

# 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 12

DECEMBER 2023

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

## Editor-in-Chief

**Bo Hyun Kim**

Soongsil University  
bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

**Jihwan An**  
POSTECH

**Baeksuk Chu**  
Kumoh National Institute of Technology

**Won-Shik Chu**  
Gyeongsang National University

**Doo-Man Chun**  
University of Ulsan

**Koo Hyun Chung**  
University of Ulsan

**Duhwan Mun**  
Korea University

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

**Young Hun Jeong**  
Kyungpook National University

**Jonghan Jin**  
Korea Research Institute of Standards & Science

**Dong Sung Kim**  
POSTECH

**Ho-Chan Kim**  
Andong National University

**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

**In Hwan Lee**  
Chungbuk National University

**Hyung Wook Park**  
UNIST

**Min Soo Park**  
Seoul National University of Science & Technology

**Sang-Hu Park**  
Pusan National University

**Jung Woo Sohn**  
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

**Young-Kug Hwang**  
Chosun College of Science & Technology

**Jinah Jang**  
POSTECH

**Yongho Jeon**  
Ajou University

**Jayil Jeong**  
Kookmin University

**Maolin Jin**  
Korea Institute of Robot & Convergence

**Beomjoon Kim**  
The 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

**Jongkil Lee**  
Andong National University

**Kwang-Il Lee**  
Kyungil University

**Sangkee Min**  
University of Wisconsin-Madison

**June Park**  
Korea Photonics Technology Institute

**Jungjae Park**  
Korea Research Institute of Standards & Science

**Jung Whan Park**  
Yeungnam University

**Simon Park**  
University of Calgary

**Yong Son**  
Korea Institute of Industrial Technology

**Chul Ki Song**  
Gyeongsang National University

**Ki-Sik Tae**  
Konyang University

**Duck Hyun Wang**  
Kyungnam University

**Hae-Sung Yoon**  
Korea Aerospace University

**Sung Ho Yoon**  
Kumoh National Institute of Technology

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

**VOLUME 40, NUMBER 12 / December 2023**

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** December 1, 2023 (Monthly)

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

**Publisher** Seok-Woo Lee (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](mailto:paper@kspe.or.kr) / <http://www.kspe.or.kr>

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

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

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



## 목차

### 일 반

- 939 두 원통형 구조물의 접촉-분리를 활용한 마찰대전 바람 에너지 하베스터  
최종안, 정진구, 강민규, 표순재
- 947 계단오르기 동작 시 체중상승을 위해 하지관절이 생성하는 역학적 일의 성별 비교  
신현수, 이준영, 김민재, 엄광문
- 955 다구치 방법과 그레이 관계분석을 이용한 전기화학 수소압축기 엔드플레이트의 구조분석 및 최적화  
서상덕, 권원태
- 965 유리 기판 상 구리 패터닝 전극의 Mask-less 증착을 위한 레이저 유도 증착 공정 연구  
이용훈, 이황규, 김동민, 김태욱, 김지수
- 975 구조물의 능동 유지보수를 위한 드론부착형 분사장치 개발  
양승한, 이광일
- 981 로봇을 활용한 신발 갑피 접착제 도포 공정 자동화  
장원보, 박상현, 정성엽, 황면중, 김무림
- 989 유정압베어링 설계 최적화 모듈 개발  
김경호, 오정석
- 997 이오노머 코팅층을 추가한 자가 가습 고분자 전해질막 연료전지  
박규태, 김동진, 윤준서, 박정현, 오현명, 박태현
- 1003 딥러닝 기반 일상 생활 및 낙상 위험도 예측  
이승희, 구범모, 양수민, 김동권, 김영호
- 1011 다관절 로봇시스템을 이용한 차체 금형 자동화 열처리 방안 연구  
박기진, 윤성호

# JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 12 / December 2023

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

## CONTENTS

### REGULAR

- 939 Wind-powered Triboelectric Nanogenerator Using Contact-separation of Two Cylindrical Structures  
**Jong-An Choi, Jingu Jeong, Mingyu Kang, and Soonjae Pyo**
- 947 Gender Comparison of Mechanical Work in the Lower Limb Joints Required for Body Weight Elevation during Stair Ascent  
**Hyeon-Soo Shin, Jun-Young Lee, Min-Jae Kim, and Gwang-Moon Eom**
- 955 Structural Analysis and Optimization of Electrochemical Hydrogen Compressor End Plate Using Taguchi Method and Gray Relational Analysis  
**Sang Duk Seo, and Won Tae Kwon**
- 965 Laser-induced Deposition Method for Mask-less Copper Patterning on the Glass Substrate  
**Yonghoon Lee, Hwanggyu Lee, Dong Min Kim, Taewook Kim, and Jisoo Kim**
- 975 Development of Drone-attached Spraying Device for Active Maintenance of Structures  
**Seung-Han Yang and Kwang-II Lee**
- 981 Automation of Shoe Upper Adhesive Spraying Process Using Robot  
**Won Bo Jang, Sang Hyun Park, Seong Youb Chung, Myun Joong Hwang, and Murim Kim**
- 989 Development of Design Optimization Module for Hydrostatic Bearings  
**Gyungho Khim and Jeong Seok Oh**
- 997 Additional Ionomer-coated Layer for Self-humidifying Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells  
**Gyutae Park, Dongjin Kim, Junseo Youn, Junghyun Park, Hyoun-Myoung Oh, and Taehyun Park**
- 1003 Risk Prediction in Daily Activities and Falls based on Deep Learning  
**Seunghye Lee, Bummo Koo, Sumin Yang, Dongkwon Kim, and Youngho Kim**
- 1011 Study on Automated Heat Treatment for Car-body Mold Using an Articulated Robot System  
**Kee Jin Park and Sung Ho Yoon**

## 두 원통형 구조물의 접촉-분리를 활용한 마찰대전 바람 에너지 하베스터

# Wind-powered Triboelectric Nanogenerator Using Contact-separation of Two Cylindrical Structures

최종안<sup>1</sup>, 정진구<sup>1</sup>, 강민규<sup>2</sup>, 표순재<sup>1,2,#</sup>  
Jong-An Choi<sup>1</sup>, Jingu Jeong<sup>1</sup>, Mingyu Kang<sup>2</sup>, and Soonjae Pyo<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과 (Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology)  
<sup>2</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)  
# Corresponding Author / E-mail: [sjpyo@seoultech.ac.kr](mailto:sjpyo@seoultech.ac.kr), TEL: +82-2-970-6375  
ORCID: 0000-0002-2882-5923

KEYWORDS: Triboelectric effect (마찰대전 효과), Triboelectric nanogenerator (마찰대전 나노발전기), Wind energy (바람 에너지), Rotating structure (회전 구조), Energy harvesting (에너지 수확)

*In this paper, we develop a cylindrical triboelectric nanogenerator (TENG) for omnidirectional wind energy harvesting, by designing a slanted slit structure along the outer surface of the cylinder. The TENG consists of an inner cylinder based on Al film and a 3D printed outer structure. Wind blowing through the slits of the outer structure causes the inner cylinder to rotate in the slanted direction, and the contact-separation between the Al cylinder and polytetrafluoroethylene attached to the inner surface of the outer structure generates an output voltage. The performance of the harvester with different inner cylinder diameters under various wind speeds is experimentally studied. The results indicate that the TENG with a smaller Al cylinder is suitable for a self-powered wind speed sensor while that with a larger cylinder is optimal for efficient energy harvesting. In addition, the TENG is capable of harvesting wind energy in all directions. Its potential utility to be used as a supplementary power source for small electronic devices is verified through various experiments. Based on its compact size, simple design, and ease of manufacturing, the proposed TENG can be used as a low-cost, portable harvester.*

Manuscript received: March 6, 2023 / Revised: June 13, 2023 / Accepted: July 14, 2023  
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2022

### 1. 서론

일상적으로 버려지거나 사용하지 않는 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 기술들을 에너지 하베스팅 기술(Energy Harvesting Technology)이라 하며, 태양, 바람, 열, 파도, 진동, 신체의 움직임과 같이 자연 혹은 주변 환경에서 필연적으로 발생하는 에너지원을 활용하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다[1-6]. 에너지 하베스터는 태양열 발전기, 풍력 발전기와 같이 현재 상용화된 대형 발전기와 비교했을 때 큰 전력을 생산할 수는 없지만 상대적으로 크기가 작기 때문에, 일상 생활에서 작은 공간으로

도 에너지를 수확할 수 있고, 설치가 쉽다는 장점을 갖고 있다. 따라서, 일상 생활에서 저전력이 요구되는 소형 전자 부품 및 기기에 지속적으로 에너지를 공급하기에 용이하다[7,8].

다양한 에너지 하베스팅 원리 중 서로 다른 전기 음성도를 가지는 두 물질 간 접촉과 분리에 의하여 전기적으로 대전되는 현상인 마찰대전 효과(Triboelectric Effect)와 전하 유도 현상을 활용한 마찰대전 나노발전기(Triboelectric Nanogenerator, TENG)가 최근 들어 활발하게 연구되고 있다[9,10]. TENG 기반 에너지 수확 방식은 저렴하고 다양한 재료들을 활용할 수 있어 열전 발전에 비하여 가격 경쟁력이 상대적으로 우수하고,

넓은 대역폭의 진동 에너지를 수확할 수 있기 때문에 압전 방식에 비하여 활용 가능성이 높다. 즉, 건물/기계의 진동, 자연 현상과 같은 수많은 에너지원으로부터 접촉과 분리만으로 에너지를 수확할 수 있기 때문에 효율적인 에너지 수확이 가능하며, 넓은 활용처를 가진다.

바람은 자연 및 실생활에서 쉽게 관측 가능하고 지속적으로 이용 가능한 친환경적인 에너지원으로, 바람으로부터 전력을 생산하기 위해 터빈을 활용하는 등 과거부터 널리 사용되고 있다 [11]. 거대한 구조를 가져 높은 풍속 하에서만 작동하며 공간적 제약이 크고 소음, 환경문제와 같은 문제점을 가지는 전통적인 대형 풍력 발전기와는 달리 에너지 하베스터들은 소형으로 제작할 수 있어 공간활용도가 우수하고 휴대성이 용이하다는 장점을 가진다. 최근 들어 바람 에너지 수확을 위하여 다양한 재료와 구조를 활용한 TENG 연구들이 보고되고 있다[12-17]. 예를 들어, Yuan 등은 웨이크 갤로핑(Wake Galloping) 현상을 활용하여 저풍속(1 m/s)의 바람으로부터 에너지를 수확할 수 있는 TENG를 개발하였다[16]. 제작된 하베스터는 간단한 구조를 가지며 매우 가볍다는 장점이 있지만(8.5 g), 특정 풍향에 대해서만 작동한다는 단점을 가진다. Wang 등은 초경량 점토를 활용하여 160 V 이상의 출력 전압을 나타내며 전방향 바람 에너지를 수확할 수 있는 풍선 구조의 TENG를 개발하였다[17]. 하지만, 부피가 크고 외부 구조가 움직여야 하기 때문에 설치 가능한 장소가 한정된다. 하베스터의 장점인 지속적인 에너지 수확과 공간 활용도를 십분 활용하기 위해서는 시간 및 장소에 따라 불규칙한 풍향과 풍속에 대해 에너지를 수확할 수 있는 하베스터 개발이 요구된다.

본 연구에서는 임의의 방향에서 불어오는 바람 에너지 수확을 위해 경사진 슬릿(Slit) 구조가 원통 구조로 배열된 부유식 원통형 TENG를 개발하였다. 제작된 TENG는 외부 구조물이 고정되어 있고 내부 원통이 회전하며 외부 구조물 내면과 내부 원통 외면이 접촉과 분리를 반복하여 전압을 생산하는 구조이다. 따라서, 외부 환경에 노출되어 움직이는 부품이 없어 공간 활용에 용이하며 여러 개의 소자를 배열하여 바람 에너지를 수확하고자 할 때 매우 유용하다. 실험을 통해 소자에 가해지는 풍속이 증가함에 따라 출력 전압도 증가하는 것을 확인하였으며, 전방향에서 불어오는 바람에 대해 동일한 성능으로 에너지 수확이 가능함을 입증하였다. 또한, 수확된 에너지를 다양한 정전용량을 가진 커패시터(Capacitor)에 저장하고 다수의 LED 및 전자시계를 구동함으로써 제안하는 하베스터가 소형 전자 부품의 보조 전력원으로 활용 가능함을 보였다.

## 2. 하베스터의 제작 및 구동 원리

### 2.1 구조 및 제작 방법

제안하는 부유식 원통형 하베스터의 사진과 구조는 Fig. 1과 같다. 원통 형상을 가진 TENG의 외부 구조는 6개의 슬릿이

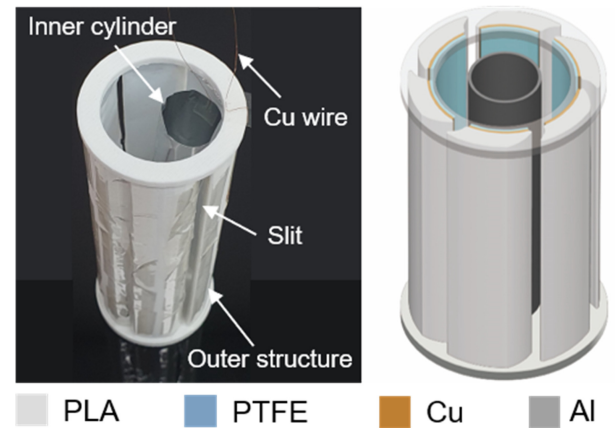


Fig. 1 Photograph and schematic of the proposed wind-powered triboelectric nanogenerator based on two cylindrical structures

원형으로 형성되도록 배치되어 있으며, 각각의 슬릿은 임의의 방향에서 불어오는 바람에 대해 슬릿 내부에 와류를 유도하기 위한 목적으로 설계되었다. 슬릿 형성을 위한 외부 구조물은 3D 프린팅을 활용하여 Polylactic Acid (PLA) 소재로 제작하였고, 원통형 구조의 지름과 높이는 각각 50, 160 mm이다. 내부 원통과의 접촉-분리에 따른 마찰대전 효과를 유도하기 위해 6개의 외부 구조물 내면에 0.05 mm 두께의 Polytetrafluoroethylene (PTFE)가  $30 \times 140 \text{ mm}^2$ 의 크기로 부착되어 있으며, 발생하는 전력을 수확하기 위해 PTFE 뒷면에 동일한 크기를 가지는 Cu 전극을 배치하였다. 6개의 외부 구조물을 고정하는 하단, 상단 고정부 또한 3D 프린팅으로 제작된 PLA 소재로 이루어져 있다. 두 개의 고정부 모두 외경은 50 mm이지만, 상단 고정부는 내부 원통의 출입을 위하여 내경 35 mm의 중공축 모양으로 제작했으며, 하부 고정부는 6개의 외부 구조물을 고정하기 위한 홈이 형성되어 있다. 외부 구조물 내부에서 회전하는 내부 원통은 바닥면에 고정되어 있지 않고 부유되어(Freestanding) 있는 형태로 외부 구조물 내에서 수평방향으로 자유롭게 움직일 수 있다. 내부 원통은 Al 필름을 원형으로 굴곡시킨 뒤 테이프로 고정하여 제작하였으며, 두께 0.03 mm, 높이 130 mm의 크기를 갖는다. 본 연구에서는 내부 원통의 지름에 따른 에너지 수확량을 비교하기 위하여 4개의 서로 다른 지름(22.5, 25, 27.5, 30 mm)을 갖는 내부 원통을 준비하였다. 마지막으로 Cu 와이어를 이용하여 PTFE와 Al을 전기적으로 연결하였다. 제안하는 하베스터의 제작 공정은 매우 간단할 뿐만 아니라 손쉽게 조립과 분리가 가능하고 휴대성이 용이하므로 야외에서 사용할 수 있는 휴대용 바람 에너지 하베스터로 활용 가능하다.

### 2.2 구동 원리

Fig. 2(a)와 같이 TENG에 바람이 불어오면 슬릿 구조로 인해 외부 원통 내부에 회전하는 와류가 발생하고 이에 따라 내부 원통은 반시계 방향으로 회전하게 된다. 이 회전에 의하여 6개의 외부 구조물 안쪽에 부착되어 있는 PTFE와 내부 원통의 Al이

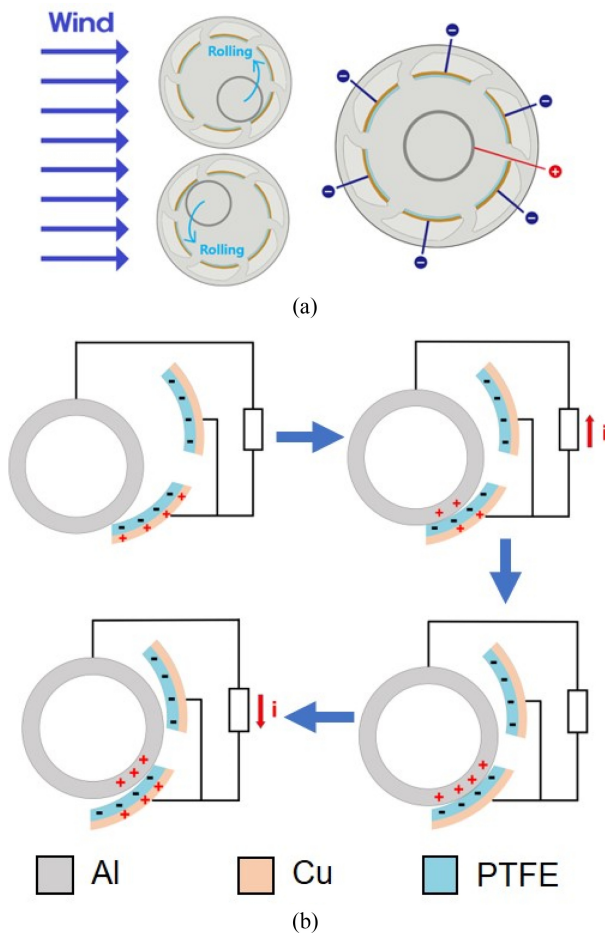


Fig. 2 (a) Principle that the inner cylinder rotates by the input wind.  
(b) Schematic illustration presenting triboelectric effect between Al and PTFE when they are contacted and separated

반복적으로 접촉과 분리를 일으킨다. 외부 구조물은 고정되어 있고 내부 원통이 외부 구조물 내에서 회전하는 구조이기 때문에, 프로펠러 기반 바람 에너지 하베스터에서 필연적으로 발생하는 외부 움직임이 발생하지 않아 에너지 수확에 필요한 공간을 줄일 수 있다. Fig. 2(a)의 오른쪽 그림은 접촉/분리에 따른 마찰대전 효과로 인해 발생하는 전력을 수확하기 위한 전기적 배선을 나타낸다. 6개의 PTFE는 하나의 전극으로 연결되었고, 내부 Al 원통과 전기적으로 연결하여 두 소재의 전위차로 인해 발생한 전력을 수확한다. Fig. 2(b)는 내부 원통 외벽의 Al과 외부 구조물 내벽의 PTFE가 접촉할 때 발생하는 전류의 이동을 나타낸다. Al과 PTFE가 접촉하게 되면 Al은 상대적으로 전기적 양성을 띄고 PTFE는 전기적 음성을 가지게 되며, 전위차에 의한 전류가 Cu 와이어를 통해 두 전극 사이에 흐르게 된다. 내부 원통이 회전하면서 두 면이 분리되는 경우에는 전류가 반대로 발생한다. 내부 원통이 회전에 따라 6개의 접촉면에서 이러한 과정이 반복적으로 일어나기 때문에 지속적인 전력 수확이 가능하다.

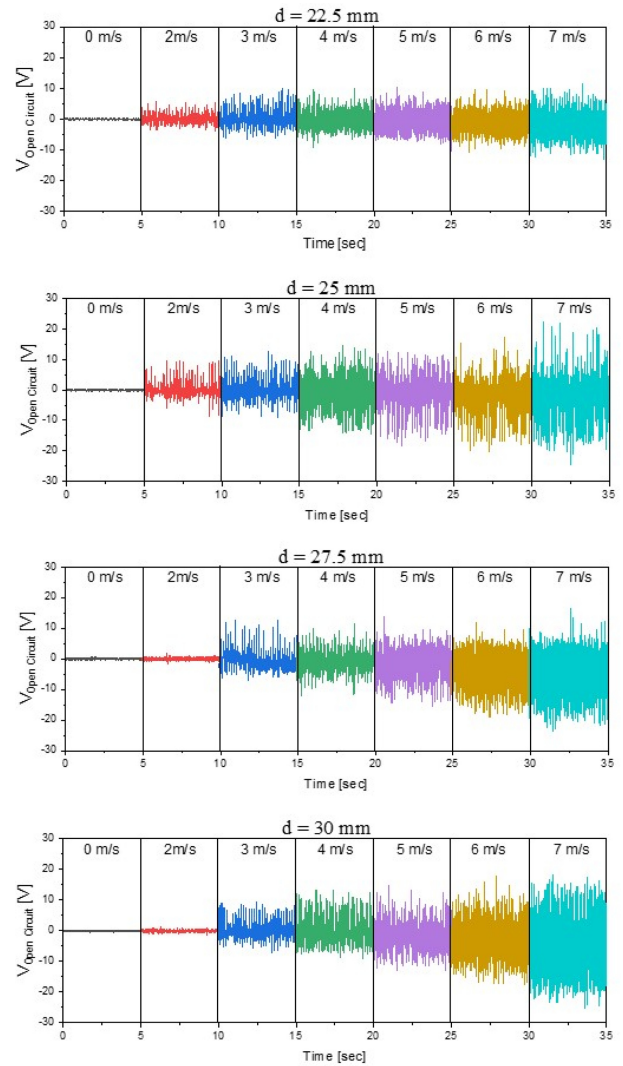


Fig. 3 Output voltage of the harvester using the inner cylinder with different diameters (22.5, 25, 27.5, and 30 mm) when the wind speed increases from 0 to 7 m/s

### 3. 실험 결과

#### 3.1 실험 방법

제작된 TENG의 성능 평가를 위해 직접 제작한 소형 풍동 시스템에서 풍속 및 풍향에 따른 전기적 출력 특성을 측정하였다. 출력 전압은 오실로스코프(TBS 2102B, Tektronix)와 1,000 : 1 고전압 패시브 프로브(P6015A, Tektronix)를 활용하여 측정하였으며, 동일한 오실로스코프에 저잡음 전류 증폭기(SR570, Stanford Research)를 연결하여 전류를 측정하였다. 모든 데이터는 오실로스코프에 연결된 컴퓨터를 사용하여 수집되고 처리되었다.

#### 3.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 풍속의 변화에 따른 소자의 개방회로 전압(Open



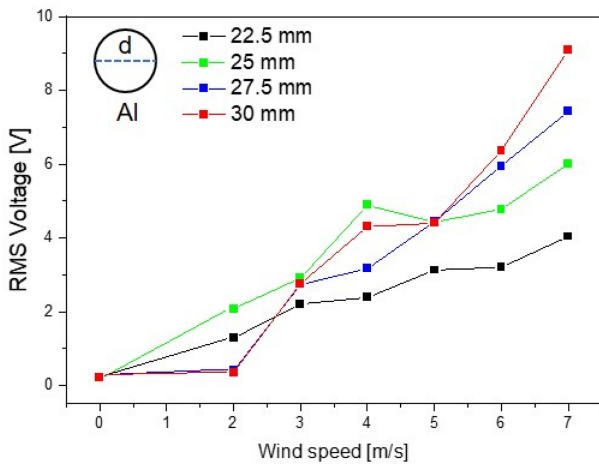


Fig. 4 Effect of wind speed on RMS voltage of the TENG with various inner cylinder diameters

Circuit Voltage)을 나타낸다. 내부 원통의 지름이 서로 다른 4개의 소자 모두 풍속이 증가할수록 전압이 증가하는 경향성을 보였다. 이는 고풍속 하에서 내부 원통이 더 빠르게 회전하여 내부 원통과 외부 구조물 내벽 사이의 접촉-분리가 더 빠르게 자주 발생하기 때문이다[18]. 비교적 낮은 풍속인 2 m/s의 바람에서는 내부 원통의 지름이 작은 두 소자( $d = 22.5, 25$  mm)는 작동을 하지만, 상대적으로 큰 지름을 가지는 두 소자( $d = 27.5, 30$  mm)는 내부 원통이 거의 움직이지 않아 출력 전압이 매우 작다. 이는 지름이 커질수록 내부 원통의 무게 또한 증가하여 AI과 PTFE의 접촉-분리가 거의 발생하지 않기 때문이며, 이를 통해 작동을 위한 임계 유속은 내부 원통의 무게와 밀접하게 연관되어 있음을 추측할 수 있다. Fig. 4는 2-7 m/s의 입력 풍속에 대한 내부 원통의 지름 크기별 실효(Root Mean Square, RMS) 전압 값을 보여준다. 앞서 설명한 바와 같이 풍속이 증가할수록 RMS 전압도 증가하는 경향성을 보이며, 고풍속(6 m/s 이상) 하에서는 지름이 큰 내부 원통이 외부 구조물과 접촉하는 면적이 더 넓기 때문에 RMS 전압도 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만, 마찰대전 효과를 활용하는 하베스터의 특성상 바람으로 인해 발생하는 내부 원통의 회전 속도와 지름 크기에 따른 접촉면적 변화, 두 가지 요소가 서로 반대로 작용하기 때문에 RMS 전압이 일정하게 증가하지는 않는다. 그럼에도 불구하고, 지름의 크기가 작으면 가벼운 무게로 인해 저속에도 민감하게 반응하므로 작은 내부 원통 기반 TENG는 자가구동 풍속 센서에 적합한 특성을 보이며, 큰 지름의 내부 원통으로 제작된 하베스터는 고풍속에서 최대 효율의 에너지 수확이 가능하므로 내부 원통 크기에 따라 적합한 응용처에 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

현재까지 개발된 많은 TENG 기반 바람 에너지 하베스터는 특정 방향의 바람에만 작동하는 풍향 의존성을 보인다. 모든 풍향에 대응하기 위하여 소자를 실시간으로 회전시키거나 방사형으로 배열할 수 있지만 이러한 추가 작업은 대형 발전기 대비 에너지 하베스터가 갖는 장점을 활용하기 어렵게 만든다. 본

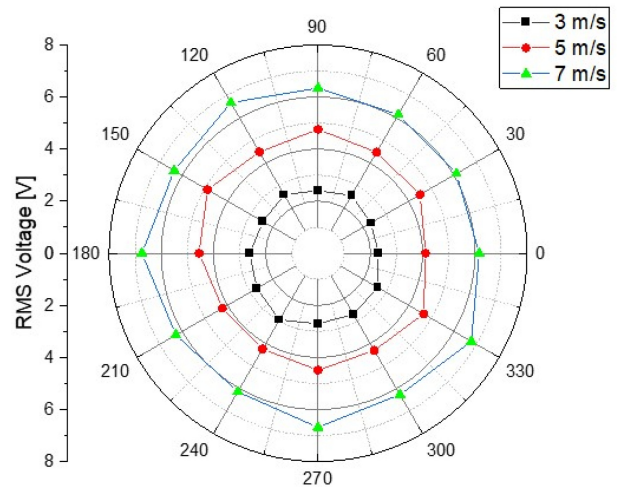


Fig. 5 RMS voltage output of the TENG at different wind speeds when changing the wind direction by a 30° interval

연구에서 개발한 원통형 하베스터는 슬릿 구조로 인하여 임의의 방향에서 바람이 불어와도 원통 내부에 회전하는 와류를 만들어낼 수 있어 모든 풍향에 대응한 에너지 수확이 가능하다. 하베스터의 전방향을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 다양한 풍속 하에서 바람의 입력 방향을 30° 간격으로 변화시켜가며 RMS 전압을 측정하였다. 실험 결과, 동일한 풍속 하에서 풍향에 관계없이 유사한 값을 가지며, 이는 제안하는 하베스터가 전방향 풍력 에너지를 수확할 수 있다는 것을 입증한다.

다음으로 수확된 에너지를 소형 전자 부품 및 기기의 보조 전력으로 활용 가능한지를 검증하기 위하여 6 m/s 풍속 하에서 하베스터와 연결된 부하 저항을 1 kΩ에서 1 GΩ까지 증가시키며 임피던스 매칭 실험을 진행하였다. Fig. 6(a)는 부하 저항에 따라 일정한 풍속 하에서 6.4초간 측정된 출력 전압과 전류를 RMS 값으로 변환한 결과이다. 저항이 증가함에 따라 RMS 전압은 증가하고 RMS 전류는 감소하는 경향을 보였다.  $P = IV$  식을 이용하여 계산한 최대 RMS 전력은 400 MΩ의 부하 저항에서 약 1.7 μW였다(Fig. 6(b)). Fig. 7(a)는 TENG에서 발생하는 교류전압을 직류전압으로 변환하기 위하여 6 m/s의 풍속 조건에서 정류회로를 거쳐 측정된 전압을 보여준다. Fig. 7(b)는 정류 회로를 사용해 1 μF부터 22 μF까지 다양한 용량의 커패시터를 충전한 결과이다. 저장량의 커패시터는 하베스터 작동 초기에 빠르게 반응하고 커패시터의 용량이 늘어날수록 느리게 충전되는 모습을 보이며, 1 μF의 커패시터를 150초간 충전했을 때 커패시터 양단의 전압차는 약 9.8 V였다. 본 연구진은 제안하는 하베스터를 통해 수확된 전력의 실시간 활용 가능성을 검증하기 위하여 LED 작동을 시연하였다. 6 m/s의 바람이 가해질 때 Fig. 7(c)와 같이 직렬 연결된 10개의 LED가 실시간으로 작동하는 것을 확인하였다. 추가로, 커패시터에 충전된 전력을 활용하여 전자시계를 구동하였다. Fig. 8(a)는 33 μF 용량의 커패시터를 활용하여 TENG와 연결된 전자시계를 15초 동안 작동시킨 사진이다. 6 m/s의 바람에 대해 Fig. 8(b)와 같이 약 400초에

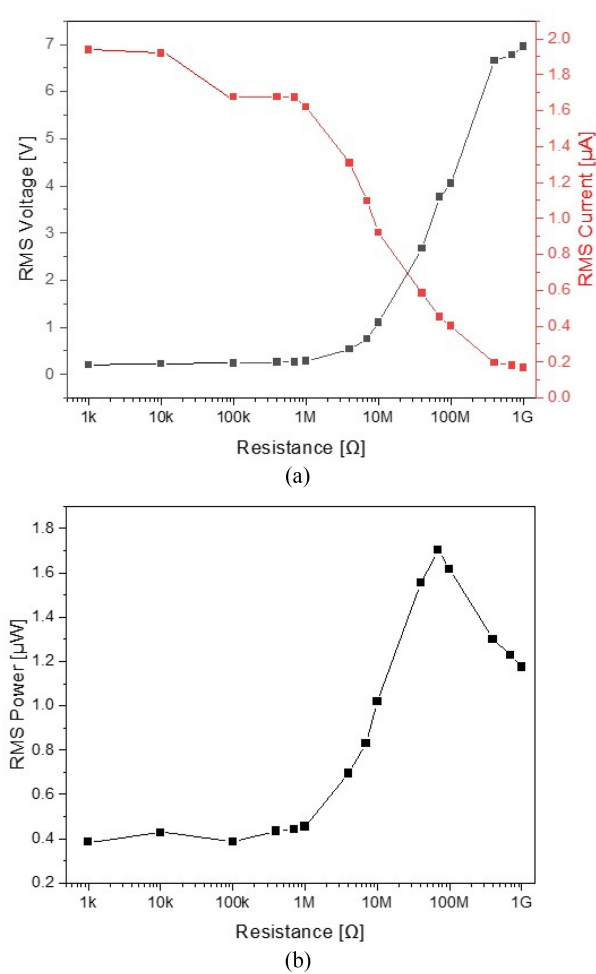


Fig. 6 Impedance-matching result when the wind speed is 6 m/s. (a) RMS voltage and current of the TENG as a function of external load resistance. (b) Dependence of the RMS power on the load resistance

걸쳐 에너지를 수확하였으며 충전된 커패시터를 활용하여 전자시계를 구동할 수 있었고, Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이 시계가 작동할 때 커패시터는 전압강하를 일으킨다. 이는 제안하는 TENG가 상용 전자부품에 전력을 공급하기에 충분한 에너지를 생산할 수 있음을 의미한다. 이번 연구에서는 필요한 전력이 상대적으로 작은 LED 실시간 구동 및 충전된 커패시터를 활용한 전자시계 구동을 수행하였으나, 전력관리칩과 연결하여 에너지를 충전해서 사용할 경우 다양한 소형 센서들도 구동할 수 있을 것으로 예상된다.

