후반부(트레드밀 후반 3분, 계단오르기 후반 3층부터 종료시점) 구간의 데이터를 분석하였다[7]. EEM은 다음 공식에 따라 계산되었다: $EEM = 3.781 \times VO_2 \times 1.237 \times VCO_2$ [25].

모든 기술통계는 평균과 표준편차로 제시되었으며, 통계 분석 프로그램(PASW statics 18, IBM SPSS, USA)을 이용하여 웨어러블 로봇 착용 유무에 따른 차이를 검증하였다. 본 연구는 표본수가 10 미만이므로 정규성을 갖지 않은 것으로 간주하고 비모수 검정인 윌콕슨 부호 순위 검정(Wilcoxon Signed Rank Test)을 실시하였다. 통계적 유의수준은 $p < .05$ 로 하였다.

3. 결과

3.1 평지 트레드밀 보행 결과

3.1.1 평균 근활성도 및 근피로도

트레드밀 보행 시 하지근육의 평균 근활성도와 근피로도 분석 결과는 Table 2와 같다. RF의 평균 근활성도는 WIM에서 noWIM보다 19.9% 증가하였고, ST의 근활성도는 26.2% 감소하였지만 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 또한 RF의 근피로도는 WIM에서 noWIM보다 90.2% 감소하였으며, ST와 GCM의 근피로도도 각각 7.9%와 37.7% 감소한 반면 TA의 근피로도는 101% 증가하였다. 그러나 이들 변수 모두 통계적 유의성은 없었다.

3.1.2 에너지소모도

트레드밀 보행 시 에너지 소모도 결과는 Table 3 및 Fig. 5와 같다. 산소 섭취량은 WIM에서 noWIM보다 8.9% 통계적으로 유의하게 감소하였다($p < .05$). 심박수는 두 조건 간 유의한 차이가 없었으며, EEm과 EEtot는 WIM에서 noWIM보다 각각 8.8%와 13.1% 감소하면서 통계적으로도 유의한 차이를 보였다($p < .05$).

3.2 상행계단보행 결과

3.2.1 평균 근활성도 및 근피로도

상행계단보행 시 근활성도와 근피로도 분석 결과는 Table 4와 같다. 웨어러블 로봇 착용 상태에서 RF, ST, TA, GCM의 평균 근활성도는 모두 감소하였으며, 특히 ST의 평균 근활성도는 27.47% 감소하면서, 통계적으로도 유의한 차이를 보였다($p < .05$).

또한 웨어러블 로봇 착용 상태에서 RF를 제외한 ST, TA, GCM의 근피로도는 각각 37.59, 16.95, 65.88% 감소하였지만, 이들 변수 모두 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다.

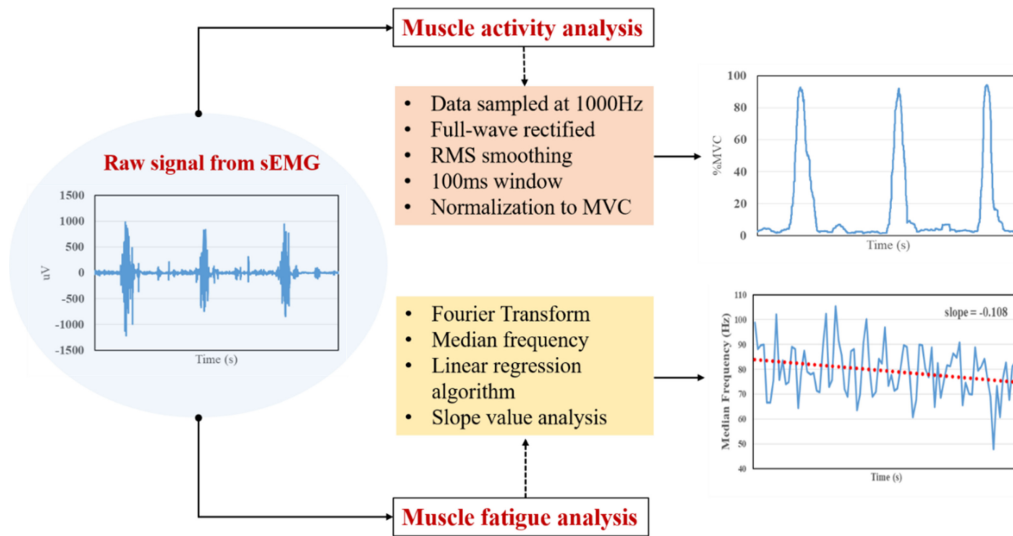


Fig. 4 Electromyography signal analysis

Table 2 Results of average muscle activity and muscle fatigue of lower extremity muscles during 6-minute treadmill walking

		NoWIM	WIM	Mean diff. [%]	Z score
RF	MA	13.34±11.04	15.98±11.11	19.85	-.674
	MF	-.028±.017	-.003±.012	-90.21	-1.483
ST	MA	18.81±15.36	13.88±8.44	-26.23	-1.214
	MF	-.024±.017	-.022±.013	-7.86	-.405
TA	MA	11.56±2.83	11.70±2.49	1.23	-.135
	MF	-.009±.007	-.018±.008	100.97	-.944
GCM	MA	20.70±6.02	20.43±4.74	-1.33	-.674
	MF	-.016±.016	-.010±.029	-37.70	-.674

RF, Rectus Femoris; ST, Semitendinosus; TA, Tibialis Anterior; GCM, Gastrocnemius; MA, Muscle Activity (%MVC); MF, Muscle Frequency (Hz)

Table 3 Results of energy consumption during 6-minute treadmill walking

	NoWIM	WIM	Mean diff. [%]	Z score
O ₂ Uptake [VO ₂ /Kg]	10.28±1.43	9.37±1.68	-8.87	-2.023*
Heart rate [bpm]	98.44±9.17	97.58±9.85	-0.87	-1.483
EE per min [kcal/min]	3.86±0.52	3.51±0.68	-8.83	-2.023*
EEtot [kcal]	11.50±1.56	10.00±3.04	-13.10	-2.023*

EE, Energy Expenditure; **p* < .05

3.2.2 에너지소모도

상행계단보행 시 에너지 소모도 분석결과는 Table 5와 같다. 웨어러블 로봇 착용 유무에 따른 계단보행 수행 시간은 두 조건 간 유의한 차이가 없었으며, 산소섭취량, 심박수, EEm, EEtot

Table 4 Results of average muscle activity and muscle fatigue of lower extremity muscles during up-stair walking

		NoWIM	WIM	Mean diff. [%]	Z score
RF	MA	23.31±10.89	22.05±9.76	-5.39	-1.483
	MF	-.082±.050	-.092±.104	12.41	-.405
ST	MA	12.07±10.56	8.75±5.01	-27.47	-2.023*
	MF	-.062±.085	-.039±.151	-37.59	-.135
TA	MA	17.28±4.64	17.18±3.53	-0.62	-.674
	MF	-.113±.076	-.094±.060	-16.95	-.944
GCM	MA	22.05±11.69	21.89±12.27	-0.72	-.674
	MF	-.107±.060	-.036±.104	-65.88	-1.214

RF, Rectus Femoris; ST, Semitendinosus; TA, Tibialis Anterior; GCM, Gastrocnemius; MA, Muscle Activity (%MVC); MF, Muscle Frequency (Hz); **p* < .05

모두 웨어러블 로봇 착용 상태에서 조금 감소하기는 하였지만, 통계적인 유의성은 확인할 수 없었다.

4. 논의

본 연구에서는 초경량 고관절 보조로봇(WIM) 개발에 따른 외골격 장치 효과성을 검증하고자, 트레드밀 걷기와 계단을 오르는 동안 로봇 착용 유무에 따른 근육의 활성화 및 피로도와 에너지소모도의 차이를 검증하였다.

4.1 평지 트레드밀 보행

본 연구에서 트레드밀 보행 결과, 로봇 착용 유무에 따른 근활성도와 피로도는 통계적으로 유의한 차이가 없었지만, 산소 섭취량, 분당 에너지 소비 및 총 에너지 소비량은 WIM 착용 시

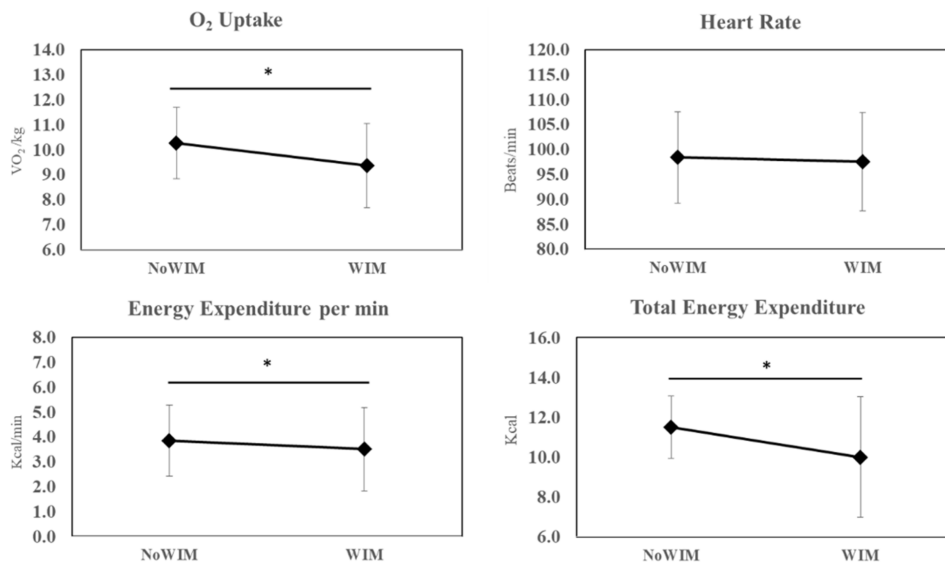


Fig. 5 Energy consumption during 6-minute treadmill walking (**p* < .05)

Table 5 Results of energy consumption during up-stair walking

	NoWIM	WIM	Mean diff. [%]	Z score
O ₂ Uptake [VO ₂ /Kg]	69.01±14.91	68.62±13.20	-0.56	-.365
Heart rate [bpm]	19.58±4.04	18.90±4.52	-3.46	-.674
EE per min [kcal/min]	141.28±16.69	136.91±9.84	-3.10	-1.214
EEtot [kcal]	7.48±2.01	7.20±2.08	-3.70	-.674

EE, Energy Expenditure

noWIM보다 통계적으로 유의하게 감소하는 것으로 나타났다.

선행연구에서 Lee 등(2017)은 고관절 보조로봇(GEMS) 착용 시 노인의 산소소모량이 7% 감소하고, 총 에너지 소비는 6.6% 감소했다고 보고하였다[6]. 또한 Mooney 등(2014)은 고관절 보행보조로봇 착용 시 심폐 대사비용이 약 7% 감소한다고 하였으며[26], 고관절 어시스트 소프트 외골격의 효과성을 분석한 최근 연구에서도 젊은 성인의 트레드밀 보행 시 순 대사 에너지 소비가 17.4%나 감소했다고 보고하였다[27].

또 다른 연구에서 Ding 등 (2016)은 소프트형 고관절 엑소슈트가 보행 중 신진 대사력을 4.6% 감소 시켰다고 보고하였으며[28], Young 등(2017)은 공압식 고관절 외골격 장치를 이용하여 실험한 결과 순대사력의 9.7% 감소를 보고하였다[29].

위에서 언급한 많은 선행연구들에서, 저자들은 공통적으로 고관절 보행보조로봇이 심폐대사 비용을 감소시켜 효과적인 보행을 유도할 수 있다고 주장하였다. 이들 연구에서 제시한 에너지대사 감소율 범위는 최소 6.6%에서 최대 17.4% 범위로 나타났다.

본 연구에서 사용한 외골격 WIM은 산업현장 또는 보행 보조가 필요한 사람들이 장시간 로봇을 착용해도 신체에 부담이 되

지 않도록 초경량(1.4 kg)으로 개발되었다. Lee 등(2017)의 연구에서 사용된 GEMS는 2.8 kg이며[6], Kim 등(2022)의 연구에서 사용된 엑소슈트는 2.31 kg으로[17] 우리 제품과는 약 1 kg 내외의 차이를 보인다. 착용형 로봇의 무게를 줄이는 것은 실제 현장업무에 활용하는데 매우 핵심적이고 주요한 요소인데 장치의 보조 성능이 아무리 우수하더라도 무게가 너무 무겁다면 현장에 적용하는데 한계가 있기 때문이다. 이러한 측면에서 초경량 고관절 보조장치 WIM의 실효성 있는 활용이 기대된다. 한편 WIM의 무게 대비 에너지 대사 효율은 Kim 등(2022)의 연구에서 사용한 소프트 엑소슈트 (2.31 kg)보다 낮은 것으로 나타났다[17]. 장치의 무게가 낮을수록 에너지 효율이 더 높아질 것이라고 예상하였지만, 에너지 대사에 영향을 미치는 요인이 장치의 무게뿐만 아니라 보조력, 제어 타이밍 등 다양한 요소가 포함되기 때문에 향후 보조력이나 제어 알고리즘에 대한 추가 검토가 요구된다. WIM은 단일모터를 이용하여 고관절을 제어하므로, 듀얼 액츄에이터 방식의 기존 제품들보다 보조력이 저하될 수 있다. 단일모터를 이용하여 제품을 경량화한 만큼 보조력이 저하되지 않도록 제어 알고리즘을 보완하여 최적화된 보조력을 제공할 필요가 있을 것이다.

다음으로 로봇 착용유무에 따른 근활성도와 근피로도에 대해 논의하고자 한다. 트레드밀 보행 시 근활성도와 근피로는 통계적으로 유의한 차이가 없었지만, 로봇 착용유무에 따른 근전도 변화 양상에 대해 논의하고자 한다.

본 연구 결과, WIM 착용 시 noWIM보다 RF의 평균 근활성도가 19.9% 증가한 것으로 나타났다. Lee 등 (2017)의 연구에서는 고관절 보조로봇 GEMS 착용 시 RF 근활성도가 유의하게 감소하였다고 보고되었다[6]. 이 연구에서 저자들은 고관절 보조장치가 고관절을 포함한 무릎과 발목의 보행전략(Stratgy)을 감소시켜 전반적인 하지 근육의 사용이 줄었다고 주장하였다. 이러한 결과는 우리 연구결과와 상반된 결과이다.

이와 같은 원인은 외골격의 구조적 형태의 차이에서 비롯된 것으로 사료된다. Lee 등 (2017)의 연구에서 사용된 보조장치는 듀얼 액츄에이터 방식으로 고관절의 측면에서 다리 거동을 보조하지만, WIM은 메인 바디가 골반의 전방에 위치하여 앞쪽에서 고관절의 전방 거동을 보조하게 된다. 이러한 WIM의 구조적 특성은 하지 관절 중 특히 고관절의 굴곡 가동범위를 증가시킬 수 있다. 이와 관련하여, 벨트를 감아 전방에서 고관절 굴곡 보조력을 제공하는 소프트 로봇 슈트 실험에서 최대 고관절 굴곡각도가 평균 5.4% 증가하고, 무릎과 발목 관절의 최대 수직위치가 높아졌음이 보고된 바 있다[30]. 본 연구에서 하지 관절 각도를 직접적으로 측정하지는 않았지만 선행연구에 비추어 볼 때 유사한 구조의 WIM을 착용했을 때에도 고관절을 포함한 하지관절 각도가 전반적으로 증가했을 것으로 예상된다. 이 부분에 대한 정확한 검증은 향후 추가실험을 통해 이루어져야 할 것이다.

한편 WIM 착용 시 RF의 근활성도가 증가하였음에도 불구하고 근피로도도는 발생하지 않은 것으로 나타났다.

근활성도는 근 수축이 많아질수록 증가하는 경향을 보이지만, 근활성도가 증가한다고 해서 근피로도도 동반 증가하는 것은 아니다. 근활성도와 근피로도도의 양상은 근육의 작용과 종류에 따라 상이하게 나타날 수 있으며[31], 근 피로는 근육이 최대 힘을 발생할 수 있는 능력이 감소하는 것으로 근전도의 주파수 범위의 변화를 통해 근피로도도를 추정할 수 있다[32]. 따라서 근활성도의 증가가 근력의 증가를 의미할 수는 있지만, 반드시 근피로도를 유발한다고 단정할 수는 없다[33]. 본 연구에서 보여준 RF의 근활성도와 근피로도 분석 결과는 근활성도와 근피로도도의 경향이 일치하지 않음을 보여주는 단적인 예이다. 대부분의 선행연구들은 근활성도가 감소하면 에너지 효율성이 좋다고 보고하였지만[6], 근활성도가 감소하여도 근피로도도가 증가할 수 있다는 것을 본 연구결과를 통해 확인하였다. 산업현장에서 외골격 장치의 장시간 사용으로 인한 근피로 문제는 주요한 이슈이므로 외골격 보조장치를 검증할 때 반드시 근피로도도에 대한 분석이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

또 한가지 주목할 점은 WIM 착용 시 RF, ST 및 GCM의 근피로도도는 감소하였지만, TA의 피로도도는 증가하는 것으로 나타났다. 로봇의 도움으로 하지의 근피로도도가 감소할 것으로 예측하였지만, 발목 배굴에 관여하는 전경골근의 피로도도가 101%나 상승하였다.

발목관절은 보행 중 유각기 동안 발목이 지면에 닿지 않도록 중립 위치를 유지하는데[34], 부적절한 자세나 과도한 발목 배굴은 TA의 피로도도를 높일 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 Jin 등 (2016)의 연구 결과에서 보여준 무릎과 발목의 수직 위치의 증가는 결과적으로 발목 배굴을 유지하는 TA의 긴장도를 높일 수 있고 나아가 근피로를 유발할 수 있을 것으로 생각된다[30]. WIM 착용 시 TA의 피로도 증가는 작업현장에서 장시간 착용 시 문제점을 유발할 수 있으므로 적절한 구동부 토크 조절을 통해 다리를 보조하면서도 한편으로는 다리의 위치를 과도하게 상승시키지 않도록 제어 메커니즘의 설계 보완이 필요할 것으로 사료된다.

4.2 상행 계단보행

계단 오르기 실험에서 WIM착용 시 ST의 평균 근활성도도가 27.5% 유의하게 감소하는 것으로 나타났다.

Lee 등(2020)의 연구에서는 소프트 엑소 슈트 착용 시 계단 보행에서 RF의 근활성도도가 최대 47% 감소했다고 보고하였지만[35], WIM의 RF 근활성도도는 5.4% 감소 하는데 그쳤으며, 오히려 근피로도도가 12.4% 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 평지 트레드밀 보행 시 근피로도도는 RF, GCM, ST 순으로 감소율이 높았는데, 상행계단 보행에서는 오히려 RF의 근피로도도가 증가하고, GCM, ST, TA 순으로 감소율이 큰 것으로 나타나 평지와 계단보행의 근피로도 양상이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 상행계단 보행에 사용되는 하지의 주동근이 평지보행과 다르기 때문인 것으로 추정되는데, 상행계단 보행에서는 입각기 중 수직 추진을 위해 주로 GCM이 작용하며, 전방 추진을 위해서는 대둔근과 슬괩근이 주동근으로 사용된다. 또한 유각기에서는 엉덩이, 무릎, 발목관절에 걸쳐있는 길항근이 다리에서 신체의 나머지 부분으로 힘을 분산시키면서 다리를 조절하는 역할을 하게 된다[36].

본 연구에서 계단보행에 사용되는 주동근의 근활성도를 모두 측정하지는 않았지만, 상행계단보행 시 수직 추진의 주동근인 족저굴근(GCM)의 피로도도가 65.9% 감소하고, 전방추진에 관여하는 슬괩근(ST)의 근피로도도가 37.6% 감소한 결과는 WIM의 보조력이 상행계단 보행에서 효과적으로 작용한 것으로 해석된다.

한편 계단보행 시 RF의 근활성도도가 감소하였음에도 불구하고 근피로도도가 증가한 것은 WIM의 보조력이 작용하기는 하였지만 근피로를 유발할 만한 어떤 요인이 근육에 작용했음을 추측할 수 있다. 실제적으로 실험 당시 연구 참여자들은 WIM이 계단보행을 도와주는 하지만 계단을 상승할 때 다리의 움직임과 대퇴부 지지대의 부조화로 인한 불편감을 호소하였으며, 이는 평지보행과 달리 계단을 상승할 때 고관절 굴곡 각도 범위가 커지면서 최적화된 제어를 제공하지 못한 것으로 판단된다. 이러한 요인이 고관절 거동에 관여하는 RF의 정상적인 활동을 방해하면서 결과적으로 RF의 근피로를 유발했을 것으로 추측되며, 이러한 특성을 고려하여 향후 계단보행과 관련된 제어 알고리즘에 대한 개선이 필요할 것으로 생각된다.

마지막으로 계단보행 시 에너지대사는 WIM 착용 유무에 따라 유의한 차이가 없음을 확인하였다.

선행연구에서 Kim 등(2018)은 노인을 대상으로 한 계단을 오르기 실험에서 로봇 착용 후 순 산소소모량 및 순대사력이 각각 8.6% 와 10.2% 유의하게 감소했다고 보고하였지만[7], 본 연구에서는 에너지 대사의 유의한 감소를 확인하지는 못했다.

WIM을 착용하고 평지 트레드밀을 보행한 경우에는 총 에너지 소비량이 13.1% 감소하였지만, 계단 보행에서는 약 3% 수준의 감소율을 보였다. 이러한 이유는 앞서 언급한 바와 같이 계단 보행을 위한 최적화된 제어 알고리즘을 제공하지 못했고, WIM의 구동 파워가 낮아 계단보행 시 충분한 보조력을 제공하지 못했던 것으로 생각된다. 계단보행은 평지보행에 비해 약 30-40%

의 심폐대사 에너지가 더 필요한 힘든 활동이다[37,38]. 계단 보행을 위해서는 평지보행보다 더 큰 보조력이 필요하지만 우리 연구에서 사용된 WIM의 구동력이 상행계단보행을 효율적으로 수행하기에는 충분하지 못했던 것으로 파악되며, 향후 이러한 점에 대한 구동부 설계 보완이 진행되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 초경량 웨어러블 고관절 보조로봇 개발에 따른 보행 효율성을 검증하고자 건강한 젊은 성인 남성 5명을 대상으로 트레드밀과 계단보행 시 로봇착용 유무에 따른 하지 근활성도와 피로도 및 에너지소모도를 분석하였다. 평지 트레드밀 보행에서 WIM 착용 시 TA를 제외한 RF, ST와 GCM의 근피로도 감소 경향을 확인하였으며, 총에너지소비는 13.1% 유의하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 상행계단보행에서 RF를 제외한 ST, TA와 GCM의 근피로도 감소와 에너지대사 감소 경향은 확인하였지만 통계적인 유의성은 없었다. 본 연구결과 통해 WIM의 효율적인 측면과 함께 일부 개선사항을 파악하였으며, 본 연구결과를 기반으로 근피로도 감소와 에너지 대사의 향상을 위한 제어 알고리즘의 개선이 요구된다. 또한 본 연구는 개발 장치의 문제점을 개선하고자 진행된 예비 연구로서 향후에는 대상자 수를 확대하고, 성능, 휴대성 및 편의성 측면의 사용성 평가도 추가적으로 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 정부(한국로봇산업진흥원)의 재원으로 수요맞춤형 서비스 로봇 개발보급사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022-05081-3).

REFERENCES

- Bogue, R., (2018), Exoskeletons—a review of industrial applications, *Industrial Robot: An International Journal*, 45(5), 585-590.
- Baltrusch, S., Van Dieën, J., Bruijn, S., Koopman, A., Van Bennekom, C., Houdijk, H., (2019), The effect of a passive trunk exoskeleton on metabolic costs during lifting and walking, *Ergonomics*, 903-916. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1602288>
- von Glinski, A., Yilmaz, E., Mrotzek, S., Marek, E., Jettkant, B., Brinkemper, A., Fisahn, C., Schildhauer, T. A., Gebmann, J., (2019), Effectiveness of an on-body lifting aid (HAL® for care support) to reduce lower back muscle activity during repetitive lifting tasks, *Journal of Clinical Neuroscience*, 63, 249-255.
- Ali, A., Fontanari, V., Schmoelz, W., Agrawal, S. K., (2021), Systematic review of back-support exoskeletons and soft robotic suits, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 765257.
- Lalitharatne, T. D., Hayashi, Y., Teramoto, K., Kiguchi, K., (2012), A study on effects of muscle fatigue on EMG-based control for human upper-limb power-assist, *Proceedings of the 2012 IEEE 6th International Conference on Information and Automation for Sustainability*, 124-128.
- Lee, H.-J., Lee, S., Chang, W. H., Seo, K., Shim, Y., Choi, B.-O., Ryu, G.-H., Kim, Y.-H., (2017), A wearable hip assist robot can improve gait function and cardiopulmonary metabolic efficiency in elderly adults, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(9), 1549-1557.
- Kim, D.-S., Lee, H.-J., Lee, S.-H., Chang, W. H., Jang, J., Choi, B.-O., Ryu, G.-H., Kim, Y.-H., (2018), A wearable hip-assist robot reduces the cardiopulmonary metabolic energy expenditure during stair ascent in elderly adults: A pilot cross-sectional study, *BMC Geriatrics*, 18(1), 1-8.
- Lee, S.-H., Kim, J., Lim, B., Lee, H.-J., Kim, Y.-H., (2023), Exercise with a wearable hip-assist robot improved physical function and walking efficiency in older adults, *Scientific Reports*, 13(1), 7269.
- Pan, Y.-T., Lamb, Z., Macievich, J., Strausser, K. A., (2018), A vibrotactile feedback device for balance rehabilitation in the EksoGT™ robotic exoskeleton, *Proceedings of the 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)*, 569-576.
- Zeilig, G., Weingarden, H., Zwecker, M., Dudkiewicz, I., Bloch, A., Esquenazi, A., (2012), Safety and tolerance of the ReWalk™ exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: A pilot study, *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 35(2), 96-101.
- Tefertiller, C., Hays, K., Jones, J., Jayaraman, A., Hartigan, C., Bushnik, T., Forrest, G. F., (2018), Initial outcomes from a multicenter study utilizing the indigo powered exoskeleton in spinal cord injury, *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*, 24(1), 78-85.
- Xiloyannis, M., Alicea, R., Georgarakis, A.-M., Haufe, F. L., Wolf, P., Masia, L., Riener, R., (2021), Soft robotic suits: State of the art, core technologies, and open challenges, *IEEE Transactions on Robotics*, 38(3), 1343-1362.
- Van Dijk, W., Van der Kooij, H., Hekman, E., (2011), A passive exoskeleton with artificial tendons: Design and experimental evaluation, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 1-6.
- Jarrassé, N., Morel, G., (2011), Connecting a human limb to an exoskeleton, *IEEE Transactions on Robotics*, 28(3), 697-709.
- Shi, Y., Dong, W., Lin, W., Gao, Y., (2022), Soft wearable robots: Development status and technical challenges, *Sensors*, 22(19), 7584.