마지막으로 외부 환경에서 하베스터 성능을 평가하였다(Fig. 9(a)). 풍동 실험과 동일한 장비를 활용하여 전압을 측정하였으며, 상용화된 풍속계를 통해 구간 내 최대 풍속을 측정하였다. Figs. 9(b), 9(c), 9(d)는 최대 풍속이 2, 4, 그리고 7 m/s일 때의 출력 전압을 나타낸다. 풍동 환경과는 달리 자연적으로 불어오는 바람의 풍속과 풍향이 일정하지 않기 때문에 지속적이고 일정하게 전력을 수확할 수 없었으나 출력 전압이 발생하는 것을 확인하였으며 최대 풍속 대비 출력 전압도 풍동 실험결과와 유사

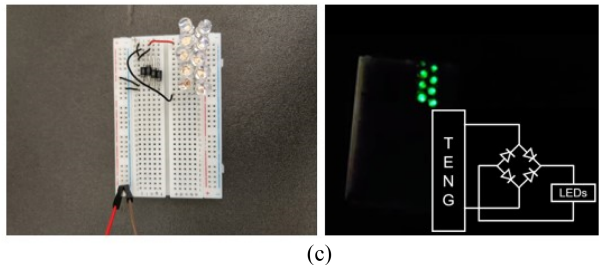
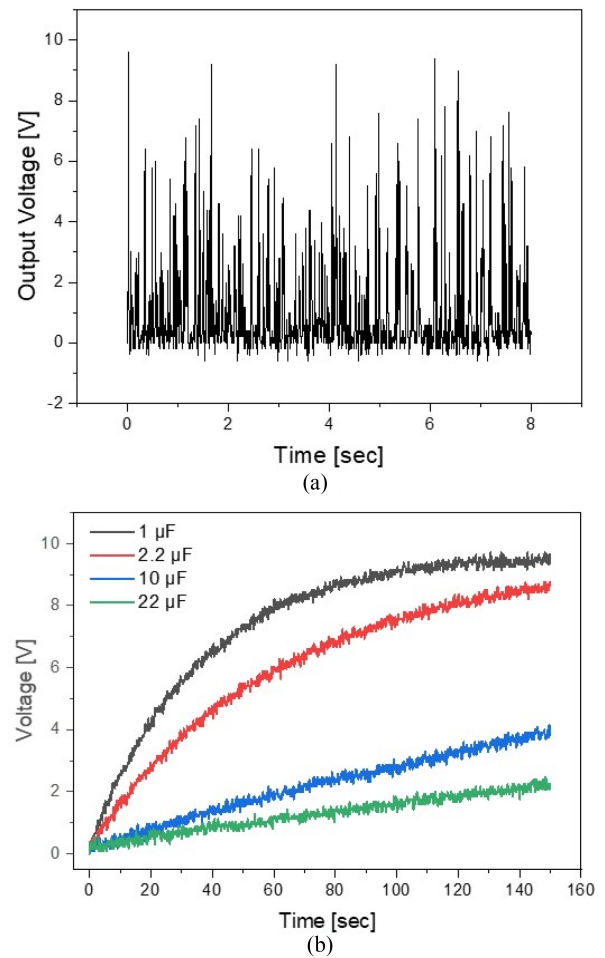


Fig. 7 (a) Rectified output voltage measured when the wind speed is 6 m/s. (b) Charged voltage of four capacitors increasing over time. (c) Photographs exhibiting the successful operation of green LEDs using the electrical energy generated from the harvester

하였다. 다양한 외부 환경 중에서도 바람이 지속적으로 빠르게 부는 환경에 설치한다면 하베스터의 효율성을 최대한 활용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 경사각을 가진 슬릿 구조를 원통 형상으로 설계하여 전방향 바람 에너지 수확이 가능한 TENG를 개발하였다.

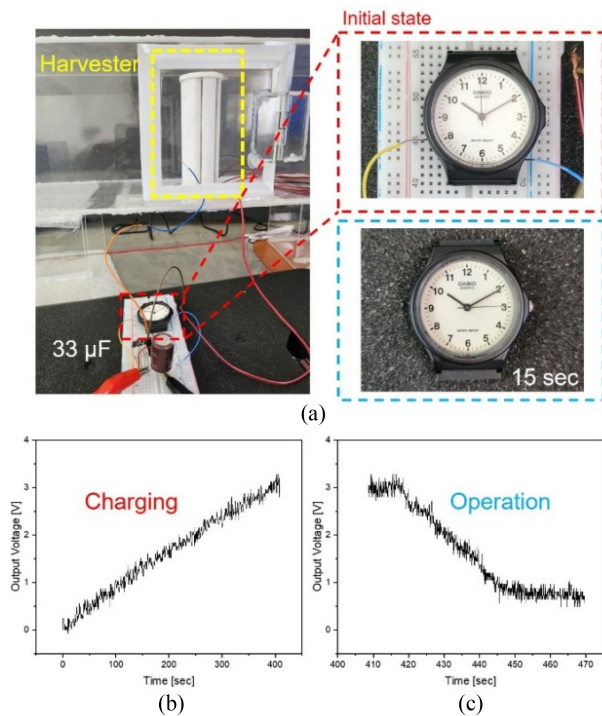


Fig. 8 (a) Photograph of the electronic watch operated for 15 s. (b) Voltage of the capacitor (33  $\mu$ F) at a wind speed of 6 m/s. (c) Voltage drop of the capacitor when the watch operates

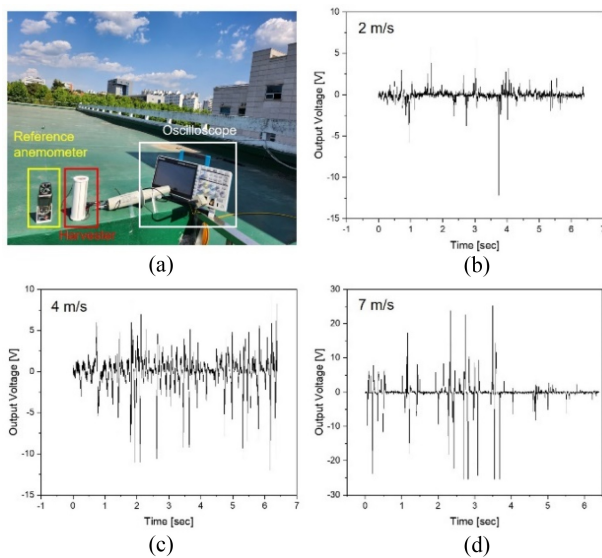


Fig. 9 (a) Photograph of the device placed outdoor environment. (b)-(d) Output voltage of the harvester at wind speed up to 2, 4, and 7 m/s

소자는 AI 필름으로 제작한 내부 원통과 3D 프린팅을 이용해 제작한 외부 구조물로 구성되었다. 외부 구조물의 슬릿을 통해 바람이 들어오면 내부 원통이 경사진 방향으로 회전하고 내부 원통의 AI과 외부 구조물 내면에 부착된 PTFE의 접촉-분리에 의해 전압이 발생하는 것을 확인하였다. 내부 원통의 지름 및

풍속에 따른 하베스터의 성능 검증을 위한 실험을 수행하였으며, 지름의 길이에 따라 고효율 에너지 하베스터 또는 자가구동 풍속 센서로 활용할 수 있음을 확인하였다. 또한 개발한 하베스터는 바람이 불어오는 방향과 상관없이 에너지를 수확할 수 있었으며, 임피던스 매칭, 커패시티 충전, LED 및 전자시계 구동 실험을 통해 소형 전자부품의 보조 전력원으로 활용할 수 있음을 입증하였다. 제작한 소자는 비교적 작고 간단한 구조로 설계되어 휴대성이 용이하며, 외부 구조물이 고정되어 주변 환경에 큰 영향을 받지 않아 효율적인 공간 활용에 유리하다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Shaikh, F. K., Zeadally, S., (2016), Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1041-1054.
2. Yun, Y., Jang, S., Cho, S., Lee, S. H., Hwang, H. J., Choi, D., (2021), Exo-shoe triboelectric nanogenerator: Toward high-performance wearable biomechanical energy harvester, *Nano Energy*, 80, 105525.
3. Kishore, R. A., Priya, S., (2018), A review on low-grade thermal energy harvesting: Materials, methods and devices, *Materials*, 11(8), 1433.
4. Rodrigues, C., Nunes, D., Clemente, D., Mathias, N., Correia, J., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Morais, T., Pereira, A., Ventura, J., (2020), Emerging triboelectric nanogenerators for ocean wave energy harvesting: State of the art and future perspectives, *Energy & Environmental Science*, 13(9), 2657-2683.
5. Panda, S., Hajra, S., Mistewicz, K., In-na, P., Sahu, M., Rajaittha, P. M., Kim, H. J., (2022), Piezoelectric energy harvesting systems for biomedical applications, *Nano Energy*, 100, 107514.
6. Vasiliev, M., Nur-E-Alam, M., Alameh, K., (2019), Recent developments in solar energy-harvesting technologies for building integration and distributed energy generation, *Energies*, 12(6), 1080.
7. Zeadally, S., Shaikh, F. K., Talpur, A., Sheng, Q. Z., (2020), Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109901.
8. Ko, H.-J., Kwon, D.-S., Bae, K., Kim, J., (2022), Self-suspended shell-based triboelectric nanogenerator for omnidirectional wind-energy harvesting, *Nano Energy*, 96, 107062.



9. Luo, J., Wang, Z. L., (2020), Recent progress of triboelectric nanogenerators: From fundamental theory to practical applications, *EcoMat*, 2(4), e12059.
10. Ko, H.-J., Kwon, D.-S., Kim, J., (2022), Cylindrical shell and metal wire-based omnidirectional wind-driven triboelectric nanogenerator, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(10), 753-758.
11. Amano, R. S., (2017), Review of wind turbine research in 21st century, *Journal of Energy Resources Technology*, 139(5), 050801.
12. Chen, B., Yang, Y., Wang, Z. L., (2018), Scavenging wind energy by triboelectric nanogenerators, *Advanced Energy Materials*, 8(10), 1702649.
13. Ko, H.-J., Kwon, D.-S., Pyo, S., Kim, J., (2022), Curved flap array-based triboelectric self-powered sensor for omnidirectional monitoring of wind speed and direction, *Nano Energy*, 102, 107717.
14. Yong, H., Chung, J., Choi, D., Jung, D., Cho, M., Lee, S., (2016), Highly reliable wind-rolling triboelectric nanogenerator operating in a wide wind speed range, *Scientific Reports*, 6(1), 33977.
15. Zeng, Q., Wu, Y., Tang, Q., Liu, W., Wu, J., Zhang, Y., Yin, G., Yang, H., Yuan, S., Tan, D., (2020), A high-efficient breeze energy harvester utilizing a full-packaged triboelectric nanogenerator based on flow-induced vibration, *Nano Energy*, 70, 104524.
16. Yuan, S., Zeng, Q., Tan, D., Luo, Y., Zhang, X., Guo, H., Wang, X., Wang, Z. L., (2022), Scavenging breeze wind energy (1–8.1 ms<sup>-1</sup>) by minimalist triboelectric nanogenerator based on the wake galloping phenomenon, *Nano Energy*, 100, 107465.
17. Wang, K., Zhang, Y., Luo, X., Zhu, L., Wang, Z. L., (2022), Active deformable and flexible triboelectric nanogenerator based on super-light clay, *ACS Applied Electronic Materials*, 4(9), 4764-4771.
18. Lee, J.-S., Yong, H., Choi, Y. I., Ryu, J., Lee, S., (2021), Stackable disk-shaped triboelectric nanogenerator to generate energy from omnidirectional wind, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9, 557-565.



#### Jong-An Choi

M.S. candidate in the Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are energy harvesters and fabrication of micro sensors.

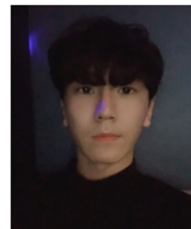
E-mail: finalplan95@seoultech.ac.kr



#### Jingu Jeong

M.S. candidate in the Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are energy harvesters and micro/nanofabrication.

E-mail: lklk789@seoultech.ac.kr



#### Mingyu Kang

B.S. candidate in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are additive manufacturing and micro/nano sensors.

E-mail: 99mingue@seoultech.ac.kr



#### Soonjae Pyo

Assistant Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are modeling, design, and fabrication of micro/nano-systems

E-mail: sjpyo@seoultech.ac.kr



## 계단오르기 동작 시 체중상승을 위해 하지관절이 생성하는 역학적 일의 성별 비교

## Gender Comparison of Mechanical Work in the Lower Limb Joints Required for Body Weight Elevevation during Stair Ascent

신현수<sup>1</sup>, 이준영<sup>1</sup>, 김민재<sup>1</sup>, 엄광문<sup>1,#</sup>

Hyeon-Soo Shin<sup>1</sup>, Jun-Young Lee<sup>1</sup>, Min-Jae Kim<sup>1</sup>, and Gwang-Moon Eom<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 건국대학교 대학원 의학공학과 (Department of Biomedical Engineering, Graduate School, Konkuk University)

# Corresponding Author / E-mail: gmeom@kku.ac.kr, TEL: +82-43-840-3764

ORCID: 0000-0002-7934-3772

KEYWORDS: Stair climbing (계단 오르기), Gait strategy (보행전략), Lower limb (하지), Gender difference (성차), Mechanical work (역학적 일)

*Climbing stairs places a greater load on lower limb joints compared to walking on level ground. Variations in anatomical structures and muscle characteristics between genders suggest potential differences in the distribution of required mechanical work among the three lower limb joints. This study aimed to identify gender disparities in the allocation of mechanical work to lower limb joints during stair climbing. A total of thirty-six adults (equally divided between men and women) participated in the study. Participants ascended stairs equipped with force plates at their comfortable speeds, while motion was captured using nine cameras. Inverse dynamics analysis was employed to calculate the mechanical work performed by each joint during four phases of stance: weight acceptance, pull-up, forward continuation, and push-up. Male participants exhibited significantly higher mechanical work than females at the hip and ankle joints ( $p < 0.05$ ) from the 1st-3rd phases and the 2nd phase, respectively. Conversely, female subjects displayed greater knee joint work during the 2nd-3rd phases ( $p < 0.05$ ). Notably, a pronounced gender difference was observed during the 2nd pull-up phase, where body mass is lifted by a single leg. These findings suggest that men and women employ distinct strategies in distributing mechanical work across lower limb joints.*

Manuscript received: May 19, 2023 / Revised: October 4, 2023 / Accepted: October 11, 2023

### NOMENCLATURE

WA = Weight Acceptance  
PIU = Pull Up  
FC = Forward Continuanace  
PsU = Push Up

### 1. 서론

계단오르기 동작은 일상생활에서 자주 수행되는 수직이동을

위한 동작이다[1]. 계단오르기에서는 평지보행에 비해 더 큰 관절모멘트와 관절가동범위(Range Of Motion, ROM)가 필요하므로, 하지관절에 가해지는 부하가 더 크다[2]. 계단오르기에서의 에너지 소비는 평지 보행의 10-15배이며[3,4], 무릎에 가해지는 외부(External) 굴곡모멘트는 평지보행의 3배가 된다[5].

보행 중에 주로 사용되는 근육과 관절에 따라서 보행의 패턴이 달라지게 되는데[6], 남녀의 인체구조학적 특성과 근육의 속성이 다르므로 보행전략의 차이가 발생할 수 있다[7]. 평지보행에서는 여성이 남성보다 시상면에서 골반이 전방으로 더 기울어지며, 고관절의 굴곡각도의 평균값이 더 컸다[8]. 또한 여성의 시상면에서의 발목 가동범위가 남성보다 컸으며, 몸통의 앞뒤

흔들림 정도도 남성보다 컸다[9]. 이러한 보행전략 및 자세의 성차는 부하가 큰 계단보행에서 더욱 두드러질 수도 있으며 혹은 다른 양상으로 나타날 가능성도 있다.

보행전략은 하지관절의 관절모멘트와 역학적 일(Mechanical Work)과 같은 운동역학적 변수에도 영향을 미친다. 여기서, 역학적 일은 동작구간의 시작과 끝에서의 총에너지(위치에너지와 운동에너지의 합)의 차이를 보완하기 위해( $W = \Delta E$ ) 근육들이 각 관절에서 생성/흡수하는 것으로서, 다음과 같이 관절파워의 시간적분으로 정의된다.

$$P = M\omega \quad [W]$$

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad [J]$$

$P$  : Joint mechanical power

$M$  : Joint moment

$\omega$  : Velocity of the joint angle

$W$  : Joint mechanical work

예를 들어, 입각기(Stance Phase) 시작에서의 발접촉전략은 발목과 무릎관절의 모멘트[10,11], 각 하지관절에서 흡수하는 역학적 일(에너지)에 큰 영향을 미친다[12]. 또한 무릎 골관절염의 주된 마커로 알려진 무릎 내전모멘트(Knee Adduction Moment) [13]를 줄이기 위해, 의도적으로 몸통을 지지측 다리로 과도하게 기울이거나 지지측 발의 수평면 각도(Foot Progression Angle)를 변경하는 보행전략이 사용되고 있다[14,15].

계단오르기에서의 보행전략 차이도 역학적 일의 생성방식의 변화를 유도할 수 있다. 계단을 오를 때 스텝의 높이만큼의 위치에너지 증가를 만들어내기 위해서는 하지의 관절들이 양(Positive)의 역학적 일을 수행해야 한다. 이러한 역학적 일은 하지의 각 관절에 적절히 분배되어야 하는데, 남녀의 인체구조적 차이와 근육특성의 차이로 인해 이러한 분배방식 혹은 전략에 성차가 있을 가능성이 있다. 따라서, 보행전략에 대한 이해를 위해서는 하지의 전체관절에 대하여 역학적 일을 파악하는 것이 필요하다.

보행의 성별 차에 대한 선행연구에서는 주로 평지 보행을 대상으로 하였고[8,9,16,17], 계단 보행에서 역학적 일의 분배에 관한 보행전략의 성별 비교에 관한 연구는 매우 부족하다. 즉, 계단보행에서는 최대값의 관점에서 운동학적[18,19], 근전도[19], 관절모멘트[18]의 비교만이 수행되었고, 하지의 전체관절을 대상으로 역학적 일을 비교한 것은 없었다. 예를 들어, Law 등[18]은 고령자 계단보행중의 관절각도와 관절모멘트의 최대값을 조사하여, 관절각도에는 성차가 있으나 관절모멘트에는 성차가 없음을 보고하였다. Ferrag [19]와 Cartwright [20]는 젊은 남녀의 계단오르기에서 하지의 최대관절각도와 근전도에 성차가 있음을 보고했다. Baldon 등[21]은 젊은 남녀의 계단내리기에서 관상면과 수평면 각도의 성차를 조사하였다. 한편, Hong 등은 관절각도와 관절모멘트, 관절파워, 음의 일[22], 무릎근육의

Table 1 Subject Characteristics

Characteristic	Male (n = 18)	Female (n = 18)	Significance
Age	24.7±3.4	24.6±1.2	N.S.
Height [cm]	173.9±4.5	163.4±3.9	***
Body mass [kg]	69.3±1.1	59.4±8.6	**
Leg length [cm]	90.6±3.6	87.4±4.2	N.S.
Thigh length [cm]	41.1±1.9	40.6±2.2	N.S.
Shank length [cm]	38.3±2.3	36.1±1.6	**

\*,  $p < 0.05$ , \*\*,  $p < 0.01$ , \*\*\*,  $p < 0.001$

Leg: from iliac spine to lateral malleolus, Thigh: from hip joint center to knee joint center; Shank: from knee joint center to ankle joint center; N.S.: non-significant

대향성 동시수축[23]에 성차가 있음을 보였으나, 계단에서 평지로의 전환 후의 첫 스텝에 대하여만 분석을 수행하여 계단보행 자체에 대한 전략의 차이를 밝히지는 못했다.

따라서 본 연구에서는, 계단오르기 동작에서 수행되는 역학적 일이 각 관절에 분배되는 방식을 남녀간에 비교하여, 남녀의 보행전략의 차이를 밝혀내고자 한다.

## 2. 방법

### 2.1 피실험자

피실험자로는 건강한 20대 성인 남성 18명, 여성 18명을 대상으로 하였고(Table 1), 근골격계 질환이나 신경계 질환을 보유하고 있는 자, 3개월 이내에 하지 수술의 이력이 있는 자는 제외하였다. 피험자에게 사전에 연구내용을 설명한 후 실험 동의를 받았으며, 이 연구는 건국대학교 기관생명윤리위원회의 승인(HR-409)을 받았다. Table 1에서 피험자의 인체특성의 성차를 Mann-Whitney 방식으로 검정하였다.

### 2.2 실험장비 및 방법

계단 오르기 동작의 계측을 위하여 모션캡처카메라(MX T40, VICON Inc., UK) 9대와 Plug-in-gait 마커셋을 사용하였다. 계단은 Fig. 1과 같이 높이 17 cm, 가로너비 70 cm, 폭 30 cm 경사도 30 deg의 총 5개의 스텝으로 구성되며, 지면반력의 계측을 위하여 계단의 2번째와 3번째 스텝에 힘판(9260AA, Kistler, Swiss)을 삽입하였다. 모션캡처카메라와 힘판의 샘플링 주파수를 각각 100 Hz, 1 kHz로 설정하였다. 모션데이터와 힘판의 고주파 잡음을 10 Hz 저역통과필터를 통해 제거하였다. 계단의 프레임은 알루미늄으로 구성하였으며, 미끄럼 방지를 위해 발판은 PVC 재질로 제작되었다. 마지막 스텝(플랫폼)은 피실험자가 편하게 서 있을 수 있도록 세로폭을 70 cm로 하였다. 보행 중의 안전을 위하여 계단의 양 옆과 상단의 플랫폼에 안전가드를 설치하였다. 피실험자들은 실험에 필요한 신체 사이즈를 측정한 뒤 전용수트를 착용하고 지름 14 mm의 반사마커를 부착했다.

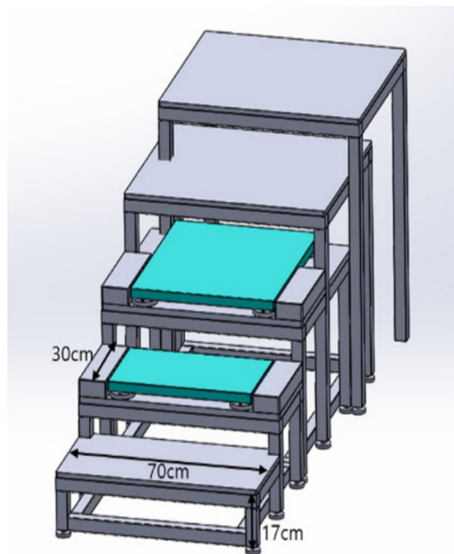


Fig. 1 Instrumented stairs (two force plates inserted)

실험 환경에 적응을 하기 위해 충분한 연습을 한 뒤 계단 오르기 동작을 진행하였다. 미끄럼 방지를 위해 맨발로 실험을 진행하였으며, 피실험자에게 편안한 보행속도로 걷도록 요구하였다. 데이터 수집은 두 번째 계단에 있는 힘판을 오른발로 초기 접촉했을 때(Initial Contact)부터 발을 떼기(Toe Off)까지의 입각기(Stance Phase)에서 수행하였다. 개인별 3회의 실험을 진행하였고, 각 실험 사이에는 1분의 휴식시간을 두었다. 3개의 실험 데이터 중 노이즈가 적고, 마커 데이터의 유실이 가장 적은 데이터 1개를 선별하여 분석을 진행하였다.

### 2.3 분석 및 통계

계단 오르기 동작 중 오른쪽 다리의 입각기를 대상으로 분석을 수행하였다. 모션데이터와 힘판데이터를 입력으로 하여 NEXUS 2.0 소프트웨어(VICON Inc., UK)를 사용하여 Dynamic Plug-in Gait Model 기반의 역동역학 분석을 통해, 각 관절의 시상면에서의 관절파워를 계산하였다. 각 관절의 시상면을 계산하기 위한 국소(Local) 좌표축으로서 관절에 인접한 상부 분절의 좌표축이 사용되었다. 이 과정에서 사용되는 각 분절의 질량과 관성모멘트와 같은 인체측정학적(Anthropometric) 데이터의 산출에는 사체데이터를 바탕으로 한 추정식이 사용되었다[24].

계단오르기의 4가지 보행상[25]을 수정하여 Fig. 2와 같이 보행상을 구분하는 5가지 이벤트를 정의하고 4가지 보행상(Phase)으로 나누었다. 각 이벤트에서의 관절각도와 뒤꿈치들림각도(Heel Lift Angle)를 산출하였다. 뒤꿈치 들림각도는 발끝(Toe) 마커와 발꿈치(Heel) 마커를 연결하는 선분과 지면이 이루는 3차원 각도로 정의하였다.

산출된 관절 파워를 각 보행상별로 적분하여 역학적 일을 구하였다. 계단상승에서의 위치에너지 증가는 피험자의 질량에 비례하므로, 역학적 일을 피험자의 질량으로 나누어서 정규화(Normalization)를 한 후에 성별비교를 수행하였다. 또한, 다음과

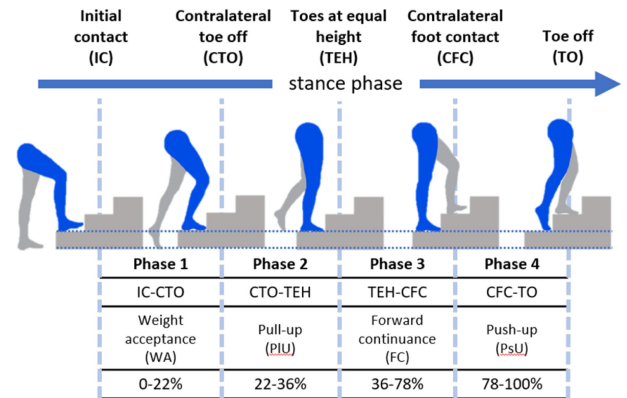


Fig. 2 Four phases and 5 events of stance period

같이 하지 전체관절의 일에 대한 관절별 일의 비율을 산출하였다.

$$R_j = \frac{|W_j|}{\sum |W_j|}$$

$R_j$ : The ratio of work done by each joint to the total leg work

$W_j$ : Mechanical work at joint j

또한, 계단보행의 속도를 두 스텝의 끝을 연결하는 대각선 거리를 오른발의 초기접지(Initial Contact, IC)부터 왼발의 초기접지까지의 시간으로 나누어 계산하였다.

모든 통계처리에 SPSS26 (IBM, NY)를 사용하였으며, 일부 분의 변수가 정규성(Normality)을 만족하지 못하여서, 성별 비교에는 비모수검정인 Mann Whitney U-test를 사용하였다.

### 3. 결과

Table 2는 각 보행상에서의 하지관절 전체의 역학적 일에 대해 각 관절에서의 일이 차지하는 비율을 나타낸다. PsU를 제외한 모든 보행상에서, 여성은 남성에 비해 무릎관절에서의 일의 비중이 더 컸고, 이와 반대로 남성의 경우 고관절에서의 일의 비중이 여성에 비해 컸다( $p < 0.05$ ). PIU 보행상에서는 남성의 족관절의 일의 비중이 여성에 비해 높았다( $p < 0.05$ ).

Table 3는 각 관절에서의 역학적 일을 몸무게로 나누어 정규화한 값을 나타낸다. Table 2와 동일하게, 남자는 족관절과 고관절에서, 여자는 무릎관절에서의 역학적 일이 더 큰 것을 알 수 있다( $p < 0.05$ ).

계단보행의 속도는 남녀가 각각  $0.47 \pm 0.10$ ,  $0.48 \pm 0.06$  [m/s]로서 유의한 차이가 없었다( $p > 0.05$ ).

Fig. 3는 입각기의 5가지 이벤트에서의 관절각도를 나타낸다. TO를 제외한 모든 이벤트에서, 여성은 족관절에서의 배측굴곡(Dorsiflexion)과 무릎관절의 굴곡(Flexion)의 각도가 남성에 비해 컸고, 남성은 보행중기(CTO-TEH)에서 뒤꿈치 들림각도가 여성에 비해 컸다( $p < 0.01$ ).

Table 2 Ratio of each joint work to leg total work [%]

	Joint	WA	PIU	FC	PsU
Ankle	Men	-11.3±10.1	7.1±5.5	11.9±10.6	84.0±12.1
	Women	-9.40±10.9	3.93±5.72	3.75±27.4	86.3±5.60
	Significance	N.S.	M > F*	N.S.	N.S.
Knee	Men	43.8±21.0	56.4±24.6	37.0±33.7	9.70±10.6
	Women	63.3±19.4	79.3±20.6	56.2±26.6	7.10±6.83
	Significance	M < F**	M < F**	M < F*	N.S.
Hip	Men	44.5±19.9	33.9±27.1	32.8±37.4	2.72±10.6
	Women	25.3±18.5	11.4±20.1	-0.64±29.5	-1.89±6.12
	Significance	M > F**	M > F*	M > F**	N.S.

Mann Whitney U-test, \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , N.S.: Non-significant; WA: Weight acceptance, PIU: Pull-up, FC: Forward continuance, PsU: Push-up

Table 3 Joint mechanical work normalized by body mass [mJ/kg]

	Joint	WA	PIU	FC	PsU
Ankle	Men	-21.2±17.8	28.9±21.0	41.7±44.6	308.1±104.8
	Women	-16.1±23.7	15.0±18.8	27.6±95.0	375.5±115.2
	Significance	N.S.	M > F*	N.S.	N.S.
Knee	Men	93.2±54.0	260.1±182.0	130.1±147.8	36±37.8
	Women	131.0±89.6	370.7±157.0	231.2±140.4	30.2±32.8
	Significance	N.S.	M < F*	M < F*	N.S.
Hip	Men	98.5±64.2	132.4±123.0	105.9±135.2	2.8±18.8
	Women	54.4±54.0	40.7±80.0	-26.1±96.0	-6.47±27.9
	Significance	M > F*	M > F*	M > F**	N.S.

Mann Whitney U-test, \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , N.S.: Non-significant; WA: Weight acceptance, PIU: Pull-up, FC: Forward continuance, PsU: Push-up

#### 4. 고찰

본 연구에서는 입각기에서 계단을 올라가기 위해 필요한 일을 각 관절에 분배하는 방식에 있어서, 유의한 성차가 있음을 밝혔다. 즉, 남성은 여성에 비해 고관절과 족관절에 더 많은 일을 배분하고, 여성은 남성보다 무릎관절에 더 많은 일을 배분하였다(Table 2). 이것은 스탬프높이만큼의 위치에너지 증가에 필요한 역학적 일을 생성하기 위해서 선호하는 관절에 성차가 있다는 것으로서, 남성은 고관절을 여성은 무릎관절을 더 많이 사용한다는 것을 의미한다. 보행속도에 성차가 없었으므로, 이러한 관절선호의 성차는 보행속도에 의존하지 않는 고유의 것으로 판단된다.

첫 번째 보행상인 Weight-Acceptance (WA)에서, 남녀 모두 족관절에서는 음의 일이, 무릎관절과 고관절에서는 양의 일이 발생했다(Table 3). 양의 일이 에너지의 증가를 유발하는 것과 반대로 음의 일은 에너지를 흡수하여 에너지의 감소를 유발한다( $W = \Delta E$ ). 따라서, 족관절에서의 음의 일은 초기접지(IC)에

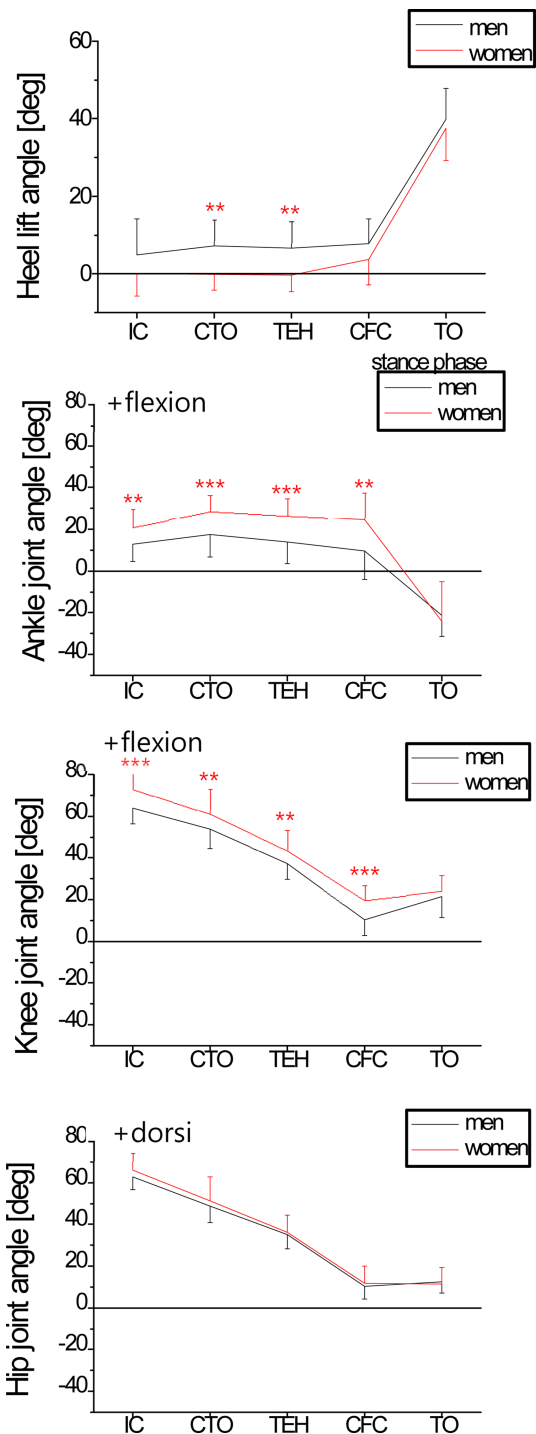


Fig. 3 Kinematics at 5 events of stance period. Mann Whitney U-test, \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

따르는 충격을 흡수하기 위한 이심성 수축(Eccentric Contraction) 전략으로 볼 수 있고, 이것은 평지보행에서의 충격흡수 메커니즘과 동일하다. 그러나, WA 보행상에서의 충격흡수는 족관절에서만 수행되었고, 무릎과 고관절에서는 초기접지 후 즉시 위치에너지 증가를 위한 양의 일이 발생된 것은, 평지보행과 차별되는 점이다.



WA 보행상에서, 이러한 에너지 증가를 위한 양의 일을 무릎과 고관절이 담당하는 비중은(Table 2) 남자는 44 : 46로서 동등한 반면, 여자는 63 : 25로서 고관절보다 무릎에 2.5배나 되는 일을 담당하고 있다. 이러한 경향은 두 번째 보행상인 Pull-Up (PIU)에서는 더욱 심화된다.

특이한 것은, 남성은 전 보행상에서 고관절이 양의 일을 수행하였으나, 여성은 보행후반기(FC-PsU)에서는 고관절이 오히려 음의 일을 수행한 점이다(Table 3). 따라서, 남성의 경우 전 구간에 걸쳐 고관절이 발생한 양의 일이 스탭높이만큼의 위치에너지의 증가를 달성하는데 크게 기여한 반면, 여성의 경우에는 오히려 다른 관절(주로 무릎)에서 제공한 양의 일을 고관절이 흡수하는 비효율적인 전략을 취하고 있는 것으로 해석된다. 즉, 대다수 여성에서 발생한 음의 일은 보행후반기에 고관절이 Fig. 3과 같이 신전하는 과정에서 실제로는 굴곡방향의 모멘트가 발생하여 고관절 신전에 저항했던 것을 나타낸다. 여성의 고관절에서 발생하는 에너지 흡수의 목적은 불분명하다. 한가지 가능성으로서, 마지막 보행상인 Push-Up이 반대쪽 다리의 관절에서는 초기접지에 따른 충격을 흡수하는 Weight-Acceptance에 해당되는 것과 관련이 있을 수 있으나, 이러한 전략이 왜 여성에게만 나타나는지를 알기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

이러한 보행전략의 차이는 보행의 자세에도 나타났다(Fig. 3). 즉, 여성은 남성보다 지지축 하지를 전체적으로 더 구부린 자세(족관절과 무릎관절의 굴곡이 증가)를 보인데 반해, 남성은 지지축 하지를 더 곧게 편 자세(발뒤꿈치를 더 들고 무릎의 신전이 증가)를 나타냈다.

역학적 일의 배분방식의 성차는 보행자세의 선택과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. 즉, 여성의 경우, 지지축 하지를 구부린 자세를 취하는 것에 의해, 지면반력벡터와 무릎관절과의 거리 즉, 모멘트 암을 증가시킬 수 있고, 이것이 큰 무릎관절의 모멘트로 연결되어, 무릎의 역학적 일이 증가했을 가능성이 있다. 반면, 남성의 경우, 지지축 하지를 곧게 펴는 자세를 취함으로써, 무릎의 모멘트 암을 줄이는 전략을 사용하여 결과적으로 무릎의 모멘트가 감소하고 역학적 일도 감소했을 가능성이 있다. 또한, 남성은 발뒤꿈치를 상대적으로 더 많이 올리는 것을 통해 발의 압력중심(Center of Pressure, COP)을 발 앞쪽으로 이동시켜서, 결과적으로 족관절과 고관절에서의 모멘트 암(지면반력벡터와 관절중심과의 거리)을 증가시킬 수 있고, 이것이 고관절의 모멘트와 역학적 일을 증가시켰을 가능성이 있다.

이러한 역학적 일의 배분전략의 성차는 이 연구에서 처음으로 밝혀진 것으로서, 매우 흥미로운 것이다. 일반적으로 무릎관절염의 유병률은 여성이 남성에 비해 유의하게 높은 것으로 알려져 있고[26], 그 원인으로서는 관절염의 종류에 따라 유전적, 면역학적 원인이 다양하게 작용하고, 여성의 폐경으로 인한 골밀도감소도 제안된 바 있다[27]. 본 연구의 결과에서 여성이 무릎관절의 역학적 일을 남성보다 더 많이 사용하는 것은, 이러한 여성의 무릎관절염을 더욱 악화시키는 요인으로서 작용할 가능성도 있다. 무릎 관절염의 생체역학적 주요한 위험 인자는

관상면의 내측무릎의 부하로 작용하는 내전(Adduction) 모멘트로 알려져 있다. 그러나, 무릎의 신전모멘트도 슬개대퇴(Patellofemoral) 관절 뿐 아니라 하퇴대퇴(Tibiofemoral) 관절의 내측부하를 증가시키는 것으로 보고되었다[28]. 그러나, 보행전략과 무릎관절염의 정확한 관계를 파악하기 위해서는, 연령별 비교와 코호트 관찰연구를 통한 종합적 조사가 수행되어야 할 것이다.

무릎관절보다 고관절에 보다 많은 역학적 일을 의도적으로 배당하기 위해서는 상체를 더 앞으로 숙여서 보행하는 전략을 생각할 수 있다. 즉, 상체를 숙일수록 상체의 하중이 고관절에 작용하는 굴곡모멘트가 커지게 되고, 이에 저항하기 위한 고관절 근육의 신전모멘트도 따라서 커지게 된다. 그러면, 모멘트와 각속도의 곱으로 표현되는 파워도 커지게 되므로, 고관절의 역학적 일이 증가하는 것이다. 실제로 남성의 경우, 무릎과 발목관절의 신전이 여성보다 컸기 때문에, 고관절 각도는 여성과 차이가 없었어도(Fig. 3) 상체의 각도는 더 전방으로 기울인 자세로 보행했다는 것을 알 수 있다.

이러한 역학적 일 분배전략의 성별 차이의 원인은 밝혀진 바가 없으나, 여성이 남성에 비해 지지축 다리를 더 구부리는 전략을 취하여 한쪽 다리 지지기에서 보행의 안정성을 추구했을 가능성이 있다.

본 연구의 제한점으로서, 일부의 데이터가 정규성 검정을 만족하지 못하였고, 피험자의 수가 성별당 18명이므로 이를 남녀간의 특성으로 일반화하기 어렵다는 점을 들 수 있다. 따라서, 차후에 피험자의 수를 늘려서 추가연구를 수행할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 역학적 일과 자세만을 연구의 대상으로 하였으나, 보행전략의 성차를 보다 깊이 이해하기 위해서는 모멘트와 모멘트암 및 근육특성을 포함한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

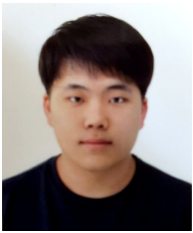
이 논문은 2021년도 건국대학교 KU 학술연구비 지원에 의한 결과임.

## REFERENCES

1. Riener, R., Rabuffetti, M., Frigo, C., (2002), Stair ascent and descent at different inclinations, *Gait & Posture*, 15(1), 32-44.
2. Silverman, A. K., Neptune, R. R., Sinitski, E. H., Wilken, J. M., (2014), Whole-body angular momentum during stair ascent and descent, *Gait & Posture*, 39(4), 1109-1114.
3. Eun, S., (2003), Biomechanical effect of the stair heights on the lower extremity joints in stair-ascent activity of elderly persons, Ph.D. Thesis, Seoul National University.

4. Fruin, J. J., (1971), Pedestrian planning and design. <https://trid.trb.org/view/114653>
5. Protopapadaki, A., Drechsler, W. I., Cramp, M. C., Coutts, F. J., Scott, O. M., (2007), Hip, knee, ankle kinematics and kinetics during stair ascent and descent in healthy young individuals, *Clinical Biomechanics*, 22(2), 203-210.
6. Waters, R. L., Mulroy, S., (1999), The energy expenditure of normal and pathologic gait, *Gait & Posture*, 9(3), 207-231.
7. Crosbie, J., Vachalathiti, R., Smith, R., (1997), Age, gender and speed effects on spinal kinematics during walking, *Gait & Posture*, 5(1), 13-20.
8. Cho, S.-H., Park, J. M., Kwon, O. Y., (2004), Gender differences in three dimensional gait analysis data from 98 healthy Korean adults, *Clinical Biomechanics*, 19(2), 145-152.
9. Bruening, D. A., Frimenko, R. E., Goodyear, C. D., Bowden, D. R., Fullenkamp, A. M., (2015), Sex differences in whole body gait kinematics at preferred speeds, *Gait & Posture*, 41(2), 540-545.
10. Choi, E. B., Jeon, H. M., Heo, J. H., Eom, G. M., (2019), Comparison of ankle joint load in different foot strike strategies during stair ascent, *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 19(07), 1940043.
11. Jeon, H.-M., Choi, E.-B., Heo, J.-H., Eom, G.-M., (2020), Influence of the initial foot contact strategy on knee joint moments during stair and ramp descent, *Scientific Reports*, 10(1), 13922.
12. Jeon, H.-M., Lee, K.-K., Lee, J.-Y., Shin, J.-H., Eom, G.-M., (2021), Energy absorption at lower limb joints in different foot contact strategies while descending stairs, *Technology and Health Care*, 29(S1), 433-440.
13. Chang, A. H., Moio, K. C., Chmiel, J. S., Eckstein, F., Guermazi, A., Prasad, P. V., Zhang, Y., Almagor, O., Belisle, L., Hayes, K., (2015), External knee adduction and flexion moments during gait and medial tibiofemoral disease progression in knee osteoarthritis, *Osteoarthritis and Cartilage*, 23(7), 1099-1106.
14. Lindsey, B., Eddo, O., Caswell, S. V., Prebble, M., Cortes, N., (2020), Reductions in peak knee abduction moment in three previously studied gait modification strategies, *The Knee*, 27(1), 102-110.
15. Go, E., Hong, S.-Y., Lee, K.-K., An, K.-O., (2013), Effect of active change of foot progression angle on lower extremity joint during gait, *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 23(1), 85-90.
16. Obreńska, P., Skubich, J., Piszczatowski, S., (2020), Gender differences in the knee joint loadings during gait, *Gait & Posture*, 79, 195-202.
17. Di Nardo, F., Mengarelli, A., Maranesi, E., Burattini, L., Fioretti, S., (2015), Gender differences in the myoelectric activity of lower limb muscles in young healthy subjects during walking, *Biomedical Signal Processing and Control*, 19, 14-22.
18. Law, N.-H., Li, J. X., Law, N.-Y., Varin, D., Lamontagne, M., (2021), Effects of body mass and sex on kinematics and kinetics of the lower extremity during stair ascent and descent in older adults, *Sports Medicine and Health Science*, 3(3), 165-170.
19. Farrag, A., (2016), Comparison of stair walking mechanics between adult males and females, *Bulletin of Faculty of Physical Therapy*, 21(2), 88-93.
20. Cartwright, A. M., (2007), The influence of Q-angle and gender on the stair-climbing kinetics and kinematics of the knee, B.Sc. Thesis, University of Waterloo.
21. Baldon, R. D. M., Lobato, D. F., Furlan, L., Serrão, F., (2013), Gender differences in lower limb kinematics during stair descent, *Journal of Applied Biomechanics*, 29(4), 413-420.
22. Hong, Y. N. G., Shin, C. S., (2015), Gender differences of sagittal knee and ankle biomechanics during stair-to-ground descent transition, *Clinical Biomechanics*, 30(10), 1210-1217.
23. Hong, Y. N. G., Lee, J., Kim, P., Shin, C. S., (2020), Gender differences in the activation and co-activation of lower extremity muscles during the stair-to-ground descent transition, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 1563-1570.
24. VICON Documentation, Kinetic modeling. <https://docs.vicon.com/display/Nexus212/Kinetic+modeling>
25. Song, Y. S., Ha, S., Hsu, H., Ting, L. H., Liu, C. K., (2017), Stair negotiation made easier using novel interactive energy-recycling assistive stairs, *PLOS ONE*, 12(7), e0179637.
26. Zhang, Y., Jordan, J. M., (2010), Epidemiology of osteoarthritis, *Clinics in Geriatric Medicine*, 26(3), 355-369.
27. Hadjidakis, D. J., Kokkinakis, E. P., Sfakianakis, M. E., Raptis, S. A., (2003), Bone density patterns after normal and premature menopause, *Maturitas*, 44(4), 279-286.
28. Creaby, M., (2015), It's not all about the knee adduction moment: The role of the knee flexion moment in medial knee joint loading, *Osteoarthritis and Cartilage*, 23(7), 1038-1040.



**Hyeon-Soo Shin**

M.Sc. candidate in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interest is biomechanics in osteoarthritis.

E-mail: gustntls98@naver.com

**Jun-Young Lee**

M.Sc. in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interest is sports rehabilitation.

E-mail: dlwnsdud116@naver.com

**Min-Jae Kim**

M.Sc. candidate in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interest is biomechanics in osteoarthritis.

E-mail: piedrotlino@naver.com

**Gwang-Moon Eom**

Professor in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interests include rehabilitation of elderly and biomechanics.

E-mail: gmeom@kku.ac.kr



# 다구치 방법과 그레이 관계분석을 이용한 전기화학 수소압축기 엔드플레이트의 구조분석 및 최적화

## Structural Analysis and Optimization of Electrochemical Hydrogen Compressor End Plate Using Taguchi Method and Gray Relational Analysis

서상덕<sup>1</sup>, 권원태<sup>2,#</sup>  
Sang Duk Seo<sup>1</sup>, and Won Tae Kwon<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과 (Department of Mechanical and Information Engineering, Graduate School, University of Seoul)

<sup>2</sup> 서울시립대학교 기계정보공학과 (Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul)

# Corresponding Author / E-mail: [kwon@uos.ac.kr](mailto:kwon@uos.ac.kr), TEL: +82-2-6490-2386

ORCID: 0000-0002-9604-3202

KEYWORDS: Electrochemical hydrogen compressor (전기 화학적 수소압축기), Grey relational analysis (그레이 관계분석), Taguchi method (다구치 방법), Finite elements method structural analysis (FEM 구조해석), Clamping pressure (체결력)

*The Electrochemical Hydrogen Compressor is an optimal device for compressing low-pressure hydrogen to high-pressure hydrogen. It has a similar structure to the Proton Exchange Membrane Fuel Cell but operates at extremely high pressures, requiring multiple cells sealed with End Plates. The End Plate design must provide initial cell activation support, withstand maximum operating pressure within the stack, and prevent internal gas leakage. This study applies a multi-objective optimization method and grey relation analysis to determine the optimal design parameters for the End Plate based on the activation area of Dummy Cells. Finite Element Method (FEM) analysis is conducted to verify the effectiveness of the optimized End Plate design, considering the uniform pressure distribution with stacked Dummy Cells (1, 3, 6, 12). The analysis reveals that the parameters affecting the uniform pressure distribution include the End Plate design, stack sealing pressure, individual Cell design parameters, and the number of Cell stack layers.*

Manuscript received: August 4, 2023 / Revised: September 11, 2023 / Accepted: October 5, 2023

### NOMENCLATURE

$\eta$  = S/N Ratio

### 1. 서론

최근 에너지 소모, 압축 방법, 수소오염 등의 단점이 있는 기계적 압축에 대한 대안으로 비기계적 압축 방식 중 전기화학적 수소압축기가 주목을 받고 있다[1]. 전기화학적 수소압축기는 전기화학적 원리를 이용하여 수소를 압축하는데, 낮은 전력 소

비와 열 손실, 높은 효율, 고순도 압축 등의 장점이 있다[2]. 전기화학적 수소압축기의 높은 출력과 내구성 향상을 위해 엔드플레이트에 대한 정확한 디자인의 최적화 연구가 필요하다. Jo et al.은 유한요소분석(FEA)을 사용하여 물 전기분해(PEMWE) 스택에서의 엔드 플레이트의 두께가 성능에 미치는 영향을 평가하고 최적화하였다[3]. 그들은 엔드 플레이트의 두께에 따라 PEMWE 스택의 성능의 영향을 분석하였다. Choi et al. 연료전지 스택의 엔드플레이트에 대한 토폴로지 최적화에 대해 연구하였다. 토폴로지 최적화로 얻은 설계 값을 제작성을 고려한 설계로의 전환 시 유의점들을 미리 파악하고 유한요소분석(FEA)을 적용하여 최적설계를 수행하였다[4]. Chung et al.은 양성자 교환

막 연료전지(PEMFE) 스택의 기계적 설계 및 분석에 대한 방법론을 제시하였다. 이를 위해 PEMFC 스택의 기계적 반응을 설계, 분석 및 개선하는 방법을 연구했다[5]. Yu et al.은 엔드플레이트의 경량화와 더 나은 열특성을 갖도록 설계하기 위해 공리적 설계방법과 유한요소해석을 사용하여 탄소섬유강화 복합재질로 된 외부판과 열 절연폼이 내재된 샌드위치 구조의 엔드플레이트에 대한 연구 수행하였다[6]. Zhou et al.은 양성자 교환막 연료전지(PEMFC)의 기계적 상태를 예측하기 위한 복합모델과 재료 특성 평가를 기반으로 유한요소모델(FEM)을 사용하여 스택 시스템을 모델링했다. 유한요소모델의 정확성을 검증하기 위해 스탬프 처리된 분리판(Bipolar Plate)을 사용한 실험을 수행하였다[7]. Yoon et al.은 스택 조립과정 시 발생하는 조립오차에 대해 스택의 안전성 확보와 성능향상을 위해 다구치 방법을 이용해서 양성자 교환막 연료전지(PEMFC)의 가스켓(Gasket)의 강건설계를 수행하여 구조적 신뢰성을 확인하였다[8]. Caponetto et al.은 압축 압력이 700 Bar로 작동하는 전기화학 수소 압축기의 엔드플레이트의 모양과 두께를 유한요소법(FEM) 분석을 사용하여 최적화하였다[9]. Kim et al.은 유한요소 방법(FEM)과 DOE를 활용하여 스택의 성능에 영향을 주는 기체 확산층의 압력 분포에 대한 설계 매개변수의 영향을 분석하고 최적화를 수행하였다[10]. 지금까지 엔드플레이트에 대한 연구들은 주로 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 적용되는 엔드플레이트의 디자인 및 성능향상을 위한 최적화 연구들이 진행되었다. 따라서 전기화학 수소 압축기의 엔드플레이트 경우 구조적으로 더 높은 작동압력으로 확장해서 설계되고 검증되어야 한다. 하지만 전기화학 수소 압축기의 엔드플레이트에 대한 디자인과 구성품들에 대한 구조적 검증 연구는 거의 수행되지 않았다.

이 연구에서는 고압 작동 조건에서 전기화학 수소 압축기 스택의 성능과 내구성을 극대화하기 위해 스택 구성품 중 엔드플레이트의 개념적 설계 방법론을 제시하였다. 또한 다구치-그레이 관계분석을 이용하여 엔드플레이트 파라미터 최적화를 시행하였다. 최적화된 엔드플레이트가 전기화학 수소 압축기의 스택의 성능과 내구성에 미치는 영향을 검토하기 위해 Dummy Cell을 적용하여 구조분석을 통해 전기화학 수소 압축기의 스택 내부의 구성품(분리판, 기체확산층) 사이에 분포되는 접촉압력의 균일도 경향을 분석하였다.

## 2. 전기 화학적 수소압축기 엔드플레이트 구조 최적화

### 2.1 전기 화학적 수소압축기

전기화학 수소 압축기(EHC)는 고분자 전해질 연료전지(PEM-FC)와 동일한 구조를 가지고 있다[11]. 양쪽에 전해질로 작용하는 막이 두 개의 촉매가 함유된 전극 사이에 위치해 있으며, 양극(Anode)에서 수소가 산화되고 음극(Cathode)에서는 전원 공급에 의해 환원된다. 이러한 방식으로, 수소가 저압 양극 구획(Fig. 1, Left)에서 고압(높은 압력) 음극 구획(Fig. 1, Right)

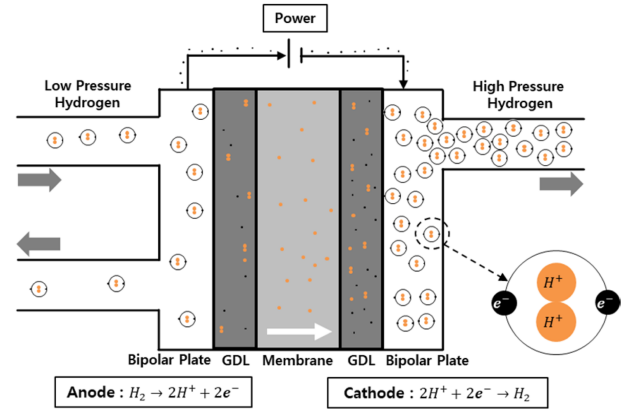


Fig. 1 How an electrochemical hydrogen compressor works

으로 이동하게 된다[12].

### 2.2 엔드플레이트의 최적화 방안

엔드플레이트 설계를 위해 단위 Cell 활성화면적은 28.26 cm<sup>2</sup>, 압축과정 중 스택 내부에서 발생하는 최대 압력 300 Bar로 결정하였다. 이를 만족하면서 가장 무게가 적게 나가면서도 변형은 최소, 그리고 최소의 응력을 받는 엔드플레이트를 설계하는 것이 이 연구의 목적이다. 이는 운반이 용이하면서도 변형에 의한 수소가스 누출이 없는 수소압축기를 설계하기 위함이다.

$$\begin{aligned} \text{Constraints: Cell Activation Area} &= 28.26 \text{ cm}^2, \\ \text{Cell Maximum Pressure} &= 300 \text{ Bar} \\ \text{Minimize: Weight, Stress, Stress} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 압축기의 무게 최소화화 변형 최소화화는 서로 모순된다. 무게를 최소화하면 변형이 커지고, 변형 최소화화를 위해서는 무게를 가능한 한 크게 해야 하기 때문이다. 서로 모순되는 두개의 목적을 달성하기 위해서 다구치-그레이 관계분석의 합성방법을 이용하였다[13]. 즉 먼저 다구치 방법으로 무게 최적화와 변형과 응력 최소화화를 각각 실시하고 각각의 목적함수에 가중치를 설정하여 그때의 파라미터를 결정하는 방법을 이용하였다. 여기서 응력은 엔드플레이트에 작용하는 최대 Von Mises 응력을 채택하였다.

### 2.3 다구치방법을 이용한 엔드플레이트 구조 최적화

#### 2.3.1 설계인자 및 설계조건 결정

먼저 다구치 방법을 적용하여 전기 화학적 수소 압축기(Electrochemical Hydrogen Compressor)의 엔드플레이트 설계 및 유효성 평가를 수행하였다. 엔드플레이트의 형상 설계 인자는 Fig. 2에서 명시한 각 설계인자들을 선택하였다. 또한, 전기 화학적 수소압축기 작동 시 주변 환경 (온도, 습도)과 스택 조립 시 발생하는 유격과 같은 제어 불가능한 인자도 고려되었다. 엔드플레이트 초기 설계를 위해 제공된 정보는 단위 Cell 활성화면적 28.26 cm<sup>2</sup> 과 압축과정 중 스택 내부에서 발생하는 최대 압력 300 Bar이다. 제공된 초기 설계 값을 기반으로 엔드플레이트와 관련된 설계 파라미터와 범위를 Table 1과 같이 선정하였다. 엔드플레이트

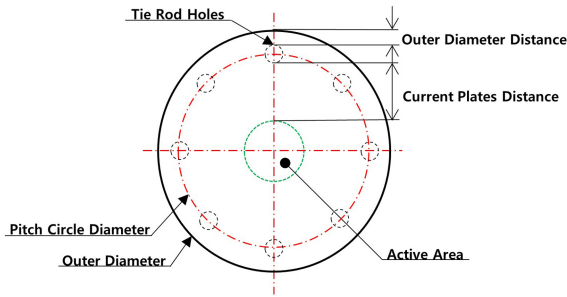


Fig. 2 Definition of design parameters for end plate

Table 1 End plate design parameter table

Control factors	Unit	Level of parameters		
		1	2	3
Number of tie rods (A)	EA	8	14	20
CP distance (B)	mm	10	20	30
OD distance (C)	mm	10	15	20
Thickness (D)	mm	75	100	125
Clamping force (E)	MPa	30	35	40

모양은 Caponetto et al.가 최적의 형상임을 증명한 원형으로 선정하였다[7]. 엔드플레이트의 안전성을 유지하고 스택 내부 압력을 지탱하는 Tie Rod의 Size와 개수는 스택 내부의 압력(300 Bar)을 버틸 수 있도록 안전률까지 고려하여 결정하였다. 이 연구에서 Tie Rod Nominal Size가 M16, 개수 8개를 수준 1로, Tie Rod Nominal Size를 M12, Tie Rod개수 14개를 2 수준으로, Tie Rod Nominal Size M10, 개수 20개를 3 수준으로 선정하였다. 부적절한 Tie rod Size와 개수는 시스템의 안정성 문제를 초래할 수 있다. 엔드플레이트의 외경, 활성화 면적 최대활용 및 Tie Rods 배치에 영향을 주는 항목인 Current Plate Distance, Outer Diameter Distance는 활성화면적을 고려하여 Current Plate Distance, Outer Diameter Distance가 최소치인 경우에도 Tie Rod 간의 배치배열을 이룰 수 있도록 각각의 수준을 결정하였다. 엔드플레이트 구조강도와 무게에 영향을 주는 항목인 엔드플레이트의 두께는 임의로 75 mm를 1수준으로 하였고 25 mm씩 늘어나도록 각각의 수준을 결정하였다. 엔드플레이트의 봉인 및 압축과정에서 필요한 압력 제어에 영향을 주는 항목인 Clamping Pressure도 제시된 값이 없기 때문에 스택 내부에서 발생하는 압력을 같은 값을 1수준으로 하였고 5 MPa씩 늘어나도록 각각의 수준을 결정하였다.