16. Pesenti, M., Antonietti, A., Gandolla, M., Pedrocchi, A., (2021), Towards a functional performance validation standard for industrial low-back exoskeletons: State of the art review, *Sensors*, 21(3), 808.
17. Kim, J., Quinlivan, B. T., Deprey, L.-A., Arumukhom Revi, D., Eckert-Erdheim, A., Murphy, P., Orzel, D., Walsh, C. J., (2022), Reducing the energy cost of walking with low assistance levels through optimized hip flexion assistance from a soft exosuit, *Scientific Reports*, 12(1), 11004.
18. Chen, L., Chen, C., Wang, Z., Ye, X., Liu, Y., Wu, X., (2021), A novel lightweight wearable soft exosuit for reducing the metabolic rate and muscle fatigue, *Biosensors*, 11(7), 215.
19. Lim, B., Choi, B., Roh, C., Hyung, S., Kim, Y.-J., Lee, Y., (2023), Parametric delayed output feedback control for versatile human-exoskeleton interactions during walking and running, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(8), 4497-4504.
20. Allison, G., Fujiwara, T., (2002), The relationship between EMG median frequency and low frequency band amplitude changes at different levels of muscle capacity, *Clinical Biomechanics*, 17(6), 464-469.
21. Mitchell, J. H., Blomqvist, G., (1971), Maximal oxygen uptake, *New England Journal of Medicine*, 284(18), 1018-1022.
22. Mtaweh, H., Taira, L., Floh, A. A., Parshuram, C. S., (2018), Indirect calorimetry: History, technology, and application, *Frontiers in Pediatrics*, 6, 257.
23. Giroux, M., Moissenet, F., Dumas, R., (2013), EMG-based validation of musculo-skeletal models for gait analysis, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 16(1), 152-154.
24. Merletti, R., Conte, L. L., Orizio, C., (1991), Indices of muscle fatigue, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 1(1), 20-33.
25. Elia, M., Livesey, G., (1992), Energy expenditure and fuel selection in biological systems: the theory and practice of calculations based on indirect calorimetry and tracer methods, *Metabolic Control of Eating, Energy Expenditure and the Bioenergetics of Obesity*, 70, 68-131.
26. Mooney, L. M., Rouse, E. J., Herr, H. M., (2014), Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking during load carriage, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 11(1), 1-11.
27. Zhang, J., Fiers, P., Witte, K. A., Jackson, R. W., Poggensee, K. L., Atkeson, C. G., Collins, S. H., (2017), Human-in-the-loop optimization of exoskeleton assistance during walking, *Science*, 356(6344), 1280-1284.
28. Ding, Y., Galiana, I., Asbeck, A. T., De Rossi, S. M. M., Bae, J., Santos, T. R. T., De Araujo, V. L., Lee, S., Holt, K. G., Walsh, C., (2016), Biomechanical and physiological evaluation of multi-joint assistance with soft exosuits, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(2), 119-130.
29. Young, A. J., Foss, J., Gannon, H., Ferris, D. P., (2017), Influence of power delivery timing on the energetics and biomechanics of humans wearing a hip exoskeleton, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 5, 4.
30. Jin, S., Iwamoto, N., Hashimoto, K., Yamamoto, M., (2016), Experimental evaluation of energy efficiency for a soft wearable robotic suit, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(8), 1192-1201.
31. Bigland-Ritchie, B., Donovan, E., Roussos, C., (1981), Conduction velocity and EMG power spectrum changes in fatigue of sustained maximal efforts, *Journal of Applied Physiology*, 51(5), 1300-1305.
32. Lowery, M. M., O'Malley, M. J., (2003), Analysis and simulation of changes in EMG amplitude during high-level fatiguing contractions, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 50(9), 1052-1062.
33. Hunter, G. R., McCarthy, J. P., Bamman, M. M., (2004), Effects of resistance training on older adults, *Sports Medicine*, 34, 329-348.
34. Jacquelin Perry, M., (2010), *Gait analysis: Normal and pathological function*, New Jersey: SLACK.
35. Lee, H. D., Park, H., Seongho, B., Kang, T. H., (2020), Development of a soft exosuit system for walking assistance during stair ascent and descent, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 2678-2686.
36. Harper, N. G., Wilken, J. M., Neptune, R. R., (2018), Muscle function and coordination of stair ascent, *Journal of Biomechanical Engineering*, 140(1), 011001.
37. Knaggs, J. D., Larkin, K. A., Manini, T. M., (2011), Metabolic cost of daily activities and effect of mobility impairment in older adults, *Journal of the American Geriatrics Society*, 59(11), 2118-2123.
38. Cho, K. H., Song, W., Kim, J., Jung, E. J., Jang, J., Im, S. H., Kim, M., (2016), Energy expenditures for activities of daily living in Korean young adults: A preliminary study, *Annals of Rehabilitation Medicine*, 40(4), 725-733.

**Yun Hee Chang**

Ph.D., Principal Researcher, Medical Convergence Research Team, Rehabilitation Engineering Research Institute. Her research interest is biomedical engineering, rehabilitation, and motion analysis.

E-mail: yhchang2@comwel.or.kr

**Jung Sun Kang**

MS, Researcher in Medical Convergence Research Team, Rehabilitation Engineering Research Institute. Her research interest is biomechanics, and motion analysis.

E-mail: js0670@comwel.or.kr

**Bo Ra Jeong**

MS, Researcher in Medical Convergence Research Team, Rehabilitation Engineering Research Institute. Her research interest is medical engineering, rehabilitation, and motion analysis.

E-mail: keongbora77@comwel.or.kr

**Bok Man Lim**

Ph.D., R&D Team Leader at WIRobotics, Seoul, Korea. His research interests include wearable robots, biped locomotion, musculoskeletal dynamics, physical human-robot interaction, and robot motion optimization.

E-mail: bokman.lim@wirobotics.com

**Byung June Choi**

Ph.D., the COO of the WIRobotics Inc, South Korea. His research interests include robotic mechanisms, wearable robots, exoskeleton, soft robotics, human-robot interaction and field applications of robots.

E-mail: bjchoi@wirobotics.com

**Youn Baek Lee**

Ph.D, a Chief Executive Officer at WIRobotics Inc, South Korea. His research interests include wearable robot design, medical/rehabilitation robotics, humanoids, manipulators and physical human-machine interaction.

E-mail: younbaek@wirobotics.com

중량물 들어올리기 작업 중 근육 활동에 대한 착용형 보조 작업복의 효과

Effects of the Wearable Assistive Suit on Muscle Activity during Lifting Tasks

이광희¹, 홍철운^{2,3}, 유미^{2,#}, 권대규^{2,3,#}
Kwang Hee Lee¹, Chul Un Hong^{2,3}, Mi Yu^{2,#}, and Tae Kyu Kwon^{2,3,#}

¹ 전북대학교 대학원 헬스케어공학과 (Department of Healthcare Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University)

² 전북대학교 바이오메디컬공학부 (Division of Biomedical Engineering, Jeonbuk National University)

³ 전북대학교 고령친화복지기기연구센터 (Research Center of Healthcare & Welfare Instrument for the Aged, Jeonbuk National University)

Corresponding Authors / E-mail: kwon10@jbnu.ac.kr, TEL: +82-36-270-4066, ORCID: 0000-0002-2755-2062

E-mail: yumi@jbnu.ac.kr, TEL: +82-36-270-4063, ORCID: 0000-0003-4546-3765

KEYWORDS: Musculoskeletal disorders (근골격계 질환), Passive assistive suit (수동 보조 작업복), Electromyography (근전도)

Quick picking and heavy lifting are the most common problems in current workplaces. They can cause lumbar muscle damage. The operator then must spend energy, time, and money for recovery or rehabilitation. To solve this problem, we developed a passive-type assistive suit using air mesh material, elastic band, and wire. To determine the strength support effect of the passive-type assistive suit, electromyography (EMG) was performed for eight muscles and the maximum voluntary contraction (MVC) was analyzed when lifting weights of 0%, 15%, and 30% of the subject's weight in a Semi-squat motion. Results showed that MVC increased as the weight of the heavy object increased. However, its increase was not proportional to the decrease in MVC according to the presence or absence of assistive suits or the weight of the heavy object. The highest MVC was observed for the erector spinae muscle under all conditions. The greatest decrease in MVC according to working clothes was measured for the vastus lateralis muscle (lifting: 17.7±2.95%, lowering: 18.3±0.55%). These results show that lifting work performed while wearing a passive-type assistive suit using wires and elastic bands is effective in assisting muscle activity.

Manuscript received: August 31, 2023 / Revised: October 30, 2023 / Accepted: November 13, 2023
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2023

1. 서론

현재 작업 현장에서 발생하는 근골격계 질환의 여러 원인 중 무거운 중량물 들기가 주요 원인으로 언급되고 있다[1,2]. 요추 근육 손상은 무거운 짐을 들고 장시간 서서 일하는 작업자에게 흔한 직업병이며 설문 조사에서 생산직 근로자의 17%가 높은 등급의 허리 통증을 가지고 있다[3]. 이로 인해 작업의 효율성을 높이고 부상을 예방하는데 도움이 되는 로봇이 많이 개발되고 있다[4]. 그러나 여전히 작업자는 좁고 협소한 공간에서 중량물을 들어 올리는 작업을 진행하고 있으며 이를 수동으로 처리하고

있다. 중량물을 들어 올릴 때 작업자의 몸이 신전되면서 요추 추간판에 압축력이 발생하게 되고, 이 압력이 한계를 초과할 경우 조직 손상이 발생하게 된다. 이는 추간판의 퇴행성 과정으로 이어져 결국 요통을 야기한다[5]. 허리 부상을 입은 작업자들은 회복 및 재활을 진행해야 하며 이것은 경제적 손실로 이어지게 된다.

중량물을 들어 올릴 때 부적절한 자세는 허리 근육 부상의 원인 중 하나이다. 같은 무게를 드는 경우 들어 올리는 자세에 따라 허리 근육의 피로 빈도가 달라질 수 있다[6]. 중량물을 들어 올리는 조건에서 작업자가 들어 올리는 기술에는 Stoop, Squat 및 Semi-squat가 있다. Stoop 자세는 물체를 지면에서 수

평으로 들어 올릴 때 시작 위치에서 무릎 관절을 180°로 펴고 몸통을 90° 구부린 자세이다. Squat 자세는 무릎 관절의 굽힘 정도가 135° 이상이고 몸통을 거의 똑바로 세운 자세이다. Semi-squat 자세는 Stoop과 Squat의 중간 자세로 물체를 들어 올리기 시작할 때 무릎이 약 90°, 몸통이 약 45° 구부러진다[7]. 물체를 들어 올리는 과정에서 Wang 등[6]은 측정된 근전도 신호에 Jointed EMG Amplitude and Spectrum Analysis (JASA)를 적용하여 Semi-squat 자세에 비해 Stoop과 Squat 자세에서 등 근육이 더 피로해지기 쉽다는 것을 보였다. Jing 등[8]은 척추기립근(Erector Spinae Muscle)의 근전도 신호의 평균 진폭을 측정한 결과 Semi-squat 자세를 사용하여 동일한 물체를 들어 올릴 때 척추기립근 근전도 신호의 평균 진폭이 가장 낮아지는 것을 발견하였다.

물체를 운반하는데 근육을 보조해주는 착용형 장치가 많이 개발되고 있으며, 이들 중 하나가 착용형 작업복이다. 이는 수동 작업에 필요한 물리적 힘을 생성하도록 지원하는 착용형 장치로 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다[9]. 능동형과 수동형으로 분류할 수 있으며[10], 능동형 작업복은 액추에이터 장치가 포함되어 있고 수동형 작업복보다 큰 근육 보조를 제공할 수 있다[11,12]. Hyun 등[13]은 능동형 허리 보조 작업복 H-WEXv2를 설계했다. 단일 직렬 탄성 작동을 기반으로 한 와이어 구동 메커니즘을 활용하여 Stoop 및 Semi-squat 자세를 지원할 수 있으며 척추기립근 및 대둔근(Gluteus Maximus)의 근육 강도가 감소했음을 알 수 있다. Stoop 자세에서 각각 40.7, 41.1%, Semi-squat 자세에서 각각 33.0, 41.6% 감소했다. 그러나 무거운 중량물을 옮길 때 보조 토크를 생성하면서 물체의 질량을 설정해야 하므로 대규모 응용 프로그램에서는 매우 불편한 단점이 있다. Xia 등[14]은 Squat 자세로 중량물을 들어 올리는 인체 동작의 곡선 함수를 5차 다항식을 사용하여 완성한 알고리즘을 작업복과 결합하였고, 사용자가 무거운 물체를 들어 올릴 때 요추의 긴장을 40% 이상 줄일 수 있었다. 이와 같이 능동형 작업복은 근육 보조의 효과가 있었지만, 구동 모터와 전원 공급을 위한 배터리 등의 구성으로 부피가 크고 무거우며 착용 시 동작이 불편한 단점이 있다[15].

이러한 단점을 보완하고자 개발된 수동형 작업복은 주로 스프링이나 댐퍼로 구성되어 외부에서 전원 없이 인간의 움직임에 의해 생성된 에너지를 저장했다가 방출한다[9]. Maja Goršič 등[16,17]은 등과 허리에 가해지는 생체 역학적 부하를 줄여 육체적으로 힘든 작업을 수행하는 작업자를 지원하는 착용형 작업복 HeroWear Apex를 개발하였다. 체간을 보조하는 가벼운 작업복으로 구성되며, 이 작업복은 연결과 해제가 간편하여 움직임에 자유로운 작업복이다. 의자에서 일어서기, 바닥에서 허리까지 하중 들기 등의 프로토콜을 통해 물체를 들어 올리고 내리는 작업 중 척추기립근의 근전도를 15% 가량 감소시켰고 이는 HeroWear Apex가 근육의 부하와 피로를 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다. Moon 등[18]은 신근 모멘트와 요추 견인력에 동력을 공급하기 위해 4개의 막대 연결 구조를 가진 하부 등 작업복을 제안했다. 이 작업복은 중량물을 들어 올리는 동작에서

척추기립근의 근전도를 평균 21.0%, 피크 18.3% 감소시켰으며, 요추 부위의 근력감소에 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한, Cha 등[19]은 탄성밴드의 탄성력을 이용한 소프트 착용형 작업복의 효과에 대한 인체 평가 실험을 진행하여 근육 보조 효과를 검증하였고, 작업복을 착용했을 때 근육 사용량이 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 이 작업복은 탄성밴드로만 구성되어 있어 장기간 사용 시 탄성밴드의 탄성한계에 도달하게 되어 장력이 약해지는 현상이 발생할 수도 있으며, 이를 보완할 수 있는 작업복이 필요하다.

본 연구에서는 수동형 작업복과 관련한 선행 연구의 단점을 보완하고자 탄성밴드와 와이어를 사용하여 장기간 사용하더라도 장력에 이상이 없고 작업자가 동작하기 편한 수동 보조 작업복을 제작하였다. 또한 작업복의 유무와 중량물을 무게에 따라 Semi-squat 자세로 들어 올릴 시 근육의 보조 효과를 검증하고자 하였다.

2. 착용형 근육보조 작업복 개발

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 작업자의 행동 범위를 넓히고 편의성을 높이기 위해 외골격이나 액추에이터와 같은 장치를 사용하지 않고 와이어의 장력과 탄성력이 강한 탄성밴드를 사용하였다. 작업복을 입고 착용자의 자세와 중량물을 들어 올릴 때 사용되는 근육을 보조할 수 있게 설계하였다. 에어매쉬 소재를 사용하여 환기성에 장점이 있으며, 무게가 2.3 kg으로 작업자가 장기간 착용하고 작업하는데 큰 부담을 느끼지 않게 설계하였다.

척추기립근부터 대둔근까지 탄성밴드를 연결하여 상체가 수축 후 신전 시 탄성력을 이용하여 근육을 보조할 수 있게 하였다. 대둔근부터 대퇴이두근까지 장력이 강한 와이어를 연결하였고, 대퇴의 길이에 맞게 조절할 수 있도록 와이어가 끝나는 부위에 다이얼(Dial)을 설치하였다. 사람마다 어깨 및 체간과 하지 대퇴부의 크기가 달라 벨크로(Velcro) 소재를 이용한 밴드 디자인으로 착용자의 신체에 맞게 조절할 수 있도록 하였다.

작업복 중앙 프레임에 플라스틱 체인을 장착하여 탄성밴드가 수축할 때 작업복이 뒤틀리지 않게 잡아주면서 발생하는 힘으로 허리의 척추기립근과 허벅지의 대퇴이두근을 보조하였다. 각각 4개씩 두 고무다발을 대퇴이두근 부위에 장착하여 신체가 수축 후 신장하며 에너지를 얻고 착용자가 신전할 시 에너지를 변환하며 중량물을 들어 올릴 때 보조를 최대화하여 탄성밴드의 에너지가 근육보조에 집중될 수 있도록 개발하였다.

3. 연구 방법

3.1 피험자 구성

본 연구의 피험자는 요추 및 근골격계 질환을 겪지 않은 신체가 건강한 남성 15명으로 구성하였다. 실험에 앞서 피험자들은 연구 담당자로부터 본 실험에 대해 자세한 설명을 들은 후 서면

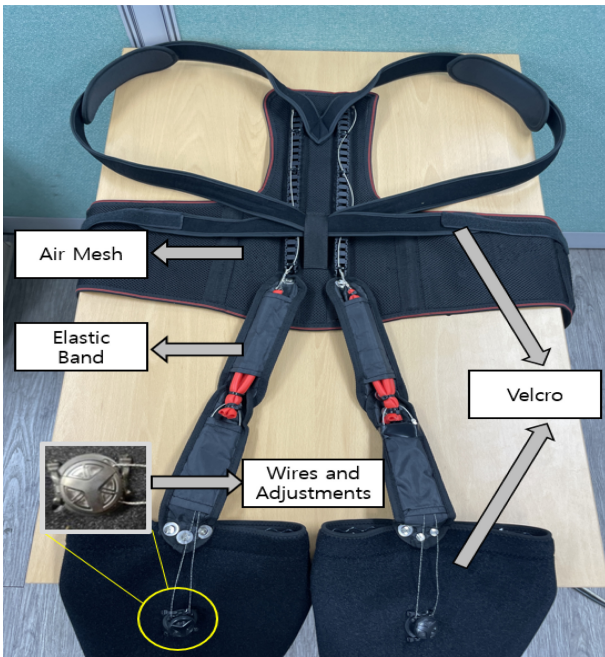


Fig. 1 Passive assistive suit for muscle assistance

Category	Mean	Std.
Age [years]	25.1	0.6
Height [cm]	173.2	6.3
Weight [kg]	71.9	4.21

동의서를 작성하였다. 피험자의 신체정보는 Table 1과 같이 나타났다. 본 연구는 전북대학교 생명윤리 심의위원회의 심의를 거쳐 승인(IRB No. 2021-02-015-002)되었으며 평가자들은 모두 자발적인 참여 동의서에 서명하였다.

3.2 실험방법

본 실험에서는 작업복의 착용 유무에 따라 피험자 체중의 0%(1.5 kg), 15%(10.5±2.1 kg), 30%(21.5±4.2 kg)에 해당하는 중량물을 반복적으로 들어올리게 하였다. Fig. 2는 실험 시 중량물을 들어올리는 자세로 Stoop Lift와 Squat Lift 자세의 중간 자세인 Semi-squat Lift를 나타내고 있다. 중량물을 들어 올릴 때 지면으로부터 0.3 m 높은 위치에서 3회씩 반복하여 들어올렸다.

본 실험에 앞서 중량물을 들어 올릴 때 사용되는 광배근(Latissimus Dorsi Muscle), 척추기립근(Erector Spinae Muscle), 대둔근(Gluteus Maximus), 대퇴이두근(Biceps Femoris Muscle), 비복근(Gastrocnemius Muscle), 전경골근(Tibialis Anterior Muscle), 외측광근(Vastus Lateralis), 대퇴직근(Rectus Femoris Muscle)의 근육별 최대 자발적 수축을 3번씩 측정하였다. 이는 피험자들이 중량물을 들어올릴 때 각 근육이 최대 힘의 몇 %의 근사용량을 나타내는지 비교하기 위해서 측정하였다.

이후 작업복을 착용하고 3초간 중량물을 들기 위해 몸을 숙이

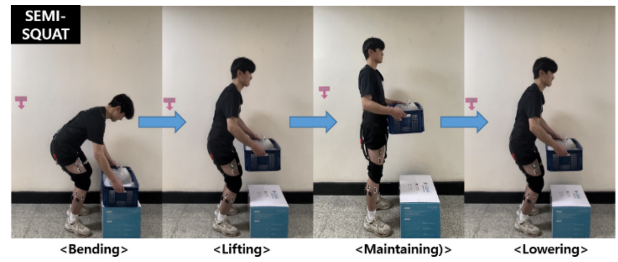


Fig. 2 Semi-squat lifting posture

고, 3초간 중량물을 잡은 후 직립(Lifting)하도록 하였으며, 3초간 중량물을 들고 유지한 후 3초간 중량물을 내리는 동작(Lowering)을 3회 반복하여 실험하였다. 각 실험에 앞서 근 피로도를 줄이기 위해 실험 간 5분의 휴식을 부여하였으며, 이후 작업복을 미착용했을 때 위 과정과 동일한 방법으로 실험을 진행하였다. 근육의 활동을 측정하기 위해 표면근전도(TELEMyo Desktop DT, Noraxon Inc., USA) 측정 시스템을 사용하였다. 측정된 근전도를 Signal Processing한 후 FIR 필터를 사용하여 대역 50-500 Hz로 설정한다. 이후 근전도 원신호를 절댓값으로 변환시키는 Rectification을 하고 RMS를 100으로 Smoothing하여 데이터 값을 추출하였다. 근전도 프로그램에 있는 Amplitude Normalization 세부 속성의 Normalize to에서 Values From Other Record로 설정하여 최대 자발적 수축 대비 실험 데이터에서 %로 근육 수축률을 분석하였다. 피험자들이 중량물을 들어올리고 내릴 때 동영상 촬영을 통하여 관절가동범위를 일치시켰다.

3.3 통계 분석

수집된 데이터는 SPSS (Version 27.0, SPSS Inc., USA) 통계 분석 프로그램을 사용하여 수행하였다. Lifting과 Lowering 동작에서 비모수 검정인 Friedman Test를 시행하였으며, 작업복 착용의 유무와 중량물의 무게에 따라 Wilcoxon Signed Rank Test를 진행하여 중량물을 들어 올릴 때 근육 사용량의 차이를 분석하였다. 유의수준은 $p < 0.05$ 로 하였다.

4. 결과

4.1 작업복 착용 유무에 따른 근전도 값 측정 결과

본 연구에서는 와이어와 탄성밴드를 이용하여 수동 보조 작업복을 개발하였고, 피험자 체중의 0, 15, 30% 해당하는 중량물을 Semi-squat 자세로 들어올렸다 내리는 동작을 수행하였을 때 근력 보조 효과를 분석하였다.

Fig. 3은 중량물을 들어올리고 내리는 동작에서 중량물 무게(0, 15, 30%)와 작업복의 착용유무에 따른 실험 조건에서 광배근, 척추기립근, 대둔근, 대퇴이두근, 비복근, 전경골근, 외측광근, 대퇴직근의 근전도의 근육 사용량인 최대 자발적 수축(%)를 나타낸 것이다. 중량물을 들어올리고 내리는 동작에서 중량물의 무게가 증가할수록 근육 사용량이 증가하였다($p < 0.05$). 척추

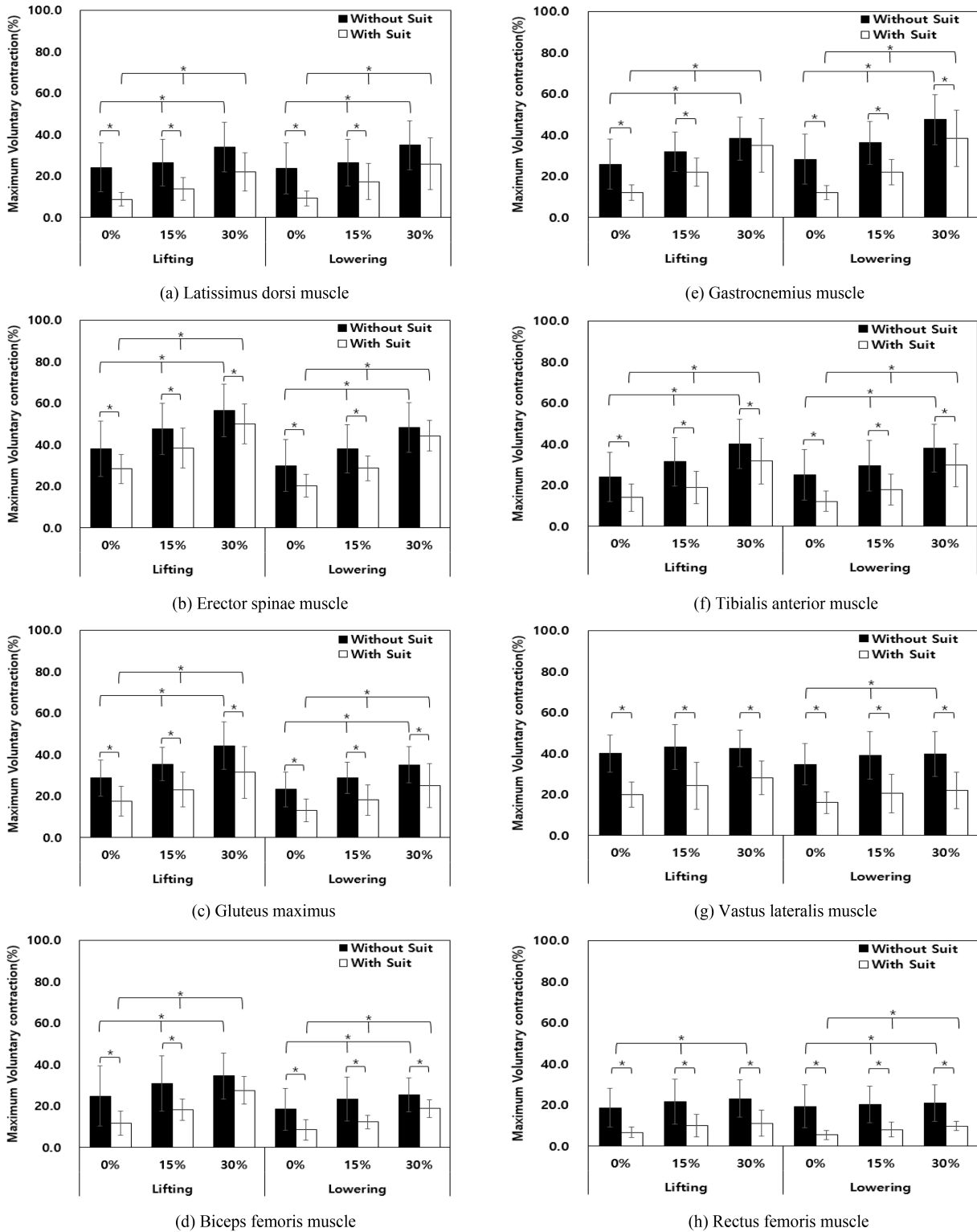


Fig. 3 MVC (%) results for the 8 muscles in lifting and lowering by assistive suit and the weight conditions (*p < 0.05)

기립근에서 가장 높은 근육사용량을 보였고, 대퇴직근에서 가장 낮은 결과를 보였다.