결과적으로 5개의 3수준 설계인자가 결정되었다. 직교배열표는 설계 파라미터 사이의 교호작용을 고려하지 않고, 주 효과만을 고려하여 L18로 결정한 후, 각 경우에 대하여 유한요소법(FEM) 시뮬레이션을 수행하였다. FEM 해석을 위하여 ANSYS Design Modeler (ANSYS Workbench 18.2.2)을 이용하여 18가지 Case의 모델링 데이터를 생성하였다. 격자(Mesh)는 단일 엔드플레이트 형상이 단순하므로 Mechanical Auto-Mesh를 적용하여 생성하였고, 격자(Mesh)의 요소 편차를 줄이기 위해 격자

Table 2 Mechanical properties of stainless steel 316L

Tensile strength, yield [MPa]	205
Tensile strength, ultimate [MPa]	515
Density	8,000
Young's modulus [GPa]	193
Poisson ratio	0.27

(Mesh) 밀도를 +100으로 설정하였다. 엔드플레이트의 재료로 수소에 대한 내식성이 우수한 Stainless 316L을 선택하였고 그 물성치가 Table 2에 주어졌다. 체결 압력은 엔드플레이트의 바닥면 모서리에 Remote Fixed 조건으로 고정시켰다. 스택 내부에서 발생하는 내압은 Current Plate를 통해 엔드플레이트로 전달되는 형태로 모사하였다. Current Plate 작동 압력은 Cell의 최대압력인 300 Bar (30 MPa)를 적용하였다.

### 2.3.2 시뮬레이션 결과 및 데이터 분석

각 목적 함수에 대한 시뮬레이션 조건과 해석결과, 그리고 식 (2)로 계산한 S/N비를 Table 3에 표시하였다.

$$\eta = -10 \log_{10} y^2 \quad (2)$$

### 2.3.3 S/N비의 분산분석(ANOVA)

Table 4에 최소 총 변형 결과에 대한 분산 분석이 보여졌다. 여기서 변형에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 F 값이 가장 큰 Clamping Force임을 알 수 있다. 응력 최소화에는 두께가 가장 중요함이 Table 5에 보여졌는데 이는 엔드플레이트의 두께가 증가할수록 응력 값이 낮아질 것이라는 직관과 일치한다. 무게 최소화 분산분석이 주어진 Table 6에서 엔드플레이트의 두께가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 여기서 체결력은 엔드플레이트의 무게에 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

### 2.3.4 최적조건 결정

Fig. 3에서 각 목적 함수에 대한 설계 파라미터의 수준별 S/N비를 그래프로 보여졌다. 여기서 얻어진 엔드플레이트의 Total Deformation, Equivalent Stress, 그리고 Weight의 최적조건이 Table 7에 보여졌는데 목적함수에 따라 최적조건이 다르다. 이를 극복하기 위해 그레이 관계분석이 이용되었다.

## 2.4 그레이 관계 분석

2.3절에서는 최소 Total Deformation, 최소 Equivalent Stress, 최소 Weight를 만족시키기 위한 엔드플레이트의 최적 설계 파라미터를 독립적으로 분석하고 결정했다. 그러나 각 목적 함수의 최적화 조건이 상이하므로 그레이 관계 분석(Gray Relational Analysis)을 이용하여 다목적 함수의 최적 조건을 동시에 충족시키도록 시도하였다[13]. 이때 각 목적함수에 동일한 가중치 1/3씩을 할당하여 그레이 관계등급을 구하였다(Table 8).

Table 8에서 계산된 그레이 상관관계 등급을 이용하여 분산

Table 3 End plate simulation results for deformation, stress, weight

Case	Parameter					Response					
	A	B	C	D	E	Deformation [mm]	Stress [MPa]	Weight [Kg]	S/N ratio deformation	S/N ratio stress	S/N ratio weight
1	8	10	10	75	30	0.00565	120.13	17.92	44.96	-41.59	-25.07
2	8	20	15	100	35	0.00624	102.78	31.81	44.10	-40.24	-30.05
3	8	30	20	125	40	0.00701	90.96	55.16	43.09	-39.18	-34.83
4	14	10	10	100	35	0.00634	103.64	21.97	43.95	-40.31	-26.84
5	14	20	15	125	40	0.00733	88.59	36.98	42.69	-38.95	-31.36
6	14	30	20	75	30	0.00742	105.41	31.13	42.59	-40.46	-29.86
7	20	10	15	75	40	0.00798	117.30	17.37	41.96	-41.39	-24.80
8	20	20	20	100	30	0.00593	94.42	33.82	44.54	-39.50	-30.58
9	20	30	10	125	35	0.00789	88.36	38.71	42.05	-38.93	-31.76
10	8	10	20	125	35	0.00546	93.07	39.76	45.25	-39.38	-31.99
11	8	20	10	75	40	0.00889	116.13	21.78	41.02	-41.30	-26.76
12	8	30	15	100	30	0.00591	106.14	37.72	44.56	-40.52	-31.53
13	14	10	15	125	30	0.00524	99.12	30.48	45.61	-39.92	-29.68
14	14	20	20	75	35	0.00729	107.93	26.47	42.74	-40.66	-28.45
15	14	30	10	100	40	0.00859	97.44	32.38	41.32	-39.77	-30.20
16	20	10	20	100	40	0.00759	87.80	28.24	42.40	-38.87	-29.02
17	20	20	15	125	30	0.00651	95.90	32.05	43.73	-39.64	-30.12
18	20	30	10	75	35	0.00976	111.36	25.36	40.21	-40.93	-28.08

Table 4 ANOVA Table of minimum deformation

Control factors	DOF	Sum of squares	Mean square	F value
Number of tie rods (A)	2	5.448	2.724	2.001
CP distance (B)	2	8.841	4.421	3.247
OD distance (C)	2	1.077†	0.538	
Thickness (D)	2	7.589	3.795	2.787
Clamping pressure (E)	2	15.290	7.645	5.616
Error	(2)	(1.646)	0.823	
Total	17	39.891	19.945	

Table 5 ANOVA Table of minimum equivalent stress

Control factors	DOF	Sum of squares	Mean square	F value
Number of tie rods (A)	2	0.771	0.386	0.804
CP distance (B)	2	0.246†	0.123	
OD distance (C)	2	1.534	0.767	1.599
Thickness (D)	2	9.344	4.672	9.741
Clamping pressure (E)	2	0.395	0.198	0.412
Error	(2)	(0.714)	0.178	
Total	17	13.003	6.323	

분석을 수행한 후, 그 결과를 Table 9에 정리하였다. 각 목적 함수에 각각 0.33의 가중치를 주고 분석했을 때, CP Distance가

Table 6 ANOVA Table of minimum weight

Control factors	DOF	Sum of squares	Mean square	F value
Number of tie rods (A)	2	2.967	1.484	28.598
CP distance (B)	2	29.738	14.869	286.626
OD distance (C)	2	16.879	8.439	162.682
Thickness (D)	2	59.814	29.907	576.510
Clamping pressure (E)	2	0.009†	0.005	
Error	(2)	(0.094)	0.047	
Total	17	109.502	54.751	

첫번째, 엔드플레이트의 두께가 두번째 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. 다른 설계 파라미터들은 큰 영향을 주지 않아 오차로 처리하였다. 그레이 상관분석으로 결정한 파라미터와 각 목적 함수 별 최적 조건 파라미터에 대한 시뮬레이션 결과가 Table 10에 제시되었다. 그레이 상관분석으로 얻어진 결과는 3가지 최적 조건 결과의 중간값을 가짐을 알 수 있다.

### 3. Dummy Cell 적층 FEM 시뮬레이션

#### 3.1 전기 화학적 수소압축기 스택 모델

최적화된 엔드플레이트에 안전성 및 성능을 평가하기 위해

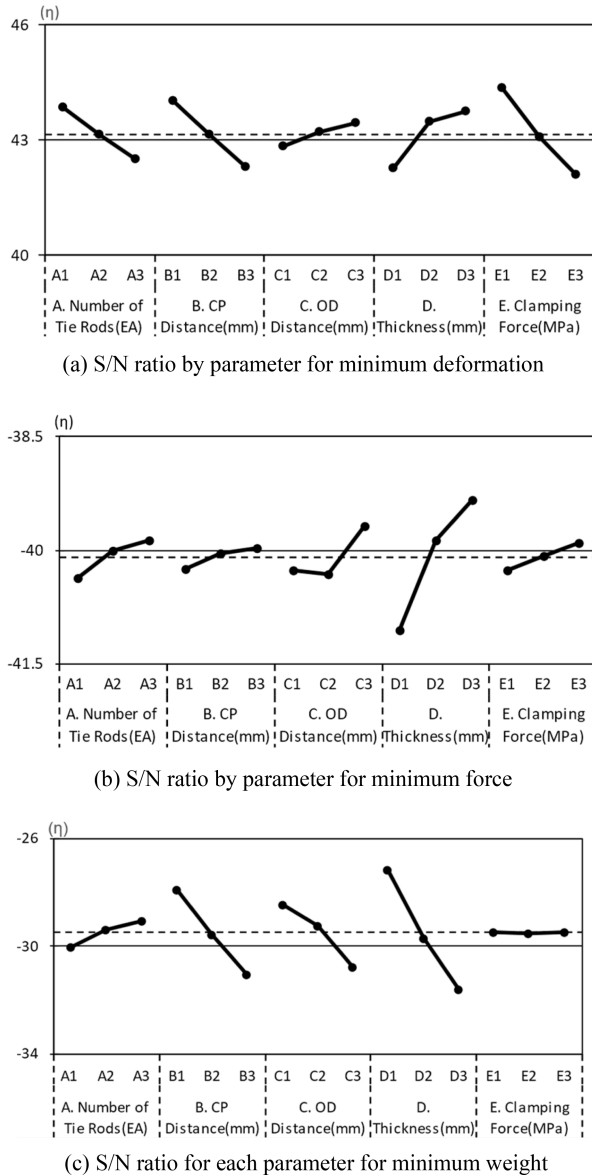


Fig. 3 Parameter mean response graph by objective function

Table 7 Optimization conditions and simulation results for each objective function

Optimization criteria	Optimal combination	Total deformation [mm]	Equivalent stress [MPa]	Weight [Kg]
Total deformation	A1B1C3D3E1	0.004622	96.61	39.76
Equivalent stress	A3B3C3D3E3	0.008199	82.96	49.88
Weight	A3B1C1D1E1	0.006236	119.76	15.61

스택 내부에 전달되는 셀 접촉압력분포와 압력의 균일 여부를 분석하고 및 평가하였다. 이를 위해 12개의 Dummy Cell을 적용한 스택 시뮬레이션을 실시하였다.

### 3.1.1 유한요소해석 구조 모델링

전기 화학적 수소압축기 스택은 엔드플레이트, Bipolar Plate, Gasket, GDL, 그리고 MEA로 구성되어 있다. 본 연구에서는 모델의 간소화를 위해 Tie Rod와 Nut는 고려하지 않았다. 스택 시뮬레이션을 위해 제공된 활성화 면적(28.26 cm<sup>2</sup>), 작동압력(300 Bar)을 기준으로 설계된 단일 Dummy Cell 구성 요소의 치수와 기계적 특성이 Table 11에 자세히 기술되었다

### 3.1.2 경계조건 및 하중조건

본 모델에서 가스확산층(GDL)과 엔드플레이트 사이, Current Plate와 Bipolar Plate 사이, 가스확산층(GDL)과 Bipolar Plate 사이, 그리고 Gasket과 Bipolar Plate 접촉조건을 ‘Bonded’로 구성하였다. 또한 엔드플레이트의 모서리를 X, Y, Z, X0, Y0, Z0의 자유도는 0으로 가정하여 움직임을 구속하였다. Clamping Pressure는 엔드플레이트에 있는 와셔의 투영된 엔드플레이트 표면에 작용하는 것으로 모델링하였다.

### 3.1.3 적절 체결력

본 연구에서는 GDL의 최대 효율을 도출하기 위해 Dummy Bipolar Plate와 Dummy GDL의 접촉압력을 1.0 MPa로 설정하였다[14]. 또한, 스택 내부 압력 누수 방지를 위해 GDL에 적정 접촉압력을 가정하였다. 이를 위해 식(3)을 사용하여 스택 내부에서 발생하는 300 Bar (30 MPa)의 압력을 엔드플레이트에 있는 와셔의 단면적으로 나누어 힘 평형 체결압력과 적정 체결압력을 계산하여 적정 체결압력을 65.5 MPa로 도출하였다. 이를 통해 GDL에 적절한 압력을 적용하여 최적의 연료전지 성능을 도출하기 위한 설계 기준을 제시하였다.

$$P_{internal} = \frac{F_{Clamping\ Force}}{A_{Washer\ Area}} \quad (3)$$

## 3.2 FEM 시뮬레이션 결과 및 토론

스택 내부에 전달되는 평균 접촉압력을 평가하기 위해 Dummy GDL의 위치별로 24개의 Sampling Data를 취득하고 이를 기반으로 평균 접촉압력을 계산하였다. Fig. 4는 힘-평형 방정식과 적정 체결압력을 이용하여 얻은 결과이다. 힘-평형 방정식으로 시뮬레이션한 결과, 스택 중심에서는 평균 접촉압력이 거의 0이었지만, 엔드플레이트에 가까워질수록 평균 접촉압력이 증가하는 경향을 보였다. 반면, 적정 체결압력으로 시뮬레이션한 결과 평균 접촉압력이 목표 평균 접촉압력인 1.0 MPa에 근접하였고, 엔드플레이트에 가까워질수록 평균 접촉압력이 증가하였다.

### 3.2.1 체결압력 파라미터 분석

이 절에서는 Dummy GDL의 체결압력 변화에 따른 평균 접촉압력의 변화를 연구하였다. 체결압력을 20 MPa부터 5 MPa 단위로 증가시키면서 95 MPa까지 시뮬레이션을 수행한 결과, Fig. 5(a)에서



Table 8 Gray correlation coefficient and gray correlation rating for analysis results

Case	Normalized S/N ratio			Grey relational coefficient			Grey relational grade
	Total deformation	Equivalent stress	Weight	Total deformation	Equivalent stress	Weight	
1	0.910	0.000	0.986	0.847	0.333	0.972	0.646
2	0.779	0.537	0.618	0.694	0.519	0.567	0.534
3	0.609	0.902	0.000	0.561	0.836	0.333	0.519
4	0.756	0.510	0.878	0.672	0.505	0.804	0.594
5	0.537	0.975	0.481	0.519	0.953	0.491	0.589
6	0.517	0.455	0.636	0.509	0.479	0.579	0.470
7	0.394	0.088	1.000	0.452	0.354	1.000	0.542
8	0.848	0.795	0.565	0.767	0.709	0.535	0.603
9	0.413	0.983	0.435	0.460	0.966	0.470	0.569
10	0.951	0.837	0.407	0.911	0.754	0.458	0.637
11	0.192	0.124	0.883	0.382	0.363	0.811	0.467
12	0.852	0.433	0.462	0.771	0.468	0.482	0.516
13	1.000	0.650	0.653	1.000	0.588	0.590	0.654
14	0.546	0.377	0.759	0.524	0.445	0.675	0.493
15	0.257	0.702	0.603	0.402	0.626	0.557	0.476
16	0.480	1.000	0.712	0.490	1.000	0.635	0.638
17	0.719	0.750	0.612	0.640	0.666	0.563	0.561
18	0.000	0.271	0.788	0.333	0.407	0.703	0.433

Table 9 Analysis of variance table of gray relational ranks

Control factors	DOF	Sum of squares	Mean square	F value
Number of tie rods (A)	2	0.0004†	0.0002	
CP distance (B)	2	0.0451	0.0226	0.2713
PCD distance (C)	2	0.0007†	0.0004	
Thickness (D)	2	0.0196	0.0098	0.1177
Clamping force (E)	2	0.0047	0.0024	
Error	(6)	(0.4816)	0.0803	
Total	17	0.5522	0.1041	

Table 10 Optimization conditions and simulation results for each objective function

Optimization criteria	Optimal combination	Total deformation [mm]	Equivalent stress [MPa]	Weight [Kg]
Total deformation	A1B1C3D3E1	0.004622	96.61	39.76
Equivalent stress	A3B3C3D3E3	0.008199	82.96	49.88
Weight	A3B1C1D1E1	0.006236	119.76	15.61
GRA	A3B1C3D3E1	0.005862	92.322	35.30

보듯이 체결압력이 65-70 MPa 구간까지 평균 접촉압력이 목표로 한 1 MPa에 가까워지다가 다시 증가하였다. 목표값에 근접한

Table 11 Dimensions and mechanical properties of cell components

Component	Material	Young's modulus [GPa]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Poisson ratio	Diameter, area [cm <sup>2</sup> ]	Thickness [mm]
End plate	SUS 316L	193	8,000	0.25	Optimal Design	
Bipolar plate	Graphite	10	1,800	0.3	113.09	5.0T
GDL	Carbon cloth	10	400	0.25	28.27	0.3T
MEA	Nafion® 117	0.249	2,000	0.25	113.09	0.05T
Gasket	Silicone rubber	0.05	2,300	0.3	66.76	0.5
	PTFE	0.5	2,200	0.46	113.09	1.0T
Current plate	Copper	120	8,960	0.34	113.09	7.0T
Tie rods	SUS 304	190	8,000	0.27		

체결압력구간에 대해 체결압력을 1 MPa 단위로 증가시키면서 시뮬레이션을 수행한 결과, Fig. 5(b)에서 보듯이 체결압력이 68 MPa를 기점으로 두 구간에서 목표로 한 평균접촉압력, 1 MPa에 근접하였다. 두 체결압 중 낮은값을 결정해야 Middle Position GDL과 End Position GDL의 평균접촉압력 차가 낮아 스택내부에 좀 더 균일한 접촉압력이 전달됨을 알 수 있었다.



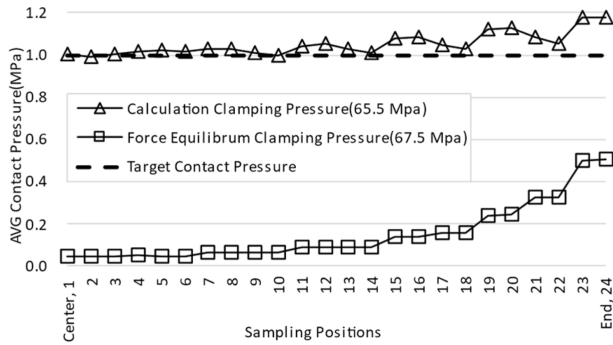
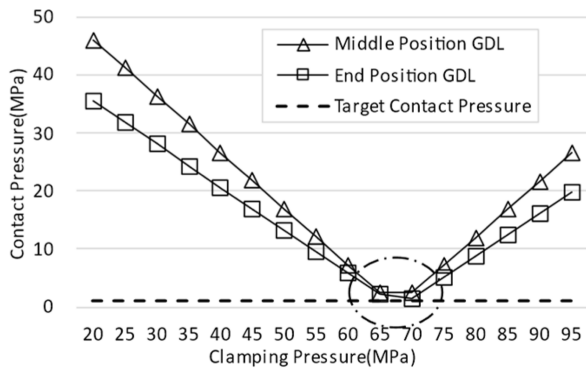
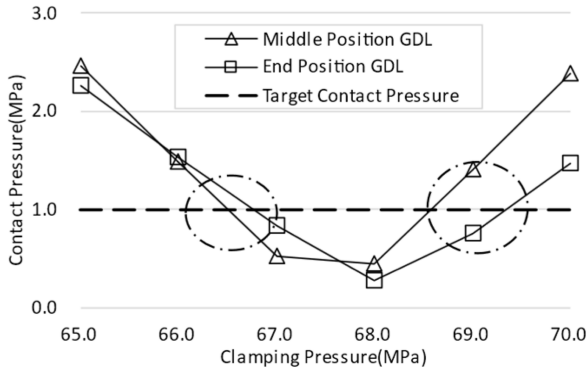


Fig. 4 Dummy stack configuration schematic



(a) Clamping pressure 20 MPa to 95 MPa (Each 5.0 MPa)



(b) Clamping pressure 65 MPa to 70 MPa (Each 1.0 MPa)

Fig. 5 Average contact pressure according to clamping pressure conditions

## 4. 접촉압력 최적화

### 4.1 Dummy Single Cell 디자인 파라미터 최적화

#### 4.1.1 Dummy Single Cell 디자인 파라미터 설정

셀 내부 구성품의 균일 압력분포를 위해 단일 셀 최적화 연구를 수행하였다. 단일 셀은 분리판(Bipolar Plate), 가스확산층(GDL), 가스켓(Gasket), 그리고 막 전극 집합체(MEA)로 구성되어 있다. 단일 셀의 최적화를 위해 각 구성품의 초기 디자인값은 Table 11에 제시되었고 다양한 디자인 변수의 범위는 Table 12에 제시하였다.

Table 12 Single cell design parameters and levels

	Parameter definition	Parameter range
Inner gap	Gasket side to bipolar plate inner side & GDL side gap	0.25-5.25 mm (Each 2.5 mm)
Outer gap	Gasket side to bipolar plate outer side	0-7.5 mm (Each 2.5 mm)
Bipolar plate thickness	Thickness	5-12.5 mm (Each 2.5 mm)

#### 4.1.2 경계조건 및 하중 조건

경계조건으로 단일 셀의 상부와 하부 Bipolar Plate 모서리를 X, Y, Z 방향 및 X0, Y0, Z0 각도로 고정하였다. 단일 셀의 압착 상태를 시뮬레이션하기 위해 압축하중을 Bipolar Plate 외부 노출면에 적용하였다. 압축하중은 단일 셀에 1.5 MPa부터 6.0 MPa까지 1.5 MPa 간격으로 적용하여 목표 평균 접촉압력인 1.0 MPa에 도달할 수 있는 초기 체결압력을 도출하였다. 이를 통해 단일 셀 디자인 변수 최적화를 위한 2.5 MPa의 압축하중을 적용하였다.

#### 4.1.3 스택 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션 결과가 Fig. 6에 보여졌다. Figs. 6(a), 6(b)에서는 Gasket과 구성품 간의 Gap 수준에 따라 특정 값에서 균일한 접촉압력이 발생하는 것이 관찰되었다. 또한, Fig. 6(c)에서는 Bipolar Plate의 두께가 증가할수록 접촉압력의 균일도가 향상되고 GDL 중심 부근에서 발생하는 접촉압력이 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로, 균일한 접촉압력 전달을 위한 단일 Cell의 최적 디자인을 도출하였으며, 해당 결과는 Fig. 7에 제시되었다.

## 4.2 Dummy Single Cell 적층

이 절에서는 최적화된 Dummy 단일 셀을 적층 하여 접촉압력 분포와 균일도에 대한 영향을 조사하였다. 적층 된 Dummy 단일 셀 간의 접촉조건으로는 Frictional Coefficient를 0.3으로 적용하였다. Fig. 8는 단일 셀 적층 별 End GDL 위치의 접촉압력 분포를 보여줍니다. 단일 셀의 적층이 증가할수록 평균 접촉압력과 균일도가 향상되는 것을 확인되었다. Fig. 9은 단일 셀 적층별 Von-Mises Stress결과이다. 단일 셀이 6 Cell 이상 적층 되었을 때 스택의 중심, 양쪽 끝 부분에서 접촉압력이 안정화되는 것을 확인하였다. 따라서 안정화된 접촉압력을 얻기 위해서는 최소 6 Cell 이상의 셀을 적층해야 함을 알 수 있다.

## 4.3 스택 작동 상태 시뮬레이션

#### 4.3.1 경계조건 및 하중 조건

시뮬레이션을 통해 실제와 거동이 유사한 결과를 얻기 위해 Tie Rod와 Nut, 와셔 등을 추가로 모델링하여 스택 적층 해석을 수행하였다. 이 과정에서 기존의 고무 타입 Gasket 대신 내구성이

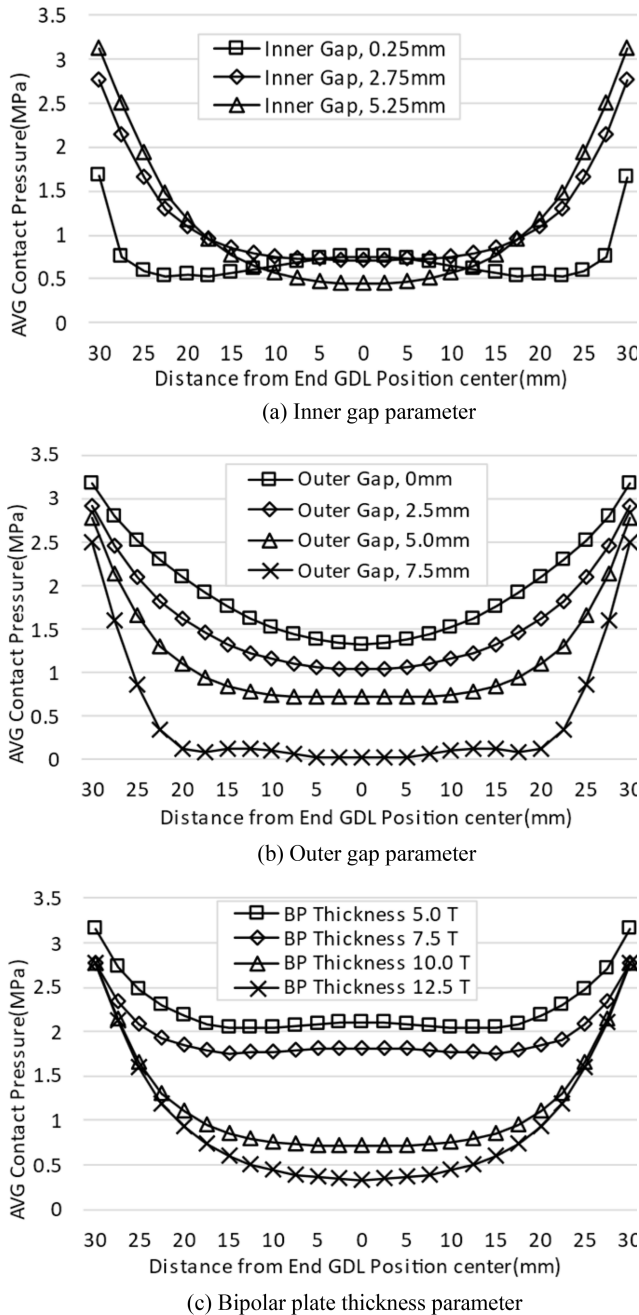


Fig. 6 GDL contact pressure distribution according to design parameters

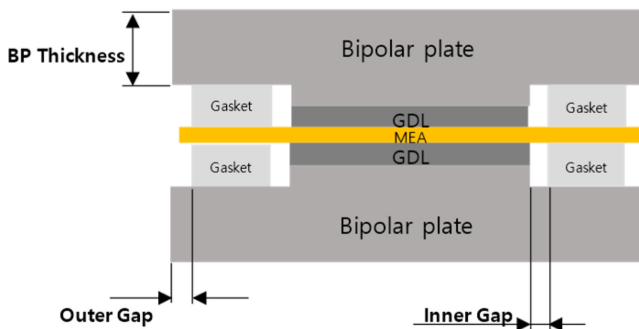


Fig. 7 Dummy single cell optimal design

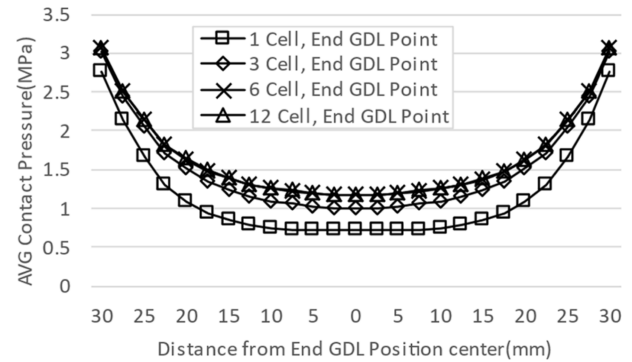


Fig. 8 Contact pressure distribution for each layer of dummy single cell

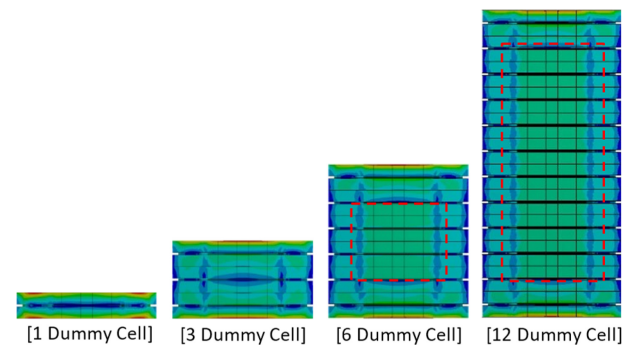


Fig. 9 Dummy cell stacked section (Von-Mises Stress)

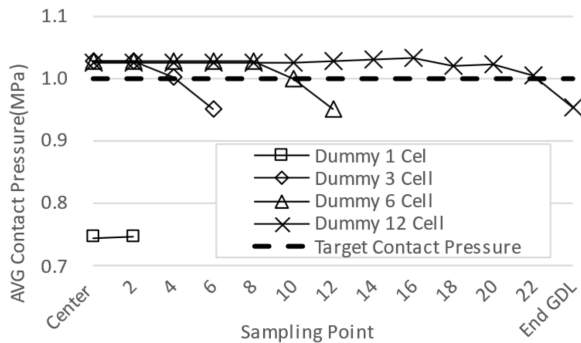
높은 PTFE 재질을 사용하여 높은 내압과 체결압력을 견딜 수 있도록 설계하였다. 구성품의 기계적 특성치는 Table 11에 보여졌다. 또한, 시뮬레이션의 수렴성 개선을 위해 엔드플레이트와 셀 구성품에는 Web Mesh 형태를, Tie Rod, Nut, 와셔에는 Hex Domination Mesh를 적용하였다. 각 구성품 간의 접촉 조건이 Table 13에 주어졌다.

#### 4.3.2 내압발생상태 시뮬레이션

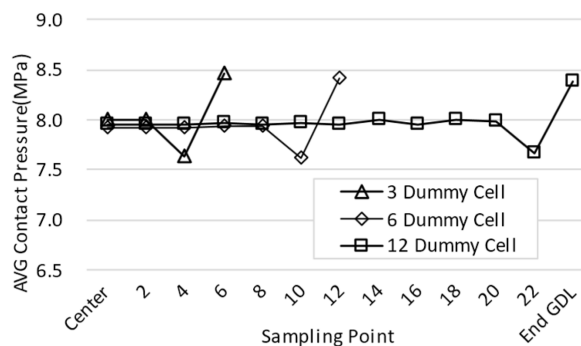
스택 내부의 운전조건에 따라 전달되는 평균접촉압력 분포와 균일도 분석을 위해 추가적인 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 초기 부하상태를 시뮬레이션하기 위해 Bolt-Pretension 조건을 적용하여 Tie Rod에 450 N의 하중을 적용하였다. 그 이후에는 스택이 작동하는 상황을 가정하여 설계상 최대 내부압력인 300 Bar에 도달하는 순서로 하중을 가하였다. Fig. 10(a)에서 초기 부하상태 때 Dummy 단일 셀을 적층한 경우 목표로 한 평균 접촉압력보다 낮은 분포를 보였지만, 3, 6, 12 Cell을 적층했을 때는 End Position을 제외한 위치에서 균일한 접촉압력 분포를 확인할 수 있었다. 스택의 초기 부하 상태에서 스택 작동에 따라 Cell 내부의 가스확산층(GDL)에 대한 평균 접촉압력 분포는 Fig. 10(b)에 보여졌다. 결과적으로, 초기 부하 상태보다 높은 평균 접촉압력이 발생했다. 그러나 End Position에 평균 접촉압력을 제외하면 초기 부하 상태와 유사한 평균 접촉압력 값이 다른 위치에서 균일한 형태로 발생하는 것을 확인하였다. 또한, End

Table 13 Dimensions and mechanical properties of single cell components

Contact point	Contact condition
Tie rod to end plate hole	N/A
Tie rod to nut hole	Bonded
Tie rod to washer hole	N/A
Nut to washer	Frictional (0.3)
Washer to end plate	Frictional (0.3)
End plate to current plate	Frictional (0.3)
Current plate to bipolar plate	Frictional (0.3)
Bipolar plate to bipolar plate	Frictional (0.3)
Bipolar plate to GDL	Frictional (0.4)
Bipolar plate to gasket	Frictional (0.8)
GDL to MEA (Cell)	Bonded
Gasket to MEA (Cell)	Bonded



(a) Pre-load condition



(b) Operating condition

Fig. 10 GDL average contact pressure distribution by location

Position에 접촉압력은 다른 위치에 있는 평균 접촉압력보다 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

이 연구에서는 전기화학적 수소 압축기의 작동 압력(300 Bar)에서 무게를 최소화하고, 변형과 응력을 최소화하면서 안전성과 성능을 최적화하는 엔드플레이트를 설계하기 위해 구조분

및 최적화를 수행하였다. 다구치 방법을 이용하여 Number of Tie Rods, CP Distance, OD Distance, Thickness, Clamping Force, 그리고 엔드플레이트의 설계 인자들이 변형, 응력, 무게에 미치는 영향을 분석하였다. 목적함수에 따라 변형, 응력, 무게에 각각 0.3의 가중치를 부여하여 다목적 최적화를 수행하였고, 그레이 상관 관계 분석법을 이용하여 최적수준을 구했다. 결과적으로, CP Distance가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 또한 엔드플레이트 두께도 영향을 주었다. 최적조건은 그레이 상관분석 결과의 중간값을 가짐을 확인하였다. 최적화된 엔드플레이트의 안전성과 성능을 평가하기 위해 스택 내부의 셀 접촉압력 분포와 균일성을 분석하였다. 12개의 더미 셀을 적층한 스택 시뮬레이션을 수행하였고, 힘 평형 방정식을 이용하여 셀 체결압력을 결정하여 시뮬레이션을 진행했다. 결과적으로, 최적의 평균 접촉압력이 1.0 MPa에 근접하였고, 셀 체결압력이 증가하면 Dummy GDL의 평균 접촉압력이 감소-증가하는 경향을 확인하였다. 더불어, 균일한 접촉 압력분포를 위해 단일 셀 구성품의 최적화 및 적층 시뮬레이션을 수행하였고, 6개 이상의 셀을 적층한 경우 스택 내부의 평균 접촉압력이 균일화되는 것을 확인하였다. 또한, 운전조건에 따라 초기 부하 상태와 유사한 평균 접촉압력을 얻을 수 있었다. 이러한 연구 결과는 수소 에너지 저장 시스템의 설계와 안정성 향상을 위한 유용한 정보를 제공하며, 다목적 최적화 문제에 그레이 상관 관계 분석법과 다구치 방법이 유용한 접근 방법임을 보여준다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었음.

## REFERENCES

1. Sdanghi, G, Maranzana, G, Celzard, A., Fierro, V., (2020), Towards non-mechanical hybrid hydrogen compression for decentralized hydrogen facilities, *Energies*, 13(12), 3145.
2. Zou, J., Han, N., Yan, J., Feng, Q., Wang, Y., Zhao, Z., Fan, J., Zeng, L., Li, H., Wang, H., (2020), Electrochemical compression technologies for high-pressure hydrogen: Current status, challenges and perspective, *Electrochemical Energy Reviews*, 3, 690-729.
3. Jo, M., Cho, H.-S., Na, Y., (2020), Comparative analysis of circular and square end plates for a highly pressurized proton exchange membrane water electrolysis stack, *Applied Sciences*, 10(18), 6315.
4. Choi, W.-S., Oh, S.-J., Kim, S.-J., Hong, B.-S., (2003), Topology optimization for end plate of fuel cell stack, *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*, 456-461.

5. Chung, T.-T., Lin, C.-T., Shiu, H.-R., (2016), Mechanical design and analysis of a proton exchange membrane fuel cell stack, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 39(3), 353-362.
6. Yu, H. N., Kim, S. S., Do Suh, J., (2010), Axiomatic design of the sandwich composite endplate for PEMFC in fuel cell vehicles, *Composite Structures*, 92(6), 1504-1511.
7. Caponetto, R., Privitera, E., Mirone, G., Matera, F., (2022), Structural analysis of electrochemical hydrogen compressor end-plates for high-pressure applications, *Energies*, 15(16), 5823.
8. Zhou, Z., Qiu, D., Zhai, S., Peng, L., Lai, X., (2020), Investigation of the assembly for high-power proton exchange membrane fuel cell stacks through an efficient equivalent model, *Applied Energy*, 277, 115532.
9. Yoon, J.-Y., Park, J.-S., (2008), Structural robust design of PEMFC gasket using taguchi method, *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 36(8), 740-746.
10. Kim, C., Sohn, Y., Park, G., Kim, M., Lee, J., Kim, C., Choi, Y., Cho, S., (2012), The stress distribution analysis of PEMFC GDL using FEM, *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 23(5), 468-475.
11. Bampaou, M., Panopoulos, K. D., Papadopoulos, A. I., Seferlis, P., Voutetakis, S., (2018), An electrochemical hydrogen compression model, *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1213-1218.
12. Grigoriev, S., Shtatniy, I., Millet, P., Porembsky, V., Fateev, V., (2011), Description and characterization of an electrochemical hydrogen compressor/concentrator based on solid polymer electrolyte technology, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(6), 4148-4155.
13. Jung, J. H., Kwon, W. T., (2010), Optimization of EDM process for multiple performance characteristics using Taguchi method and Grey relational analysis, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(5), 1083-1090.
14. Chen, R., Qin, Y., Du, Q., Peng, J., (2018), Effects of clamping force on the operating behavior of PEM fuel cell, *SAE Technical Paper*, 2018-01-1718.



#### **Sang Duk Seo**

He received his M.S in Mechanical Information Engineering from University of Seoul. He is currently an Engineer in Engineering Solution Group in INSTRON. He is involved in designing specialized solutions to meet the unique testing needs of a wide variety of materials and testing applications. E-mail: smliez1@uos.ac.kr



#### **Won Tae Kwon**

He received his B.S., M.S. degree from Seoul National University, and Ph.D. degree from Northwestern University in 1982, 1984 and 1992, respectively. Prof. Kwon is currently a Professor of the Department of Mechanical and Information Engineering of University of Seoul, Korea. His research fields include micro machining and machining process optimization. E-mail: kwon@uos.ac.kr

# 유리 기판 상 구리 패턴화 전극의 Mask-less 증착을 위한 레이저 유도 증착 공정 연구

## Laser-induced Deposition Method for Mask-less Copper Patterning on the Glass Substrate

이용훈<sup>1</sup>, 이황규<sup>1</sup>, 김동민<sup>2</sup>, 김태욱<sup>1,3,#</sup>, 김지수<sup>1,3,#</sup>  
Yonghoon Lee<sup>1</sup>, Hwanggyu Lee<sup>1</sup>, Dong Min Kim<sup>2</sup>, Taewook Kim<sup>1,3,#</sup>, and Jisoo Kim<sup>1,3,#</sup>

<sup>1</sup> 경북대학교 미래과학기술융합학과 (Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University)  
<sup>2</sup> 한국생산기술연구원 정밀기계공정제어연구그룹 (Precision Mechanical Process and Control R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)  
<sup>3</sup> 경북대학교 정밀기계공학과 (Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University)  
# Corresponding Authors / E-mail: kimtw@knu.ac.kr, TEL: +82-54-530-1277, ORCID: 0009-0003-1572-0473  
E-mail: js.kim@knu.ac.kr, TEL: +82-54-530-1279, ORCID: 0000-0001-9540-2800

KEYWORDS: Laser induced deposition (레이저 기반 증착 공정), Mask-less copper pattern (마스크 없는 구리 패턴), Laser induced plasma backward deposition (레이저 기반 플라스마 유도 역방향 증착)

*This study investigated the Laser-Induced Plasma Backward Deposition (LIPBD) process for transparent glass-copper composite film production. LIPBD was compared with Laser-Induced Backward Transfer (LIBT). Controlling laser parameters and the z-axis position of Depth of focus (DOF) resulted in various post-deposition outcomes. The optimal deposition depth was 10  $\mu\text{m}$  to 90  $\mu\text{m}$ , ensuring good glass-copper adhesion. Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) mapping confirmed copper and copper oxide (CuO) particles. X-ray diffraction confirmed Cu and CuO peaks. The adhesive test showed a strong binding between glass and deposition, but the parts of the cracks caused by heat accumulation were delaminated during the test. LIPBD offers controlled deposition potential for glass-copper composites. Optimizing laser parameters leads to high-quality films. This study provides valuable insights into nanotechnology and the semiconductor industry, with potential applications across diverse fields.*

Manuscript received: August 10, 2023 / Revised: September 5, 2023 / Accepted: September 12, 2023

### 1. 서론

유리는 높은 투명성, 전기저항성, 내식성과 더불어 낮은 유전 상수, 전기 손실을 가지기 때문에 다양한 응용 분야에 기판으로 사용되는 소재이다[1-3]. MEMS 센서, 반도체 패키징, 광학, 미세 유체, 에너지 저장/생성/운송 등 수많은 산업에서 필수적인 역할을 하는 유리는 평탄성, 투명성, 내열성, 내구성과 같은 독특한 특성들과 고온 작업 온도에서 낮은 변형률 등과 같은 여러 장점으로 인해 인쇄회로 기판(Printed Circuit Board, PCB) 분야에서 많은 관심을 받고 있다[4,5]. Glass PCB (Printed Circuit Board)라고도 불리는 이 기술은 태양광 발전장치, 투명 LED,

디스플레이, 광전자 및 신재생 에너지 등 여러 산업에서 널리 적용된다[2,5,6].

그러나, Glass PCB의 필수 공정인 금속화(Metallization) 공정에는 여러 어려움이 있다. 먼저, 유리 기판에 구리를 금속화하기 위해서는 여러 복잡한 전처리 과정을 거친다[3,7,8]. 현재 산업에서 유리 기판 위 구리를 금속화하는 공정들은 전해도금 및 무전해 도금으로, 금속화 과정 전 습윤, 감광, 광산화, 활성화와 같은 패턴 마스크를 이용한 복잡한 전처리 공정들이 필요하다. 다음으로, 유리 기판은 금속화된 구리와 밀착력이 낮다[8]. 앞서 설명한 이러한 복잡한 금속화 전처리 공정에도 불구하고, 유리 기판은 우수한 물리적 및 화학적 안정성을 가지고



있기 때문에 유리 기판과 금속화 증착물 사이의 밀착력이 낮다는 단점을 가진다. 위와 같은 문제점들을 해결하기 위해서 마스크를 이용하지 않는 단순한 공정으로, 구리와 유리 기판 사이의 높은 밀착력을 부여하는 새로운 금속화 증착 공정이 필요한 실정이다.

최근 레이저를 이용한 패터닝 증착 공정 기술들이 보고되고 있다. 레이저는 빛을 원하는 부위에만 선택적으로 조사할 수 있기 때문에, 이를 활용하면 마스크를 이용하지 않고 간단하게 유리 기판 위에 금속화가 가능하다. Kim 등은 구리 전구체 용액을 활용하여 유리 기판 위에 구리 패턴을 증착하고자 하였다[9-11]. 유리 기판 위에 구리 나노 입자를 도포한 후 레이저로 선택적 용융을 통해 구리를 증착한 연구들도 보고되었다[12]. 이와 같은 연구들은 레이저를 이용하여 마스크 없이 간단하게 구리를 금속화 및 증착했다는 점에서 의의를 가지지만, 여전히 유리 기판과 구리 사이의 접착력이 낮다는 문제점을 가진다[13].

위 문제를 해결 가능한 새로운 공정으로, 레이저 유도 플라스마 보조 후면 증착(Laser-induced Plasma Backward Deposition, LIPBD)이 있다. 본 공정 기술을 이용하면 기존 레이저를 이용한 간단한 금속화 패터닝 공정이 가능함과 더불어, 플라스마와 증착물의 상호작용을 통해 유리 기판 위에 우수한 밀착력을 가지는 구리의 금속화가 가능하다. 최근 LIPBD를 이용하여 유리 기판 위 구리의 패터닝에 대한 연구들이 진행되었다[8,14]. 관련 연구들은 공정 조건에 따른 증착물의 특성을 보고하였지만 공정 조건에 따른 기판에 생기는 결함 정도에 대해서는 분석을 진행하지 않았다[8,14]. 또 LIPBD 증착물을 시드로 무전해도금을 진행해 공정을 완성했기 때문에, LIPBD 단일 공정을 통해 구리 패턴 증착을 이루거나, 공정 조건에 따른 기판의 결함과 손상에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 LIPBD 공정을 사용하여 추가적인 공정 없이 단일 공정으로 면형 증착을 수행하였다. 본 연구의 목적은 LIPBD 공정 기술을 활용하여 유리 기판 위에 구리를 면형으로 증착하는 최적의 레이저 조건을 분석하고, 증착물의 특성과 기판의 손상 정도를 평가하는 것이다. 선형 증착과 달리 면형 증착은 기판에 부과되는 열의 축적량이 많고, 이는 기판의 손상을 야기한다. 레이저 조건에 따른 열의 축적 및 기판의 손상을 LIPBD 테스트 시편 제작을 통해 분석하였다. 제작된 시편 위 증착된 증착물들의 구조와 성분을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM), 에너지 분산 분광법(Energy-dispersive X-ray Spectroscopy, EDS), X-선 회절 분석법(X-ray Diffraction, XRD) 등을 활용하여 분석하였고 Tape Peeling Test를 통해 기판의 손상 정도를 판단하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 레이저 공정 시스템

LIPBD를 위한 공정 시스템은 Fig. 1에 나타내었다. 공정에는

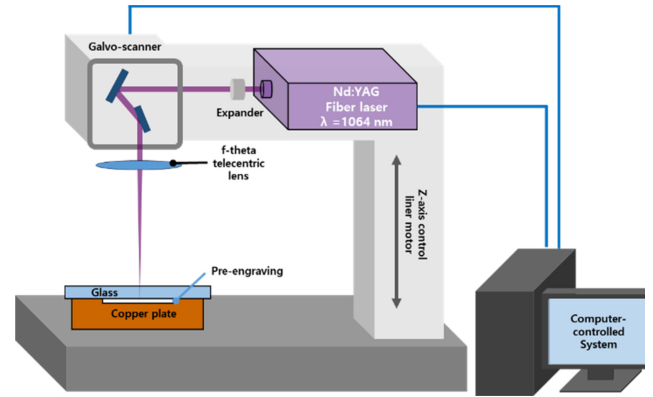


Fig. 1 Schematic of the laser processing system and Laser Induced Pulsed Backward Deposition (LIPBD) system

펄스 파이버 레이저 마킹기 (LG-20P PRO, Ideal Laser) 시스템과 증착 대상 물질인 60(길이) × 60(너비) × 20 mm<sup>3</sup>(두께) 크기의 구리판 그리고 증착 대상 기판인 76(길이) × 52(너비) × 1 mm<sup>3</sup>(두께)의 크기를 가진 대형 슬라이드 글라스(Inexus)가 사용되었다. 레이저 시스템의 레이저 소스는 Nd:YAG 레이저로 1,064 nm의 파장을 가진다. 레이저의 빔 반경(Laser Beam Diameter, D)은 0.05 mm이고 초점 심도(Depth of Focus, DOF)는 0.459 mm이다. 레이저 소스에서 나온 레이저는 증폭기를 통과하여 Galvo-scanner로 진입한다. Galvo-scanner는 진입한 레이저의 x 축, y 축 방향을 결정한다. 방향이 결정된 레이저는 초점 렌즈를 통과한 후 유리 기판을 투과해 구리판으로 조사된다. 구리판 위에 대형 슬라이드 글라스가 위치되는데, 레이저는 슬라이드 글라스를 통과해 구리판에서 초점이 맞고 유리 기판 방향으로 증착이 수행된다.

레이저의 세기와 방향, 선 간격, 펄스 반복률은 컴퓨터 제어 시스템을 통해 조절된다. 레이저 파워는 7.34 W부터 21.14 W의 범위로 조사되었다. 레이저 속도(Laser Speed,  $v$ )와 반복률(Frequency,  $f$ )은 레이저 스팟 간격(Laser Spot Distance,  $S_d$ , (1))과 레이저 스팟 오버랩(Laser Spot Overlap,  $S_o$ , (2))의 함수로 표현할 수 있다.

$$S_d = \frac{v}{f} \quad (1)$$

$$S_o = 1 - \frac{v}{Df} \times 100 \quad (2)$$

본 연구에서는 변인 통제를 위해  $f$ 를 고정하고  $v$ 를 다양하게 구성하여  $S_d$ 와  $S_o$ 에 변화를 주었다.  $S_d$ 가 0.01 mm 단위로 증가할 수 있도록  $v$ 들을 선정하였다. Table 1에서 선정한  $v$ 에 따른  $S_d$ 와  $S_o$  변화를 나타내었다.

$S_d$ 와  $S_o$ 는 하나의 레이저 선 안에서 적용되는 변수들이다. 본 연구에서는 균일한 레이저 조사를 위해 Table 1의 각각의 레이저 조건에 따라 Line Distance를  $S_d$ 와 동일하게 하여 선 방향과 선에 수직인 방향의 오버랩을 일치시켰다.

Table 1 Laser spot distance ( $S_d$ ) and laser spot overlap ( $S_o$ ) calculation that vary depending on the laser speed ( $v$ )

Beam condition	$D$ [mm]	$v$ [mm/sec]	$f$ [kHz]	$S_d$ [mm]	$S_o$ [%]
#1	0.05	200	20	0.01	80
#2		400		0.02	60
#3		600		0.03	40
#4		800		0.04	20
#5		1,000		0.05	0
#6		1,200		0.06	-20

## 2.2 Spacing Depth에 따른 증착 특성 분석

유리 기판과 구리판 사이의 간격(Spacing Depth)에 따라 달라지는 LIPBD 공정 증착물들의 증착 특성 분석을 위해, 레이저 시스템으로 구리판의 사전 각인(Pre-engraving)을 수행하였다. 구리판은 가장 균일한 오버랩을 가지는 Table 1의 600 mm/sec 속도 조건 그리고 21.14 W의 레이저 세기로 0회부터 50회까지 다양한 반복 횟수로 사전 각인되었다. 사전 각인된 구리판은 10 분 동안 초음파 세척, 건조 후 백색광 주사 간섭계(White Light Scanning Interferometer, NV-Series, NanoSystem)로 사전 각인된 지점의 깊이 및 표면조도를 측정하였다. 깊이 측정 완료 후 사전 각인된 샘플에 LIPBD 공정이 사전 각인에 사용된 동일한 조건으로 진행되었다. 구리가 증착된 유리 기판은 10분 동안 초음파세척 및 건조된 후 증착 정도가 분석되었다

## 2.3 LIPBD 테스트 시편 준비 및 제작

LIPBD 테스트 시편을 제작하기 위한 공정은 다음과 같다. 먼저, 증착 대상 소재인 구리판의 증착 면을 기계적 연마한다. 기계적 연마는 #600, #1200으로 각 10분 동안 수행하며 광학현미경(Optical Microscope, OM)으로 균일한 표면을 확인한다. 두 번째로, 연마된 구리판 표면에 21.14 W의 레이저 세기, 600 mm/sec의 레이저 속도로 사전 각인을 10회 반복 수행한다. 사전 각인이 끝난 구리판은 에탄올 수조에서 10분 동안 초음파 세척되었다. 마지막으로, 사전 각인된 구리판 위에 슬라이드 글라스를 올리고 LIPBD 공정 테스트 시편이 제작된다.

테스트 시편의 조건은 Table 1과 레이저 파워의 모든 조건의 행렬로 구성되며, 가로축에는 레이저 파워, 세로축에는 레이저 속도로 각각 조건 변화 따라 5(길이) × 2.5 mm<sup>2</sup>(너비) 크기로 증착이 이루어진다.

## 2.4 표면분석

LIPBD 공정으로 증착된 테스트 샘플의 표면 형상은 OM (Optical Microscope, AxioLab, Zeiss) 그리고 SEM (Scanning Electron Microscope, Regulus 8220, Hitachi)으로 분석되었다. 유리 기판 자체에는 전도성이 없기 때문에 LIPBD 테스트 샘플은 SEM 관찰 전 백금으로 스퍼터링 되었고, 15 keV의 가속전압을

이용하여 3,000배, 10,000배, 40,000배 확대되어 미세구조가 분석되었다. SEM 이미지에서 샘플의 균열이 분석되었으며, 3,000 배에서 육안으로 증착물 사이의 틈을 확인 가능한 조건을 균열 조건으로 판단하였다.

SEM 장비에 모듈화되어있는 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Ultim MAX100, Oxford)로 LIPBD 테스트 샘플의 성분분석도 같이 수행되었다. EDS는 10 keV 가속전압을 이용하여 Mapping 되었다.

XRD (X-ray Diffraction, Smartlab, Rigaku)를 이용한 결정구조 분석도 수행되었다. XRD는 20°에서 80°까지 1 스텝 당 0.02° 간격으로 수행되었다.

밀착력 분석 전후로 4-point Probe (M4P205, MS Tech) 및 멀티미터(DMM6500, Keithley)를 통한 면저항이 측정되었다.

## 2.5 기판손상 및 밀착력 분석

제조된 LIPBD 테스트 시편에 밀착력 분석이 수행되었다. 밀착력 분석을 위한 시편은 다른 표면분석 시편과 겹치지 않게 단독으로 제작되었다. 밀착력 분석을 위한 테스트 시편은 LIPBD 공정 이후 30분 동안 초음파 세척 후 건조되었다. 건조 후 ASTM D330 규격을 참고해 Tape Peeling Test로 밀착력 분석이 수행되었다. 테이프(600-QC33, 3 M Scotch)는 45°의 각도로 제거되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 LIPBD 공정 메커니즘

LIPBD 공정은 넓은 범주에서의 레이저 투명 기판 생산공정으로 유사 공정으로는 레이저 기반 역방향 전사(Laser Induced Backward Transfer, LIBT)가 있다. 레이저가 유리를 통과해 증착 소재에 조사되는 공정이라는 점과 증착물이 레이저 방향과 반대로 증착된다는 점이 LIPBD 공정과 LIBT 공정의 공통점이다.

하지만 LIPBD 공정은 LIBT 공정과 달리 기판과의 증착 및 밀착력을 최대로 높인 공정으로 증착물의 열의 축적을 과도하지도 부족하지도 않은 수준으로 조절한 공정이다[15].

레이저 기반 투명 기판 공정은 증착 물질 타겟(Doner), 그리고 타겟 위에 올려진 증착 대상인 유리 기판(Receiver)으로 이루어진다. 본 연구에 이용된 레이저는 1,064 nm의 근적외선 파장을 가지는 레이저로 유리의 투과율이 95% 이상이기 때문에 레이저는 파워의 손실 없이 대부분 유리 기판을 투과해 불투명한 타겟으로 조사된다[8]. 레이저의 조사로 온도가 높아진 타겟은 국부적으로 용융과 증발이 일어난다. 이 용융과 증발은 타겟을 이온화 시키고 국부적인 폭발과 함께 플라스마 흠을 발생시킨다. 플라스마 흠 내부에는 타겟 소재의 나노입자들이 들어있기 때문에 이 타겟 나노입자들이 유리 기판에 증착된다.

이 증착물들의 후속 상태에 따라 공정이 차별화된다. 증착물의 후속 상태는 열의 축적에 따라 분류되며 초점심도, 레이저

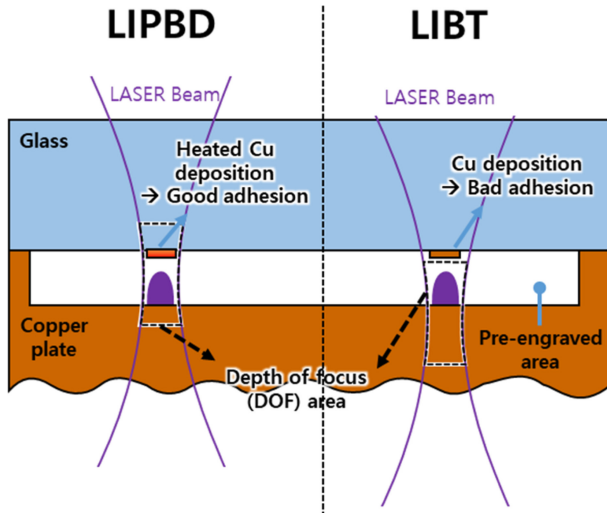


Fig. 2 Comparison of laser induced processes for transparent substrate patterning

펄스 오버랩, 유리 기판과 타겟 사이의 거리에 따라 달라질 수 있다. 한 예인 초점심도에 의한 증착물의 후속 상태를 Fig. 2에 도식화하였다.

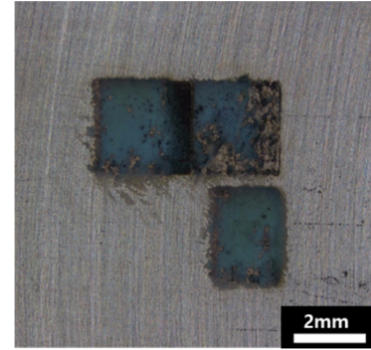
증착물이 초점심도 영역에 겹치지 않을 경우, 증착물이 후속 레이저 펄스에 영향을 받지 않고 추가적인 열의 축적이 일어나지 않는다. 이 공정은 LIBT 공정이라고 불리며 유리 기판과 상호작용이 일어나지 않기 때문에 타겟 증착물과 유리 기판 사이의 접착력이 좋지 못하다[13,16].

LIPBD 공정의 경우, 적절한 수준으로 초점심도의 z축 위치를 조절하여 유리 기판과 증착물 계면에 국부적인 용융 및 반응을 이끌어내어 새로운 계면층을 형성할 수 있다. 이 경우 유리 와 기판 사이의 높은 밀착력을 확보하는 것이 가능하다[14].

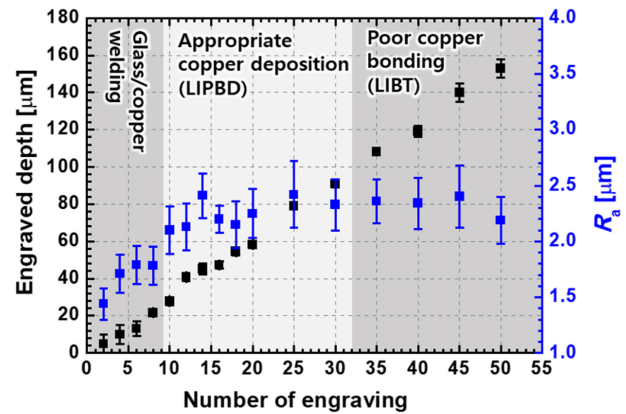
### 3.2 Spacing Depth에 따른 증착성능 분석

사전 각인 횟수에 따른 사전 각인 깊이와 표면 조도 변화를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 사전 각인 깊이는 사전 각인 1회 당 ~3  $\mu\text{m}$ 씩 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 레이저 조사 횟수에 따라 표면 조도는 사전 각인 2회 후 1.44  $\mu\text{m}$ 이었으나, 횟수가 거듭할수록 점점 증가하고 이후 사전 각인 횟수 ~10회 이후로는 수렴하기 시작해 ~2.5  $\mu\text{m}$  수준으로 수렴한다.