작업복의 착용 유무에 따른 근육 사용량의 감소율은 피험자 체중의 0% 무게에서 가장 큰 감소율을 보였으며(Lifting:

13.1±3.37%, Lowering: 13.3±3.26%), 외측광근에서 가장 높은 근 감소율(Lifting: 17.7±2.95%, Lowering: 18.3±0.55%)을 보이고, 척추기립근에서 가장 낮은 근 감소율(Lifting 8.5±1.72%, Lowering 7.7±3.24%)을 보였다.

5. 고찰

본 연구에서는 와이어와 탄성밴드를 통해 수동 보조 작업복을 개발하였고, 중량물을 들어 올리고 내리는 동작에서 작업복의 근력 보조 효과를 분석하고자 하였다. 작업복의 착용 유무와 중량물의 무게 조건에 따라 8개 근육의 근전도를 측정하고 최대 자발적 수축(%)을 환산하여 비교하였다.

중량물을 들어 올릴 때 척추기립근에서 가장 큰 근사용량을 보였으며, 대퇴직근에서 가장 적은 근사용량을 보였다. 척추기립근은 척추를 신전시키면서 척추의 굽힘을 작용하는 근육이다 [20]. 부하량이 증가될수록 무게에 저항하기 위해 척추기립근의 에너지가 많이 사용되어 강한 수축을 통한 높은 근 활성도가 나타났다, 근육 사용량이 다른 근육들에 비해 크게 사용되었다 [21]. 이는 Semi-squat 자세 시 무릎을 작게 굽히고 허리를 많이 굽히면서 척추기립근에 많은 힘이 사용된 것이라 판단된다.

작업복을 착용하고 중량물을 들어올리는 작업 시 근사용량이 감소하는 경향을 보였다. 근육 사용량 감소율의 경우 외측광근에서 가장 크게 감소하였으며, 척추기립근에서 가장 작은 감소량을 보였다. 이는 착용형 작업복이 중량물을 들어 올릴 때 대퇴의 크기와 길이에 따라 자세를 잘 잡아주어 외측광근에 실리는 근력을 효과적으로 보조한 것으로 판단되며, 중량물을 들어 올릴 때 외측광근이 다른 대퇴근에 비해 많은 에너지를 사용하여 비교적 크게 감소된 것으로 보인다.

또한, 무릎의 굽힘 각도가 클수록 대퇴사두근 활성도가 높아지기 때문에 나타나며, 중량물의 무게와 체중을 신전 및 굴곡 시 외측광근에서 신장성 운동을 하여 신체의 균형을 유지하고자 하기 때문에 많은 힘이 사용된 것으로 판단된다[22,23].

본 연구에서 개발한 탄성밴드와 와이어를 이용한 수동 보조 작업복은 평균 11.7±2.15%의 근력 보조 효과를 나타냈으며, 이 중 척추기립근의 근력 보조 효과는 8.1±2.35%(p < 0.05)을 보였다. 능동형 작업복으로 Stoop, Squat, Left-asymmetric, Right-asymmetric 4가지 자세에서 5, 10, 15 kg의 서로 다른 무게로 근력 보조 효과를 분석한 Li 등[24]의 연구에 따르면, 평균 10%의 근력 보조 효과를 얻었으며, 척추기립근의 보조 효과는 11.6±3.27%을 보였다. 또한 Van Sluijs 등[25]은 수동형 작업복으로 Semi-squat 자세에서 6, 12, 20 kg의 서로 다른 무게로 중량물을 들어올리는 조건에서 작업복의 척추기립근의 근력 보조 효과는 5.36-9.61%을 보였다고 발표하였다. 따라서 본 연구에서는 능동형 작업복만큼은 아니지만, 다른 수동형 작업복과 유사한 근력 보조 효과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 가장 높은 근력 보조 효과를 보여야 하는 척추기립근에서 다른 근에 비해 낮은 효과를 개선하기 위한 추가 연구가 진행되어야 한다.

작업복을 착용했을 때 중량물을 들어 올릴 경우와 내려놓을 경우, 체중의 0, 15, 30% 무게 순으로 근력 보조 효과가 감소됨을 보였다. 이는 중량물을 들어올리는 자세에 따라서 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 이와 관련한 연구로 Li 등[24]은 Stoop 자세의 경우 10 kg, Squat 자세의 경우 15 kg일 때 근력 보조 효율이

높았으며, Asymmetric 자세에서는 5, 10, 15 kg 순으로 근력 보조 효율이 높았다고 보고하였다. 이에 따라 다양한 자세와 중량물의 무게의 조건을 달리하였을 때 작업복의 근력 보조 효과에 대한 추가 연구가 필요하다.

이를 통해 작업복을 착용하고 중량물을 들어 올렸을 때 각 근육에서 근육 사용량이 감소함을 알 수 있었고 이는 중량물을 들어 올릴 때 사용하는 근육들의 근력 보조에 효과가 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 작업 현장에서 요추 및 근골격계 질환을 겪는 작업 근로자들이 증가함에 따라 이를 예방하기 위해 탄성밴드와 와이어를 이용한 수동 보조 작업복을 개발하였다. 수동 보조 작업복의 근력 보조 효과를 검증하고자 Semi-squat 자세로 피험자 체중의 0, 15, 30%의 중량물을 들어올리는 동작에서 8개 근육의 근전도를 측정하여 최대 자발적 수축을 분석하였다.

그 결과 모든 근육에서 수동 보조 작업복 착용 후 근육 사용량이 감소하는 경향을 보였으며, 중량물의 무게가 가벼운 순(0, 15, 30%)으로 근육 감소량의 차이가 크게 나타났다. 중량물의 무게가 무거울수록 근육을 보조해주는 힘이 비례하지 않음을 알 수 있으며, 적당한 무게를 들어 올릴 때 수동 보조 작업복의 효능이 효과적으로 작용됨을 알 수 있다. 중량물을 들어 올리는 작업 시 착용형 작업복의 근력보조 효과를 확인하였고, 중량물을 반복해서 들어 올리고 운반하는 작업 근로자들의 요추 및 근골격계 질환을 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 중량물을 들어 올릴 때 가장 많이 사용되는 척추기립근의 보조 효과를 높일 수 있는 방안을 고려하여 수동 보조 작업복을 개선하고자 한다. 또한, 중량물을 들어 올릴 때 정자세가 아닌 비틀면서 올릴 경우 체간 부위에서 발생하는 통증을 예방하고자 비틀면서 중량물을 들어 올리는 자세와 다양한 들어 올리기 자세(Stoop과 Squat 자세 등)에서 작업복의 근력보조효과에 대한 연구와 근력 특성을 분석하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 정부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2022R111A1A01064258).

REFERENCES

1. Hoy, D., Brooks, P., Blyth, F., Buchbinder, R., (2010), The epidemiology of low back pain, Best Practice & Research Clinical Rheumatology, 24(6), 769-781.

2. Griffith, L. E., Shannon, H. S., Wells, R. P., Walter, S. D., Cole, D. C., Côté, P., Frank, J., Hogg-Johnson, S., Langlois, L. E., (2012), Individual participant data meta-analysis of mechanical workplace risk factors and low back pain, *American Journal of Public Health*, 102(2), 309-318.
3. Munch Nielsen, C., Gupta, N., Knudsen, L. E., Holtermann, A., (2017), Association of objectively measured occupational walking and standing still with low back pain: A cross-sectional study, *Ergonomics*, 60(1), 118-126.
4. Bae, S., Shin, J., Huh, I., Kim, S., (2020), A study on qualitative usability assessment guideline of the wearable industrial robots for interacting with the upper extremities, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 39(2), 129-141.
5. Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., Fine, L. J., (1993), Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks, *Ergonomics*, 36(7), 749-776.
6. Wang, Z., (2009), Experimental study on manual lifting techniques and fatigue recovery, Ph.D. Thesis, Huazhong University of Science and Technology. https://www.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFD0911&filename=2009173560.nh&uniplatform=OVERSEA&v=J0b0I91Z2tUTc_Ly0xbik9Uj0muCWpVEXiFRmqk95zxxlBdNplxHncylJd5KToKn
7. Burgess-Limerick, R., Abernethy, B., (1997), Toward a quantitative definition of manual lifting postures, *Human Factors*, 39(1), 141-148.
8. Jing, C., Lei, Y., Jiasun, D., Zhenglun, W., (2004), The application of surface electromyography in the assessment of ergonomic risk factors associated with manual lifting tasks, *Journal of Huazhong University of Science and Technology [Medical Sciences]*, 24, 552-555.
9. Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., de Looze, M., (2016), The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work, *Applied Ergonomics*, 54, 212-217.
10. Ito, T., Ayusawa, K., Yoshida, E., Kobayashi, H., (2016), Stationary torque replacement for evaluation of active assistive devices using humanoid, *Proceedings of the 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 739-744.
11. Huysamen, K., de Looze, M., Bosch, T., Ortiz, J., Toxiri, S., O'Sullivan, L. W., (2018), Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks, *Applied Ergonomics*, 68, 125-131.
12. Roveda, L., Savani, L., Arlati, S., Dinon, T., Legnani, G., Tosatti, L. M., (2020), Design methodology of an active back-support exoskeleton with adaptable backbone-based kinematics, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 79, 102991.
13. Hyun, D. J., Lim, H., Park, S., Nam, S., (2020), Singular wire-driven series elastic actuation with force control for a waist assistive exoskeleton, H-WEXv2, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(2), 1026-1035.
14. Xia, L., Feng, Y., Zheng, L., Wang, C., Wu, X., (2019), Development of an adaptive iterative learning controller with sensorless force estimator for the hip-type exoskeleton, *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2516-2521.
15. Park, S. J., Park, C. H., (2019), Suit-type wearable robot powered by shape-memory-alloy-based fabric muscle, *Scientific Reports*, 9(1), 9157.
16. Goršič, M., Song, Y., Dai, B., Novak, D., (2021), Evaluation of the HeroWear Apex back-assist exosuit during multiple brief tasks, *Journal of Biomechanics*, 126, 110620.
17. Goršič, M., Song, Y., Dai, B., Novak, V. D., (2022), Short-term effects of the Auxivo LiftSuit during lifting and static leaning, *Applied Ergonomics*, 102, 103765.
18. Moon, C., Bae, J., Kwak, J., Hong, D., (2022), A lower-back exoskeleton with a four-bar linkage structure for providing extensor moment and lumbar traction force, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30, 729-737.
19. Cha, E. H., Oh, S. Y., Hong, C. U., Yu, M., Kwon, T. K., (2022), A study on the effect of soft wearable suit using elastic band, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(1), 59-67.
20. Lee, J. S., Lee, H. S., (2013), Comparison of muscle activity of core muscles according to support surface condition and load during squat exercise, B.Sc. Thesis, Dankook University. <https://m.riss.kr/link?id=T13242351>
21. Neumann, D. A., (2016). *Kinesiology of the musculoskeletal system-e-book: Foundations for rehabilitation*. Elsevier Health Sciences.
22. Choi, S. K., (2018), Comparative analysis of gluteus maximus and quadriceps muscle activity during the dead-lift and squat, Ph.D. Thesis, Pukyong National University. <https://repository.pknu.ac.kr:8443/handle/2021.oak/14008>
23. Kim, H. S., (2014), A comparative analysis through EMG of the lower half of the body when doing full and half squats, Ph.D. Thesis, Pukyong National University. <https://repository.pknu.ac.kr:8443/handle/2021.oak/12501>
24. Li, J., He, Y., Sun, J., Li, F., Ye, J., Chen, G., Pang, J., Wu, X., (2023), Development and evaluation of a lumbar assisted exoskeleton with mixed lifting tasks by various postures, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 31, 2111-21119.
25. van Sluijs, R. M., Wehrli, M., Brunner, A., Lamercy, O., (2023), Evaluation of the physiological benefits of a passive back-support exoskeleton during lifting and working in forward leaning postures, *Journal of Biomechanics*, 149, 111489.



Kwang Hee Lee

M.S. candidate in the Department of Healthcare Engineering, Jeonbuk National University. His research interest is biomechanics and healthcare engineering.

E-mail: rhkdgml311@jbnu.ac.kr



Mi Yu

Research Professor in the Division of Biomedical Engineering, Jeonbuk National University. Her research interest is rehabilitation, biomechanics and healthcare engineering.

E-mail: yumi@jbnu.ac.kr



Chul Un Hong

Professor in the Division of Biomedical Engineering, Jeonbuk National University. His research interest is rehabilitation, biophysics, sensor engineering.

E-mail: cuhong@jbnu.ac.kr



Tae Kyu Kwon

Professor in the Division of Biomedical Engineering, Jeonbuk National University. His research interest is biomechanics, rehabilitation, sports science

E-mail: kwon10@jbnu.ac.kr

선형 모터 스테이지의 주파수 영역 모델기반 모션 제어 설계

Model-based Motion Control Design of a Linear Motor Stage in Frequency Domain

전희원¹, 안형준^{2,#}
Hee Won Jeon¹ 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 stage (선형 모터 스테이지), Frequency domain (주파수 영역), Motion controller (모션 제어기), Tuning GUI (튜닝 그래픽 인터페이스), Disturbance observer (외란 관측기), Iterative learning control (반복 학습 제어)

The fourth industrial revolution led to advanced servo systems, enhancing productivity across industries. However, designing these systems remains challenging due to the performance-stability trade-off. This paper presents a model-based motion control of a linear motor motion stage in frequency domain. A user-code for the PowerPMAC commercial controller was developed to excite motion control system so that we could get a frequency response. The theoretical frequency response of the servo algorithm was compared with the experimental frequency response. Based on this, a tuning graphical user interface (GUI) was developed to predict performance when the servo loop gain is changed. Especially, to compensate for residual vibrations caused by high acceleration and deceleration and to improve tracking error, DOB (Disturbance Observer) and ILC (Iterative Learning Control) control techniques were applied in the frequency domain. Through the design of the frequency domain motion controller, the control performance of the linear motor motion stage could be predicted with over 96% accuracy, resulting in a 54.32% improvement in tracking error and a 93.56% improvement in settling time, 85.29% in RMS error.

Manuscript received: August 31, 2023 / Revised: November 16, 2023 / Accepted: November 21, 2023
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2023

NOMENCLATURE

C = Controller
 C_d = Damping of Magnet Track
 d = Disturbance
 \hat{d} = Estimated Disturbance
 e = Position Error
 g_d = Cutoff Frequency of DOB
 J_n = Nominal Inertia
 K_i = Servo Integral Gain
 K_s = Spring Coefficient
 K_m = torque Coefficient
 K_p = Servo Proportional Gain

K_T = Stiffness of Magnet Track
 K_{vfb} = Servo Velocity Feedback Gain
 K_{vff} = Servo Velocity Feedforward Gain
 L = Learning Filter
 M_n = Mass of Mover
 N = Filter Order of DOB
 Q = Q Filter
 R = Reference Input
 t_d = Time Delay
 u_c = Control Effort
 u_s = Servo Out
 Y = Actual Position

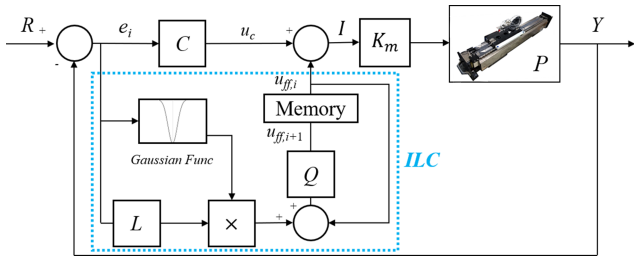


Fig. 3 Iterative learning control schematic

구간에서 발생한 오차 값을 보상하기 위하여 이전 제어 노력 ($u_{ff,i}$)과 현재 오차를 반영한 새로운 제어 노력($u_{ff,i+1}$)을 학습하여 저장한다. 여기서 오차 크기에 대한 제어노력을 적응적으로 조절하기 위하여, 학습물을 상수가 아닌 가우시안 함수를 사용하여 정의하였다. 추종 오차로부터 전향제어 입력까지의 관계는 식(3)과 같이 표현되고 오차를 0으로 만들기 위해 설계되는 학습필터(L)의 수식은 식(4)와 같이 표현된다. 이때 P는 식별된 모델의 이론 값이고 식(5)의 Q는 저역 필터로, 필터 L의 차수를 맞춰주고 고주파로 인한 불확실성을 차단해주는 역할을 한다.

$$e_i = -(u_{ff,i} + C e_i)P \tag{3}$$

$$e_i/u_{ff,i} = -P/(1+PC) = L \tag{4}$$

$$u_{ff,i}/e_i = -Q(1+PC)/P = QL^{-1} \tag{5}$$

3. 주파수 영역 제어기 설계

3.1 주파수 응답 측정

모션 제어 시스템을 구성하고 있는 서보 제어 및 전류 제어 그리고 플랜트의 영향을 통합적으로 고려하기 위하여 Fig. 4와 같이 PMAC 서보 알고리즘을 거치고 출력된 제어노력 값에 1-1,000 Hz의 다중 정현파 신호를 주입하여 모션 제어 시스템을 가진하였다. 가진신호를 주입하기 전의 제어노력 값을 입력, 가진신호를 주입한 후인 서보출력 값을 출력 값으로 하여 개루프의 주파수 응답을 측정하였다.

3.2 주파수 응답 기반 제어기 설계

주파수 영역 모델 기반 제어기를 설계하고 안정성 및 성능을 예측하기 위하여 Fig. 5와 같은 주파수 응답 기반의 튜닝 GUI를 설계하였다. DOB가 적용된 PMAC 서보 제어기의 이론 모델이 식(8)로 표현되고, Table 1의 튜닝 이전(Before) 제어이득을 가지는 제어기의 이론 주파수 응답($C_{Th1}(j\omega)$)을 실제 주파수 응답($C_{Ex}(j\omega)$)과 비교한 결과 Fig. 6와 같이 일치하기 때문에 식(6)이 성립하여 새로운 제어기의 이론 주파수 응답($C_{Th2}(j\omega)$)을 식(7)과 같이 적용할 수 있다. 또한 주파수 응답 기반 ILC

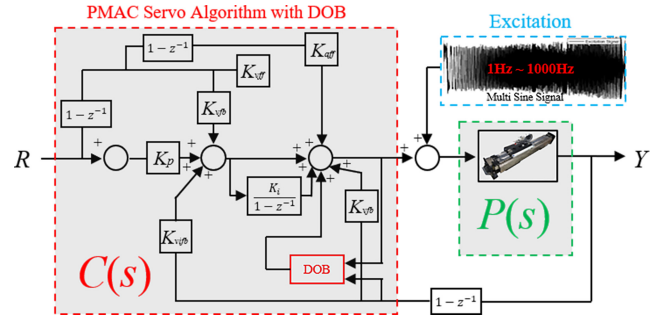


Fig. 4 Frequency response measurement

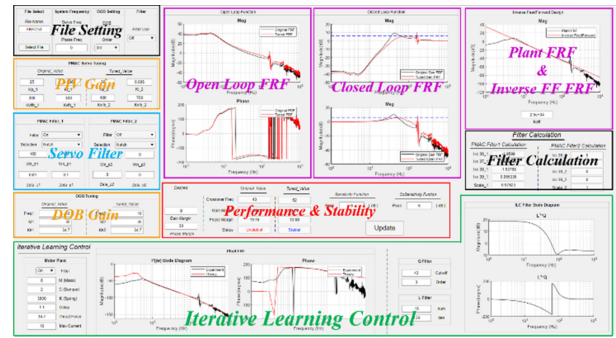


Fig. 5 Frequency response based tuning GUI

Table 1 PMAC servo tuning

Variable	Before	After	Variable	Before	After
K_p	15	27	K_{vfb}	300	500
K_i	0.006	0.006	g_d	10	30
K_{vifb}	300	500	K_{aff}	0	25,000

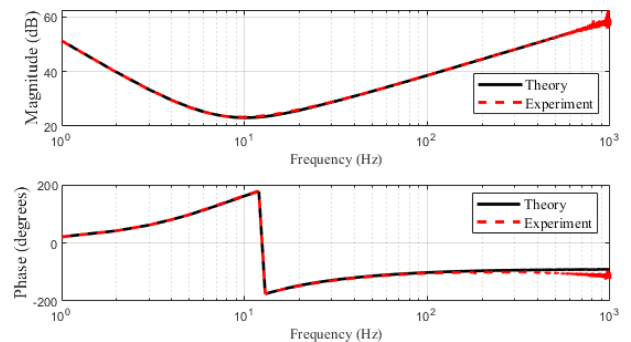


Fig. 6 FRF of PMAC servo algorithm with DOB

적용을 위해 식(9)와 같은 선형 모터 모델과 Q 필터를 함께 적용하여 식(5)와 같은 학습필터를 설계한다. 이때 튜닝 GUI를 통하여 Fig. 7과 같이 모델의 이론 주파수 응답과 실제 주파수 응답을 비교하며 모델을 식별한다.

$$C_{Ex}(j\omega) \approx C_{Th1}(j\omega) \tag{6}$$

$$PC_{Ex}(j\omega) \times \frac{C_{Th2}(j\omega)}{C_{Th1}(j\omega)} = PC_{Th2}(j\omega) \tag{7}$$

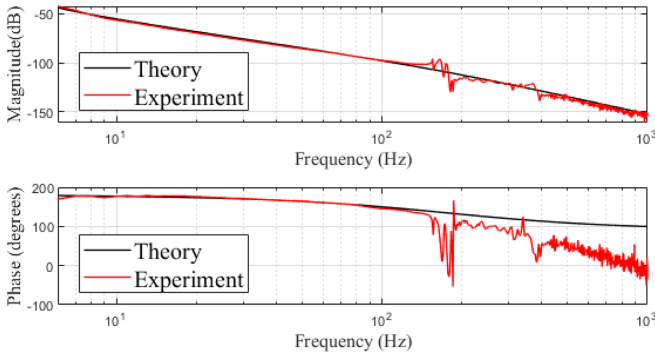


Fig. 7 FRF of the plant ($P(j\omega)$)

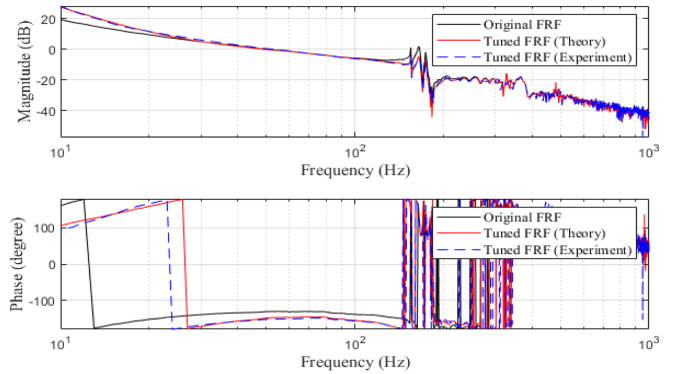


Fig. 8 Open-Loop FRF of the tuned controller

$$C(s) = - \left[\frac{(K_p + K_{vfb}s) \left(1 + \frac{K_i}{s}\right) + K_{vfb}s}{1 - \left(\frac{g_d}{s + g_d}\right)^N} \right] + \left[\frac{\left(\frac{M_n s^2}{K_m}\right) \left(\frac{g_d}{s + g_d}\right)^N}{1 - \left(\frac{g_d}{s + g_d}\right)^N} \right] \quad (8)$$

$$P(s) = \frac{1}{Ms^2 + C_d s + K_s} \times \frac{1}{2\pi dt \cdot t_d s + 1} \quad (9)$$

$$Q = \frac{1}{(\tau s + 1)^N} \quad (10)$$

4. 실험

4.1 주파수 영역 설계 결과

튜닝 GUI를 통하여 얻어진 이론 기반 주파수 응답이 실제 주파수 응답을 잘 예측했는지 비교하기 위하여 개루프 주파수 응답을 각각 Fig. 8에 나타냈다. 그 결과 Table 2에서 보여주듯이 절점주파수는 99.62% 위상여유는 99.32% 이득여유는 96.07%의 정확성을 가졌다.

튜닝 전후로 적용된 제어 이득은 Table 1과 같고, 최종 53 Hz 대역폭, 29.3° 위상여유 그리고 9.93 dB 이득여유의 제어 시스템을 구성하였다. 모델이 가지는 100 Hz 이상 불확실성을 고려하여 Q 필터 차단주파수를 100 Hz로 선정하였다 ILC 필터 설계에 사용된 변수와 수식을 Table 3에 나타냈고, 주파수에 응답은 Fig. 9에 나타냈다.

4.2 모션 스테이지 성능 평가

설계된 모션 스테이지는 Fig. 10과 같이 모델 기반 DOB와 ILC가 함께 적용되었다. 성능 실험을 위해 Fig. 11과 같이 200 mm 스트로크, 250 mm/s 속도, 2,500 mm/s² 가속도의 모션 프로파일을 실행하였고 발생한 추종오차와 평균오차를 각각 Figs. 12와 13에 나타냈다. PIV만 적용하였을 때 보다 DOB와 ILC를 함께 적용하였을 때 추종오차가 54.32%, 정착시간이 93.56%, 평균오차가 85.29% 향상되었다.

Fig. 14와 같이 모션을 반복할수록 제품평균오차가 감소하였다.

Table 2 Accuracy of the tuning GUI

Performance	Prediction	Real	Accuracy
Bandwidth	52.8 Hz	53 Hz	99.62%
Phase margin	29.1°	29.3°	99.32%
Gain margin	9.54 dB	9.93 dB	96.07%

Table 3 ILC design parameter

Linear motor plant (P)		
Variable	Value	Transfer function
M_n [kg]	6	$\frac{1}{0.005s^3 + 6.02s^2 + 4.7 + 3000}$
C_d [Ns/m]	2	
K_s [N/m]	3,000	
t_d [s]	1.1	
ILC filter design (Q^*P^{-1})		
Variable	Value	Transfer function
τ [s]	0.001	$\frac{0.7s^3 + 797.1s^2 + 632.8s + 8.2 \times 10^8}{s^3 + 1885s^2 + 1.2 \times 10^6s + 2.4 \times 10^8}$
N	2	

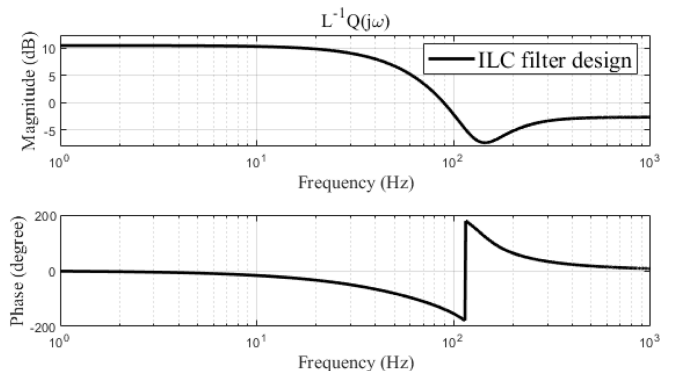


Fig. 9 Bode diagram of the ILC filter

모션을 30회 반복 수행하는 동안 Fig. 15와 같이 RMS 오차가 지속적으로 감소하지만 특정 구간(18, 21, 24, 25, 27, 30번째)에서는 오차가 증가하는 경우가 있다. ILC에 의해 저주파 오차는

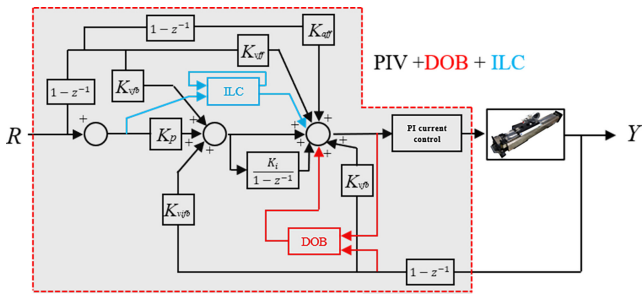


Fig. 10 Motion control schematic

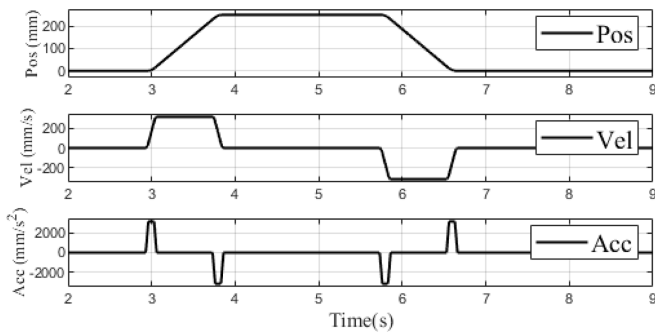


Fig. 11 Motion profile

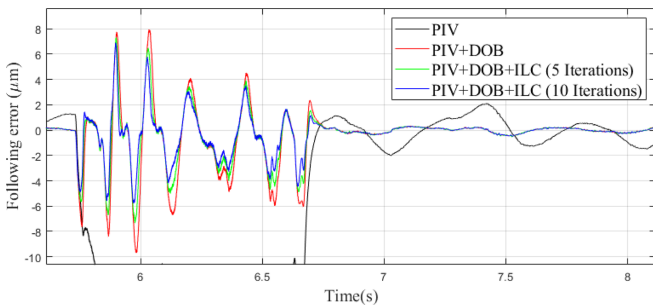


Fig. 12 Following error comparison

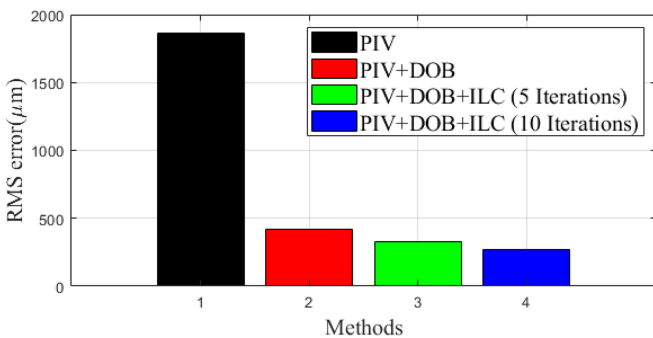


Fig. 13 RMS error comparison

제거되나 저역 통과 Q 필터 영향으로 고주파 오차는 잘 제거되지 않기 때문이다. 실제 모션을 반복하며 발생하는 추종오차 성분을 분석한 결과 Fig. 16과 같이 저주파수 성분은 줄어들지만 고주파 성분은 증가한다.

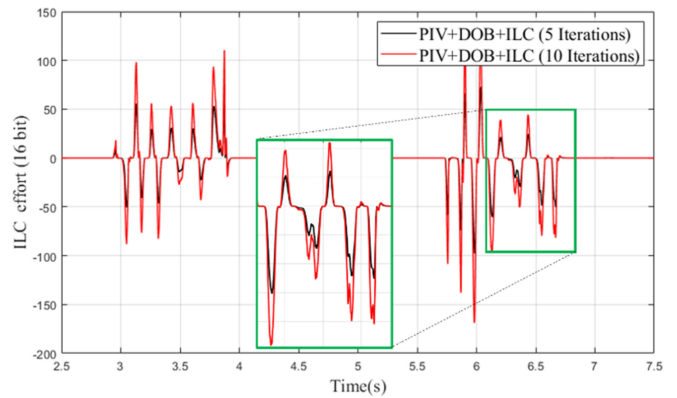


Fig. 14 ILC effort

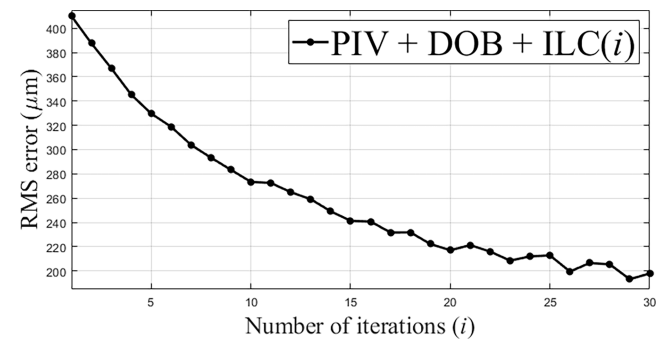


Fig. 15 RMS error by iterations

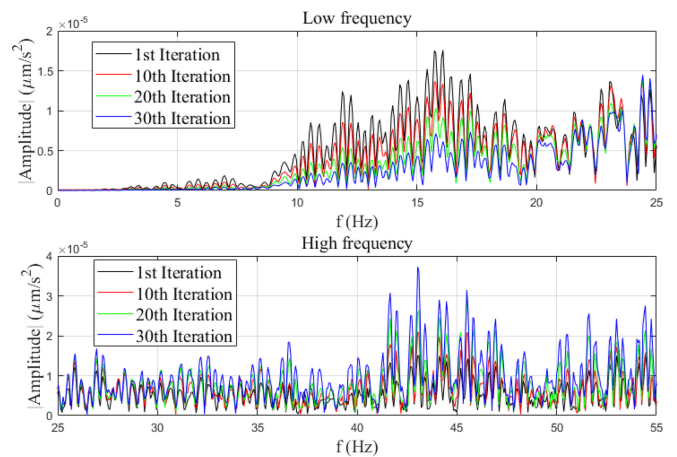


Fig. 16 Acceleration FFT of following error

5. 결론

이 연구에서는 조합형으로 구성된 선형 모터 모션 스테이지의 모델기반 주파수 영역 모션 제어기 설계를 위하여, DOB가 적용된 PMAC 서보 알고리즘의 이론 주파수 응답과 실제 주파수 응답을 비교하고 검증하여 튜닝 GUI를 설계하였다. 추가적인 성능 향상을 위하여, 주파수 응답을 통해 식별된 모델을 바탕으로 ILC를 적용하였다. 설계된 GUI는 절점주파수를 99.62%,

위상여유는 99.32%, 이득여유는 96.07%의 정확도로 성능 및 안정성을 예측하였고, 주파수 영역 모델 기반으로 제어기를 설계하여 시행착오를 크게 줄일 수 있었다. 모션 프로파일을 통하여 설계된 제어기의 성능을 비교한 결과 모델 기반의 DOB와 ILC를 함께 적용하였을 때, 추종오차가 54.32%, 정착시간이 93.56%, 평균오차가 85.29% 향상되었다.



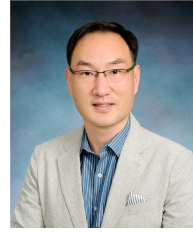
Hee Won Jeon

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

E-mail: dyfmfogldy@gmail.com

ACKNOWLEDGEMENT

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



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

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. 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)*, 3-683.
4. 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.
5. Murakami, T., Ohnishi, K., (1988), An advanced approach of servo control in industrial robot, *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1988, 379-384.
6. 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.
7. Longman, R. W., (2000), Iterative learning control and repetitive control for engineering practice, *International Journal of Control*, 73(10), 930-954.
8. Kim, D. H., Han, C. S., Kim, G. S., (1995), A force control of robot manipulator based on the iterative learning control, *Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering*, 577-583.

유연판재 조립 자동화를 위한 협동로봇 기반 볼트체결 시스템 개발

Screwing Automation System Using a Collaborative Robot for Steel Plate Assembly

김태훈¹, 정주노^{1,#}, 김휘수², 최태용², 경진호², 이대국^{3,#}
Tae-hoon Kim¹, Joono Cheong^{1,#}, Hwi-Su Kim², Taeyong Choi², Jinho Kyung², and Dae-Kug Lee^{3,#}

¹ 고려대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University)
² 한국기계연구원 로봇메카트로닉스실 (Division of Robot Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials)
³ 고려대학교 컴퓨터정보학과 (Department of Computer and Information, Korea University)
Corresponding Authors / E-mail: jncheong@korea.ac.kr, TEL: +82-44-860-1449, ORCID: 0000-0002-6220-0513
E-mail: daeguklee@korea.ac.kr, TEL: +82-44-860-1778, ORCID: 0000-0002-5023-1363

KEYWORDS: Screwing (볼트 체결), Robot automation (로봇자동화), Steel plate assembly (판재 조립), Compliant connector (유연 취부)

In this paper, we introduce a recently built screwing robotic system for the bolt assembly of elastic steel plates. The screwing robotic system consists of two vision cameras (having narrow and wide fields of view), a collaborative robot with a 10 kg payload, and a motorized screw drill with a pneumatic bolt supplier. Due to the elasticity of the steel plates, they tend to statically deform and dynamically vibrate during tasks under the conventional setting of automatic screwing, often resulting in screw failures. Thus, we designed a compliant connector device to be attached between the robot end-effector and screw drill that can absorb vibration and shock during the bolt assembly to improve the screwing quality and success rate of the bolt assembly. Upon adopting this screwing robotic system with the compliant connector, the success rate of the bolt assembly was improved from 56% to 100%.

Manuscript received: September 1, 2023 / Revised: October 23, 2023 / Accepted: November 22, 2023

1. 서론

볼트체결 공정은 제품 제조과정에서 가장 빈번히 일어나면서 동시에 제품의 완성도에 지대한 영향을 끼치는 공정 중 하나이다[1]. 그러나 이 볼트체결 공정은 작업자의 숙련도에 따라 작업의 질과 작업량에서 많은 차이가 발생하며 전반적으로 작업자에게 많은 부하를 발생시키고 업무 강도가 높아지는 이유의 하나로 지적되어 오래전부터 자동화하려는 시도가 있어왔다[2].

거슬러 올라가면 가장 먼저 등장한 것은 자동 볼트 공급기와 전동스크류를 결합한 전자동 볼트체결기로서 컨베이어형 공장에 도입되어 대량의 제품 제조 공정에 활용되어 왔다[3]. 그리고 최근에는 다품종 소량의 유연생산 및 셀공정에 적합한 로봇을 이용해 자동차 부품의 볼팅 체결 자동화 시도가 이루어지고 있으나[2] 고정된 위치에서 반복적으로 수행하는 볼트 체결 수준에

주로 머물러 있어, 실시간 체결 위치 변화가 있는 경우 또는 볼트 조립 시 외란 요소가 끼어드는 경우 대응이 어렵게 된다.

학술적 관점에서 볼트 체결의 자동화에 관한 체계적 연구 사례는 그리 많지 않다. 통상적으로 볼트체결이 성공한 경우와 오류가 발생한 경우 반력, 토크, 속도에서 상이한 특징을 보이므로 기존의 연구에서는 이런 정보를 데이터베이스화함으로써 볼트 체결 오류를 파악하는 방식을 채택하고 있다. 일본의 Matsuno 등은 서포트 벡터 머신(SVM)을 이용하여 체결과정에서 발생할 수 있는 오류를 분류하는 방법을 연구하였고[4], 독일의 Koch 등은 인간과 로봇이 공동작업하는 환경에서 로봇에 의한 클램핑 위험으로 인간을 보호할 수 있는 디커플링 유닛을 개발하였다[5]. 미국 CMU의 Cheng은 히든 마르코프모델(HMM)을 사용하여 소형 볼트체결에서 발생하는 오류를 분류하고 체결성공을 높일 수 있는 Compliant 스테이지도 개발하였다[6]. 로봇을

이용한 볼트체결 자동화 공정이 성공적으로 이루어지기 위해서는 볼트 홀의 중심과 스크류비트 간 정확한 위치정합이 필수적이다. Saga 등은 자동차 시트프레임 고정판의 볼트 체결을 하는 비전 기반의 볼팅 자동화 공정을 구현하였다[7]. 중국의 Wang 등은 실시간 모니터링을 위한 디지털 트윈을 적용한 볼트 체결 작업 데이터 분석 및 실시간 동기화를 적용한 볼트체결 방법을 개발하였다[8]. 일본의 Noze와 Shimonomura는 볼트 체결 작업을 위한 사람 손의 동작을 데이터화하고 카메라를 통한 위치 보정을 구현하여 볼트 체결 작업을 개발하였다[9].

이런 연구에도 불구하고 볼트가 볼트홀의 쓰레드와 맞닿아 결합되는 과정에서 볼트 가공 오차 및 형상, 마찰계수, 모재의 특성 등 쉽게 모델링되기 어려운 많은 불확실성을 갖고 있어 성공적 볼트 체결 전략을 체계적으로 마련하기 어려운 점이 있다. 향후 연구에서는 체결과정에서 발생하는 외부 인가력의 크기와 방향, 그에 따른 모재의 응력변화 등 작업 조건을 세분화하여 접근하고 폭넓은 데이터 확보와 분석과정도 요구될 것이다.

본 논문은 볼트체결의 특별한 한가지 경우인 유연 판재 조립을 대상으로 볼트체결 자동화 작업을 수행할 로봇 시스템의 개발사례를 보고하고 선택할 수 있는 하나의 솔루션으로서 제안한다. 제안하는 자동 볼트체결 시스템은 볼트 홀 인식과 카메라 및 영상처리장치, 로봇과 볼트 투입기/스크류 장치, 볼트 체결과정에서 발생하는 소음/진동 저감용 유연 취부를 주요 컴포넌트로 삼는다. 실제 필드 활용을 위한 성능실험과 신뢰성 확보를 위한 실험 결과도 함께 제시한다.

2. 연구 동기 및 해결 과제의 정의

2.1 볼팅체결 시 주요 오류

일반적으로 볼트체결 시 발생가능한 오류는 크게 Empty Screw(볼트의 부재), 위치 부 정합(Misplacement), Cross Threading, 그리고 Jamming 오류를 들 수 있다(Fig. 1 참조). Empty Screw 오류는 볼트 공급 장치의 오작동 및 고장, 볼트의 소진 또는 중간에 이탈되었을 때 발생하며 볼트자동체결 스펴들이 직진/회전할 때 반력이 없으므로 오류 판단이 용이하다. 위치 부 정합 오류는 볼트 체결 홀의 위치와 스크류 드라이버의 축이 어긋나 부 정확한 정합이 이뤄지면서 발생하는 오류로서, 이 오류가 발생하면 자동체결기의 스펴들이 전진하지 못한 채 강한 반력이 발생된다. Cross Threading이나 Jamming 오류는 주로 볼트와 볼트홀의 방향이 어긋나게 조립되면서 발생하는 오류로서 체결이 진행되면서 약간의 스펴들 전진이 일어날 수 있지만 강한 반력과 기울어진 볼트의 형상을 통해 오류를 구별할 수 있다. 이외에도 체결시간 지연에 따른 불완전 체결도 나타날 수 있는 오류의 형태이다.

이와 같은 볼트 체결 오류는 발생 후에는 구별이 명확하지만 진행과정에서는 판단이 어려워 실시간 복구나 사전방지가 용이하지 않고 볼트 체결 자동화를 어렵게 만드는 요인이 된다.

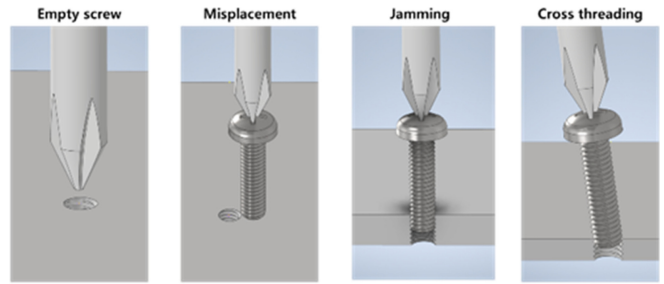


Fig. 1 Bolt assembly failures (From left to right: empty screw, misplacement, jamming, and cross threading)

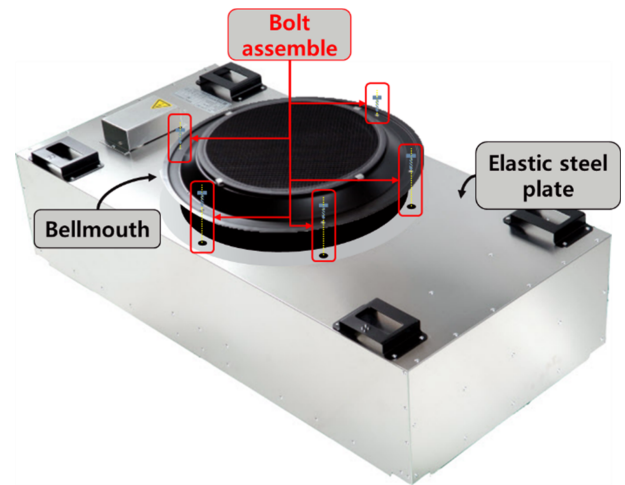


Fig. 2 Bellmouth duct assembly line

2.2 연구 동기와 해결 과제

클린 룸 등에서 많이 사용되는 기체여과기 본체는 평판 철재로 만들어진 박스형 구조물로 되어 있으며 벨마우스 팬과 안전망이 이 평판재에 부착 되어있다(Fig. 2 참조). 보통 벨마우스 팬과 안전망을 조립할 때 넓은 면에 걸쳐 볼트 체결을 하므로 복수의 인력이 체결 작업을 담당하며 노동강도가 높기 때문에 이 작업에 대한 자동화 요구가 발생한다. 기체여과기 조립에서 요구되는 볼트체결 자동화를 위해서는 볼트 홀 인식을 위한 카메라 및 영상처리장치, 인식된 위치로 안전하게 이동하여 조립 작업을 담당할 협동로봇, 볼트체결 단위작업에 필요한 자동볼트 체결기 등 장치가 요구되며, 또한 볼트체결의 성공률을 높이기 위해 로봇의 운용속도나 궤적에 대한 세심한 고려가 필요하다.

그러나 통상적인 견고한 모재와 달리 얇고 넓은 평판재는 낮은 강성 때문에 수직 힘에 대해 쉽게 탄성 변형되고 체결과정에서 충격이 가해지면 소음, 진동이 유발되어 볼트가 이탈되거나 원활한 볼트 체결이 불가능 해진다. 만약 이런 유연판재 조립에서 일반적인 로봇 볼트체결 자동화 장치를 사용한다면 Fig. 3과 같은 시나리오를 따를 것이다. 먼저 카메라를 통해 볼트를 관측할 수 있는 위치로 로봇을 움직이고(1), 카메라로 볼트의 정확한 위치를 측정 후(2) 해당 위치로 체결기 끝단을 측정된 위치로 정렬한 후 피스톤이 전동 스크류를 하강시킨다(3). 하강과 동시에

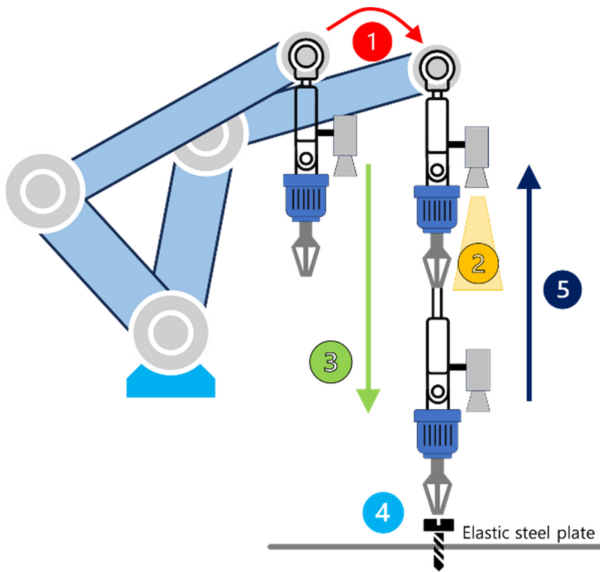


Fig. 3 Robot motion for screwing

전동 스크류가 볼트를 회전시켜 유연판재에 볼트를 체결하고 (4), 체결 완료 후 피스톤이 복귀하여 체결기와 볼트가 분리된다 (5). 그러나 실제 적용시킬 경우 4번의 볼트체결 과정에서 스크류 스핀들이 빠르게 회전하면서 볼트에 동적 회전력을 가할 때 판재의 수직방향 소음과 진동이 발생할 수 있으며 이는 반대로 스크류를 타고 로봇에게 반력으로 작용하여 로봇의 보상 운동을 유발하는 불안정한 사이클을 만들어 낼 수 있다. 이런 전체 시스템의 기계적 진동은 판재-볼트-스크류 비트 간 지속적 혹은 간헐적 접촉 불량을 초래하여 결국 체결지연은 물론이고 Cross Threading 혹은 볼트 이탈과 같은 체결 실패를 일으킨다.

이런 불안 요인을 해소하지 못한다면 유연 판재 조립 시 로봇을 이용한 자동 볼트체결 공정은 현장에서 받아들이기 어렵게 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 볼트 체결 단위 작업에 적합한 볼트 체결용 로봇 자동화 시스템을 구축하고, 특히 유연 판재 진동 반력을 흡수하여 유연 판재-볼트 그리고 스크류 비트 끝단 간 접촉이 유지될 수 있도록 하는 콤플라이언스 커넥터 장치도 함께 개발하여 적용하였다. 이 콤플라이언스 커넥터는 강성을 조절할 수 있는 기능과 함께 댄핑 패드가 부착되어 있어 로봇 및 유연 판재의 강성에 맞춰 적절한 값을 설정할 수 있다. 체결을 위한 볼트 홀의 인식은 정밀 비전 시스템을 사용하였고 PLC를 통해 로봇 및 볼트공급장치와 연동될 수 있도록 하였다. 개발한 시스템에 대한 자세한 소개는 다음 장에서 다룬다.

3. 유연판재 조립용 볼트체결 로봇자동화 시스템

3.1 시스템 개관

볼트 체결 자동화 장치는 크게 6축 다관절 로봇, 볼트 홀 인식용 비전시스템, 볼트체결기와 가변 콤플라이언스 커넥터로 구성된다. Fig. 4에 보이는 것과 같이 사용된 로봇(두산 로보틱스



Fig. 4 Overview of screwing automation robot system

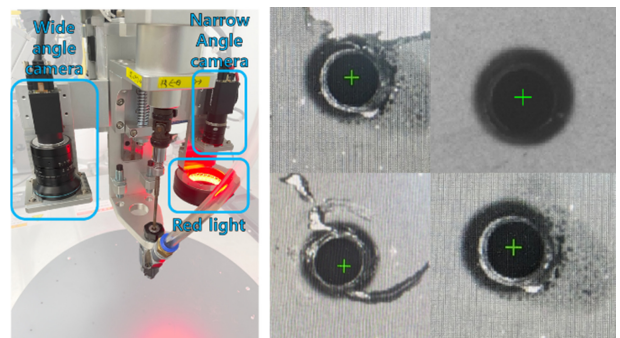


Fig. 5 Vision system (left) and bolt hole sensing (right)

M1013)은 자체 질량 33 kg, 허용하중 10 kg의 6축 다관절 협동로봇이다. 두 개의 펜던트를 통해 로봇 제어 및 볼트 체결 작업 제어를 할 수 있다. 또한 로봇 제어기에서 각 축의 토크 센서를 통해 충돌 인식 및 그에 따른 비상정지 기능이 동작한다. 볼트 체결 자동화 공정 구현 시 로봇 작업 공간 내 작업자의 공동 협업 및 안전을 고려하여 협동로봇으로 선정하였다.

비전시스템(HIKROBOT MV-CA013-20GM)은 2D 카메라로서 볼트 홀 인식을 위한 광학장비이다. 비전 시스템은 광시야 카메라와 근시야 카메라 2대의 카메라로 이루어져 있다. 카메라는 같은 카메라 모듈이지만 렌즈의 구성을 달리하여 광각 카메라와 근시 카메라를 구현하였다. 광시야 카메라는 유연 판재 면에 펼쳐진 여러 볼트 홀들의 위치 인식을 위해 사용되고, 근시야 카메라는 특정 볼트의 홀 중심 위치와 크기를 정밀 인식하기 위한 용도로 사용된다. 외부 환경 변화에도 변함없는 다른 볼트 홀의 센터와 크기 인식의 일관성을 위해 근시야 카메라 전단에 적색 광원을 사용한다. Fig. 5는 카메라 설치 장면과 측정된 볼트 홀 센터의 위치를 보여 주고 있다. 홀 가장자리의 흠결이나 마감에 따라 센터 위치 측정이 다소 영향을 받게 되지만 대체로 볼트 체결에 무리가 없는 수준이다.

볼트 공급장치는 제어기 신호에 맞춰 볼트 거치대에 정렬된 날개의 볼트를 우레탄 튜브에 삽입하여 공압을 통해 우레탄 튜브를 통해 전달한다(Fig. 6 참조). 다양한 볼트에 대해 사용 가능하도록 볼트 장전 카세트의 카세트 간격과 투입구 및 볼트 거치대가

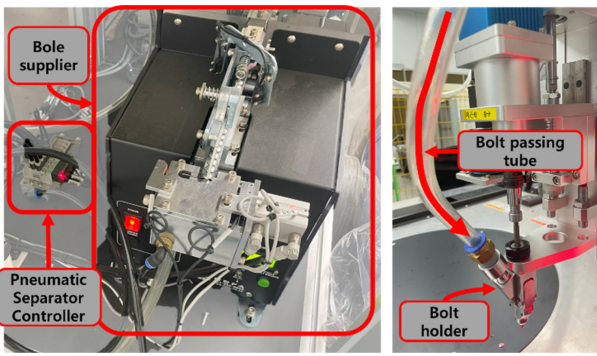


Fig. 6 Bolt supply unit and passing tube

조절 가능하다. 볼트가 체결기 끝에 도착하여 장착되면 모터에 의해 스핀들이 회전하면서 동시에 공압이 피스톤을 밀어내면서 스핀들을 하강시킨다. 스핀들에 의해 볼트가 유연 판재 표면에 접촉하여 수직 압력이 가해지면서 회전하면 볼트 체결이 진행된다. 스핀들의 회전속도는 300 RPM으로 설정되어 있다. 체결 최대 허용 시간이 경과(Timeout)하였거나 체결 토크 반력이 일정 수치를 넘게 되면 회전이 멈추고 스핀들이 수거되면서 체결 작업이 종료된다. 전자의 경우 일반적으로 체결이 불완전한 미완성 오류(Empty Bolt, 체결 토크 미달 등)로 귀결되는 반면, 후자의 경우 정상적인 체결과 Jamming, Cross Threading 오류 모두 해당될 수 있다. 하지만 현재 시스템의 경우 센서 피드백을 통한 오류 판단 기능이 없으므로 향후 개선을 통해 보완이 필요하다.

본 볼트체결 로봇 시스템 개발을 위해 본 연구의 개발은 볼트홀을 인식하기 위한 비전 센서 및 비전 데이터를 활용한 볼트홀 인식 알고리즘, 공압을 통한 볼트 공 및 전동 스크류 장치의 압력 인가를 위한 공압 피스톤 제어, 동작 시퀀스에 따른 전동 스크류 장치의 제어, 협동로봇의 제어 및 피드백을 PLC를 이용하여 각 장치 간의 통신 및 제어를 구현하였다.