사전 각인된 구리판 위 유리에 증착된 LIPBD 증착물은 사전 각인의 깊이에 따라 총 3종류로 분류되었다. 먼저 사전 각인 깊이가 10  $\mu\text{m}$ 의 미만(0회~4회 반복)일 때, 유리 기판과 구리판이 용접되는 현상이 나타났다. 유리 기판은 위에서 균열이 발생하였고 유리 기판을 구리판에서 분리 후 Fig. 3(b)와 같이 구리판에 유리가 접착되어 잔류하는 것을 확인할 수 있었다. 이 잔류 유리들은 구리판의 초음파세척 후에도 떨어지지 않은 것으로 보아 밀착력이 상당한 것으로 분석된다. 두번째로, 사전 각인 깊이가 ~10  $\mu\text{m}$  이상 ~90  $\mu\text{m}$ (5회~30회 반복)일 때, 유리 기판과 구리판의 용접이 이루어지지 않았고 오롯이 유리 기판 위 증착만



(a) Changes and deposition quality analysis of engraving depth according to the number of engravings



(b) After removing the glass and the welded copper, the glass residue attached to the copper

Fig. 3 Deposition performance analysis according to spacing depth

이루어졌다. 유리 기판의 초음파 세척 후에도 구리 증착물들은 형태를 유지하는 것으로 보아 준수한 밀착력을 가지는 것으로 판단된다.

마지막으로 사전 각인 깊이가 90  $\mu\text{m}$ (30회 반복)를 넘어가면서 증착물들은 점점 초음파 세척에 분리되었다. 이후 사전 각인 깊이가 깊어짐에 따라 LIPBD 샘플의 증착물 초음파 세척 분리 정도는 더욱 심해졌다.

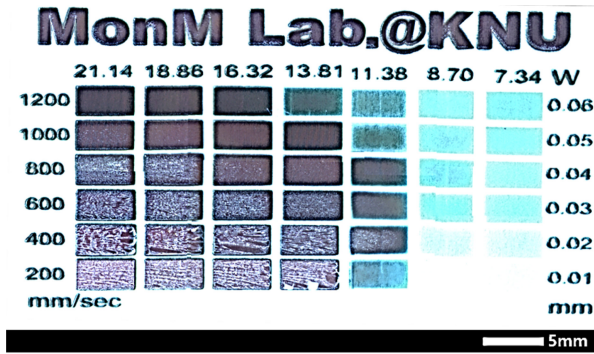
이를 통해 LIPBD 증착을 위한 유리 기판과 구리판 사이의 사전 각인 최적 깊이는 10  $\mu\text{m}$  이상 90  $\mu\text{m}$  이하인 것으로 분석할 수 있다. 90  $\mu\text{m}$  이상에서는 초음파 세척으로 구리가 분리되는 것으로 보아 각인 깊이가 얕아질수록 유리 와 구리 증착물 사이 접착력은 강해지고 깊어질수록 약해진다. 하지만 너무 얇은 각인 깊이는 유리 기판과 구리판의 용접을 발생시키기 때문에 10  $\mu\text{m}$  이상의 깊이 확보는 필수적인 것으로 보여진다.

### 3.3 LIPBD 샘플 형상 분석

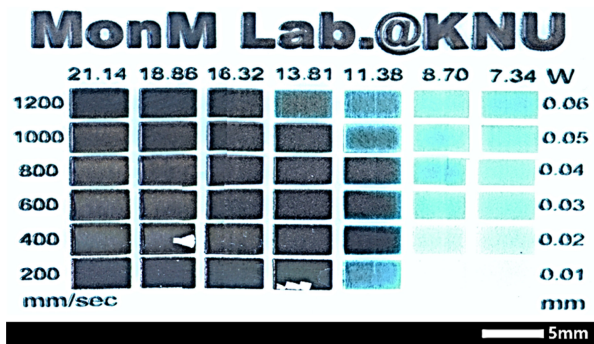
Table 1의 다양한 조건의 레이저 속도와 레이저 파워로 LIPBD 테스트 샘플이 제작되었다. 유리 기판의 증착된 면과 그 반대면이 OM으로 분석되었다(Fig. 4). LIPBD의 색깔의 경우 증착면은 어두운 갈색을 띠며 증착 반대면은 갈색을 띠었다.

레이저 조건에 따라 투명도가 달라지는 것을 확인할 수





(a) Deposition surface images of LIPBD photographed with an OM



(b) Back of the deposition surface image of LIPBD photographed with an OM (left and right inversion)

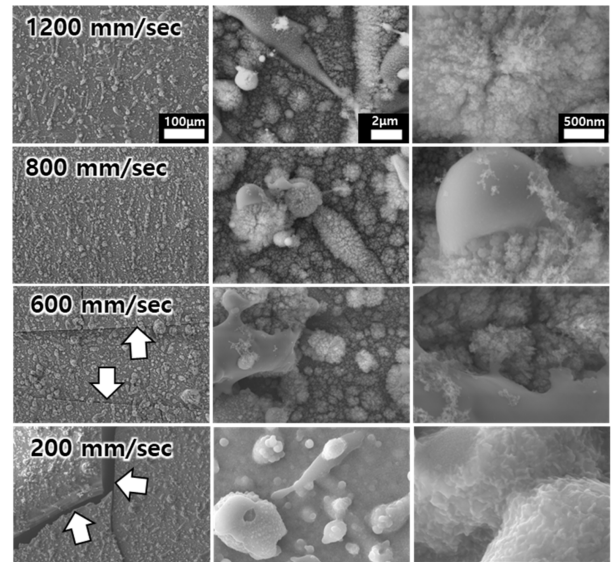
Fig. 4 Test sample optical microscope (OM) image generated by laser-induced plasma backward deposition (LIPBD) process

있었는데, 레이저 세기가 강해질수록 불투명도가 높아지는 경향을 보였다. 레이저 세기가 강해지리 수록 플라즈마 흡에 존재하는 나노 입자 들의 양이 많아지고, 이 나노 입자들의 양의 차이 때문에 레이저의 세기가 세질수록 증착물은 불투명해지는 것으로 분석할 수 있다.

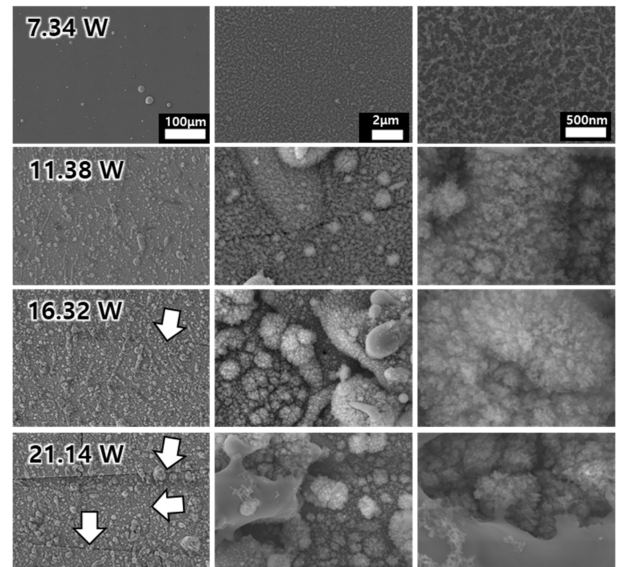
LIPBD 테스트 샘플의 증착 반대면에서 유리의 균열을 확인할 수 있다. 이 균열은 증착면에서는 확인이 불가능했는데 속도가 느릴수록, 레이저 파워가 세질수록 더 높은 빈도로 균열을 확인할 수 있었다. 균열이 심한 경우 자연적으로 박리가 발생되기도 하였다. 테스트 샘플의 불투명한 증착면에서는 육안으로 균열을 확인하기 힘들었기 때문에 균열은 유리 기판과 증착물 사이에서 생성되어 전파되는 것으로 분석된다. 균열의 발생 원인은 기판에 가해지는 과도한 열축적 때문이며, 이 열축적은 레이저 세기가 세질수록, 레이저 속도가 느릴수록 많이 일어나는 것으로 보여진다. Fig. 4(b)에서 레이저 파워가 높을수록 레이저 속도가 느릴수록 균열이 많이 발생하는 양상은 이를 뒷받침해 준다.

LIPBD 테스트 시편의 미세구조를 확인하기 위해 SEM 분석이 시행되었다. 레이저 속도에 따른 미세구조의 차이를 분석하기 위해 가장 경향이 뚜렷한 21.14 W를 선정하여 Fig. 5(a)에 대표적인 이미지를 도시하였다.

증착물은 증착 형상에 따라 크게 두 종류로 분류가 가능하다.



(a) Comparison of sediments with different velocity conditions at the same watt (21.14 W)



(b) Deposits under different laser power conditions unified under 600 mm/sec speed conditions

Fig. 5 Comparative analysis of deposited properties according to various laser conditions using scanning electron microscope (SEM). 3,000 times, 10,000 times, 40,000 times enlarged images from in order from the left and the identified surface cracks are marked with white arrows

먼저, 유리 기판 위 평평하게 깔린 증착물들과 그리고 그 위 ~50 µm에서 100 µm 이상까지 여러 크기로 불규칙적으로 증착된 마이크로 입자들은 두 부분으로 구성되는데, 이 증착물들을 10,000배, 40,000배 확대한 SEM 이미지에서는 이 마이크로 증착물들이 형상과 무관하게 대부분 나노 입자로 이루어져 있다는 것을 확인했다.

하지만 800 mm/sec 조건의 경우, 두 번째 10,000배 확대 이미지에서 국부적으로 나노 입자가 아닌 매끈한 마이크로

입자들을 확인할 수 있다. 이 매끈한 마이크로 입자들은, 800 mm/sec에서 속도가 느릴수록 보다 높은 빈도로 관찰되었다. 마지막, 속도가 가장 느린 200 mm/sec에서는 나노 입자들의 관찰이 불가능했고, 전면이 매끈한 표면으로 변한 것을 확인했다.

크랙의 생성도 레이저 속도에 반비례한다. 600 mm/sec 레이저 속도부터는 표면에 균열을 확인할 수 있었다. 이후 레이저 속도가 느려지면서 점점 균열이 많이 발생했고, 200 mm/sec에서는 가장 넓은 수준의 균열이 생성되었다.

동일한 속도 조건에서 파워에 따른 증착 미세구조의 비교도 수행되었다. 600 mm/sec 레이저 조건에서 여러 레이저 파워에 대한 SEM 이미지를 Fig. 5(b)에 대표적인 이미지를 도시하였다. 가장 파워가 낮은 7.34 W에서는 아주 얇은 수준의 평평한 증착물들이 주를 이루었다. 이 증착물들도 10,000배와 40,000배 확대 이미지에서 나노 입자들로 구성하는 것을 확인하였다. 11.38 W의 레이저 에너지에서는 평평한 증착물 위 마이크로 입자들이 증착되기 시작한다. 이후 16.32 W 에너지 조건에서는 Micro-particles의 비율이 높아지고 매끈한 마이크로 입자들도 확인 가능하다. 21.14 W에서는 매끈한 마이크로 입자들의 비율이 높아진다. 표면 균열의 경우 16.32 W에서 처음 발견되었고 21.14 W에서 균열의 성장을 확인할 수 있다.

Fig. 5(b) 결과를 통해 증착의 순서로 평평한 증착면이 형성되고 난 이후 마이크로 입자들이 점차적으로 증착되는 것으로 분석하였다. Figs. 5(a)보다 5(b)의 증착량 변화가 확실하게 나타나는 것으로 보아 증착량은 레이저 속도보다는 세기에 우세하게 반영되는 것으로 보여진다. Fig. 5(a)는 증착 속도가 느릴수록, Fig. 5(b)는 레이저 세기가 강해질수록 균열의 생성이 우세해지는 결과로 미루어 보아 낮은 레이저 속도와 높은 레이저 세기는 기판에 열을 과도하게 축적하는 효과가 있다는 것을 재확인했다. 매끈한 마이크로 입자들의 증착물에 열이 축적되기 시작하면 증착물 내부의 나노 입자들이 용융 및 소결되어 매끈한 모양의 마이크로 입자들을 형성한다고 분석하였다.

속도가 느려짐에 따라, 그리고 레이저 세기가 높아짐에 따라 점차적으로 늘어나는 매끈한 마이크로 입자들이 이를 반증한다.

### 3.4 증착물 성분 분석

증착물의 성분을 분석하기 위해 SEM 챔버 내부에서 EDS Mapping 분석이 수행되었다. 가장 고른 분포를 보여주는 800 mm/sec 레이저 속도와 18.86 W 레이저 세기의 증착물의 EDS Mapping Data와 X선 그래프의 대표 이미지가 Fig. 6에 도시되었다. 모든 샘플은 Cu, Si, O의 피크를 확인할 수 있었고 스퍼터링에 사용된 Pt의 피크도 확인할 수 있었다. Cu, Si, O의 Atomic%는 각각 54.94, 8.38, 35.58이다.

유리의 화학식이  $\text{SiO}_2$ 이기 때문에 Si의 Atomic% 함량의 두 배보다 많은 O의 Atomic%는 CuO의 결합 구조에서 검출되었다고 분석할 수 있으며, 증착물은 Cu, 그리고 CuO로 구성되는 것으로 보여진다.

XRD를 통해 증착 조건에 따른 결정구조의 비교가 수행되었다.

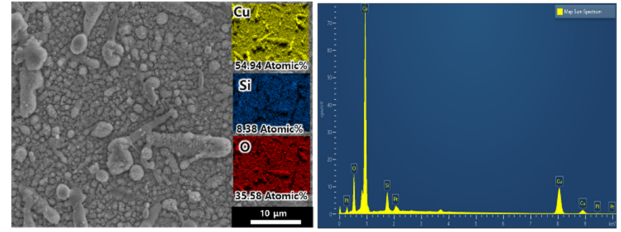


Fig. 6 Analysis of the composition of deposited materials by energy dispersive spectrometer (EDS) mapping

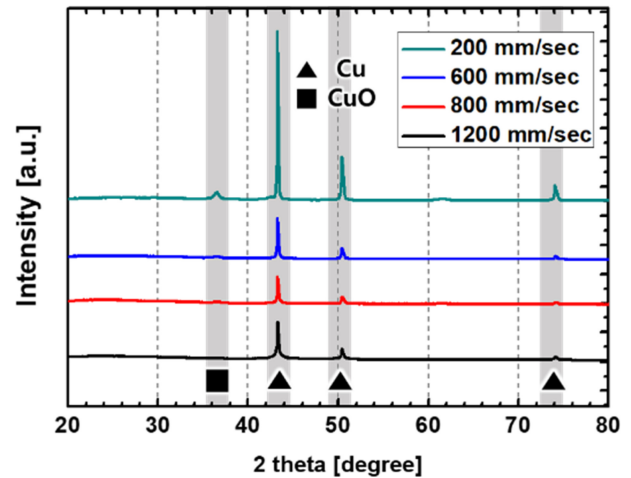


Fig. 7 Analysis of crystal structure and composition of deposition materials by X-ray diffraction (XRD)

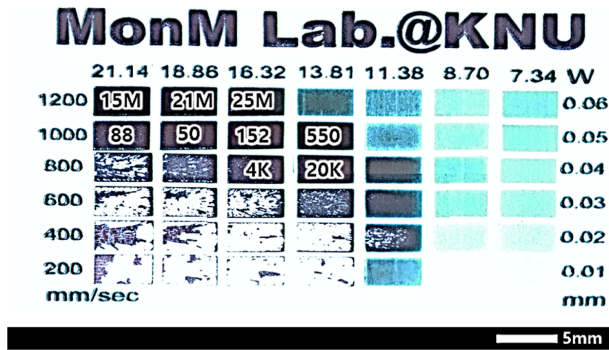
가장 증착량이 많은 Fig. 5(a) 조건들에 대한 XRD 분석을 통해 Fig. 7에 도시하였다. 모든 조건 공통적으로 3개의 피크를 가지고 있고, 가장 속도가 느린 200 mm/sec 조건의 경우 37° 부근에서 새로운 피크가 생긴 것을 확인 가능하다. 레이저 속도가 느릴수록 피크들의 상대 높이는 높아진다.

레이저 속도가 느릴수록 펄스 오버랩이 늘어나기 때문에 많은 양의 증착물이 생성되어 결정 구조의 절대량이 늘어나 피크의 높이가 높아진 것으로 분석된다. 모든 조건 공통으로 존재하는 피크는 Cu의 피크인 것으로 확인된다. 37° 부근의 피크는 CuO의 피크로 확인되며, CuO의 피크가 다른 Cu 피크에 비교하여 작은 피크 높이를 가지는 것으로 보아 CuO는 Cu에 비해 낮은 함량으로 증착되는 것으로 분석된다. Fig. 4의 색깔 분석에서 내부(갈색)와 외부(어두운 갈색)의 색깔이 달랐었는데, 이는 증착물의 내부에는 Cu(갈색)가 외부에는 CuO(어두운 갈색)가 증착되었기 때문으로 분석된다.

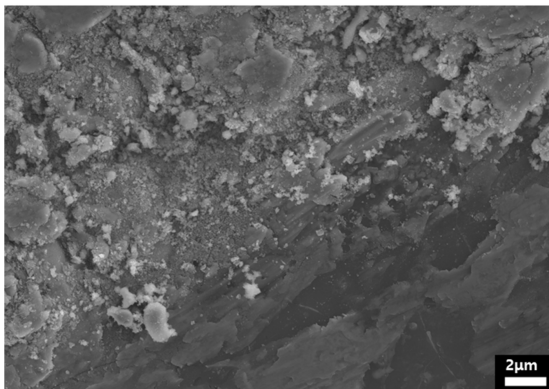
### 3.5 LIPBD 샘플 밀착력 테스트 이후 특성 분석

Tape Peeling Test는 테이프 기반의 접착력을 측정하는 시험이다. 시스템에 존재하는 힘은 테이프와 증착물 사이의 밀착력, 증착물 내부의 응집력, 증착물과 유리 기판 사이의 밀착력, 유리 기판 사이의 응집력이 존재한다. 이중 가장 약한 부분의 박리가 이루어지는 것으로 이를 통해 유리 기판의 결합 분석이 가능하다.





(a) Resistance measurement results ( $\Omega/\text{sq}$ ) after the tape peeling test and the rear (left and right inversion) of the LIPBD surface image taken with an OM



(b) SEM image of the damaged surface layer (bright side) and the inner layer (dark side) revealed after the tape peeling test

Fig. 8 Laser-induced plasma backward deposition (LIPBD) sample after tape peeling test, characteristics and surface analysis using optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM)

기판의 손상 정도를 파악하고 밀착력을 테스트하기 위해 샘플은 증착 이후 초음파 세척을 30분 동안 진행했다. 이후 Tape Peeling Test를 수행하고 샘플의 OM 이미지를 Fig. 8에 도시하였다. 초음파 세척 이후에는 샘플의 손상 및 박리를 확인할 수 없었다. 하지만 Tape Peeling Test에서 테이프에 상당량의 증착물 및 유리 기판이 제거되었다. 증착물의 제거는 Fig. 4(b)에서 균열을 확인할 수 있었던 높은 레이저 파워와 낮은 레이저 속도 조건에서 지배적으로 발생하였으며, 증착물과 균열이 발생한 유리 기판 자체가 박리되는 것을 통해 유리 기판 사이의 열 축적 및 균열로 약해진 응집력으로 박리가 발생하는 것으로 분석된다.

초음파 세척 및 Tape Peeling Test 전후로 전도성 측정이 이루어졌다. 먼저 초기상태의 증착물에는 수백  $\text{M } \Omega/\text{sq}$  수준의 저항을 확인하거나 Overload로 저항을 측정할 수 없었다. 이후 초음파 세척 후 Tape Peeling Test를 거치고 유리 기판이 떨어지지 않은 부분들에 대한 전도성 측정이 다시 수행되었다. 샘플의 저항은 Fig. 8(a)에 도시되었다.

샘플의 저항이 기존 수백  $\text{M } \Omega/\text{sq}$ 에서 Tape Peeling Test 진행 이후  $\sim 50 \text{ } \Omega/\text{sq}$ 까지 측정되었다. 샘플을 덮고 있던 CuO(어두

운 갈색) 입자들이 도포되어 높은 저항을 가지는 것으로 분석되었으며, 초음파 세척되고 Tape Peeling 되면서 밑에 존재하는 Cu(갈색)가 드러나 저항이 낮아진 것으로 분석되었다. Fig. 8(b)에서 Tape Peeling Test 이후 SEM 이미지에서 박리 및 손상된 표면층과 내부의 층을 같이 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 LIPBD 공정을 통해 유리 기판 위에 면형 증착을 수행하고 각종 시스템의 조건에 따른 증착 특성을 분석했다.

먼저, 유리 기판과 구리판 사이의 최적 거리는  $10 \text{ } \mu\text{m}$  이상  $90 \text{ } \mu\text{m}$ 이다. 최적 범위보다 거리가 짧아지면 유리 기판과 구리판 사이의 용접 현상이 발생하고, 멀어지면 증착물과 유리 기판 사이의 밀착력이 떨어지는 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

증착물의 성분 분석에서는 EDS Mapping과 XRD 분석을 통해 증착물이 Cu와 CuO로 구성됨을 확인하였다. 레이저 속도가 느릴수록 레이저 세기가 높을수록 CuO의 구성 비율이 늘어나고 증착 양이 많아지는 것을 확인했다.

낮은 레이저 속도와 높은 레이저 세기는 유리 기판에 높은 수준의 열축적을 일으키기 때문에 균열을 발생시켜 유리의 박리를 야기한다. Tape Peeling Test 결과 균열이 생긴 조건의 LIPBD 테스트 샘플에서는 박리가 발생하였고 전기 전도성도 확인할 수 없었다. 균열이 발생하지 않은 조건의 증착물에서는  $\sim 50 \text{ } \Omega/\text{sq}$ 의 저항을 확인할 수 있었다.

결과적으로, LIPBD 공정을 통해 형성된 Cu와 CuO로 구성된 증착물은 적절한 증착 두께와 적절한 레이저 조건을 선택할 경우 유리 기판과 우수한 밀착성을 갖는 안정적인 구조를 형성할 수 있음을 확인하였다. 증착물의 특성은 레이저 조건에 크게 의존한다. 증착 두께와 성분 변화에 따른 증착물의 특성을 고려하여 최적의 LIPBD 공정 조건을 설정하는 것이 중요한 것으로 분석된다. 또한 증착물의 안정성과 전도성을 향상시키기 위해서는 증착 공정 이후의 추가적인 처리가 필요하며, 증착물의 특성 변화를 잘 이해하여 실제 응용에 적용할 수 있도록 연구를 진행할 필요가 있다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2021R1I1A3045191 and 2020R1C1C1008113) and POSCO HOLDINGS.

#### REFERENCES

1. Del Rio, D. D. F., Sovacool, B. K., Foley, A. M., Griffiths, S.,

- Bazilian, M., Kim, J., Rooney, D., (2022), Decarbonizing the glass industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111885.
2. Mehta, N., (2006), Applications of chalcogenide glasses in electronics and optoelectronics: A review. <https://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/4967>
  3. Liu, H., Lin, W., Hong, M., (2021), Hybrid laser precision engineering of transparent hard materials: Challenges, solutions and applications, *Light: Science & Applications*, 10(1), 162.
  4. Esashi, M., Ono, T., (2005), From MEMS to nanomachine, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(13), R223.
  5. Liu, S., Shen, B., Hao, H., Zhai, J., (2019), Glass-ceramic dielectric materials with high energy density and ultra-fast discharge speed for high power energy storage applications, *Journal of Materials Chemistry C*, 7(48), 15118-15135.
  6. Longobardo, A. V., (2010), Glass fibers for printed circuit boards, *Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications*, 175-196.
  7. Li, L., Zhang, J., Wang, Y., Zaman, F. U., Zhang, Y., Hou, L., Yuan, C., (2021), Laser irradiation construction of nanomaterials toward electrochemical energy storage and conversion: Ongoing progresses and challenges, *InfoMat*, 3(12), 1393-1421.
  8. Wei, K., Lin, C.-K., Tung, P.-C., Ho, J.-R., Tsao, I.-Y., (2023), Formation of subsurface Cu-O-Si system through laser-induced plasma-assisted copper penetration for fabricating robust adhesive copper wire on glass substrate, *Applied Surface Science*, 609, 155149.
  9. Kim, H.-G., Park, M. S., (2017), Circuit patterning using laser on transparent material, *Surface and Coatings Technology*, 315, 377-384.
  10. Kim, H.-G., Park, M.-S., (2021), Fast fabrication of conductive copper structure on glass material using laser-induced chemical liquid phase deposition, *Applied Sciences*, 11(18), 8695.
  11. Seo, J. M., Kwon, K.-K., Song, K. Y., Chu, C. N., Ahn, S.-H., (2020), Deposition of durable micro copper patterns into glass by combining laser-induced backside wet etching and laser-induced chemical liquid phase deposition methods, *Materials*, 13(13), 2977.
  12. Suh, Y. D., Kwon, J., Lee, J., Lee, H., Jeong, S., Kim, D., Cho, H., Yeo, J., Ko, S. H., (2016), Maskless fabrication of highly robust, flexible transparent Cu conductor by random crack network assisted Cu nanoparticle patterning and laser sintering, *Advanced Electronic Materials*, 2(12), 1600277.
  13. Praeger, M., Papazoglou, S., Pesquera, A., Zurutuza, A., Levi, A., Naveh, D., Zergioti, I., Eason, R. W., Mills, B., (2020), Laser-induced backward transfer of monolayer graphene, *Applied Surface Science*, 533, 147488.
  14. Zhang, C., Yu, Y., Cao, Y., Wei, X., Su, S., Liu, W., (2021), Routing a glass substrate via laser induced plasma backward deposition of copper seed layer for electroplating, *Optics & Laser Technology*, 138, 106849.
  15. Liu, H., Li, Y., Lin, W., Hong, M., (2020), High-aspect-ratio crack-free microstructures fabrication on sapphire by femtosecond laser ablation, *Optics & Laser Technology*, 132, 106472.
  16. Zywiets, U., Evlyukhin, A. B., Reinhardt, C., Chichkov, B. N., (2014), Laser printing of silicon nanoparticles with resonant optical electric and magnetic responses, *Nature Communications*, 5(1), 3402.

**Yonghoon Lee**

M.Sc. candidate in the Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University. His research interest is about energy beam-based manufacturing process.

E-mail: lee1789911@gmail.com

**Hwanggyu Lee**

Ph.D. candidate in the Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University. His research interest is precision mechanical engineering.

E-mail: lhg0314@knu.ac.kr

**Dong Min Kim**

Principle researcher in Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interest is in advanced manufacturing process.

E-mail: dkim0707@kitech.re.kr

**Taewook Kim**

Professor in the Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is precision mechanical engineering.

E-mail: kimtw@knu.ac.kr

**Jisoo Kim**

Professor in the Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is about energy beam-based manufacturing process.

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





## 구조물의 능동 유지보수를 위한 드론부착형 분사장치 개발

# Development of Drone-attached Spraying Device for Active Maintenance of Structures

양승한<sup>1</sup>, 이광일<sup>2,#</sup>  
Seung-Han Yang<sup>1</sup> and Kwang-Il Lee<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)  
<sup>2</sup> 경일대학교 기계자동차학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University)  
# Corresponding Author / E-mail: [kilee@kiu.kr](mailto:kilee@kiu.kr), TEL: +82-53-600-5351  
ORCID: 0000-0003-0093-2783

KEYWORDS: Active maintenance (능동 유지보수), Maintenance agent (유지보수제), Spraying device (분사장치), Damage (손상부), Structure (구조물)

Exteriors of structures (apartments, buildings, bridges, dams, power plants, etc.) are subject to deterioration and damage (cracks, rust, etc.), mainly due to thermal expansion/contraction and environmental humidity. The damages shorten the lifespan of structures and cause unnecessary reconstruction, increasing social costs. The existing damage maintenance methods, which are directly constructed by the workers, have problems such as reduced work efficiency, increased work cost, lack of timely maintenance, and high work risks. In this paper, a spraying device attached to a drone for active and flexible maintenance of structures is developed. To simplify maintenance, the device consists of a solenoid motor, detachable parts for maintenance agent, and a lightweight-designed frame, manufactured with a 3D printer. In particular, the lever mechanism that amplifies the pushing force of the solenoid motor is designed to spray the maintenance agent when a switch comes into contact with the exterior of the structure. The prototype of a spraying device is attached to a commercial drone (Mavic3, DJI) and tested for effectiveness in structure maintenance. It demonstrates successful, cost-effective maintenance of structural damages in less than 10 minutes.

Manuscript received: August 22, 2023 / Revised: September 25, 2023 / Accepted: September 25, 2023

### NOMENCLATURE

$L$	=	Lever Ratio
$x_i$	=	Input Displacement [mm]
$x_o$	=	Output Displacement [mm]
$F_i$	=	Input Force [N]
$F_o$	=	Output Force [N]

### 1. 서론

드론(Dynamic Remotely Operated Navigation Equipment,

DRONE)은 사전 입력된 프로그램에 따라 비행하는 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)와 제한된 공간을 비행하는 소형 드론을 통칭하는 비행 로봇이다[1,2]. 드론 시장 규모는 연평균 성장률 7.8%로 2030년에는 약 72조원(558억\$)을 예상한다[3]. 국내 드론 산업은 4차 산업혁명을 선도하는 신성장동력을 창출하기 위한 2017년 제1차 드론산업발전 기본계획에 따라 규모가 크게 성장하였으며, 2023년 제2차 드론산업발전 기본계획을 통하여 기술혁신과 규제 개선의 드론 활용 확산, 생활편의 제고 그리고 글로벌 기술 선도를 목표로한다[4,5]. 또한 국내 드론 산업 경쟁력을 제고하기 위해 10년 동안 반드시 확보해야 하는 6대 공통핵심기능기술과 5대 용도별 플랫폼을 제시하였다[6].