Fig. 7은 전체 시스템의 진행 시퀀스를 보여 주고 있다. 로봇 동작 초기 위치 입력과 시작 신호를 입력하면 시계 방향으로 볼트 체결을 자동적으로 진행하게 된다. 각 볼트 홀에 대하여 카메라가 센터 위치를 특정하면 로봇은 해당 위치로 이동하고 볼트를 투입하여 작업을 완료하게 된다. 총 24개의 볼트 홀에 대하여 평균적으로 볼트 홀마다 12초가 소요된다. 로봇의 동작 중에는 불필요한 휴지 시간 및 동작을 가진다. 이러한 휴지 시간 및 동작을 최적화하여 작업시간은 더욱 단축 가능할 것이다.

3.2 가변 컴플라이언스 커넥터 설계 및 제작

앞절에서 설명한 볼트 자동 체결 시스템은 볼트 체결 명령에 따라 스핀들이 회전하면서 하강할 때 볼트와 유연 판재 간 빠른 하방 충격을 만들어 진동과 불안정한 초기 정렬상태를 유발시킨다(Fig. 8참조). 이런 초기 접촉 상황에서 체결기 스핀들의 회전으로 체결을 진행하면 유연 판재-볼트-스크류-로봇 간 연속된 상호작용의 효과로 인해 소음 진동이 공진의 양상으로 지속되는 경향을 보인다. 실제로 실험에 사용되는 유연 판재와 협동로봇은 비교적

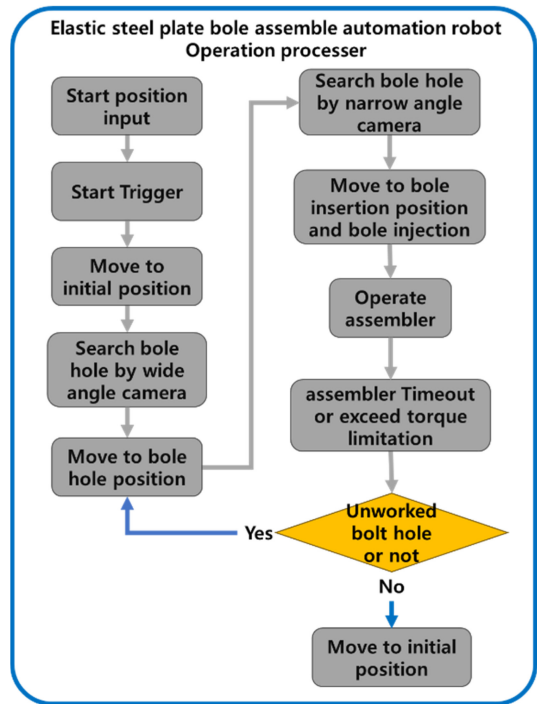


Fig. 7 Automated screwing sequence

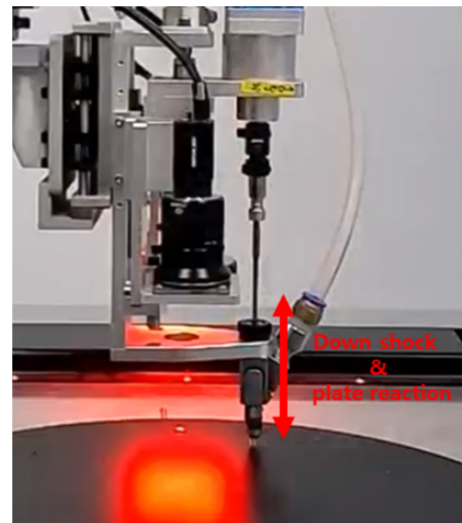


Fig. 8 Force interaction between screw bolt and elastic plate

낮은 기계적 강성을 갖고 있어 진동이 발생되면 시각적으로도 큰 변위의 진동 양상을 띠며, 이런 진동과 소음은 볼트이탈 오류나 미완성 볼트체결 오류로 이어지는 경우가 많았다.

이런 로봇과 유연 판재 간 상호 작용을 차단하여 기계적 소음 진동을 줄이고 궁극적으로 볼트 체결의 신뢰성을 높이기 위해 로봇과 볼트 체결기 사이에 컴플라이언스 커넥터를 설계 제작하였다(Fig. 9 참조). 이 컴플라이언스 커넥터는 수직방향 상대 운동만 허용한다. 자세한 설계 모형과 제작 사진은 Fig. 9에 소개되어 있다. 이 컴플라이언스 커넥터 내부에는 최대 15개의 연성이 높은 Shear Pad(스프링 요소)와 1개의 댐핑 쿠션이

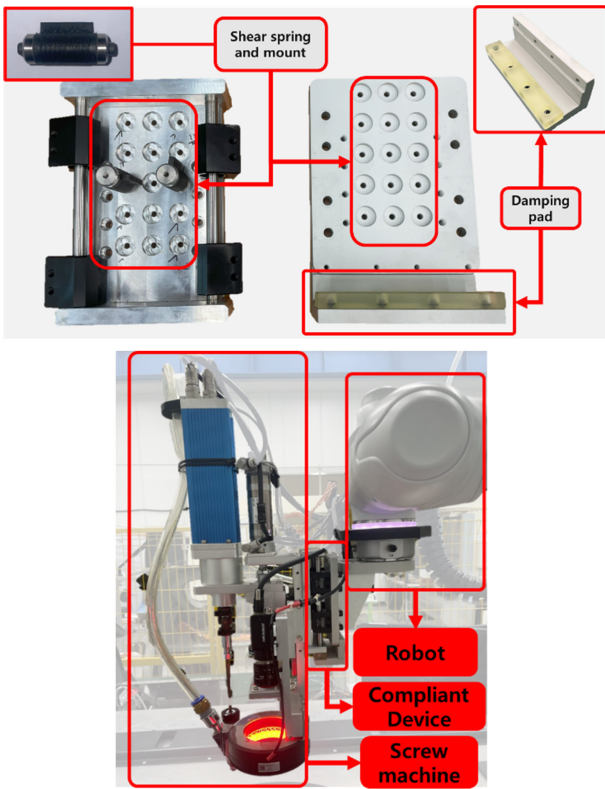


Fig. 9 Developed compliant connector (Up : compliant connector parts, Down : mounted compliant device)

Table 1 Shear pad specifications

Model	Axial stiffness [N/mm]	Lateral stiffness [N/mm]
HCL-11A	135.47	3.5

장착된다. Shear Pad는 수직방향 스프링처럼 역할을 하여 전체 시스템의 강성을 낮출 뿐만 아니라 볼트 체결 시 판재와 체결기 사이의 충격과 진동을 국소화시켜 로봇으로 전달되는 흐름을 억제한다. Table 1에 정리된 것처럼, 이 Shear Pad의 수직 방향 강성은 3.5 N/mm로서 대략 1 kg의 하중에 대해 3 mm 정도의 비교적 큰 변위를 발생시킨다. Shear Pad는 병렬로 연결되어 개수에 따라 강성이 비례되며 실험 조건에 따라 Shear Pad 개수를 조절할 수 있도록 커넥터가 설계되어 있다. 또한 댐핑 패드는 진동 충격이 억제되도록 커넥터 하단부에 부착하였다.

컴플라이언스 커넥터의 부착 유무에 따른 시스템의 거동을 분석하고 설계의 효과성을 분석하기 위해 간단한 수학적 모델을 Fig. 10와 같이 설정하였다. 단, 이 수학적 모형은 유연판재와 볼트가 접촉을 유지하고 있는 정상 상태를 기준으로 하며 유연판재는 단순 질량과 선형스프링으로 가정하였다[10]. 먼저 컴플라이언스 커넥터가 없는 모델의 선형 방정식은 다음과 같이 유도되며

$$\begin{bmatrix} m_r + m_b & 0 \\ 0 & m_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{x}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_r + 2k_p & -2k_p \\ -2k_p & 4k_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ x_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

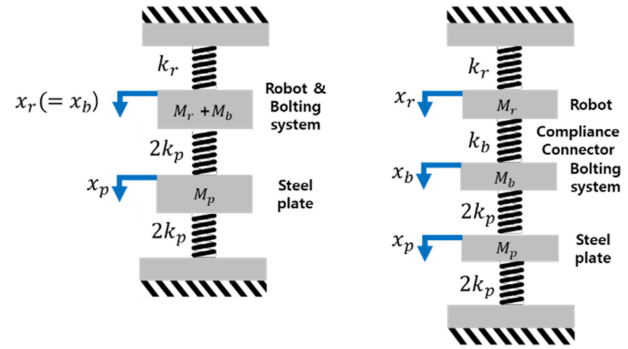


Fig. 10 Screw system models (left: Without compliant connector, right: With compliant connector)

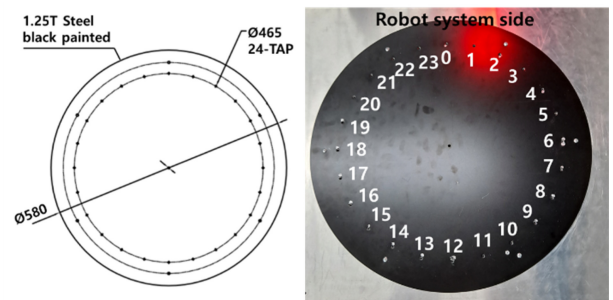


Fig. 11 Steel plate with bolt hole positions (left : engineering drawing, right : manufactured goods)

Table 2 Parameters of the screwing system models

Spring	Spring coefficient [kN/m]	Mass	Mass coefficient [kg]
k_r	20	m_r	20
k_b	3.5	m_b	7
k_p	38.395	m_p	0.94

컴플라이언스 커넥터를 포함한 모델의 선형 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_r & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_r + k_b & -k_b & 0 \\ -k_b & k_b + 2k_p & -2k_p \\ 0 & -2k_p & 4k_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ x_b \\ x_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식에서 $f(t)$ 는 볼트 체결기에 가한 외력이고, m_r , m_b , m_p 는 각각 로봇, 볼트체결기, 유연 판재의 질량이고, x_r , x_b , x_p 는 각각 로봇, 볼트체결기, 유연 판재의 변위이며, k_r , k_b , k_p 는 로봇강성, 컴플라이언스 커넥터 강성, 유연 판재 강성을 의미한다. 그리고 컴플라이언스 커넥터가 없는 모델의 경우 로봇과 볼트체결기가 직결되어 있으므로 $x_r = x_b$ 이 된다. 또한 댐핑 패드의 효과는 해석의 편의를 위해 포함시키지 않는다.

모델에 사용된 각 파라미터별 수치는 Table 2에 정리하였다. 질량의 경우 제품 스펙이나 단순 측정을 통해 쉽게 확보 가능하지만 로봇 강성이나 유연 판재의 강성은 추가적인 실험이나 간접적인 계산을 통해 얻을 수밖에 없다. 로봇의 강성 값은 전면 첫번째 볼트 홀(Fig. 11)에 로봇을 옮겨 놓은 상태에서 로봇

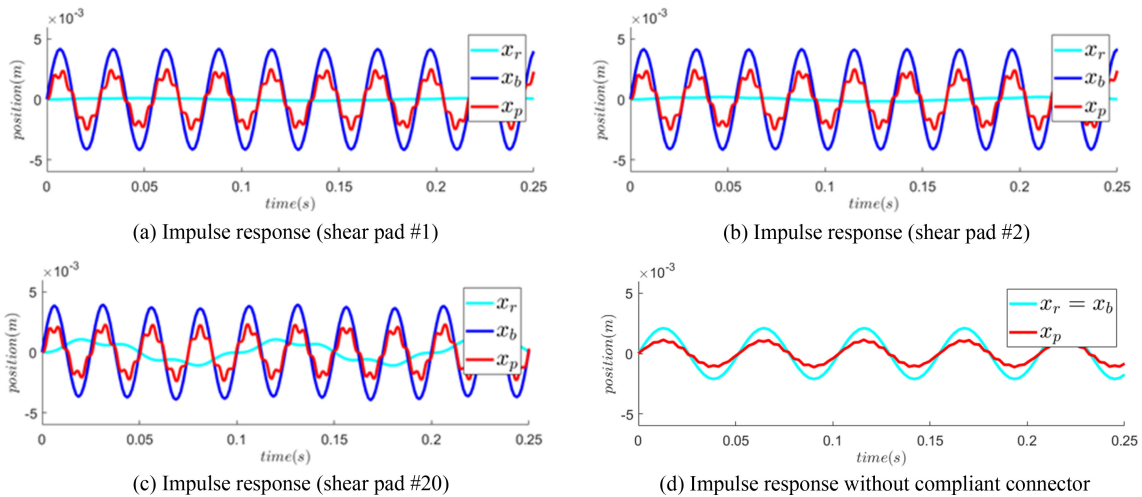


Fig. 12 Impulse responses of screwing system models

말단부에 증력방향 하중을 가하여 등가 강성을 구하였으며, 원형 평판의 선형 강성 k_p 는 Virgin이 제안한 Lumped 모델을 사용하여 계산하였다[10].

상기 2개의 모델에 대하여 컴플라이언스 커넥터의 Shear Pad 개수를 달리하면서 $f(t) = m_b \delta(t)$ 를 볼트체결기에 가하여 임펄스 응답을 구해보았다($\delta(t)$ 단위 임펄스임). 먼저 Shear Pad 1개를 사용하면 컴플라이언스 커넥터의 강성은 $k_b = 3.5 \text{ kN/m}$ 로 매우 낮게 설정된 것이다. 이때 응답은 Fig. 12(a)과 같이 로봇의 말단(x_r)의 변화가 거의 일어나지 않는 반면 볼트 체결기와 유연 판재의 위치(x_b, x_p)가 비슷한 양상으로 움직여 감을 알 수 있다. 즉 볼트체결기에 가해진 힘이 유연 판재의 진동을 유발하지만 볼트체결기 끝이 유연 판재를 지속적으로 추종해가므로 볼트와 유연 판재가 접촉을 잃지 않고 비교적 안정적으로 볼트 체결이 진행될 수 있음을 유추해 볼 수 있다. Shear Pad 2개를 사용하면(Fig. 12(b) 참조) 컴플라이언스 커넥터의 강성은 $k_b = 7 \text{ kN/m}$ 로 여전히 낮게 설정된 상황이지만 Shear Pad 1개를 사용할 때에 비해서 로봇의 말단(x_r)의 변화가 조금 커진 것을 알 수 있다. 다만 여전히 볼트 체결기와 유연 판재의 위치(x_b, x_p)가 비슷한 양상으로 변해가므로 볼트 체결기의 동작은 유사할 것으로 생각된다. Shear Pad 20개 사용한 경우(Fig. 12(c) 참조) 컴플라이언스 커넥터의 강성은 $k_b = 70 \text{ kN/m}$ 로 커졌으며 이에 따라 로봇 말단(x_r)의 움직임이 상당히 커졌음을 알 수 있다. 비록 볼트 체결기와 유연 판재 간 상대 움직임은 앞서 두 경우와 유사하지만 로봇의 움직임이 커지므로 로봇의 위치 보상 제어기의 동작에 따라 전체 시스템이 앞서 경우에 비해 불안정한 진동 운동을 발생시킬 것이다. 컴플라이언스 커넥터가 부착되지 않은 경우는 매우 큰 강성을 가지는 것으로 생각할 수 있으며 Shear Pad의 개수를 무한개로 늘린 경우와 유사할 것이다. 이때 Fig. 12(d)에서처럼 볼트체결기의 변위(x_b)는 로봇의 말단 위치(x_r)를 추종하는 반면 유연 판재의 운동과는 유리된 상황이 된다. 이는 곧 체결 과정에서 볼트와 유연 판재가 불안정한 접촉 상황을 초래하여 소음과 볼트 이탈을 초래할 가능성이 높음을

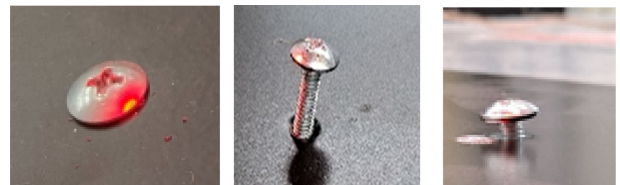


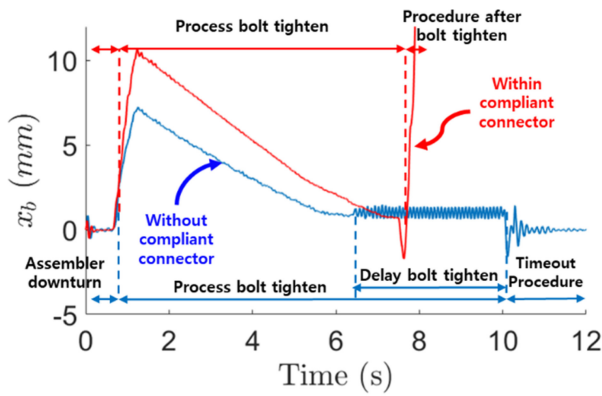
Fig. 13 Cases of the assembled bolt (From left: Success, cross threading, and non-tightening)

의미한다.

결론적으로 임펄스 응답 비교를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 첫째, 컴플라이언스 커넥터는 로봇 팔의 움직임을 억제하면서 볼트 체결기가 유연 판재와 접촉을 유지하는데 도움이 된다. 둘째, 컴플라이언스 커넥터의 강성이 낮을수록 볼트 체결 중 충격에 따른 진동 현상이 로봇 팔로 전달되는 것을 더욱 효과적으로 억제한다. 다만 너무 낮은 강성은 체결기의 자중에 의한 컴플라이언스 커넥터의 처짐이 커지고 복귀동작의 스크류 비트 회수 시 반력에 의한 다운스wing이 커지므로 커넥터의 강성이 너무 낮게 선정되지 않도록 주의가 필요하다.

4. 실험결과

본 절에서는 설계 제작된 볼트체결 자동화 로봇 시스템의 효과성을 검증할 두 종류의 실험을 수행하였다. (i) 컴플라이언스 커넥터 유무에 따른 볼트 체결 성능을 비교하고, (ii) 다음으로 컴플라이언스 커넥터의 강성 변화에 따른 볼트 체결의 양상을 분석해 보았다. 체결에 사용한 원형 판재는 Fig. 11과 같으며 해당 판재는 검정 코팅된 스텔 재질이며, 두께 1.25 T, 지름 580 mm, 24개의 볼트홀을 품고 있다. 본 실험에서 볼트 체결기의 변위(x_b)를 측정하기 위해 레이저 트래커(Leica Hexagon AT960LR)를 사용하였다. 이를 위하여 유연커넥터 하단에 리플



(a) x_b with and without compliant connector

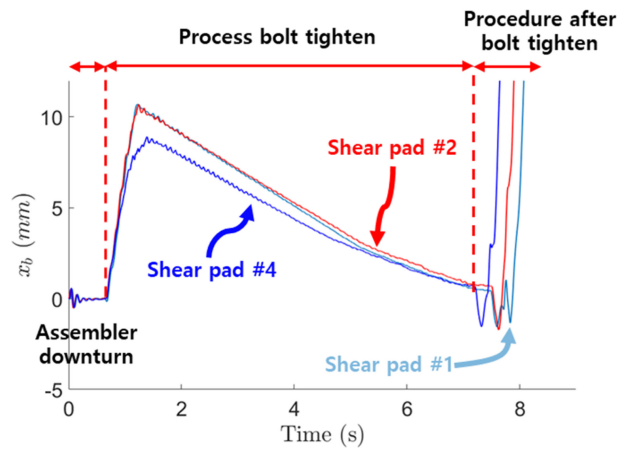
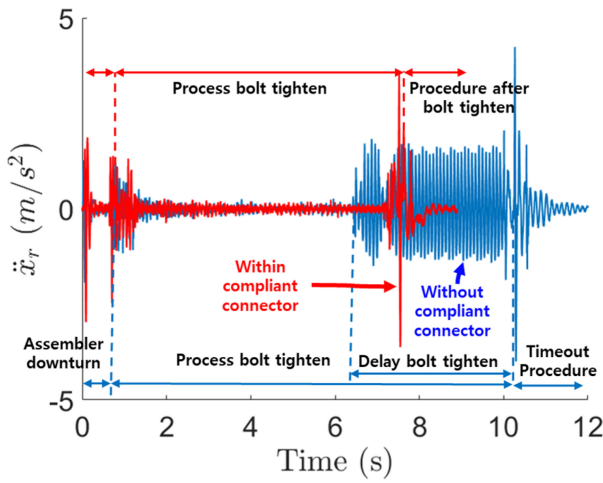


Fig. 15 Comparison of vertical movements of screw spindle with shear pads #1, #2, and #4



(b) \ddot{x}_r with and without compliant connector

Fig. 14 Comparison of vertical movements with and without compliant connector

렉터를 부착하여 변위(x_b)를 측정하였다.

첫 번째 비교 실험을 위해 먼저 컴플라이언스 커넥터 없이 로봇의 말단에 볼트체결기를 직결연결한 상태에서 유연 판재에 볼트체결 작업을 수행했다. 본 실험에서 사용한 볼트는 M4 (0.7 Pitch), 길이 10 mm, Truss 헤드형, 탭타이트 나사산을 가지는 볼트이다. 이 결과, 상당한 경우에서 볼트 체결 시 Timeout 오류가 발생하였다. 이 Timeout 오류는 상하 진동에 의해 유연 판재와 볼트 체결기가 밀착되지 못해 볼트 체결 압력이 낮게 되고 볼트 체결이 지연되면서 일정 시간이 흘러 해당 오류를 만든 것이다. 중간에 볼트가 기울어지면서 재밍 혹은 Cross Threading과 같은 오류가 생겨 더 이상 진행되지 않고 체결이 강제 종료되는 오류도 드물지만 발생하였다. Fig. 13은 위에서 언급한 본 실험에서 발생한 오류의 종류이다. 총 3장의 유연판재(72홀)에서 볼트 체결이 성공한 횟수는 40회로 약 56%의 성공률을 가지는 것으로 나타나, 컴플라이언스 커넥터가 없는 볼트체결 자동화 로봇은 유연 판재에 대한 작업이 불가능함을 확인하였다. Fig. 14는 체결과정에서 체결기의 상하 운동을 레이저 센서를 통해 측정한 결과와 로봇 끝단의 가속도 값을 측정한 결과이다. 그림에서 컴플라이언스 커넥터가 미부착된 경우, 대략 6초 이

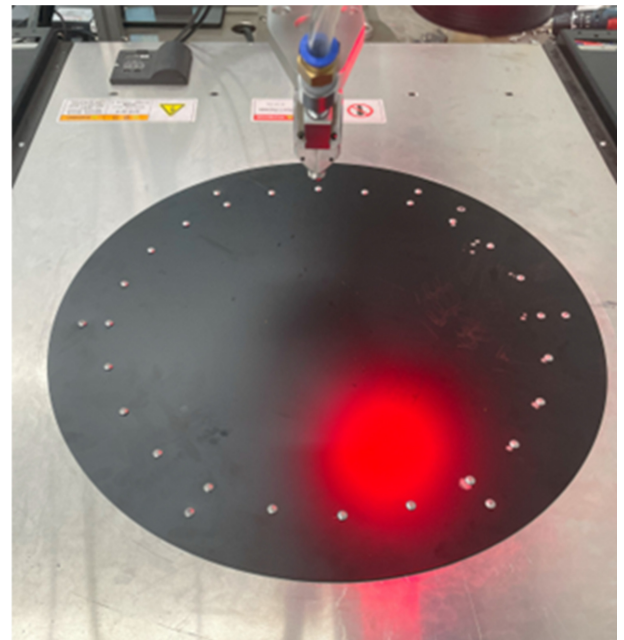


Fig. 16 Completed bolt assembly task (24 bolt holes)

후부터 수직 방향의 진동이 지속적으로 발생하여 체결시간 지연 오류로 나타나는 것을 알 수 있다. 가속도 그래프에서 진동 양상은 더욱 두드러지게 표현되고 있음을 알 수 있다.

이제 컴플라이언스 커넥터(Shear Pad 2개)를 장착한 상태로 동일한 볼트체결 작업을 수행한 결과 총 3장의 유연 판재 72홀에서 모두 체결이 완료되어 100% 성공률을 보였다. 체결되는 과정에서 소음과 진동이 확연히 줄어든 것을 알 수 있었다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 체결기의 진동이 상당히 억제되었으며, 대략 7초쯤에서 체결이 정상 종료되었다.

두번째 비교실험에서는 컴플라이언스 커넥터의 Shear Pad를 1개에서 2개, 4개로 장착한 상태로 동일한 볼트체결 작업을 수행해 보았다(Fig. 15 참조). 각각의 경우에 대해 Fig. 15와 같은 커넥터의 위치 응답 결과를 얻었다. 또한 모든 경우에서 총 3장

의 유연 판재 72홀에서 모두 체결이 완전히 성공하였다(Fig. 16 참조). Shear Pad를 4개 설치하게 되면 이전 경우에 비해 소음 진동이 다소 커지는 것을 알 수 있었다. 하지만 이 또한 기대 수준을 넘지는 않는 것으로 판단된다. 한편 Shear Pad의 개수가 증가함에 따라 체결 시간이 감소하는 양상을 보였다. 이는 유연 성을 가지는 모재에서 압력을 인가하며 볼트 체결을 하는 것이 체결 과정에서 체결시간 감소와 같은 긍정적인 효과임을 보여 준다. 이런 결과를 통해 볼 때, 콤플라이언스 커넥터의 유무에 따른 변화에 비하면 콤플라이언스 커넥터의 강성 변화에 따른 볼트체결의 질과 성공률은 크게 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 다만 Shear Pad의 개수 증가에 따른 체결 시간 감소와 소음 증폭의 Trade Off를 고려하여 적정 Shear Pad 개수를 조사하는 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 종래의 시스템으로는 불가능하였던 유연 판재 조립 용 볼트 체결 공정을 자동화하는 시도 중 하나이며 실제 공정에 적용할 수 있는 수준의 유연 판재 체결의 질과 성공률을 확보를 목표로 개발되었다. 개발된 로봇 기반 자동 볼트체결 시스템은 볼트 홀 인식용 2대의 카메라 및 영상처리장치, 협동로봇과 볼트 투입기/스크류 장치, 콤플라이언스 커넥터로 구성되어 있다. 협동로봇을 사용하였으므로 볼트 체결 작업 시 사람이 옆에서 작업을 보조하거나 또는 인간-로봇 협력작업이 가능하다. 아울러 새롭게 설계 제작한 콤플라이언스 커넥터는 기존 로봇의 위치 제어만으로도 유연 판재 조립 시 소음과 진동을 줄여주고 볼트 체결 성공률을 높일 수 있었다. 콤플라이언스 커넥터를 적용한 결과 기존 볼트체결 성공률이 56%에서 100%로 획기적으로 높아졌다. 향후 소프트웨어 인터페이스와 커넥터 구조의 완성도를 높여 실제 유연 판재 체결 필드 작업에 적용할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 산업통상자원부가 출연하고 한국 산업기술평가관리원에서 위탁 시행한 로봇 산업핵심기술개발 사업(No. 20009005), 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(No. 2021RIS-004), 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원사업(No. RS-2020-KA157018), 그리고 국토교통부 AI기반 스마트하우징 기술개발 사업의 연구비지원(20SHTD-B157018-01)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Torres, Y., Nadeau, S., Landau, K., (2021), Classification and

quantification of human error in manufacturing: A case study in complex manual assembly, *Applied Sciences*, 11(2), 749.

2. Bartoš, M., Bulej, V., Bohušik, M., Stanček, J., Ivanov, V., Macek, P., (2021), An overview of robot applications in automotive industry, *Transportation Research Procedia*, 55, 837-844.
3. GIKEN, Tightening Machine. <https://gikenkogyo.com/en/prod-use.aspx>
4. Matsuno, T., Huang, J., Fukuda, T., (2012), Nonlinear SVM based anomaly detection for manipulator assembly task, *Proceedings of the 2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, 364-367.
5. Koch, T., Fechter, M., Oberer-Treitz, S., Soltani, B., (2018), Development of a balanced decoupling unit for a safe automated screwing process during human-robot-cooperation, *Procedia CIRP*, 72, 75-80.
6. Cheng, X., Jia, Z., Mason, M. T., (2019), Data-efficient process monitoring and failure detection for robust robotic screwdriving, *Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 1705-1711.
7. Sága, M., Bulej, V., Čuboňova, N., Kuric, I., Virgala, I., Eberth, M., (2020), Case study: Performance analysis and development of robotized screwing application with integrated vision sensing system for automotive industry, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(3), 1729881420923997.
8. Wang, Y., Liu, Y., Wang, J., Zhang, J., Zhu, X., Xu, Z., (2022), Research on process planning method of aerospace engine bolt tightening based on digital twin, *Machines*, 10(11), 1048.
9. Nozu, K., Shimonomura, K., (2018), Robotic bolt insertion and tightening based on in-hand object localization and force sensing, *Proceedings of the 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 310-315.
10. Lawrence, N. V., (2021), A note on lumped parameter modeling, *Mechanics Research Communications*, 116, 103750. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2021.103750>



Taehoon Kim

Received the B.S. degree in Electro-Mechanical Systems Engineering from Korea University, Sejong, South Korea, in 2021, where he is currently pursuing the Ph.D. degree. His research interests include collaborative robot, autonomous robot, and mechanical systems control.

E-mail: kim_taehoon@korea.ac.kr



Joono Cheong

Received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from the Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, South Korea, in 1995, 1997, and 2003, respectively. In 2003, he was a Researcher with the Institute of Precision Machine and Design, Seoul National University, Seoul, South Korea. From 2003 to 2005, he was a Postdoctoral Researcher with the Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA. Since 2005, he has been with the Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University, Sejong, South Korea, where he is currently a professor. His research interests include robotic manipulation, motion planning, and mechanical systems control.

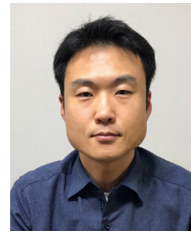
E-mail: jncheong@korea.ac.kr



Hwi-su Kim

Was born in South Korea. He received the B.S. and Ph.D. degrees in mechanical engineering from Korea University, in 2007 and 2014, respectively. He was with the School of Mechanical Engineering, Korea University. He is currently a Senior Researcher at the Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM). His research interests include manipulator design, counterbalance mechanism, and safe robot arms.

E-mail: hskim82@kimm.re.kr



Taeyong Choi

Taeyong Choi received the B.S. degree in Electronic and Electrical Engineering from Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, South Korea, in 2003, and the Ph.D. degree in Electrical Engineering from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea, in 2010. He was a Senior Engineer with Samsung Electronics, South Korea, in 2010. He has been working with the Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM), South Korea, since 2011. His current research interests include robot safety, robotic applications, machine learning, and collaborative robot.

E-mail: taeyongc@kimm.re.kr



Jinho Kyung

Received the B.S. degree from Hankook Aviation University, Seoul, Korea, in 1985, and the M.S. and Ph.D. degrees from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea, in 1988, and 2003, respectively. He is currently a Principal Researcher at the Intelligent Machine Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea. His research interests include active magnetic bearing system design, micromachine tool system analysis, and parallel kinematic machine analysis.

E-mail: jhkyung@kimm.re.kr



Dae-Kug Lee

Received his B.S. in Computer Science in 2004 from UCL, University of London, U.K. He received an M.S. in Computer Information Systems in 2018 from Korea University, Korea, where he is working toward a Ph.D. in the ICT Convergence Lab. His research interests include self-driving cars, EMS (Energy Management Systems), smart cities, smart housing, blockchain, deep learning, and ICT convergence.

E-mail: daekuglee@korea.ac.kr

Press Forming/Drawing Molding in the Radiator Support Mold Process of 440 MPa High Strength Steel Sheets

Dong-Hwan Park¹, Tae-Gil Lee², and Hyuk-Hong Kwon³#

¹ Gyeongbuk Hybrid Technology Institute

² Samsungtech Co., Ltd.

³ Department of Mechanical Engineering, Daejin University

Corresponding Author / E-mail: hkhwon@daejin.ac.kr, TEL: +82-31-539-1020

ORCID: 0000-0002-4249-4868

KEYWORDS: Forming/drawing, Radiator support parts, Automotive, High strength steel sheets, Molding technology

This study aimed to develop automotive radiator support parts by applying the press forming/drawing mold technology of 440 MPa high-tensile steel sheets. It is intended to develop a shape structure that does not generate shape and positional accuracy, deformation, wrinkles, or cracks by maintaining strong contact surface pressure on both sides of the blank material and freezing elastic recovery stress. Therefore, quality improvement and high productivity were secured by applying the forming/drawing method of high-strength steel sheets to the radiator support parts.

Manuscript received: September 4, 2023 / Revised: November 28, 2023 / Accepted: December 5, 2023

1. Introduction

Recently, from the viewpoint of automobile convenience, resource conservation, energy conservation, and global environmental measures, lightweight technology, such as the adoption of high-efficiency drive technology, has become an important key element as a way to improve fuel efficiency of automobiles. However, as new parts such as large-capacity batteries and high-pressure fuel tanks used in eco-friendly electric vehicles and hydrogen vehicles are added, the weight of vehicles has increased, and to overcome this, lighter vehicles are needed. As a way to lighten vehicles, there is a wide range of material choices to not only reduce weight by replacing existing steel materials with lightweight materials such as engineering plastics, fiber-reinforced plastics, and CFRP, but also to maximize the weight-saving effect through optimal design and component integration. However, high-strength steel sheets have many different characteristics in terms of press forming, so technical solutions are required in car seat parts [1-4]. When producing radiator support parts using a

conventional drawing method using high-strength steel plate materials, the blanking pressure is controlled to a single padding pressure when the material located on the upper surface of the lower die is contacted by the punch descending from the upper die and flows into the die. Therefore, it is difficult to solve excessive wrinkles, cracks, and springback problems in the product after molding [5-8]. In particular, not only is there a lot of quality variation due to the difference in contact surface pressure between the upper and lower molds, but it is also causing problems with customer delivery and quality due to excessive working hours and low productivity. As a solution, we aim to improve production, quality, and delivery issues by developing a forming/drawing composite mold technology with a double pressure source structure that can increase the contact surface pressure of the upper and lower molds to ensure strong contact with the blank material. As shown in Fig. 1, the radiator support parts that makes up the car body is a radiator support panel component located inside the front bumper of the car body. It is mounted on the car body along with the head light and rises from the front, rear, both sides, and road



(a) Body in white



(b) Radiator support panel



(c) Radiator support product

Fig. 1 Radiator support parts

surface when the car is driven. It is a key component that blocks external air resistance in advance, absorbs shock when colliding with the car in front, and protects the car body and engine. Therefore, positioning accuracy and material rigidity are required due to the special need to protect the engine from external shocks. In other words, radiator support parts use high-strength steel materials with rigidity because they protect the front of the car's engine room in the event of a collision with the car in front while driving and control air resistance and noise generated from both left and right sides and the road surface. However, due to the physical characteristics of high tensile strength and yield strength of high-strength steel materials, it is difficult to control elastic stresses such as excessive springback, cracks, and distortion during press forming operations [9-13].

This study aims to develop automobile radiator support parts by applying press forming/drawing composite mold technology of 440 MPa high-strength steel plate. A forming/drawing composite molding method that can strongly maintain the overall contact

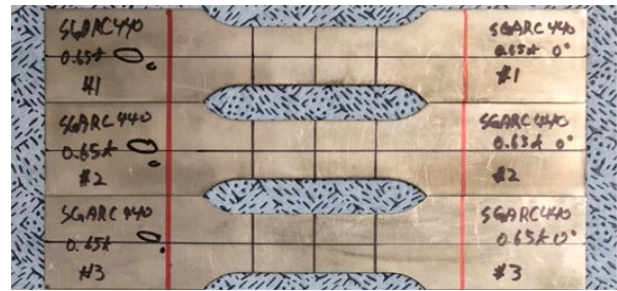


Fig. 2 Tensile test specimens of SGARC440

Table 1 Mechanical properties of SGARC440

Direction [°]	Yield stress [MPa]	Tensile stress [MPa]	Elongation [%]
0	380.3	494.6	30
45	392.3	502	28.6
90	378	494.6	30.6
Mean	383.5	497.1	29.7

surface pressure on both the top and bottom of the blank material was designed and manufactured to compare and analyze the occurrence of deformation, wrinkles, and cracks.

2. Material Property Testing

For the molding analysis of the radiator support parts, a tensile test was performed to confirm the mechanical properties. The material used in the test was galvanized steel (SGARC440), with a thickness of 0.65 mm, and the specimen was manufactured by wire cutting with a width of 25 mm and a gauge length of 50 mm, as shown in Fig. 2. A tensile test was conducted to determine the mechanical properties, and tensile specimens were manufactured in the rolling direction, 45-degree direction, and 90-degree direction. Table 1 shows the tensile test results of SGARC440 material, and Fig. 3 shows the stress-strain diagram of SGARC440 material. SGARC440 material has a yield strength of 383.5 MPa, tensile strength of 497.1 MPa, and elongation of 29.7%.

3. Mold Design and Manufacturing

The manufacturing processes of radiator support parts were designed and manufactured in a total of 6 processes, including 1st process Forming & Drawing, 2nd process Trimming, 3rd process Flanging & Restriking, 4th process Piercing & Cutting, 5th process Piercing & Cam Piercing, and 6th process Piercing & Cutting.

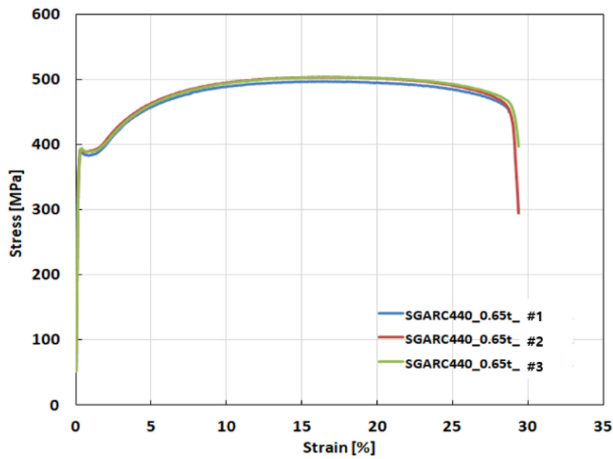


Fig. 3 Stress-strain curve of SGARC440

Table 2 Process sequence of radiator support die

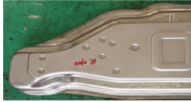





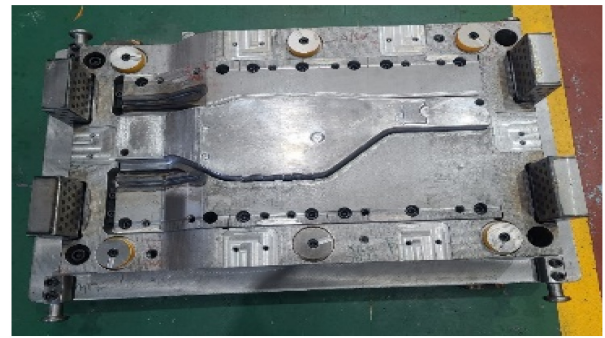
Step	Process name	Product
1	Forming & Drawing	
2	Trimming	
3	Flanging & Restriking	
4	Piercing & Cutting	
5	Piercing & Cam piercing	
6	Piercing & Cutting	

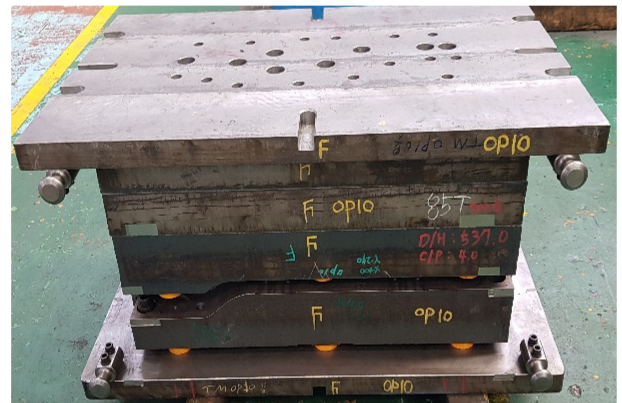
Table 2 shows the process sequence of the radiator support mold. Process 1 Forming & Drawing is a process of forming and drawing the high-strength steel blank of the radiator support product, and was produced by applying Forming/Drawing composite mold technology. Process 2 Trimming is a process of trimming the exterior of the product, Process 3 Flanging & Restriking is a process of forming and shaping the flange part, and Process 4 Piercing & Cutting is a process of piercing the hole and cutting the exterior. Process 5 Piercing & Cam Piercing is the process of piercing the hole and piercing the side hole, and Process 6 Piercing & Cutting is the final process of piercing the hole of the product



(a) Upper mold



(b) Lower die



(c) Assembly mold

Fig. 4 Forming/drawing mold of radiator support parts

and cutting the outside. Fig. 4 shows the mold for the forming/drawing process of the radiator support parts. The upper and lower molds were designed and manufactured by applying a casting die set. Fig. 5 shows the initial blank of the forming/drawing process of the radiator support parts. Fig. 6 shows the forming/drawing mold structure of the radiator support parts. We manufactured a forming/drawing mold with a double pressure source structure that can increase the pressure of the contact surfaces of the upper and lower molds to ensure strong contact with the blank material. In other words, the double pressure source structure was designed to strongly contact the blank material with the punch, pad, blank holder, and die. As shown in Fig. 6, the double pressure source structure was manufactured to increase the pressure on the blank

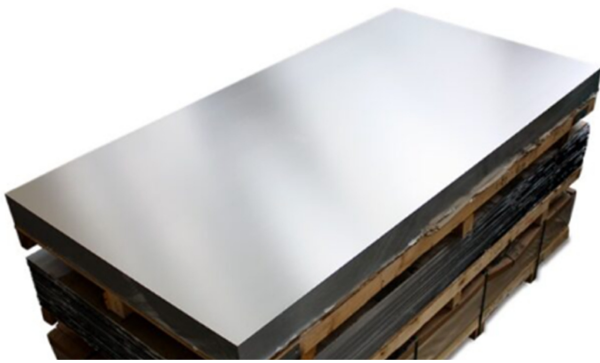


Fig. 5 Forming/drawing process blank of radiator support parts

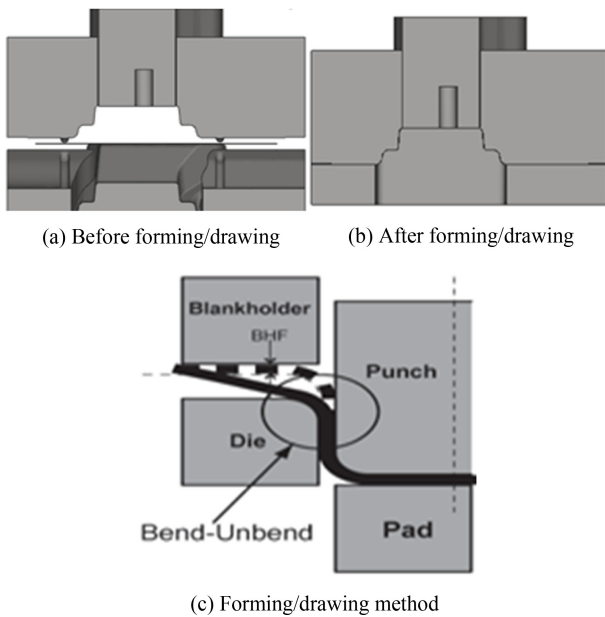


Fig. 6 Forming/drawing method for making radiator support parts

contact surface of the upper and lower molds. Figs. 6(a) and 6(b) show before and after forming/drawing, Fig. 6(c) shows forming/drawing method.

4. Forming Analysis

Process design was conducted to produce radiator support parts, and the blank material was divided into process 1 Forming & Drawing, process 2 Trimming, process 3 Flanging & Restriking, process 4 Piercing & Cutting, process 5 Piercing & Cam Piercing, and process 6 Piercing & Cutting. The process was designed to complete the product. For the 1st process Forming & Drawing mold, sheet metal forming analysis was performed. Radiator support parts and molds were modeled in three dimensions using 3D CAD S/W, and sheet metal forming analysis of the radiator

Table 3 Simulation conditions of radiator support parts

Plastic material	SGARC440
Blank size of material [mm]	300(width) × 640(length)
Thickness of material [mm]	0.65
Rigid die	STD11
Initial temp. of material [°C]	20
Initial temp. of die [°C]	20
Condition of friction	0.1, 0.15
Pressing time [SPM]	20
Simulation process	Press forming & drawing

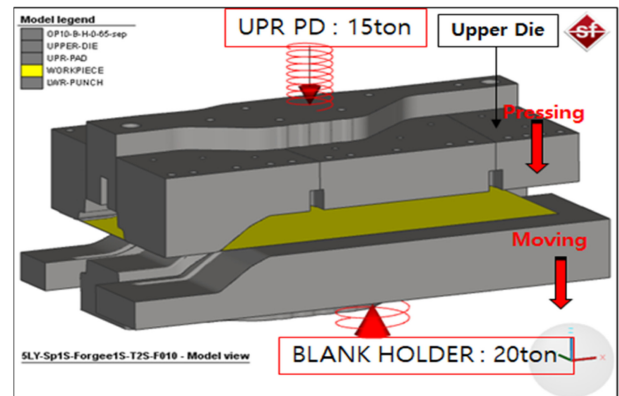


Fig. 7 Forming/drawing mold model of radiator support parts

support mold was performed using a forming software (Simufact Forming, HEXAGON). For sheet metal forming analysis, tensile test data of SGARC440 material was input as mechanical properties. Table 3 shows the sheet metal forming analysis conditions. When forming a sheet, a forming analysis was performed by dividing the friction coefficient into 0.1 and 0.15. The forming speed of the press was set at 20 SPM, and the initial blank was a rectangular blank (300 × 640 mm). Fig. 7 shows the part model of the forming & drawing mold in the radiator support parts. In the forming & drawing process, a forming analysis was performed by applying a double pressure source structure to ensure strong contact with the blank material using punches, pads, blank holders, and dies, and to increase the pressure on the contact surfaces of the upper and lower molds.

Fig. 8 shows the thickness change at a friction coefficient of 0.1 as a result of sheet forming analysis of the Forming & Drawing mold, and Fig. 9 shows the thickness change at a friction coefficient of 0.15. In the forming & drawing process, a double pressure source structure is applied to increase the pressure on the contact surfaces of the upper and lower molds, such as punches, pads, blank holders, and dies, allowing strong contact with the blank material, resulting in a significant decrease in thickness in

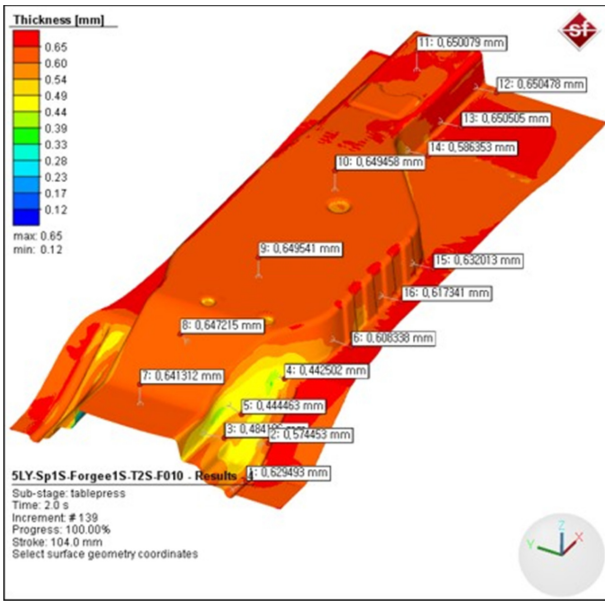


Fig. 8 Thickness change of radiator support parts at friction coefficient 0.1

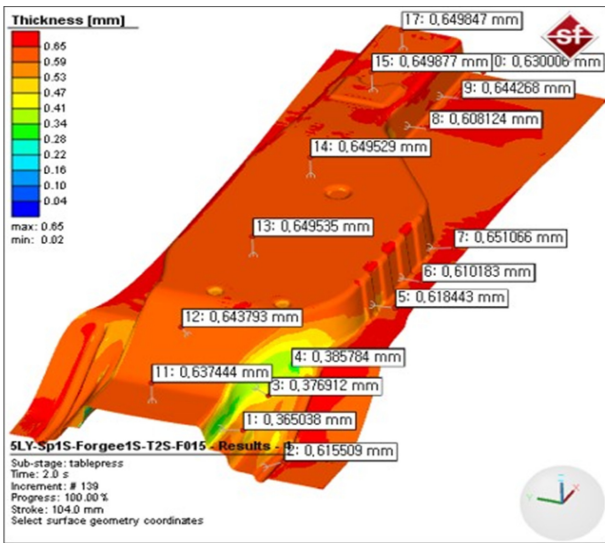


Fig. 9 Thickness change of radiator support parts at friction coefficient 0.15

areas where stress is concentrated. As a result of checking the thickness change according to the friction coefficient change, when the friction coefficient is 0.1, the thickness is at least 0.44 mm, when the friction coefficient is 0.15, the thickness is at least 0.36 mm, etc. It can be seen that the thickness reduction increases as the friction coefficient increases.

This shows that the thickness reduction rate is 32.3% and 44.6%, which can be predicted to result in significant bursting to the point where molding is impossible.

Fig. 10 shows the maximum load under the conditions of

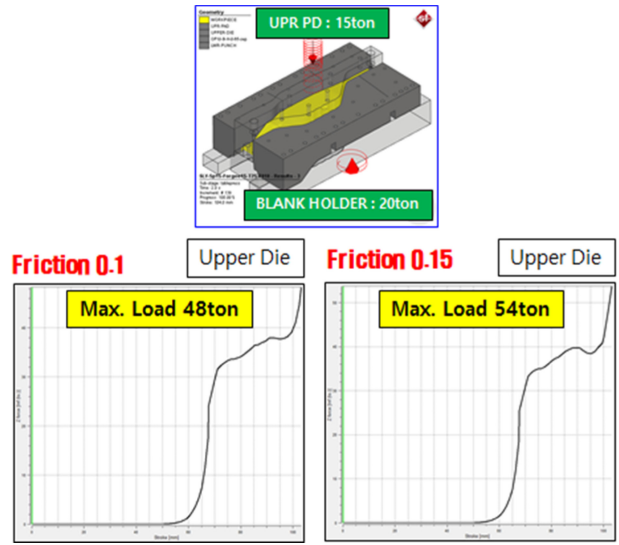


Fig. 10 Maximum load of radiator support mold according to friction coefficient

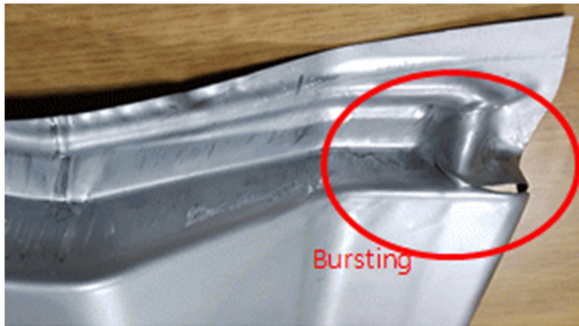
friction coefficients of 0.1 and 0.15 for the radiator support parts. At a friction coefficient of 0.1, the maximum forming load is approximately 48 tons, and at a friction coefficient of 0.15, the maximum forming load is approximately 54 tons. It was predicted that bursting would occur after molding at friction coefficients of 0.1 and 0.15, and it was confirmed that the thickness change increased as friction increased. In other words, it was found that as the friction coefficient increased, the maximum forming load increased and the thickness change at the stress concentration area increased. Therefore, in the results of the forming analysis performed using the square blank, bursting was predicted to occur at both end corners regardless of the friction coefficient increase of 0.1 or 0.15.

5. Results and Discussion

A mold with a double pressure source structure was manufactured that can increase the pressure of the contact surfaces of the upper and lower molds to ensure strong contact with the blank material in the forming & drawing process mold for radiator support parts. In other words, the double pressure source structure is designed to strongly contact the blank material with the punch, pad, blank holder, and die. Beads were applied to the flange parts at both ends to prevent wrinkles. Fig. 11 shows the Forming & Drawing process product using a square blank. Fig. 11(a) shows forming/drawing process product, Fig. 11(b) shows enlarged bursting part of forming/drawing process product. During the forming & drawing process, the blank material was formed into



(a) Forming/drawing process product



(b) Bursting part

Fig. 11 Forming/drawing process product using rectangular blank



Fig. 12 Final blank shape of forming/drawing process

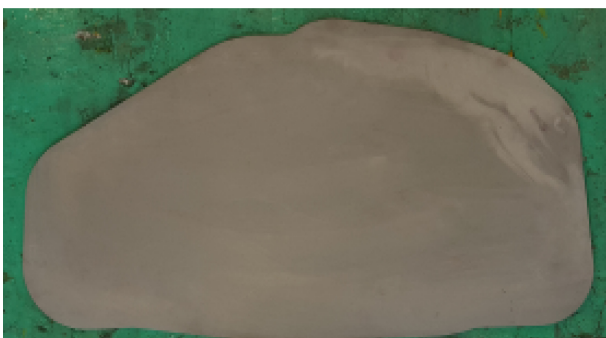


Fig. 13 Forming/drawing process product using final blank shape

strong contact with punches, pads, blank holders, and dies, and bursting occurred at the corners at both ends. To improve this, the existing square blank was designed and molded by the blanking die to resemble the product shape as shown in Fig. 12, and a good molded product was obtained as shown in Fig. 13. Therefore, since

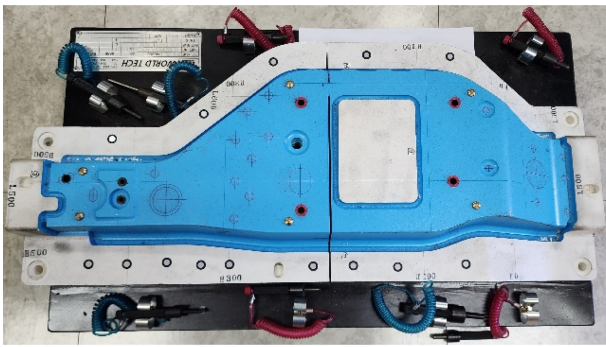


Fig. 14 Measurement scene of 3D coordinate measuring machine for radiator support parts

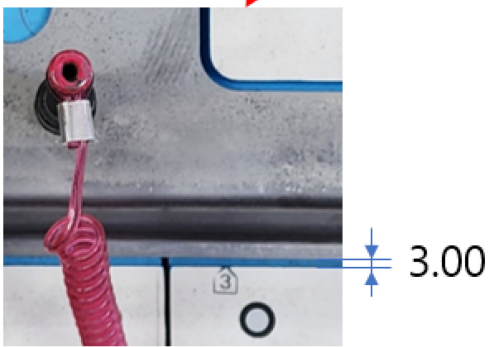
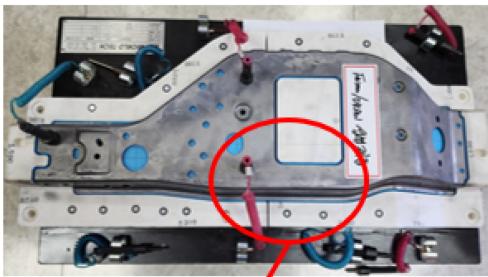
Table 4 Measurement results of shape precision for radiator support parts

Shape precision goal [mm]	Measurement data [mm]
3.00±0.50	2.865, 2.530, 2.518, 2.881, 2.846
	3.001, 2.770, 2.784, 2.802, 3.089
	2.822, 2.575, 2.977, 2.839, 3.275
	2.697, 2.561, 2.710, 2.761, 2.847
	2.925, 3.243, 2.834, 3.046, 2.914
	3.267, 2.845, 2.686, 2.583, 2.715
	3.036, 3.004, 2.915, 2.908, 2.845
	3.392, 3.079, 3.040, 3.294, 3.149
	2.992, 3.216, 2.951, 3.072, 3.041
	3.385, 3.298, 3.281, 2.838, 3.379

the blank shape has a great influence on the occurrence of bursting of molded products, it is judged that consideration of this is necessary. In addition, although it is cost-effective to cut the coil material into square blanks and apply them to the press line, it was possible to produce good products by applying the square blanks to the press line through blanking processing. Fig. 14 shows a scene measuring shape accuracy with a 3D measuring device, and Table 4 shows the shape accuracy measurement results. From the shape accuracy measurement results, it can be seen that the springback phenomenon is within ±0.5 mm tolerance. Fig. 15 shows the measurement of shape precision by using the checking fixture for radiator support parts. The checking fixture was manufactured with a gap of 3.00 mm between the outer size of the radiator support parts and the outer size of the checking fixture shown in Fig. 15(a).