높은 공간접근성에 따라 드론 활용은 농업, 물류, 재난 및 건설 분야를 포함해 광범위한 영역에서 지속적으로 증가하고

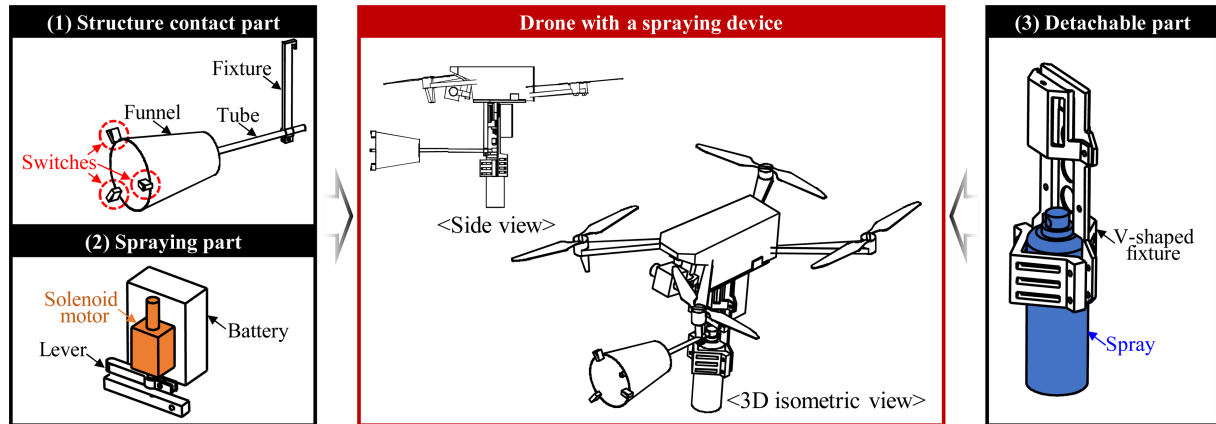


Fig. 1 Configuration of a drone with a designed spraying device

있다[7,8]. 농업분야에서 드론은 작물 생산성을 높이기 위해 다양한 정밀 농업에 활용하며, 살충제와 비료를 선택적으로 살포하여 농업의 효율 개선과 농부의 질병을 감소시킨다[9]. 또한 2050년 96억명으로 예상되는 세계 총인구의 식량 수요를 충족시키기 위해 정밀 농업은 드론 구조와 다중 센서 개발, 살충제의 주요 영역 살포, 작물의 원격 모니터링의 인공지능과 딥러닝을 적용한다[10]. 수송과 물류 분야에서 드론은 기존 모빌리티의 낮은 공역(Air Space)을 3차원으로 확장하여 화물과 승객 운송의 효율을 높이며[11], 드론 기반 물류 모델을 설계하고 계획하여 운영의 유연성, 대응성, 비용절감, 지속 가능성을 목표로한다[12,13]. 재난 분야에서 드론의 주요 적용 영역은 매핑 또는 재난 관리, 수색 및 구조, 운송, 훈련이며, 재난구조 효율성은 드론의 피해자 식별을 통해 높이고자 한다[14].

드론 활용은 건축, 엔지니어링과 건설 산업에서 빠르게 진행되고 있으며, 해당 산업은 2020년대에는 드론의 2번째 시장으로 크게 성장할 것으로 예상한다[15]. 특히 현대 사회는 다양한 고층 구조물(아파트, 빌딩, 다리, 댐, 발전소 등)을 건설하였으며, 드론을 활용한 구조물 모니터링이 지속적으로 이루어지고 있다. 건물의 에너지 활용성은 Syracuse 대학 건물을 대상으로 표준 절차를 적용하여, 비행 경로의 변수 설계, 적외선 카메라의 열 이상 영역 식별, 적외선 및 RGB의 CAD 모델링을 통하여 확인하였다[16]. 또한 철도시설물과 교량 하부의 무인자동화 점검은 헬콥터 구조의 드론을 개발하여 수행하였으며[17], 해체 대상 구조물의 실내의 구조 실측은 드론 촬영과 LiDAR 스캐닝을 통한 정밀 정합을 통해 진행하였다[18]. 도로의 균열 인식과 균열 유형 구분은 도로 영상데이터와 물체탐지 알고리즘을 사용하여 확인하였으며, 도로자산관리체계는 드론과 인공지능형 균열검지 시스템을 통해 구축하였다[19]. 또한 사회기반시설물인 교량의 교각에 발생한 균열은 딥러닝 네트워크를 개발하여 예측하고 자동으로 검출 및 평가하였다[20]. 벽면 부착의 드론은 시설물을 근거리에서 정확하게 점검하고 드론의 비행에너지를 개선하기 위해 설계하였으며, 유효성은 실험적으로 검증하였다[21,22].

앞서 서술한 바와 같이, 드론은 높은 공간접근성을 통해 다양한

응용분야에서 비약적 성장을 이루고 있으며, 현대 사회의 고층 구조물을 모니터링하고 필요 시 작업자에 의한 유지보수에 활용하고 있다. 하지만, 기존 모니터링 방법은 획득한 영상에서 손상부(예. 균열과 녹)의 유무를 단순히 판단하는 수동적인 방법으로 작업자의 추가 유지보수를 필요로 한다. 작업자의 개입은 유지보수 비용과 작업의 위험성을 직접 증가시키며, 손상부를 적시에 유지보수하지 못하고 시간 지연으로 손상부가 확대 악화되는 문제가 추가 발생하여 최종적으로 구조물의 수명을 크게 단축시킨다.

본 연구는 구조물 외부의 손상부를 적시에 능동적으로 유지보수하고 구조물의 수명 향상을 위한 드론부착형 분사장치를 개발하며 현장 적용하여 검증한다. 여기서 능동적 유지보수는 드론을 사용하여 구조물 외부의 손상부를 직접 유지보수하며, 기존 작업자가 유지보수하는 수동적 유지보수와 대비된다. 또한 능동적 유지보수는 구조물 측정, 손상부 판단, 지능형 보수 작업을 모두 드론이 진행하는 자동 유지보수의 전 단계이다. 분사장치는 구조물 유지보수의 간소화를 위해 시중에서 구입이 용이한 스프레이 형태의 유지보수제를 솔레노이드 구동으로 구조물 손상부에 직접 분사하는 구조이며[23], 상용 드론에 탈부착이 용이하도록 설계한다. 또한 구조물의 손상 종류에 따라 방청, 방오, 방수의 기능성 유지보수제를 구조물의 손상부에 선택적으로 원격 분사하여 유지보수하는 공정을 구현한다. 설계한 분사장치의 주요부품은 3D 프린팅으로 제작하고, 제작한 분사장치는 경일대학교 건물의 손상부에 적용하여 유지보수를 진행한다.

## 2. 드론부착형 분사장치 설계

### 2.1 분사장치 구조

드론부착형 분사장치는 구조물 손상부에 접촉하여 유지보수제를 자동으로 분사하며, Fig. 1과 같이 구조물 접촉부, 분사구동부, 유지보수제 탈부착부로 구성한다. 여기서, 분사장치의 주요 구성품인 솔레노이드와 유지보수제는 드론의 무게중심

수직축에 위치하도록 설계하여 안정적인 드론비행을 도모한다.

### (1) 구조물 접촉부(Structure Contact Part)

구조물 접촉부는 분사장치가 부착된 드론이 구조물의 손상부에 접촉하면 동작하는 접촉 스위치와 유지보수제를 일정 영역에 제한적으로 분사하기 위한 깔때기 형상으로 설계한다. 또한 구조물 손상부에 접촉 시 드론의 자세가 다소 불안정한 경우에도 유지보수제를 안정적으로 분사하기 위하여 다수의 접촉 스위치로 구성한다.

### (2) 분사 구동부(Spraying Part)

분사 구동부는 구조물 접촉부의 스위치 신호에 따라 솔레노이드를 On/Off 구동시키고, 스프레이 형태의 유지보수제가 분사하는 기능을 수행한다. 하지만 소형 솔레노이드는 스프레이를 분사하기 위하여 충분한 구동력,  $F_i$ 을 발생시키지 못하며, 솔레노이드의 구동력  $F_i$ 은 Class II의 레버 기구(Lever Mechanism)를 사용하여 구동력  $F_o$ 로 증폭시킨 후 스프레이를 분사하도록 하였다. 여기서 식(1)의 레버 비율  $L$ 은 3장에서 실험적으로 결정하였다.

$$L = \frac{x_i}{x_o} = \frac{F_o}{F_i} \quad (1)$$

### (3) 유지보수제 탈부착부(Detachable Part)

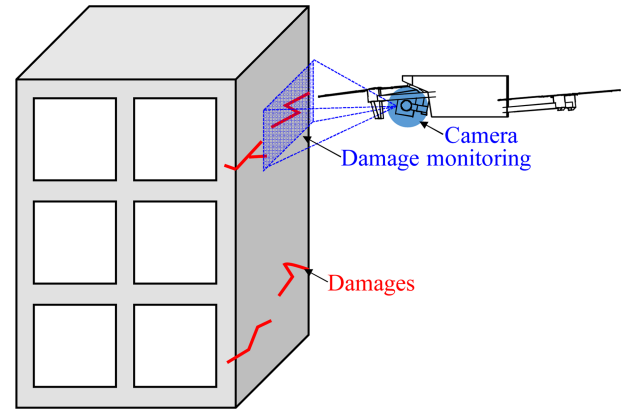
유지보수제는 방청, 방오, 방수 기능을 포함하여 다양한 종류가 있으며, 손상부는 적절한 유지보수제를 선택적 혹은 순차적으로 사용하여 유지보수한다. 따라서 드론부착형 분사장치는 다양한 크기를 가진 스프레이 유지보수제의 탈부착이 용이하여야 한다. 원통형 스프레이 유지보수제는 ‘V’ 형상의 치구에 고정하여 분사장치에 조립하며, 여러 크기의 ‘V’ 치구를 사용하여 유지보수제를 분사장치에 용이하게 탈부착한다.

## 2.2 손상부 유지보수 공정

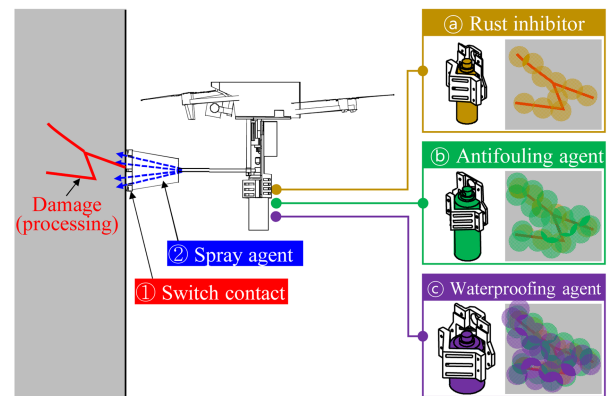
구조물 외부의 손상부는 Fig. 2(a)와 같이 드론에 장착한 카메라를 사용하여 지상에서 모니터링하며, 작업자는 지상에서 분사장치를 드론에 부착하고 고층의 손상부를 유지보수한다. 유지보수는 Fig. 2(b)와 같이 손상부에 따라서 방청, 방오, 방수 기능의 스프레이 유지보수제를 분사장치에 선택적 혹은 순차적으로 탈부착하여 진행한다.

## 3. 구조물 손상부 유지보수의 실험

본 연구에서 제안한 분사장치는 구조물을 적시에 능동 유지보수하기 위하여 상용 드론에 탈부착이 용이하며, 널리 사용하고 있는 상용 카메라 드론(Mavic3, DJI, China)에 부착하여 유지보수 여부를 확인한다.



(a) Damage monitoring of a structure using a drone



(b) Sequential spraying of maintenance agents

Fig. 2 Active maintenance processes for structure damages

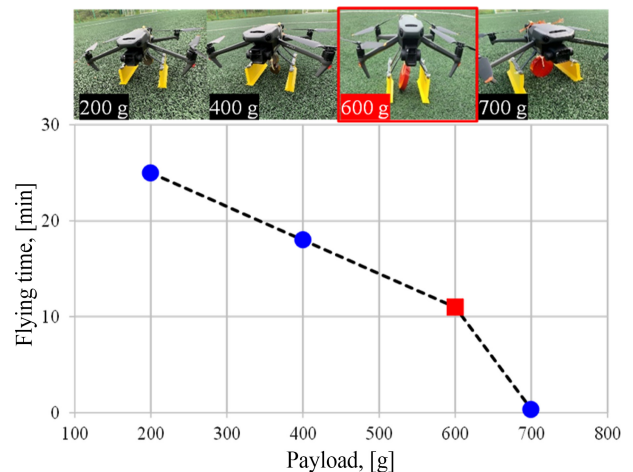
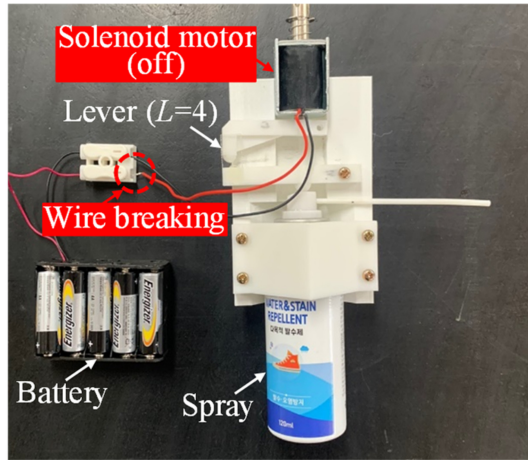


Fig. 3 Flying time of an experimental drone according to the payload

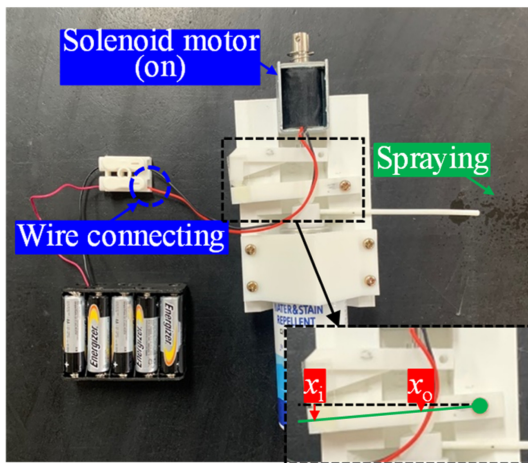
### 3.1 분사장치 제작

드론의 장시간 비행과 유지보수를 위하여 분사장치는 경량 설계가 필요하다. 본 연구에서 사용한 상용 드론은 카메라 드론이며, 제조사는 별도의 페이로드(Payload)를 제공하지 않는다. 따라서 페이로드에 따른 해당 드론의 비행시간을 Fig. 3과 같이 실험적으로 확인하였다. 드론의 비행시간은 페이로드의 증가에





(a) At wire breaking



(b) At wire connecting

Fig. 4 A testbed to determine the lever ratio for a spraying agent using a solenoid motor

따라 감소하며, 드론은 페이로드가 600 g 이상인 경우 불안정한 비행을 한다. 따라서 분사장치는 최대 중량 600 g을 가지도록 경량 설계하며, 이러한 경우 유지보수의 비행시간은 약 10분이다.

제작에 사용한 소형 솔레노이드는 구동력이 약 10 N이며, 실험적으로 확인한 스프레이 유지보수제의 최소 구동력은 약 30 N이다. 따라서 원활한 유지보수제 분사를 위하여 Fig. 4와 같이 레버 비율  $L = 4$ 를 가진 Testbed를 사용하여 솔레노이드 구동에 따른 스프레이 유지보수제의 분사를 확인하였다. 분사장치는 드론의 최대 페이로드 600 g 이내에서 3D 프린팅을 통하여 경량 제작하였으며, Fig. 5와 같이 페이로드 기준을 충족시킨다. 제작한 분사장치를 부착한 드론은 앞서 페이로드 실험과 같이 약 10분의 안정적인 비행시간을 나타낸다.

### 3.2 손상부 유지보수 실험

제작한 분사장치의 타당성은 경일대학교 건물에서 저층의 손상부에 적용하여 확인하고, 이후 해당 건물에서 고층의 손상부에 적용하여 유지보수한다. 손상부와 접촉하는 분사장치의

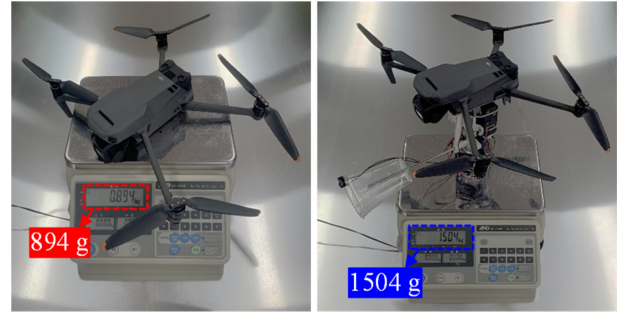


Fig. 5 Weight of the drone wo/w a spraying device

끝때기는 Fig. 5와 같이 투명한 재질로 제작하였으며, 이는 지상의 작업자가 육안으로 유지보수제의 분사여부를 Fig. 6과 같이 확인하기 위함이다.

#### (1) 저층의 손상부 유지보수

실험은 방청, 방오, 방수 기능을 가진 3가지 스프레이형 유지보수제를 각각 사용하였다. 유지보수는 2.2장에서 언급한 바와 같이 유지보수제를 순차적으로 분사장치에 부착하고 손상부에 분사하는 공정으로 진행한다. 건물의 저층 손상부는 실험자가 육안으로 선별하였으며, 이후 분사장치를 부착한 드론을 비행제어하여 Fig. 6과 같이 해당 손상부에 접촉하여 유지보수제를 분사하였다. 유지보수제의 분사여부는 손상부 주요 지점에서 RGB의 평균값을 사용하여 판단하였다. 구조물 손상부에서 주요 지점의 RGB 값은 보수 전/후 각각 (46, 26, 17), (162, 163, 158)이며, RGB의 평균값은 각각 30, 161으로 536%의 개선을 나타낸다. 따라서 구조물 손상부는 분사장치를 부착한 드론을 사용하여 성공적으로 유지보수 되었으며, 이를 통해 본 연구에서 개발한 분사장치의 타당성을 검증하였다.

#### (2) 고층의 손상부 유지보수

작업자의 접근이 어려운 고층의 손상부는 드론 촬영을 통하여 확인하였으며, 분사장치를 드론에 부착하고 방청, 방오, 방수의 유지보수제를 해당 손상부에 순차적으로 분사하였다. 손상부는 Fig. 6과 같이 유지보수 전/후에 명확한 차이를 보이며, 주요 지점의 RGB 값은 보수 전/후 각각 (75, 45, 29), (148, 133, 114)이며, RGB의 평균값은 각각 50, 132으로 264%의 개선을 나타낸다. 고층 손상부에서 RGB 평균값의 개선 정도는 저층 손상부의 개선 정도보다 작으며, 이는 고층에서 드론의 비행이 상대적으로 불안정하여 주요 지점에 집중적인 유지보수제 분사가 이루어지지 않아서 발생한다. 하지만 고층의 손상부에 유지보수제가 상당히 분사되었으며, 유지보수가 성공적으로 진행된 것을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 다양한 고층 구조물의 능동 유지보수를 위하여

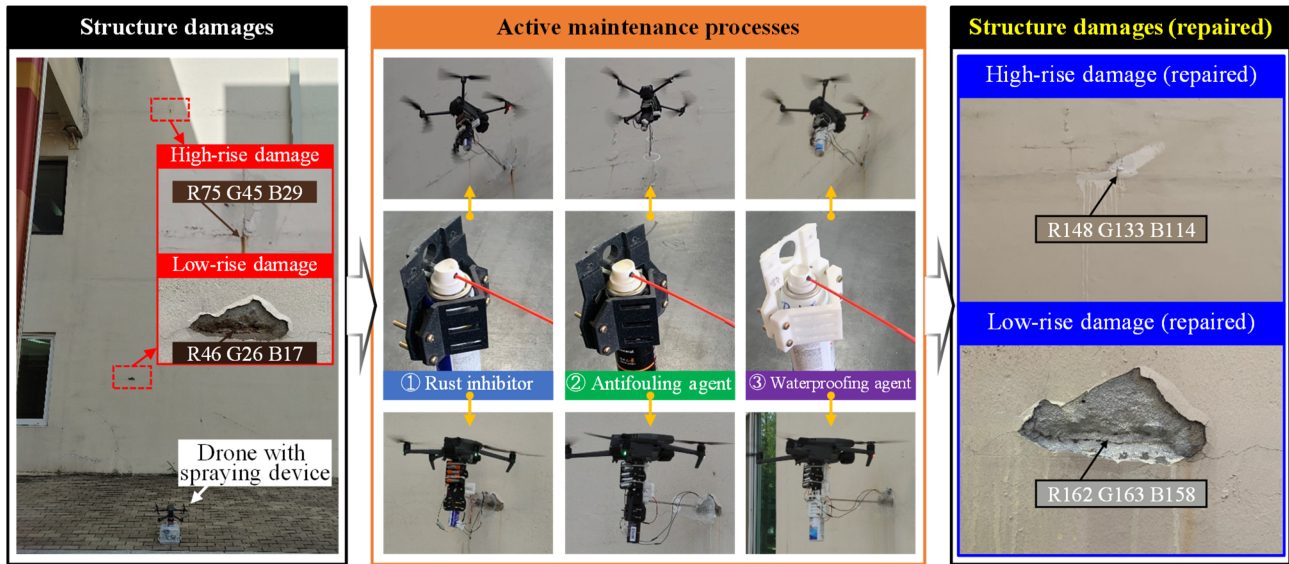


Fig. 6 Active maintenance processes using a drone with a spraying device for damages at high-/low-rise

구조물 접촉부, 분사 구동부, 유지보수제 탈부착부로 구성된 드론부착형 분사장치를 개발하였다. 분사장치는 구조물 손상부의 적시 유지보수를 위해 상용 드론에 스프레이형 유지보수제를 탈부착하도록 경량 설계하였다. 분사장치를 부착한 드론은 경일대학교 건물에서 저층과 고층의 손상부를 모두 유지보수하는 것을 확인하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 드론은 높은 공간접근성의 강점을 가지고 다양한 응용분야에서 지속적으로 확대 사용하고 있으며, 관심 대상의 영상 분석을 통하여 문제를 해결하는 장점이 있다. 기존 영상 분석의 수동적 문제해결뿐만 아니라 새로운 드론 장치와 공정을 개발하여 사회적 문제를 능동적으로 해결한다면 드론의 응용분야는 더욱 비약적으로 확장된다.

(2) 고도화된 현대 사회는 다양한 고층 구조물을 건설하며, 기존의 유지보수 방법은 작업자의 개입에 따라 비용이 증가하고 균열과 녹이 발생한 손상부를 적시에 유지보수하지 못하여 구조물의 수명이 감소하는 문제가 있다. 드론의 능동적 활용은 손상부에 대한 작업자의 접근성을 높이고, 적시에 유지보수하여 구조물의 수명을 크게 개선한다.

(3) 안전이 보장된 지상에서 드론을 사용한 유지보수는 작업자의 부상과 질병을 방지하고 저층과 고층의 여러 손상부에 대한 유연한 접근으로 작업 효율이 높다. 경일대학교 건물의 유지보수 실험은 저층과 고층에 발생한 균열을 총 10분 내외의 시간으로 작업자가 지상에서 안전하게 유지보수하며, 드론을 사용한 능동 유지보수 방법의 타당성을 나타낸다.

(4) 드론을 사용한 구조물 유지보수는 드론의 활용 영역을 일상생활로 확대하고, 사회적 주요 자산인 구조물의 수명 향상에

기여하여 사회적 기회비용을 개선한다. 하지만, 드론의 능동적 활용은 핵심 기술을 개발하여 주요 위험(사생활 침해, 오작동과 손상, 안전과 소음, 법적 책임)을 감소시키고, 사회적 혜택(구조물 수명 향상, 아파트를 포함한 개인 자산의 가치 증가)을 극대화하여 대중화하는 것이 필요하다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 논문의 실험에 참여한 경일대학교 기계자동차학부생, 신재혁, 손동화, 이성현, 김준규 학생에게 감사를 표합니다.

## REFERENCES

- Hassanalian, M., Abdelkefi, A., (2017), Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99-131.
- Korea Institute of Aviation Safety Technology, (2021), Domestic and foreign drone industry trends analysis report. [http://www.kdrone.org/bbs/board.php?bo\\_table=data\\_rep&wr\\_id=18&sst=wr\\_hit&sod=desc&sop=and&page=1](http://www.kdrone.org/bbs/board.php?bo_table=data_rep&wr_id=18&sst=wr_hit&sod=desc&sop=and&page=1)
- Drone Industry Insights, (2023), Global drone market report 2022-2030. <https://droneii.com/product/drone-market-report>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, (2017), Drone industry development basic plan. [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?lcmstage=1&id=95080117](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmstage=1&id=95080117)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, (2023), The 2nd drone industry development basic plan. [http://www.molit.go.kr/USR/BORD0201/m\\_69/DTL.jsp?mode=view&idx=253539](http://www.molit.go.kr/USR/BORD0201/m_69/DTL.jsp?mode=view&idx=253539)

6. Ministry of Science and ICT, (2018), Unmanned vehicle technology roadmap. <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&bbsSeqNo=65&nttSeqNo=1373988>
7. Ayamga, M., Akaba, S., Nyaaba, A. A., (2021), Multifaceted applicability of drones: A review, *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120677.
8. Ahmed, F., Mohanta, J., Keshari, A., Yadav, P. S., (2022), Recent advances in unmanned aerial vehicles: A review, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 7963-7984.
9. Mogili, U. R., Deepak, B., (2018), Review on application of drone systems in precision agriculture, *Procedia Computer Science*, 133, 502-509.
10. Hafeez, A., Husain, M. A., Singh, S., Chauhan, A., Khan, M. T., Kumar, N., Chauhan, A., Soni, S., (2022), Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review, *Information Processing in Agriculture*, 10(2), 192-203.
11. Kellermann, R., Biehle, T., Fischer, L., (2020), Drones for parcel and passenger transportation: A literature review, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100088.
12. Moshref-Javadi, M., Winkenbach, M., (2021), Applications and research avenues for drone-based models in logistics: A classification and review, *Expert Systems with Applications*, 177, 114854.
13. Rejeb, A., Rejeb, K., Simske, S., Treiblmaier, H., (2021), Humanitarian drones: A review and research agenda, *Internet of Things*, 16, 100434.
14. Daud, S. M. S. M., Yusof, M. Y. P. M., Heo, C. C., Khoo, L. S., Singh, M. K. C., Mahmood, M. S., Nawawi, H., (2022), Applications of drone in disaster management: A scoping review, *Science & Justice*, 62(1), 30-42.
15. Nwaogu, J. M., Yang, Y., Chan, A. P., Chi, H.-L., (2023), Application of drones in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry, *Automation in Construction*, 150, 104827.
16. Rakha, T., Gorodetsky, A., (2018), Review of unmanned aerial system (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones, *Automation in Construction*, 93, 252-264.
17. Kim, J. S., Yoon, H. J., Kim, D. H., Park, C. H., (2022), Evaluation of wind resistance of drone for unmanned inspection of railway facilities, *Journal of the Korean Society for Railway*, 25(9), 601-609. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2022.25.9.601>
18. Shin, C. H., Min, G. J., Kim, G. G., Jeon, P. R., Park, H., Cho, S. H., (2022), A study on the 3D precise modeling of old structures using merged point cloud from drone images and LiDAR scanning data, *Explosives & Blasting*, 40(4), 15-26. <https://doi.org/10.22704/ksee.2022.40.4.015>
19. Kim, J. M., Hyeon, S. G., Chae, J. H., Do, M. S., (2019), Road crack detection based on object detection algorithm using unmanned aerial vehicle image, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 18(6), 155-163.
20. An, Y. K., Bae, H. J., Jang, K. Y., (2021), Deep learning-based crack evaluation of bridges using drone and climbing robot, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 41(6), 349-357.
21. Kang, C. I., Lee, D. H., Chung, K. H., Ahn, H. J., (2022), Study on a wall climbing drone with tilt-rotor attitude conversion, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 10(1), 91-97.
22. Lee, D. H., Ahn, H. J., (2023), Adhesion force of the modular permanent magnet wheel-leg according to the posture of a wall climbing drone, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(6), 493-498. <https://doi.org/10.7736/JKSPE.022.132>
23. Kyungil University, (2020), Can-spray drones for building repair, 1020848530000. <http://kpat.kipris.or.kr/kpat/biblioa.do?method=biblioFrame>



**Seung-Han Yang**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interests are intelligent manufacturing systems and CAD/CAM.  
E-mail: syang@knu.ac.kr



**Kwang-Il Lee**

Associate Professor in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University. His research interest are CAD/CAM/CAE, mechanical design for automotive and precision engineering.  
E-mail: kilee@kiu.kr



## 로봇을 활용한 신발 갑피 접착제 도포 공정 자동화

## Automation of Shoe Upper Adhesive Spraying Process Using Robot

장원보<sup>1</sup>, 박상현<sup>1</sup>, 정성엽<sup>2</sup>, 황면중<sup>3,#</sup>, 김무림<sup>1,#</sup>

Won Bo Jang<sup>1</sup>, Sang Hyun Park<sup>1</sup>, Seong Youb Chung<sup>2</sup>, Myun Joong Hwang<sup>3,#</sup>, and Murim Kim<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 한국로봇융합연구원 인간중심로봇연구본부 (Human-Centered Robotics R&D Division, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence)

<sup>2</sup> 한국교통대학교 기계공학전공 (Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation)

<sup>3</sup> 서울시립대학교 기계정보공학과 (Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul)

# Corresponding Authors E-mail: mjhwang@uos.ac.kr, TEL: +82-2-6490-2389 ORCID:0000-0003-1272-9985

E-mail: mulimkim@kro.re.kr, TEL: +82-54-240-2531 ORCID:0000-0001-5420-9705

KEYWORDS: Shoe manufacturing process, Shoe upper adhesive dispensing automation

*It is challenging to automate the shoe upper adhesive spraying process using a robot due to the three-dimensional curved shape of the shoe upper. This paper proposes a method to automate the shoe upper adhesive spraying process with a 3-D measuring device and an industrial robot. The adhesive spraying automation process consists of the following steps, First, a transformation matrix calibration is performed to make the points measured by the 3-D measuring device and the robot end-effector points the same. Second, the shoe gauge line that connects the shoe adhesive spraying line measured by the 3D measurement device is smoothed. Lastly, the target points of the robot end-effector to quantitatively spray the adhesive are selected and the robot end-effector position/orientation to operate the robot is generated. The proposed method was validated on the test bed of a shoe upper spray system. With the method proposed in this paper, even non-robot experts can measure shoe gauge line data with a 3-D measuring device and the shoe upper adhesive spraying process can be automated without manually operating a robot.*

Manuscript received: August 26, 2023 / Revised: October 19, 2023 / Accepted: October 23, 2023  
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2023

### 1. 서론

일반적으로 신발 제조 공정은 수작업 공정이 대다수이며, 분진, 소음, 유해 물질 등 작업자들이 기피하는 공정이 많다. 그로 인해 새로운 노동 인력 진입이 어려워져 인력이 부족함과 동시에 생산 비용 증가로 생산성이 많이 하락하고 있다. 대다수 공정이 수작업으로 진행되고 있는 신발 제조 시장에서는 제화 공정 시스템에 대한 수요가 높으며, 국내외 기업 및 연구소에는 신발 제조 시장을 겨냥한 제화 공정 자동화 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다[1-6]. 하지만 신발의 다양한 디자인, 사이즈, 모델 등으로 인해 다품종에 적합한 자동화 공정 대응이 필요하며, 신발의 3차원 곡면 형상으로 인해 고난도의 자동화 기술에 요구되는 로봇 전문 인력과 현장 설치 및 적용에 막대한 시간과 비용이 소모되어 쉽게 제화 공정 자동화를 적용하기 어려운

실정이다.