(a) Checking fixture



(b) Measurement part of shape precision using checking fixture

Fig. 15 Measurement of shape precision for radiator support parts

Measurement of shape precision for radiator support parts is shown in Fig. 15(b), the change in the 3.00 mm gap between the outer size of the radiator support parts and the outer size of the checking fixture is measured.

6. Conclusion

This study developed automobile radiator support parts by applying press forming/drawing composite mold technology of 440 MPa high-strength steel plate. By applying the press forming/drawing composite mold technology of high-strength steel plate, material property evaluation, plate forming analysis, prototype mold design and production, and prototype performance evaluation were performed. The results of this study are summarized as follows.

(1) In order to determine the mechanical properties of SGARC440, the material to be processed for radiator support parts, stress-strain diagrams were obtained through tensile testing, and the forming analysis results were obtained by applying the material properties during sheet metal forming analysis.

(2) To produce radiator support products, a total of 6 processes were designed, including Forming & Drawing, Trimming, Flanging & Restriking, Piercing & Cutting, Piercing & Cam Piercing, and Piercing & Cutting, and a forming analysis was performed in the press forming/drawing composite mold process of 440 MPa high-strength steel plate. As a result, as the friction coefficient increased, the maximum forming load and thickness reduction increased.

(3) It was found that the shape of the blank in the forming & drawing process mold for radiator support parts had a significant impact on the occurrence of bursting of the molded product.

(4) By developing a forming/drawing mold structure that can strongly maintain the overall contact surface pressure on both the top and bottom of the blank material by applying high-tensile steel plate material, we have secured a composite mold technology that freezes elastic recovery stress, enabling continuous work at the press production site. Confirmed. Therefore, it was possible to improve the quality and productivity of radiator support parts by applying the forming/drawing composite mold technology of high-strength steel plate.

REFERENCES

1. Park, D.-H., Kwon, H.-H., (2016), Development of automotive seat rail parts for improving shape fixability of ultra high strength steel of 980MPa, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 15(5), 137-144.
2. Park, D.-H., Tak, Y.-H., Kwon, H.-H., (2018), Process design of automobile seat rail lower parts using ultra-high strength, DP980 steel, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 17(2), 160-167.
3. Lee, C. M., Kim, J. H., Oh, W. J., Ryu, B. H., (2017), A study on the analysis for upper seat track of automobile using 1180 MPa ultra-high strength steel, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 34(8), 525-531.
4. Ko, D., An, J., Jang, M., Bae, J., Kim, C., Kim, B., (2008), Process design of seat rail in automobile by the advanced high strength steel of DP780, Transactions of Materials Processing, 17(3), 197-202.
5. Song, J., Kim, S., Park, S., Huh, H., (2006), Stress-based springback reduction of an AHSS front side member, Transactions of Materials Processing, 15(4), 295-303.

6. Kim, K., Kim, S., Yoo, K., Lee, C., Shim, H., (2014), Application of springback analysis in the development of a reinforce center pillar stamping die, Transactions of Materials Processing, 23(5), 297-302.
7. Kang, K., Kim, S., Ro, H., (2016), Change in springback tendency during forming of a hat-type product with high strength steel using a digital servo press, Transactions of Materials Processing, 25(1), 21-28.
8. Song, J., Youn, K., Park, C., Heo, J., Kim, Y., (2017), Evaluation of servo press slide motion for springback reduction of high strength steel, Transactions of Materials Processing, 26(5), 277-285.
9. Lee, J., Kim, S., (2016), Automatic tool compensation for an UHSS automotive component using a compensation module, Transactions of Materials Processing, 25(2), 109-115.
10. Jang, D., (2017), The process development of automotive light-weighting door using high strength steel, Transactions of Materials Processing, 26(1), 55-62.
11. Bang, G., Seong, H., Kwak, H., Kim, C., (2017), A study on stamping of the center pillar (high-strength steel-780MPa) Using Finite Element Analysis, Transactions of Materials Processing, 26(2), 87-94.
12. Kwak, J., Yoon, S., Kim, S., Park, J., Han, H., (2017), Prediction of deformation mechanism and fracture for an auto-part with advanced high strength steel using solid element and damage theory, Transactions of Materials Processing, 26(5), 293-299.
13. Cha, C., Lee, S., Ko, D., Kim, B., (2009), A study on the forming of automotive front side member part with ultra high strength steel of DP980, Transactions of Materials Processing, 18(1), 39-44.



Dong-Hwan Park

Head researcher in Gyeongbuk Hybrid Technology Institute. His research interests are plastic working, sheet metal forming, hot and cold complex forging for automobile parts.

E-mail: pdh@ghi.re.kr



Tae-Gil Lee

Director in the Department of R&D Center, Samsungtech Co., Ltd.. His research interest is sheet metal forming for automobile parts.

E-mail: ltg1119@naver.com



Hyuk-Hong Kwon

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Daejin University. His research interests are metal forming for automobile parts and intellectual properties.

E-mail: hhwon@daejin.ac.kr

Implementation and Verification of Fresnel Zone Plate Patterns Designed by Optimization of Surface Phase

Huy Vu¹, and Joohyung Lee^{1#}

¹ Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology
Corresponding Author / E-mail: jlee@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6343
ORCID: 0000-0003-3219-878X

KEYWORDS: Numerical simulation, Fresnel zone plate patterns, Kinoform, Phase plate, Physical optics propagation

In this study, we present a numerical simulation approach for designing Fresnel zone plate (FZP) patterns. By optimizing surface phase parameters using desired merit functions in ray-tracing software, the obtained surface phase was converted into an FZP pattern through a 5-step procedure. A comparison between our numerical simulation approach and the traditional analytical method showed a negligible zone size difference of 0.606 nm and nearly absolute agreement of 17.549 μm in focal spot size. The FZP pattern was experimentally verified by an expected focal spot size of 18.55 μm . Our approach demonstrated design flexibility and has potential applications in simulating various functionalities in FZP patterns and refractive-diffractive hybrid lenses to address specific optical challenges. The surface phase can be freely modified based on optimization objectives that cannot be achieved using the analytical approach, ensuring high-precision design for accurate extraction.

Manuscript received: October 15, 2023 / Revised: October 29, 2023 / Accepted: October 31, 2023

1. Introduction

The trend of shrinking and thinning optical systems has always been a priority in the design of optical devices. In recent years, flat lenses have emerged as leading candidates to realize this trend [1-3]. Unlike conventional bulk lenses that use refractive theory to modulate the phase and control light propagation, Fresnel Zone Plates (FZP) is one of the most basic flat lenses that utilize diffraction theory to control waves [4,5]. They serve as the basis for modifying various diffractive patterns to address specific optical issues, such as depth of focus (DOF) extension, freeform wavefront metrology, compact imaging systems, and aberration correction [6-9]. They are widely applied in microscopy, astronomy, and telecommunications due to their thin structure.

The fundamental principle of FZP is established in dividing concentric rings into alternating transparent and opaque zones to generate out-of-phase π depicted in Fig. 1(a), allowing them to superpose diffraction rays as foci [10]. Most of the FZP is designed

through an analytical representative of the exact size of zones $r_m^2 + f^2 = (f + m\lambda)^2$, where r_m is a radius of m^{th} ring zone ($m = 1, 2, 3, \dots$), f and f_m is the foci position of FZPs and m^{th} zones, respectively, λ is the designed wavelength, and $f_m = f + m\lambda$. Then, the light propagation is considered based on Rayleigh-Sommerfeld diffraction theory as Fig. 1(b) [11].

Indeed, with the rapid advancement of photolithography and laser writer technique, the FZP is a high-resolution solution for an optical promise, but its major drawback is low efficiency [12-14]. Various ideas have been proposed to improve this issue, such as kinoform, binary phase plate, and refractive-diffractive hybrid optics [15-18]. However, the analytical design approach is quite rigid and inflexible, making it challenging to vary the size of the zones to achieve the desired combined performance.

In this study, we introduce a numerical approach for designing the FZP patterns, that can be easily modified through an optimization of surface phase using optical ray-tracing software [19]. The flexible numerical approach allows the FZP pattern to exhibit multifunctionality and adapt to various applications. We

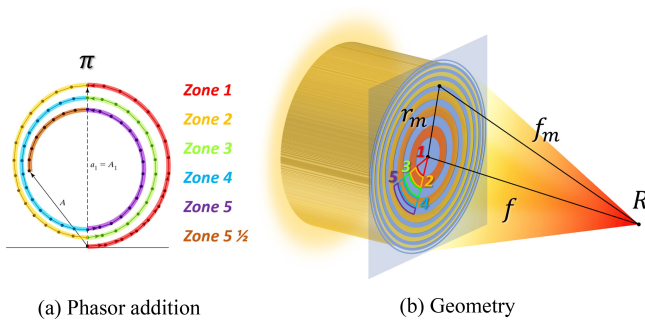


Fig. 1 Fresnel zone plate is designed by the analytical method

will discuss the detailed design procedure, evaluate performance, conduct a comparison with the analytical solution, and then validate it through experimentation.

2. Design Method

We introduce a general design procedure for the FZP pattern in Fig. 2(a) and their details in Fig. 2(b) include 5 main steps.

2.1 Procedure

Step 1: Surface Phase Optimization

The numerical simulation is performed using the design software ZEMAX[®]. Binary Optics does not directly model wavelength-scale grooves. Instead, ZEMAX employs the phase advance or delay represented by the surface locally to alter the direction of ray propagation. Binary surfaces can have zero thickness with no index change across the surface. A diffractive surface representing FZP is defined in ZEMAX by the Binary Optic 2 surface (ϕ), which adds a symmetrical phase to the ray according to the following polynomial expansion [20].

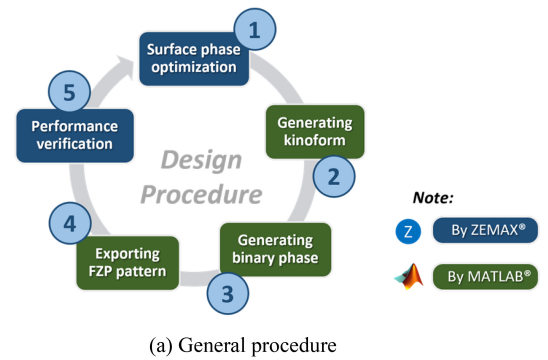
$$\phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i} \quad (1)$$

where N is the number of polynomial coefficients in the series, A_i is the coefficient on the $2i^{\text{th}}$ power of valuable ρ , which is the normalized radial aperture coordinate, and M is the diffraction order.

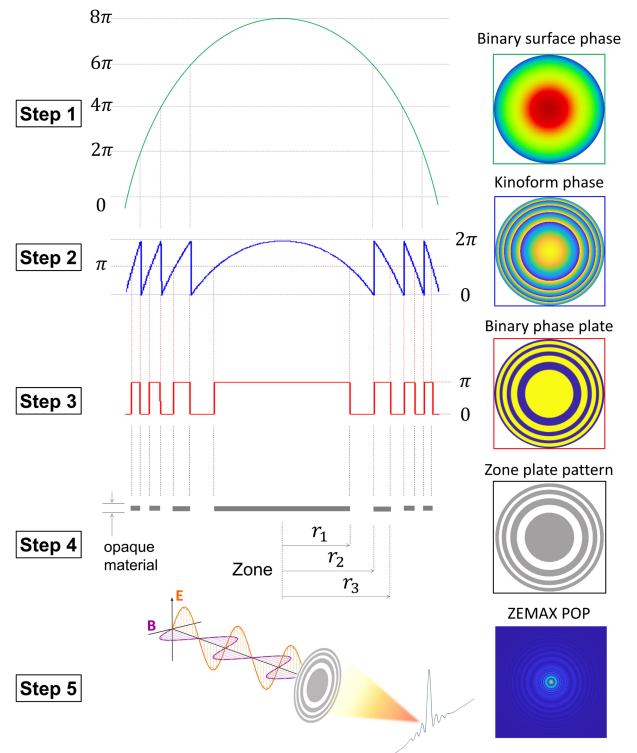
Using multiple polynomials to model FZP enhances accuracy, but it increases complexity for the surface and optimization time. The coefficients A_i represent the design parameters in the numerical simulation, corresponding to the terms used. The surface phase is optimized with the target operands to achieve specific optical performance.

Step 2: Generating Kinoform

A kinoform phase profile ϕ_K is a continuous surface phase



(a) General procedure



(b) Detailed procedure in each step

Fig. 2 Fresnel zone plate pattern designed procedure

profile divided at 2π ambiguity given by

$$\phi_K = \tan^{-1}(\tan \phi) \quad (2)$$

There are several methods to divide the surface phase at the 2π level. However, in this study, we employ a pair of inverse functions, \tan and \tan^{-1} , which ensures the precise calculation for each pixel in the numerical simulation approach. The kinoform is recognized to achieve 100% diffraction efficiency of the ideal ZEMAX surface phase [20].

Step 3: Generating Binary Phase

A binary phase ϕ_B is a phase profile structure closest to the FZP pattern, it is also known as a 2-step phase in which kinoform profile is generated as 0 and 1 binary index corresponding to 0 and

Table 1 Design specifications

Wavelength	632.8	nm
Effective focal length (EFL)	80	mm
FZP diameter	3	mm
F-number ($f/\#$)	0.0375	

Table 2 Merit function editor (MFE)

Operand	Surface	Target	Weight
RWCE	IMA	0	1
EFFL		80	1

π phase level as follows:

$$\phi_B = \begin{cases} \pi, & \phi_K \geq \pi \\ 0, & \phi_K < \pi \end{cases} \quad (3)$$

Step 4: Exporting FZP Pattern

Different from phase plates, Fresnel Zone Plate patterns are implemented using opaque materials with negligible thickness. There is no distinction in terms of where the opaque and transparent regions are placed; they simply need to be designed alternately. If the OFF and ON modes allow the rays can block and pass, respectively, the FZP pattern can be defined as follows:

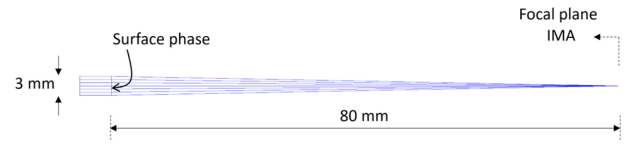
$$Z = \begin{cases} OFF, & \phi_B = \pi \text{ (or } 0) \\ ON, & \phi_B = 0 \text{ (or } \pi) \end{cases} \quad (4)$$

Step 5: Performance Verification

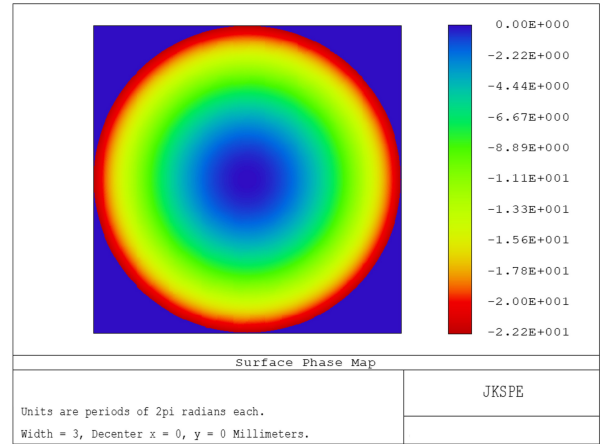
The radii of the zones r_m will be determined in Step 4 as depicted in Fig. 2(b) and evaluate rays propagation using ZEMAX[®] physical optics propagation (POP) which is calculated by scalar diffraction theory. The FZP pattern is implemented by the concentric circular apertures with corresponding radii that are entered sequentially in a user-defined aperture (UDA).

2.2 Numerical Design and Simulation

We demonstrate our procedure through a specific design with the specifications given in Table 1. Fig. 3(a) shows the ZEMAX simulation configuration in which the surface phase with a size of 3 mm diameter represents the FZP pattern. We use the 5 terms of polynomial expansion of the surface phase as optimization parameters of the default merit function for spot radius. Besides, the EFFL operand is added to constrain the 80 mm of focal length, and the RWCE operand is used to optimize the RMS wavefront error with a target of 0; Both are considered with the weight factor of 1 shown in Table 2. The diffraction order 1 is implicit in this



(a) Configuration of simulation



(b) Optimization result of binary 2 surface phase

Fig. 3 Numerical simulation for the FZP pattern

Table 3 Binary Optic 2 surface phase specification

Term (i)	Coefficient
1	-620573.77
2	243475.3849
3	-2.020849352e+06
4	4.622115197e+07
5	1.132458388e+10

study. The optimized surface phase obtained with the peak to valley (PV) of 22.2 periods of 2π is performed in Fig. 3(b) and the polynomial coefficients (A_i) obtained are presented in Table 3.

2.3 Performance

We successfully apply the 5-step procedure presented in section 2.1 and evaluate the performance of the designed FZP pattern by the 3D results presented in Fig. 4. Fig. 4(a) is the ZEMAX surface phase obtained after the optimization process presented in section 2.2, then they are divided by equation (2) at a level of 2π as Fig. 4(b). The phase plate obtained in Fig. 4(c) from binarizing the kinoform surface and then obtaining the FZP pattern. Fig. 4(d) is the footprint of the FZP pattern modeled by UDA and it is used to evaluate light propagation by ZEMAX-POP as Fig. 4(e). The input Gaussian light source is implemented by a plane wave perpendicular to the light propagation direction. We show the beam shape through the FZP pattern to the focal plane and the xy plane's light propagation. At the focal plane, we obtain the beam expressed as a delta function.

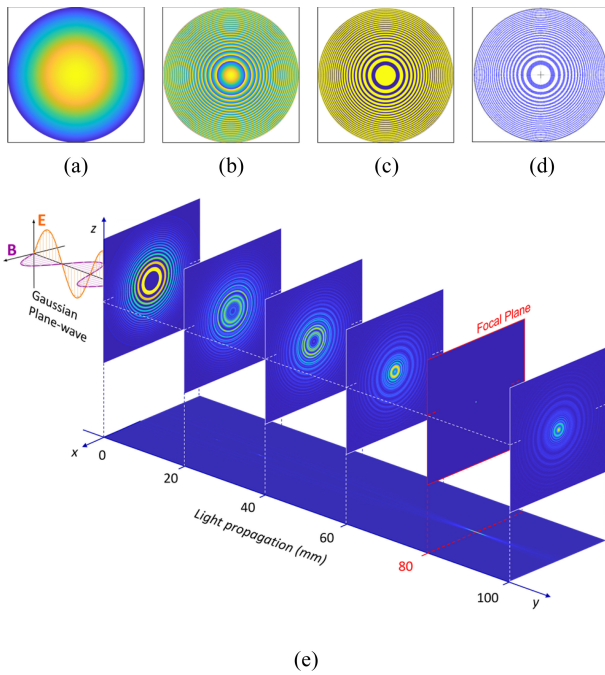


Fig. 4 The 5-step procedure performance of the specific design FZP in section 2.2. (a) Surface phase optimization, (b) Generating Kinoform, (c) Generating binary phase, (d) Exporting FZP pattern, (e) Performance verification

3. Verification

3.1 Comparison

The comparison of the FZP pattern design performance between our proposal numerical simulation approach and the traditional analytical approach is important to demonstrate flexibility in this study. By step 4, some specific zones in radii (r_m) implemented by the two approaches described are compared in Table 4. The difference between whole designed zones is shown in Fig. 5(a) with a PV of 0.606 nm and goes further if the calculation resolution of increased. This sub-nm difference is dismissed compared to the most current advanced manufacturing technologies which are at the nanometer level. The evaluation is also carried out considering propagation at the focal plane (80 mm of displacement) of the FZP designed by both approaches. Fig. 5(b) shows a near-absolute agreement of the focal spot size in both, which has a confirmed FWHM = 17.55 μm equality.

3.2 Experiment

The FZP pattern design by our numerical simulation is more verified by experiment. The practical FZP pattern is realized by photomasks technology and the fabrication positioning accuracy is used by 0.15 μm . A HeNe standard laser source (632.8 nm wavelength) is prepared from a fiber and collimated using a

Table 4 Zone comparison in radii

Zone	Radius		
	Analytic [mm]	Numerical [mm]	Difference [nm]
1	0.224998000234	0.224998222499	-0.222
2	0.318195538052	0.318195931819	-0.393
3	0.389708738649	0.389709038970	-0.300
4	0.449997335261	0.449997644999	-0.309
5	0.503112813118	0.503113250311	-0.437
...
44	1.492531343371	1.492531949253	-0.605
45	1.500000000000	1.500000000000	0

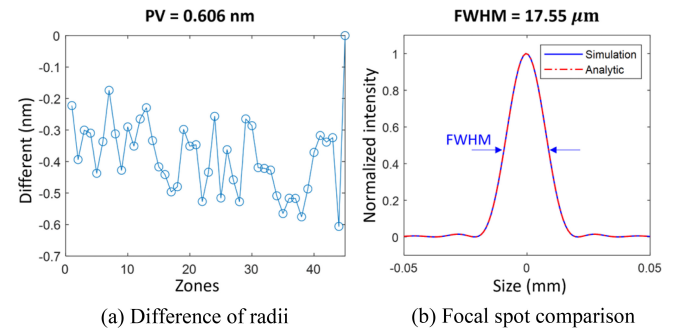
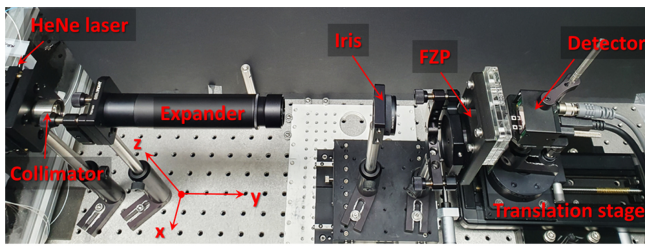
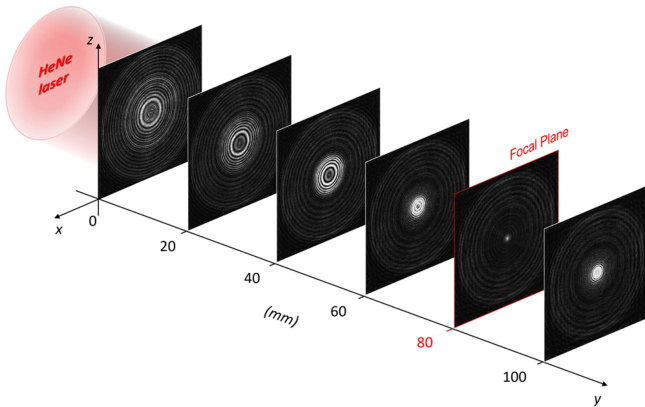


Fig. 5 Performance comparison of the FZP patterns designed by the numerical simulation and the analytical approach

collimator. An expander, which is a pair of lenses in a Galilean configuration, is placed to increase the original beam size. A free-space beam from the collimator will pass through the expander and align with a displacement of 3 meters which guarantees plane wave characteristic within the experimental setup. This plane wave beam size is controlled by a precise iris and illuminates the FZP pattern as implemented in Fig. 6(a). A monochromatic detector with a resolution of $4,096 \times 3,000$ and pixel size of 3.45 μm is mounted on a translation stage to capture the beam shape along the light propagation y . The displacement accuracy of the translation stage is employed by 0.1 μm and operated by a servo motor. The beam shapes at the different positions corresponding to the evaluation in ZEMAX-POP are taken and performed in Fig. 6(b). Beam propagation images are shown every 20 mm in each and a long displacement of 100 mm. At the focal plane in the experiment, the concentric faint sidelobes appear around the focal spot as a result of refraction of the light source obtained on the detector through the FZP pattern. They are considered dark current noise and negligible in this study. The number of data points taken by the detector is interpolated by MATLAB function to tens of thousands of data points to determine the FWHM of the focal spot. The focal spot size



(a) Experimental implementation



(b) Light propagation

Fig. 6 Practical FZP pattern verification by experiment

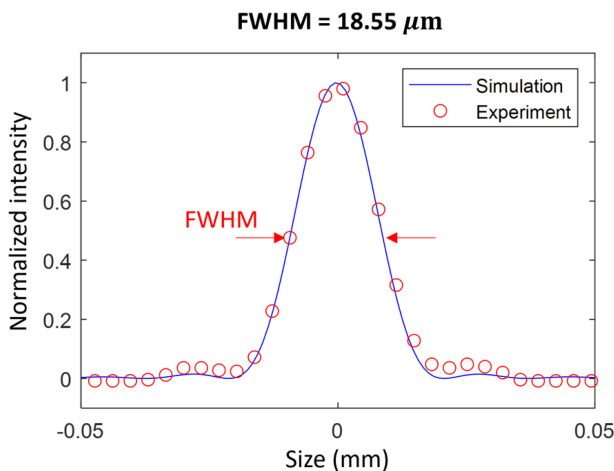


Fig. 7 Focal spot size comparison between the numerical simulation and experiment

was recorded at $FWHM = 18.55 \mu\text{m}$ and was also compared with the simulation result as shown in Fig. 7. The difference from the focal spot size in simulation by $1 \mu\text{m}$ that is the expected result based on manufacturing capability and alignment issues.

4. Conclusion

In this study, we present a flexible procedure to design the FZP

pattern using the numerical simulation approach. By optimizing the surface phase with the desired target operands in ZEMAX® software, the extracted surface phase is converted to the FZP pattern. Our approach is demonstrated by a near-absolute agreement of the focal spot size of $17.549 \mu\text{m}$ and the sub-nm difference of the zones in radii with the analytical approach. Furthermore, it was also verified by the practical experiment, and the focal spot size was expected as $18.55 \mu\text{m}$. There have been many attempts to simulate various functionality FZP patterns and combine refractive-diffractive hybrid lenses to solve optical issues such as DOF modulation, aberration correction, or freeform wavefront metrology. Our approach has the potential to be applied in the above combination design and can be freely modified depending on optimization targets that cannot be met by the traditional analytical approach. Besides, a high-precision FZP pattern design is implemented that far exceeds the fabrication capabilities currently available with typical technologies.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the National Research Foundation with the government, Ministry of Science and ICT (No. 2021R1A4A1031660), “Fanout semiconductor PR pattern high-speed automatic inspection equipment development (No. 20018441)”, a part of the Ministry of Trade, Industry and Energy’s mechanical equipment industrial technology development project, and “Development of Ultra-Small Satellite with Hyperspectral and Visible Dual-Sensor Camera (No. RS-2022-00155901)”, a part of the space innovation project funded by the National Research Foundation of Korea.

REFERENCES

1. Tuan, P. T., Hai, V. N., Shin, S., (2016), A novel technique to design flat fresnel lens with uniform irradiance distribution, *International Journal of Energy and Power Engineering*, 5(2), 73-82.
2. Banerji, S., Meem, M., Majumder, A., Vasquez, F. G., Sensale-Rodriguez, B., Menon, R., (2019), Imaging with flat optics: Metalenses or diffractive lenses?, *Optica*, 6(6), 805-810.
3. Huang, K., Qin, F., Liu, H., Ye, H., Qiu, C., Hong, M., Luk'yanchuk, B., Teng, J., (2018), *Advanced Material*, WILEY, 30(26), 1704556. <https://doi.org/10.1002/adma.201704556>
4. Moreno, V., Román, J. F., Salgueiro, J. R., (1997), High efficiency diffractive lenses: Deduction of kinoform profile, *American Journal of Physics*, 65(6), 556-562.

5. Menz, B., Bräuninger, H., Burwitz, V., Hartner, G., Predehl, P., (2015), A Fresnel zone plate collimator: Potential and aberrations, *Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy VII*, 9603, 454-467.
6. Tarrazó-Serrano, D., Castiñeira-Ibáñez, S., Minin, O. V., Candelas, P., Rubio, C., Minin, I. V., (2019), Design of acoustical Bessel-like beam formation by a pupil masked Soret zone plate lens, *Sensors*, 19(2), 378.
7. Banerji, S., Meem, M., Majumder, A., Sensale-Rodriguez, B., Menon, R., (2020), Extreme-depth-of-focus imaging with a flat lens, *Optica*, 7(3), 214-217.
8. Hao, C., Gao, S., Ruan, Q., Feng, Y., Li, Y., Yang, J. K., Li, Z., Qiu, C. W., (2020), Single-layer aberration-compensated flat lens for robust wide-angle imaging, *Laser & Photonics Reviews*, 14(6), 2000017.
9. Yamada, K., Watanabe, W., Li, Y., Itoh, K., Nishii, J., (2004), Multilevel phase-type diffractive lenses in silica glass induced by filamentation of femtosecond laser pulses, *Optics Letters*, 29(16), 1846-1848.
10. Hecht, E., (2021), *Optics 5th edition*, Pearson. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/optics/P200000006793/9780137526420>
11. Liu, T., Wang, L., Zhang, J., Fu, Q., Zhang, X., (2018), Numerical simulation and design of an apodized diffractive optical element composed of open-ring zones and pinholes, *Applied Optics*, 57(1), 25-32.
12. Siemion, A., (2019), Terahertz diffractive optics—Smart control over radiation, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 40(5), 477-499.
13. Park, S. Y., Lee, S., Yang, J., Kang, M. S., (2023), Patterning quantum dots via photolithography: A review, *Advanced Materials*, 2300546.
14. Low, M. J., Lee, H., Lim, C. H. J., Sandeep, C. S., Murukeshan, V. M., Kim, S.-W., Kim, Y.-J., (2020), Laser-induced reduced-graphene-oxide micro-optics patterned by femtosecond laser direct writing, *Applied Surface Science*, 526, 146647.
15. Low, M. J., Rohith, T. M., Kim, B., Kim, S.-W., Sandeep, C. S., Murukeshan, V. M., Kim, Y.-J., (2022), Refractive-diffractive hybrid optics array: comparative analysis of simulation and experiments, *Journal of Optics*, 24(5), 055401.
16. Wiltse, J. C., (2004), Diffraction optics for terahertz waves, *Terahertz for Military and Security Applications II*, 127-135.
17. Siemion, A., (2021), The magic of optics—An overview of recent advanced terahertz diffractive optical elements, *Sensors*, 21(1), 100.
18. Hazra, L., Han, Y., Delisle, C., (1995), Kinoform lenses: Sweatt model and phase function, *Optics Communications*, 117(1-2), 31-36.
19. Ansys, Ansys Zemax OpticStudio. [https://www.ansys.com/](https://www.ansys.com/products/optics-vr/ansys-zemax-opticstudio)

[products/optics-vr/ansys-zemax-opticstudio](https://www.ansys.com/products/optics-vr/ansys-zemax-opticstudio)

20. ZEMAX®, (2011), Optical design program user's manual. <https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/Zemax/ZemaxManual.pdf>



Huy Vu

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest His research interests are optical design, surface metrology, diffractive optics.

E-mail: cd.quanghuy@gmail.com



Joohyung Lee

Associate Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology University. His research interests are precision metrology, optical design, diffractive optics, space optics, laser pulse, spectroscopy.

E-mail: JLee@seoultech.ac.kr

창간

(사)한국정밀공학회에서 발행한 한국정밀기계학회지는 1984년 6월에 창간되었다. 이후 1985년 12월, 학술지명을 한국정밀공학회지로 변경하였다.

목적 및 연구 범위

한국정밀공학회지는 정밀공학 및 제조와 관련된 독창적 연구 논문을 게재하는 것을 목표로 한다. 구체적으로는 모든 학문분야나 산업분야에서 독창적인 아이디어의 실험적인 구현과정 및 제조과정에서의 반복정도, 신뢰성, 운동정밀도 및 측정정밀도에 영향을 미칠 수 있는 각 종 현상에 대하여, 기계공학적 또는 다학제적 접근방식으로 창의적인 실험, 해석 및 모델링 예측 등 한층 심화된 연구로 궁극적으로는 기계 및 생산공정의 정밀도향상에 기여하는 데 초점을 맞춘다, 연구범위로는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 분야 등 정밀공학 관련분야를 포함하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

- 기본면수 8면: 200,000원, 8면 초과 시 1면 당 30,000원으로 가산
- 용역 또는 지원금(Acknowledgement)으로 작성된 논문은 게재료의 50% 가산
- 게재료는 게재 확정 된 논문으로서, 용역 또는 지원금(Acknowledgement)으로 작성된 논문에만 한하여 청구
- 청구 후 15일 이내에 납부

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

전화 02-518-2928 / 팩스 02-518-2937 / paper@kspe.or.kr / <https://www.kspe.or.kr>

한국정밀공학회지 논문투고 및 심사: <https://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 최종결정이 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 1 · January 2024

REGULAR PAPERS

Study on Polysaccharide Bonded Abrasive Tool Using Hydrothermal Gelatinisation for Green Machining of Single Crystal Sapphire

Z. Wu · Y. Zhang · Y. Liu · F. Mo · C. Wang · H. Lu · J. Yuan · Z. Liu 1

Three-Dimensional Measurement and Finite-Element Simulation for Tool Wear Estimation in Cutting of Inconel 718 Superalloy

I.-C. Yoon · I.-S. Kang · K.-H. Park · J.-Y. Heo · J.-R. Lee · Y.-C. Jung 21

Tool Wear in Longitudinal-Torsional Ultrasonic Vibration Assisted Drilling of CFRP/Ti Stacks and Its Influence on Drilling Quality

C. Wang · P. Li · S. Li · X. Qiu · C. Li · Q. Jiang · Q. Niu · T.J. Ko 35

Unsupervised Anomaly Detection Process Using LLE and HDBSCAN by Style-GAN as a Feature Extractor

T. Lee · Y. Kim · Y. Hyun · J. Mo · Y. Yoo 51

Specimen Size Effect on Behavior of Mg–3Al–1Zn Magnesium Alloy in Macro to Micro-scale Deformation

S.T. Khandani · G. Faraji · M. Karimpour 65

Microstructure and Performance Study of Al/Cu Laser Welding with Ag Interlayer

T. Chen · F. Liu · L. Pang · H. Hu · P. Gao 79

FleTbot, A Flexible Thermoplastic Polyurethane Applied Tri-spiral Spoke Wheel Robot

K. Kim · T. Seo 91

Design and Feasibility Test of Motorized Hand-Held Devices for Intra-compartmental Pressure Monitoring

B. Yang · J. Hyun · J. Kim · J. Kweon · J. Choi · Y. Moon · J.W. Kim 99

Multi-objective Robust Optimization Over Time for Dynamic Disassembly Sequence Planning

X. Zhang · Y. Fang · Q. Liu · D. Yazdani 111

Assessment of Various Ductile Damage Criteria in Numerical Simulations of Machining Processes

M. Hejazi · F. Haji Aboutalebi 131

Experimental and Numerical Investigations of the Fatigue Life of AA2024 Aluminium Alloy-Based Nanocomposite Reinforced by TiO₂ Nanoparticles Under the Effect of Heat Treatment

H.M. Mahan · S.V. Konovalov · S.M. Najm · O. Mihaela · T. Trzepieciński 141

REVIEWS

Real-Time Defect Monitoring of Laser Micro-drilling Using Reflective Light and Machine Learning Models

Y.K. Lee · S. Lee · S.H. Kim 155

Additive Manufacturing of Functionally Graded Materials: A Comprehensive Review

M. Teacher · R. Velu 165

Signal Processing and Artificial Intelligence for Dual-Detection Confocal Probes

R. Sato · X. Li · A. Fischer · L.-C. Chen · C. Chen · R. Shimomura · W. Gao 199

Artificial Intelligence in the Design of Innovative Metamaterials: A Comprehensive Review

J. Song · J. Lee · N. Kim · K. Min 225

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 1 · January 2024

REGULAR PAPERS

Novel Use of Cellulose Based Biodegradable Nano Crystals in the Machining of PPS Composites: An Approach Towards Green Machining

S. Şap · Ü.A. Usca · Y.S. Tarih · A. Yar · M. Kuntoğlu · M.K. Gupta 1

A Cleaner Milling Process Replacing Emulsion Coolant by Cryogenics CO₂

O.M.P. Neto · A. Calleja-Ochoa · I. Ayesta · A. Rodríguez · H. González-Barrio · L.N.L. de Lacalle 21

Machining and Energy Aspect Assessment with Sustainable Cutting Fluid Strategies of Al-12Si Based Hybrid Composites

S. Şap 33

Storage of High-Strength Steel Flux-Cored Welding Wires in Urbanized Areas

A. Wolski · A. Świerczyńska · G. Lentka · D. Fydrych 55

Comparison and Identification of Optimal Machine Learning Model for Rapid Optimization of Printed Line Characteristics of Aerosol Jet Printing Technology

M. Li · Z. Liu · S. Yin · J.P. Choi · H. Zhang 71

Investigation on Bonding Strength and Tribological Performances of Ceramic Laminated AA6063 Composite Developed by Friction Stir Additive Manufacturing

R. Prajapati · S. Dwivedi · D. Kumar · A.K. Srivastava · A.R. Dixit 89

Plastic Deformation Mechanism of the Ti6Al4V Micro-gear Formed Under an Electrical Field

B. Zeng · X. Yan · Z. Xie · J. Liu · J. Wang · K. Huang · Y. Yang 107

Optimal Parametric Design of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles by Balancing Composite Motion Optimization

T. Huynh · A.T. Pham · J. Lee · H. Nguyen-Xuan 123

Effect of Baffle Pattern Applied to Cathode Parallel Channel on PEMFC Performance

J. Son · S. Um · Y.-B. Kim 145

Comparison of Various Cathode Materials Fabricated by Pulsed Laser Deposition for Low-Temperature Ceramic Fuel Cells

D.H. Kim · S. Yang · D.-H. Kwon · H.-I. Ji · K.J. Yoon · J.-H. Lee · J.H. Shim · J.-W. Son 161

Triboelectric Nanogenerator for Collecting Particulate Matter Using Multiple Energy Sources

H. Park · S. Ji · J. Shin · J. Yoon · D.H. Kim · J. Park 171

An Improved Soft Actor-Critic-Based Energy Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Vehicles with a Nonlinear Fuel Cell Degradation Model

D. Zhang · Y. Cui · Y. Xiao · S. Fu · S.W. Cha · N. Kim · H. Mao · C. Zheng 183

Intense Pulsed Light Welding Process with Mechanical Roll-Pressing for Highly Conductive Silver Nanowire Transparent Electrode

Y.-M. Ju · J.-W. Park · Y.-R. Jang · S.S. Park · H.-S. Kim 203

Temperature Sensors Manufactured from Edible Materials Intended for Oral Cavity Operation

G.M. Stojanović · M. Radovanović · S. Kojić · L. Milić · M. Simić · T. Kojić · R.G. Duval · J. Vukmirović · B. Petrović 221

Accelerate the Shift to Green Energy with PVDF Based Piezoelectric Nanogenerator

J. Lee · S. Hajra · S. Panda · W. Oh · Y. Oh · H. Shin · Y.K. Mishra · H.J. Kim 233

Multi-parallel Disassembly Line Balancing Problem and Improved Ant Lion Optimizer for Mixed-Waste Electrical and Electronic Equipment

W. Liang · Z. Zhang · T. Yin · Y. Zeng · Y. Zhang 243

REVIEWS

A Review on Energy Consumption and Efficiency of Selective Laser Melting Considering Support: Advances and Prospects

Q. Wang · M. Gao · Q. Li · C. Liu · L. Li · X. Li · Z. Liu 259

A Review and Comparison of Linear Pneumatic Artificial Muscles

B. Jamil · N. Oh · J.-G. Lee · H. Lee · H. Rodrigue 277

Mechanical Metamaterials for Sensor and Actuator Applications

S. Pyo · K. Park 291

The Promise of 3D Printed Solid Polymer Electrolytes for Developing Sustainable Batteries:

A Techno-Commercial Perspective

B.R. Alandur Ramesh · B. Basnet · R. Huang · J. Jeong · H. Lee · T. Kyu · J.-W. Choi 321

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 1 · January 2024

REGULAR PAPERS

The Current Design for Additive Manufacturing Research Frontier

D. W. Rosen 1

Bayesian Hyper-parameter Optimization in One-dimensional Convolutional Autoencoder for Monitoring Bearing Health Status

S. Chae · S. J. Bae 15

Designable Data Augmentation-based Domain-adaptive Design of Electric Vehicle Considering Dynamic Responses

Y. Yoo · J. Lee 23

Directed Graph-based Refinement of Three-dimensional Human Motion Data Using Spatial-temporal Information

C. Choi · J. Lee · H.-J. Chung · J. Park · B. Park · S. Sohn · S. Lee 33

A Finite Element Model of an Electric Motor with an Unbalanced Rotor for Vibration Data Generation

H. Lee · S. Son · D. Jeong · K. H. Sun · B. C. Jeon · K.-Y. Oh 47

Development of 1D-convolutional Neural Network-based Height Profile Prediction Model in Directed Energy Deposition Process Using Melt-pool Image Data

H. Shin · J. Ahn · S. W. Beak · S. W. Lee 57

REVIEW

Recent Progress in Self-Powered Sensors for Structural and Human Monitoring Systems Using Thermoelectric Energy Harvesters

I.-S. Jo · S.-K. Chung · K. Choi 67

2024년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

민병권(연세대학교)

수석부회장

안성훈(서울대학교)

부회장

이상원(성균관대학교)

오정석(한국기계연구원)

배규호(DN솔루션즈)

김정(KAIST)

이인환(충북대학교)

박상후(부산대학교)

최영재(한국생산기술연구원)

감사

송창규(한국기계연구원)

이경창(부경대학교)

총무이사

김동성(POSTECH)

김보현(숭실대학교)

신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원)

송용남(고려대학교)

정영훈(경북대학교)

편집이사

강봉철(국민대학교)

강현욱(UNIST)

고승환(서울대학교)

곽문규(경북대학교)

김규만(경북대학교)

김남근(서강대학교)

김동립(한양대학교)

김산하(KAIST)

김석민(중앙대학교)

김양진(부산대학교)

김영진(KAIST)

김종백(연세대학교)

김효영(한국공학대학교)

문두환(고려대학교)

박근(서울과학기술대학교)

박영빈(UNIST)

손정우(금오공과대학교)

안지환(POSTECH)

안형준(숭실대학교)

윤준영(연세대학교)

이광일(경일대학교)

이동원(전남대학교)

이동훈(숭실대학교)

이창우(건국대학교)

이호원(서울대학교)

장진아(POSTECH)

정구현(울산대학교)

정훈의(UNIST)

주백석(금오공과대학교)

진종환(한국표준과학연구원)

천두만(울산대학교)

추원식(경상국립대학교)

황지홍(서울과학기술대학교)

사업이사

강태준(인하대학교)

권지연(동국대학교)

김무림(한국로봇융합연구원)

김승종(고려대학교)

김진호(영남대학교)

김충수(한국생산기술연구원)

김태곤(한국생산기술연구원)

김현준(경북대학교)

박석희(부산대학교)

박용재(강원대학교)

서진호(부경대학교)

안상훈(한국기계연구원)

오기용(한양대학교)

윤주성(경남대학교)

이문구(아주대학교)

이봉기(전남대학교)

이원균(충남대학교)

이지혜(한국기계연구원)

이현섭(동아대학교)

임지석(영남대학교)

조영삼(원광대학교)

주기남(조선대학교)

최정욱(중앙대학교)

현승민(한국기계연구원)

기획홍보이사

노유정(부산대학교)

류시형(전북대학교)

이주연(서울과학기술대학교)

허세곤(한국기계연구원)

국제이사

남정수(한국생산기술연구원)

이동진(건국대학교)

전용호(아주대학교)

조영태(창원대학교)

차석원(서울대학교)

허윤정(경희대학교)

홍성태(울산대학교)

대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원)

김경동(한국공작기계산업협회)

김종혁(주현대위아)

장원석(한국기계연구원)

조영환(LIG넥스원(주))

부문회장

김건희(한밭대학교)

이현욱(한국철도기술연구원)

정재일(국민대학교)

이동윤(한국생산기술연구원)

박형욱(UNIST)

이강재(DN솔루션즈)

조정대(한국기계연구원)

엄광문(건국대학교)

김호찬(안동대학교)

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
지앤피테크놀로지(주)

(주)에비던트코리아
(주)프로토텍

(주)어드벤처코리아
핵사곤

(주)에이스나노켄

(주)엔도로보틱스

패밀리

(주)웨이퍼펍

한국공작기계산업협회

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

김갑웅
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 1/ January 2024

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

월간 • 제41권 제1호 [통권 제394호] • 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 12월 25일

발행일 2024년 1월 1일

발행인 민병권

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

[04508] 서울 중구 중림로 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 강수현 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpem.st@kspe.or.kr

IJPEM(GT) 이성경 / (02)518-0723 / ijpem@kspe.or.kr

학술대회 김영심, 이성경 / (02)393-0725 / conf@kspe.or.kr, presm@kspe.or.kr

회계 감사원 / (02)393-0724 / account@kspe.or.kr

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



About IJPEM-CFP IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 24 years and aims to disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to the international precision and manufacturing engineering community. The journal is indexed in SCIE (Impact factor 1.9) and downloaded more than 148,000 times a year around the world.

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Semiconductor Manufacturing Systems and Process

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- Lithography systems
- Etching and/or deposition systems
- Probing and test systems
- Inspection and measurement
- Advanced packaging and assembly
- Manufacturing of multi-layer structures
- Chemical-mechanical planarization (CMP)
- Air conditioning and contamination control
- Automation & robot
- Control algorithm and/or AI application
- Key components for equipment and process

Guest editors

Martin Cech

University of West Bohemia Pilsen, Czech Republic

Jun Young Yoon

Yonsei University, Korea

Hakjun Lee

Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date

January 1, 2024

Publication Date

June 1, 2024

Volume, Number

Vol. 25, No. 6

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY



Impact Factor
4.660 by JCR in 2021

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 2021 impact factor is 4.660, which ranks it top 18% (24/137) journal in the category of Engineering-Mechanical.

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of "**Green**" precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Advanced Manufacturing for ESG

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- RE100 (Renewable Electricity 100%)
- Green Manufacturing for Aerospace and Small Modular Reactor
- Smart and Sustainable Manufacturing for Semiconductors
- AI-assisted Manufacturing

Guest Editors

Professor **Beomjoon Kim**
The University of Tokyo, Japan

Professor **Sung-Tae Hong**
University of Ulsan, Korea

Professor **Hoon-Eui Jeong**
UNIST, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date
November 30, 2023

Publication Date
May 1, 2024

Vol., No.
Vol. 11, 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.

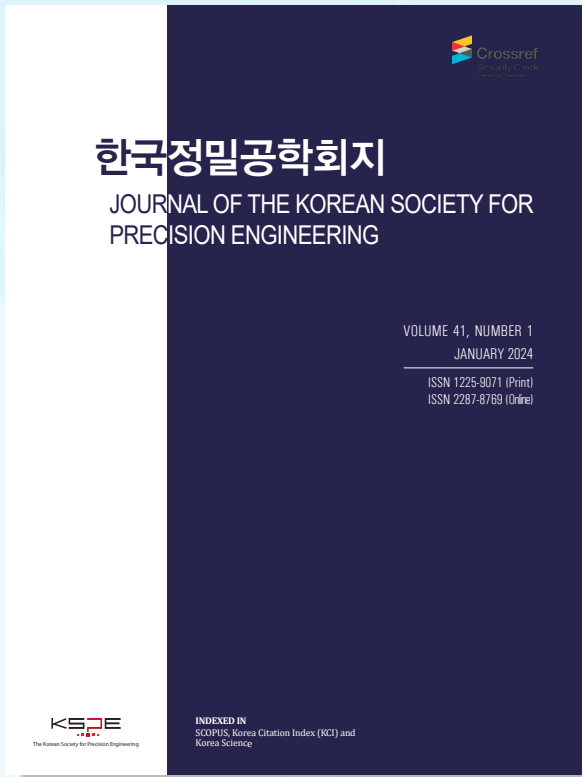
한국정밀공학회지(Journal of the Korean Society for Precision Engineering, JKSPE)는 정밀공학과 관련된 우수한 논문을 게재하고 있으며 특히 기계공학뿐만 아니라 다학제적 학문을 바탕으로 정밀공학 분야에서 새롭고 독창적인 연구결과를 소개함으로써 정밀공학의 발전에 기여하는 것을 목표로 합니다. 한국정밀공학회지(JKSPE)에 대한 투고 안내를 드리오니 적극적인 관심과 참여 부탁드립니다.



※ 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**
 - 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**
 - 한국정밀공학회지 최우수논문상 (상장, 상금)
 - 백암논문상 (상장, 상금)
 - 학술상 (상장, 상금)



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



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.

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 JKSPPE Search for JKSPPE

- <http://article.kspe.or.kr>
- <http://jkspe.kspe.or.kr>



+82-518-2928(T)

+82-518-2937(F)



paper@kspe.or.kr

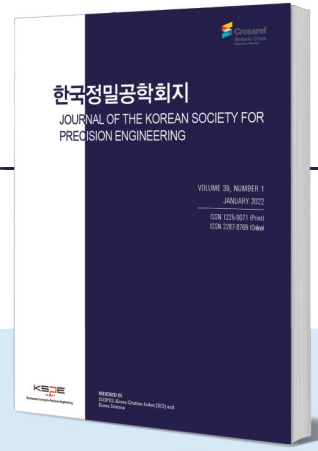
<http://www.kspe.or.kr>



12F, SKY1004 Bldg., 50-1
Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,
04508, Republic of Korea

한국정밀공학회지(JKSPE)

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING



Indexed in SCOPUS, KCI

SCOPUS 등재지(2017~), KCI 등재지(2001~)

1984년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행

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

INTRODUCTION

1. 분기마다 특정 주제에 따른 특집논문 구성
2. 국내·국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 일반 투고 논문

PUBLICATION FEE

	국문 투고	영문 투고
기본 8페이지	200,000원	면제
1페이지 추가	30,000원	면제
후기(사사) 추가	총 금액의 50% 증가	면제

* 국내외 학술대회 발표 논문, 후기(사사)가 없을 경우 게재료 면제

ADVERTISEMENT

관련 기업 및 연구기관의 연구성 또는 제품 홍보, 각 공과대학 도서관·연구소·관련 산업체에 배포

학회지 광고 게재 비용		특별광고료(연 6회 이상)		광고 필름	비고사항
뒷표지	750,000원	6회	정가의 30%	A4(210x297 mm) 제작	* 앞쪽은 광고가 불가능합니다. * 특별회원사: 칼라광고 연간 무료제공 (최대 3회)
칼라광고	500,000원	12회	정가의 50%		
흑백광고	250,000원				
홈페이지 배너	월 100,000원				

TOPICAL ISSUE

TOPIC | 2022: 재료성형 공정에서의 고효율 금형 기술
2023: 스마트/디지털 헬스케어 기술

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

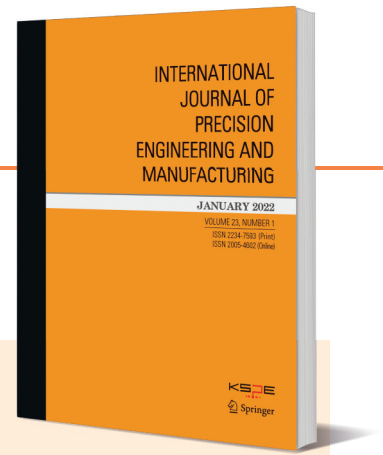
www.ijpem-st.org

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 System
- 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

2024년 국내 / 국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2024

KSPE 2024
Spring
Conference

춘계학술대회

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2024
5. 8(수) - 10(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
*PR*recision Engineering and *S*ustainable Manufacturing

PRESM 2024

2024. 7. 7(일) - 12(금)

Paradise Busan Hotel
Busan, Korea

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회

2024

KSPE 2024
Autumn
Conference

추계학술대회

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2024. 11. 13(수) - 15(금)

경주화백컨벤션센터(HICO)
(경상북도 경주시)

PIFOC Objectives Scanner



- 피에조 액추에이터를 사용하여 빠른 응답 시간 및 긴 수명
 - Z축으로 100, 400, 800 μ m의 이동 범위
 - 서브나노미터 분해능으로 정밀한 스캐닝 가능
 - Zero-play flexure guides로 높은 가이드 정확도 보장
 - Capacitive sensors로 직접 위치 측정: 높은 선형성
 - \varnothing 29 mm의 넓은 애퍼처
- >> 현미경, 3-D 이미징, 반도체 테스트, 생명공학, 오토포커스 시스템 등

적용분야



+ AFM, SEM, TEM, LSFM 등 현미경의 고정밀 Z-focus 포지셔닝에 적합!