신발은 Fig. 1과 같이 크게 상부에 해당하는 갑피(Upper)와 하부에 해당하는창(Sole)으로 구분된다. 제화 공정은 갑피와 창을 생산하는 생산 공정과 갑피와 창을 접착 결합하는 조립 공정으로 크게 분류가 되는데, 조립 공정은 다수의 작업자들의 수작업으로 이루어지고 있다. 신발 조립 공정에서는 신발 창과 갑피를 접착 결합하기 위해 창과 갑피 양쪽 접착면에 각각 접착제를 도포해야 한다. 하지만 갑피의 도포 경계면은 측면의 3차원 곡면 상에 형성되어 로봇을 활용한 자동화를 적용하기 위해 수십 개의 3차원 공간 로봇 교시점 생성과 같은 고난도의 자동화 기술이 필요하다.

현재 Fig. 2 [7]와 같이 수작업으로 이루어지는 갑피 접착제 도포 공정은 크게 2단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 작업자가 접착될 갑피와 창을 맞대어 도포 경계 라인(Gauge Line)을



Fig. 1 Structure of shoes

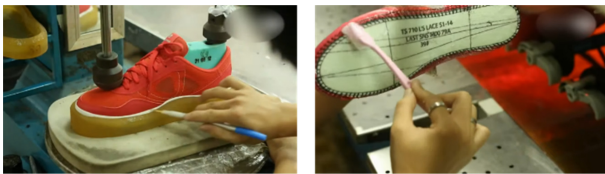


Fig. 2 Photos of the manual process of drawing a gauge line with a pen (left) and gluing (right) [7] (Adapted from Ref. 7 on the basis of website)

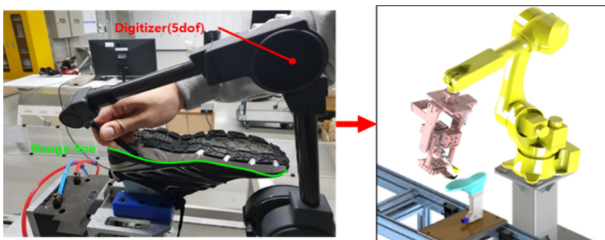


Fig. 3 Example of the proposed automation process of drawing a gauge line with the 3-D device (left) and gluing (right)

펜으로 표시하는 게이지 마킹 작업이 선행된다. 두 번째 단계에서는 접착제를 도포하는 작업자가 앞서 표시된 마킹된 게이지 라인을 따라 갑피에 접착제를 도포한다. 이와 같은 과정을 참고하여 기존 연구[4-6]들은 작업자가 도포 경계 라인을 펜으로 표시하는 작업을 Fig. 3과 같이 3차원 측정 센서로 마킹 데이터를 디지털화하며, 디지털화된 마킹 데이터를 바탕으로 로봇 작업 궤적 생성 후 로봇이 갑피 접착면에 접착제를 도포할 수 있게 한다.

기존 연구[5,6]에서는 비전, 구조광 스캐너와 같은 비접촉식 센서를 활용하여 신발 갑피 게이지 라인을 측정하고, 측정된 데이터를 기반으로 로봇 궤적 생성 기술을 적용하였다. 하지만, 신발 갑피 게이지 라인을 획득하기 위해 신발 형상 전체를 스캔할 수 있는 메커니즘과 스캔한 데이터에서 원하는 신발 게이지 라인을 정확하게 추출할 수 있는 최적화된 알고리즘 개발이 필요하다. 또한 조명, 분진 등과 같이 스캔 품질의 영향을 받을 수 있는 스캐너 특성상 현장에서 바로 적용하기 어렵다.

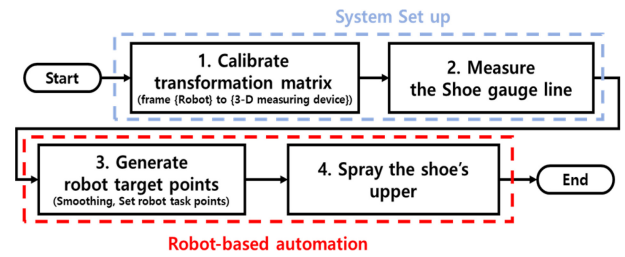


Fig. 4 Flow chart of automation of shoe upper adhesive spraying processing using robot

본 논문의 선행 연구[4]의 경우에는 현장에서 직관적으로 사용이 가능한 접촉식 센서인 3-D 디지털타이저와 갑피 회전 메커니즘을 활용하여 작업자가 신발 갑피 게이지 라인을 측정 한 후 접착제 도포를 위한 로봇 작업 궤적을 생성하였다. 그러나, 신발 게이지 라인 측정 시 회전 각도에 따라 측정 위치를 정확하게 매칭되어야 하며, 이를 위해 측정 장치와 회전 메커니즘 간 연동이 필요하다. 또한 디지털타이저로 측정된 데이터는 디지털타이저 기준 좌표계로 표현된 값으로 로봇 궤적 생성 시 로봇 기준 좌표계로 변환이 필요하다. 이 과정에서 정밀한 변환 행렬로 측정 데이터를 로봇 기준 좌표계로 변환해야 한다.

따라서 본 논문에서는 별도의 회전 메커니즘을 추가하지 않으며, 작업자가 직관적인 3-D 측정 장치를 활용하여 신발 갑피 게이지 라인을 측정한다. 로봇 궤적 생성 시 3-D 측정 장치와 로봇 간 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션을 통해 측정된 데이터를 보다 정밀하게 로봇 기준 좌표계로 변환하여 작업 품질을 향상시키고자 한다. 제안하는 방법을 구현하기 위해서 3-D 측정 장치와 로봇 간 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션이 선행되며, 신발 게이지 라인 측정 후 로봇 교시 데이터 생성, 로봇 접착제 분사 작업으로 Fig. 4의 순서로 진행된다.

본 논문의 2장에서는 3-D 측정 장치와 로봇 기준 좌표계 간 변환 행렬 캘리브레이션에 대해 설명한다. 3장에서는 측정 장치로 신발의 게이지 라인을 측정하고, 로봇으로 신발 갑피 접착제 분사를 위한 로봇 교시점 생성 방법을 설명한다. 4장은 앞서 기술한 방법들을 적용한 사용자 인터페이스와 테스트 베드에 실증한 사례를 보이고, 5장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

## 2. 측정 장치, 로봇 간 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션

본 논문에서는 3차원 측정 디바이스로 3-D (Three-Dimensional) 디지털타이저[8]를 사용하였다. 디지털타이저로 신발 게이지 라인을 측정하고, 측정된 위치를 로봇 기준 좌표계로 변환해야 한다. 디지털타이저에서 측정된 위치는 디지털타이저 좌표계를 기준으로 표현된 값으로 로봇에 적용하기 위해서는 로봇 기준 좌표계로 변환되어야 한다. 변환 행렬( $T_B^A$ )은 좌표계{A}를 기준으로 좌표계{B}의 상대적인 위치 벡터( $P$ )와 회전 행렬( $R$ )의 조합으로 표현되는 행렬로 정의하며, 식(1)과 같이 표현이 된다[9].

$$T_B^A = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

where,  $P = [x, y, z]^T$

$$R = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma)$$

$$= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_y(\beta) = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix},$$

$$R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix}$$

where,  $s(*) = \sin(*)$ ,  $c(*) = \cos(*)$

디지털라이저와 로봇 말단을 정확하게 매칭하기 위해서는 정밀한 변환 행렬이 필요하며, 디지털라이저와 로봇 기준 좌표계 간 정밀한 변환 행렬을 구하기 위해서 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션 수행하였다.

좌표계 변환 행렬 캘리브레이션은 식(2)에서 디지털라이저로 로봇 말단 위치를 측정하여 로봇 기준 좌표계로 변환한 값 ( $T_{Digitizer}^{Robot} \cdot P_{Digitizer}$ )과 로봇 기준 좌표계에서 계산된 로봇 말단 위치 값 ( $P_{Robot}$ ) 간 발생하는 위치 오차( $dP$ )값을 최소화하는 최적의 변환 행렬 파라미터를 찾아내는 방법이다.

$$dP = P_{Robot} - T_{Digitizer}^{Robot} \cdot P_{Digitizer} \quad (2)$$

$$dP = \frac{\partial T_x}{\partial x} \delta x + \frac{\partial T_y}{\partial y} \delta y + \frac{\partial T_z}{\partial z} \delta z + \frac{\partial T_\alpha}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial T_\beta}{\partial \beta} \delta \beta + \frac{\partial T_\gamma}{\partial \gamma} \delta \gamma \quad (3)$$

$$\text{where, } \frac{\partial T_i}{\partial i} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(T_{i+h} - T_i) \cdot P_{Digitizer}}{h}$$

$$T_i = T_{Digitizer}^{Robot}(i), i \in \{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\}$$

식(2)의 위치 오차( $dP$ )는 좌표계 변환행렬의 미소 변화에 관한 식(3)으로 나타내었다. 최종적으로 식(3)을 변환 행렬의 오차 파라미터로 나누고, 이를 파라미터의 오차에 대한 행렬식으로 표현하여 식(4)와 같이 자코비안 행렬식으로 표현한다[10].

$$\begin{bmatrix} dx_1 \\ dy_1 \\ dz_1 \\ \vdots \\ dx_n \\ dy_n \\ dz_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial T_x(1,4)}{\partial x}\right)_1 & \left(\frac{\partial T_\gamma(1,4)}{\partial \gamma}\right)_1 \\ \left(\frac{\partial T_x(2,4)}{\partial x}\right)_1 & \dots & \left(\frac{\partial T_\gamma(2,4)}{\partial \gamma}\right)_1 \\ \left(\frac{\partial T_x(3,4)}{\partial x}\right)_1 & \left(\frac{\partial T_\gamma(3,4)}{\partial \gamma}\right)_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial T_x(3,4)}{\partial x}\right)_n & \dots & \left(\frac{\partial T_\gamma(3,4)}{\partial \gamma}\right)_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta \alpha \\ \delta \beta \\ \delta \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

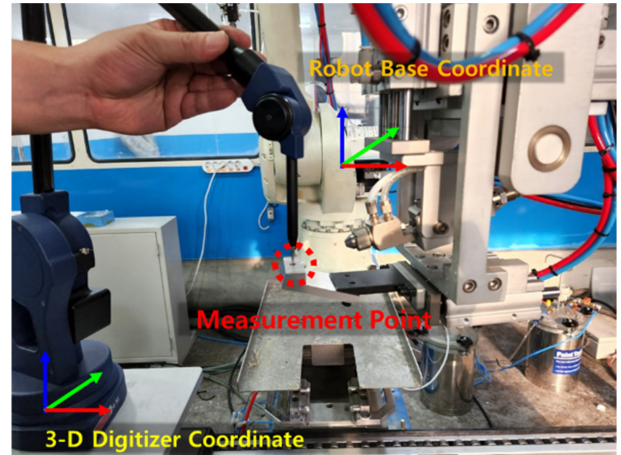


Fig. 5 Example of a measurement method for calibration

where,  $K(i, j)$ : Element in column  $j$  of row  $i$  of matrix  $K$

$$Y = J\Delta X \quad (5)$$

$$\Delta X = (J^T J)^{-1} J^T Y \quad (6)$$

where,  $\Delta X = [\delta x, \delta y, \delta z, \delta \alpha, \delta \beta, \delta \gamma]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$

$$J = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial T_x(1,4)}{\partial x}\right)_1 & \left(\frac{\partial T_\gamma(1,4)}{\partial \gamma}\right)_1 \\ \left(\frac{\partial T_x(2,4)}{\partial x}\right)_1 & \dots & \left(\frac{\partial T_\gamma(2,4)}{\partial \gamma}\right)_1 \\ \left(\frac{\partial T_x(3,4)}{\partial x}\right)_1 & \left(\frac{\partial T_\gamma(3,4)}{\partial \gamma}\right)_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial T_x(3,4)}{\partial x}\right)_n & \dots & \left(\frac{\partial T_\gamma(3,4)}{\partial \gamma}\right)_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3n \times 6},$$

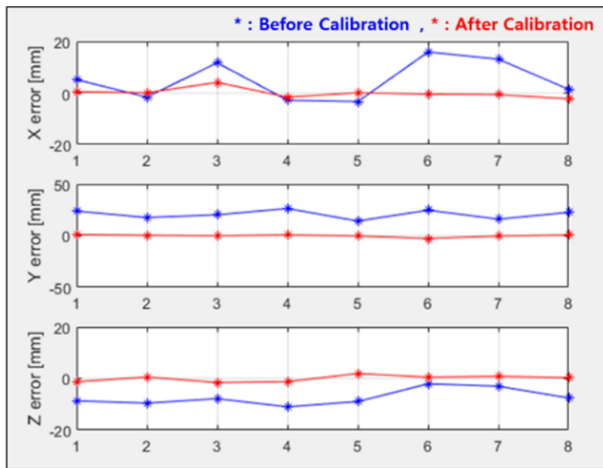
$$Y = \begin{bmatrix} dx_1 \\ dy_1 \\ dz_1 \\ \vdots \\ dx_n \\ dy_n \\ dz_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$$

$n = \text{Number of measurement } (n \geq 2)$

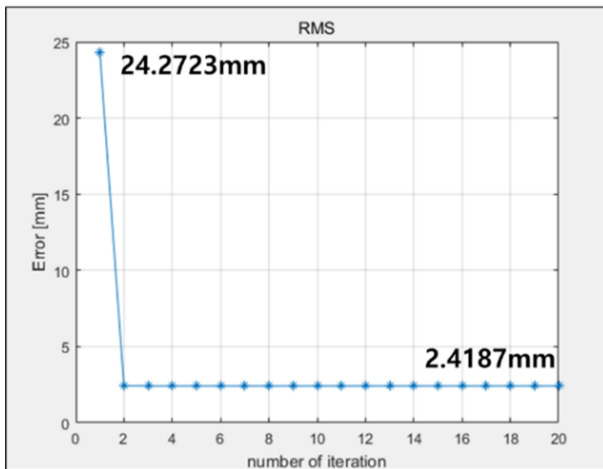
식(4)를 행렬로 이루어진 일차 선형 방정식(5)으로 표현하였으며, 식(5)에서 오차 파라미터 행렬인  $\Delta X$ 를 구하기 위해 식(6)과 같이 의사 역행렬(Pseudo Inverse Matrix) 형태로 하여 변환 행렬 오차 파라미터를 계산한다. 계산되어 나온 변환 행렬 오차 파라미터는 변환 행렬 공칭 파라미터에 반복적으로 보정한다. 정확한 변환 행렬 보정 파라미터 값을 산출하기 위해서 최소 측정 회수인 2회 이상으로 서로 다른 위치에 대해 측정하였다. 본 논문에서 Fig. 5와 같이 로봇 말단에 위치 측정 지그를

Table 1 Result of coordinate transformation matrix parameter calibration

Parameter [mm, rad]	x	y	z	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Nominal	310.0	1050.0	-250.0	0	0	0
Calibration	315.50	1065.5	-257.2	-0.0408	0.001	0



(a)



(b)

Fig. 6 Graph of comparison before/after calibration (a): error position of measured points (b): RMS error of measured points

설치하여 로봇 말단의 위치를 3-D 디지털라이저가 측정할 수 있으며, 서로 다른 3차원 위치 8곳을 측정하였다. 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션 결과 공칭 변환 행렬 파라미터 대비 보정된 변환 행렬 파라미터를 Table 1로 나타내었다.

Fig. 6(a)에서는 측정한 위치 8곳에 대해서 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션 전과 후를 비교하였다. Fig. 6(b)에서는 위치 오차 데이터 8개에 대한 RMS (Root Mean Square) 값을 나타내었다. 캘리브레이션을 수행하기 위한 반복 회수는 총 20회로 설정하였으며, 캘리브레이션 전후로 RMS 값이 24.2723 mm에서

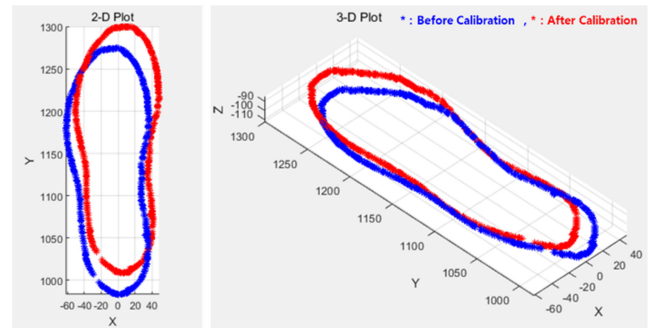


Fig. 7 Graph of comparison before/after calibration of shoe gauge line

2.4187 mm로 약 90% 감소하였다. Fig. 7에서는 측정된 신발 게이지 라인 데이터에 대한 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션 전과 후의 변환 그래프를 나타내었다. 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션을 통해 측정 장치, 로봇 간 좌표계 변환 행렬의 정밀한 값을 확인할 수 있다.

### 3. 접착제 분사를 위한 로봇 교시 데이터 생성

#### 3.1 측정 점 후처리

로봇으로 신발 갑피 접착제 분사를 수행하기 위해서는 로봇의 접착제 분사 경로를 생성해야 한다. 분사 경로는 사용자가 디지털라이저를 이용하여 신발의 창과 갑피의 게이지 라인을 측정한 데이터를 로봇 기준 좌표계로 변환해야 한다. 하지만, 작업자가 디지털라이저로 측정 시 손 떨림, 측정 실수 등으로 의도한 경로에 오차가 발생할 수 있으며, 측정 점들의 형태가 불연속적으로 샘플링 되는 경우가 있다[11]. 로봇은 접착제 분사를 원활히 수행하기 위해서 주어진 작업 점들을 연속적으로 연결이 되어야 하며, 불연속적인 작업 점들에 대해 평활화(Smoothing) 과정이 필요하다.

Fig. 8에서 디지털로 표현된 게이지 라인을 평활화 하기 위해서 식(7)에서 3차원 직교 좌표계(X-Y-Z)로 표현된 측정 데이터셋의 중심 점을 구하고, 식(8), 식(9)에서 중심 점으로부터 거리( $r$ )와 각도( $\theta$ )로 하여 높이( $z$ )와 함께 표현되는 원통형 좌표계( $r-\theta-Z$ )로 변환하였다. 변환 결과 Fig. 9(a)와 같이 각도에 대한 거리 관계 식으로 표현된 그래프와, Fig. 9(b)와 같이 각도에 대한 높이 관계 식으로 표현된 그래프로 나타내었다. 변환된 관계식을 3차 평활화 스플라인 알고리즘[12]을 적용한 결과 각각의 그래프에 대해 Figs. 10(a), 10(b)와 같이 부드러운 라인으로 평활화되는 것을 확인할 수 있다.

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, y_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (7)$$

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (8)$$



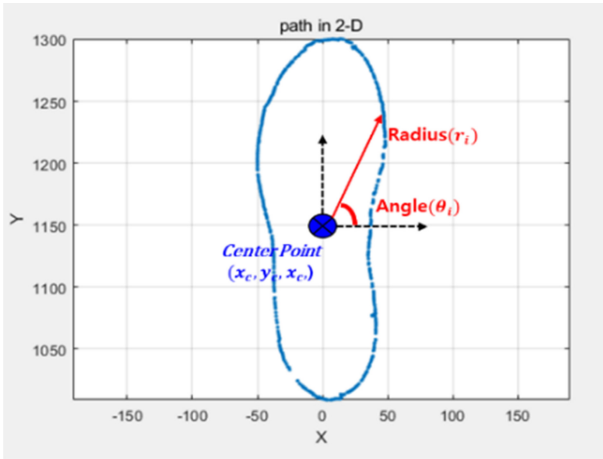


Fig. 8 Measurement point of the shoe gauge line

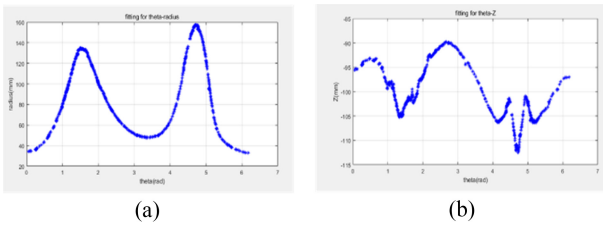


Fig. 9 Graph of cylindrical coordinate (a): The function of distance for angle  $R(\theta_i)$  (b): The function of height for angle  $Z(\theta_i)$

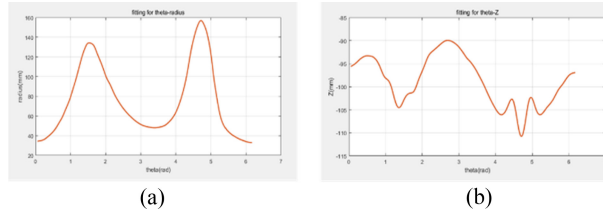


Fig. 10 Result of smoothing algorithm in cylindrical coordinate (a): The function of distance for angle  $R(\theta_i)$  (b): The function of height for angle  $Z(\theta_i)$

$$\theta_i = \text{atan2}((y_i - y_c), (x_i - x_c)) \quad (9)$$

평활화 알고리즘이 적용되어 원통형 좌표계로 표현된 결과 값들을 다시 3차원 직교 좌표계로 변환하였다. 최초 측정된 데이터 셋 Fig. 11(a)에서 평활화 알고리즘 처리된 데이터 셋 Fig. 11(b)를 비교하였을 때 보다 매끄럽고, 연속적인 형태가 만들어진 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 로봇 작업 점 선정 및 로봇 교시 데이터 추출

갑피 접착제 도포 공정에서는 접착제를 갑피에 정량적으로 도포하는 것이 중요하다. 로봇으로 접착제를 정량적으로 도포하기 위해서 일정한 간격을 가진 로봇 작업 점으로 구성되어야 한다.

Fig. 12과 같이 사용자가 도포 조건에 해당하는 로봇 작업 점

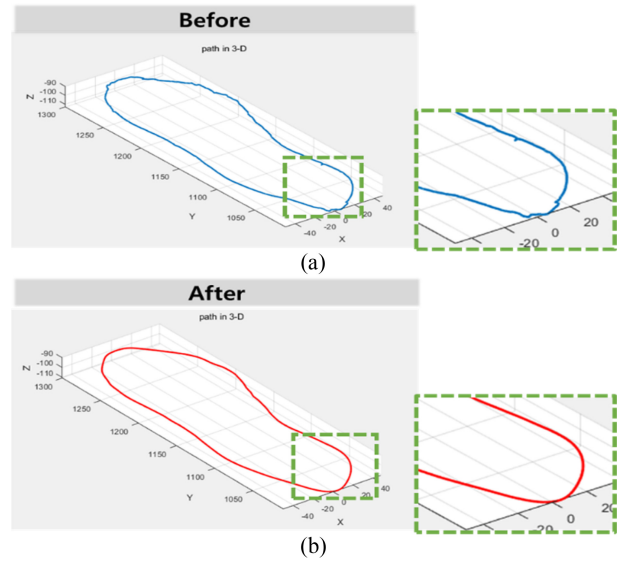


Fig. 11 Graph of result gauge line: (a) before smoothing algorithm, (b) after smoothing algorithm

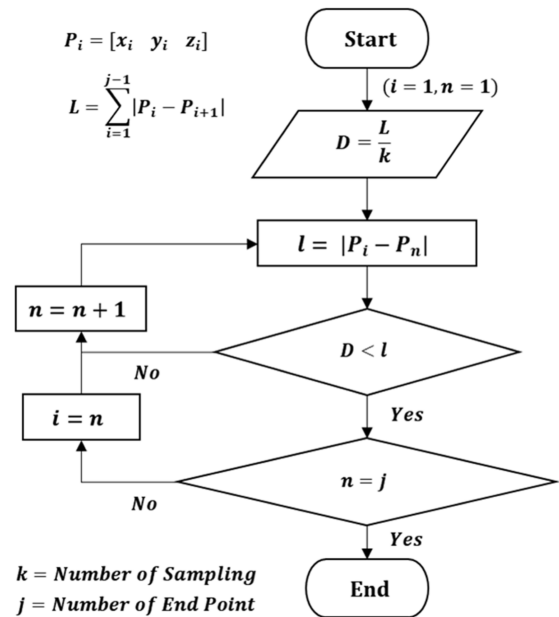


Fig. 12 Flow chart of robot task point selection algorithm

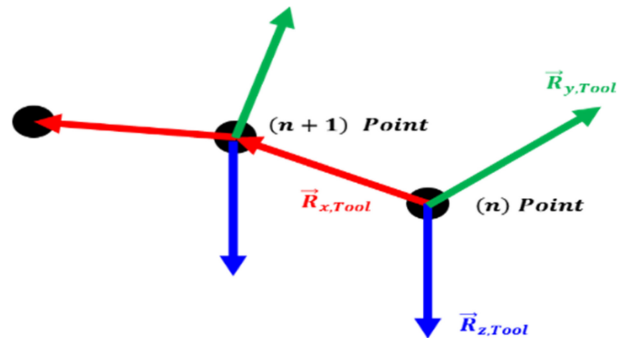


Fig. 13 Example of defining robot orientation on task point

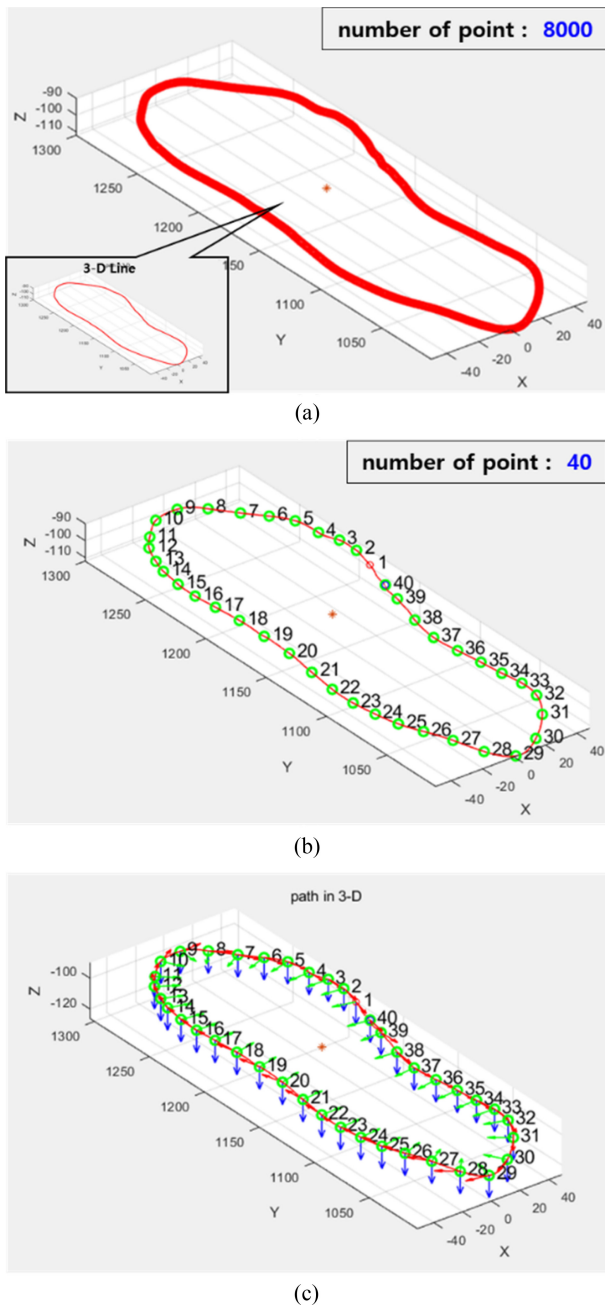


Fig. 14 Result of set robot task point (a): sampling data in 3-D gauge line (b) selected robot task data in sampling data (c) defined robot task points (position, orientation)

개수( $k$ )를 입력한다. 입력된 측정 포인트 중 이전 점( $i$ )부터 다음 점( $i+1$ )까지의 거리들을 순서대로 합한 값을  $L$ 로 정의하였으며,  $L$ 을 로봇 작업 점 개수만큼 나눈 값을 기준 거리( $D$ )라고 정의하였다. 시작 점에서 기준 거리에 만족하는 다음 점을 로봇 작업 점으로 선정하고, 이 점을 기준으로 다음 기준 거리에 만족하는 점을 로봇 작업 점으로 선정하였다.

로봇이 작업 점 위치에서 접착제 도포를 할 수 있도록 Fig. 13과 같이 로봇 툴의 방향을 정의하였다. 로봇 툴의 방향은 세 가지 방향 벡터( $\vec{R}_{Tool,x}$ ,  $\vec{R}_{Tool,y}$ ,  $\vec{R}_{Tool,z}$ )로 구성되어야 한다.

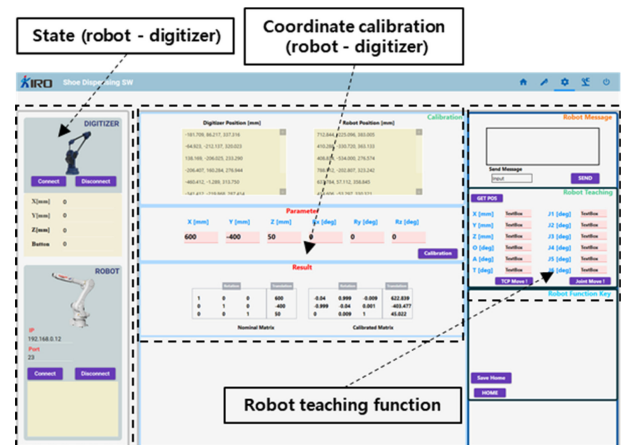


Fig. 15 GUI for calibration of transform matrix (robot-digitizer reference coordinate)

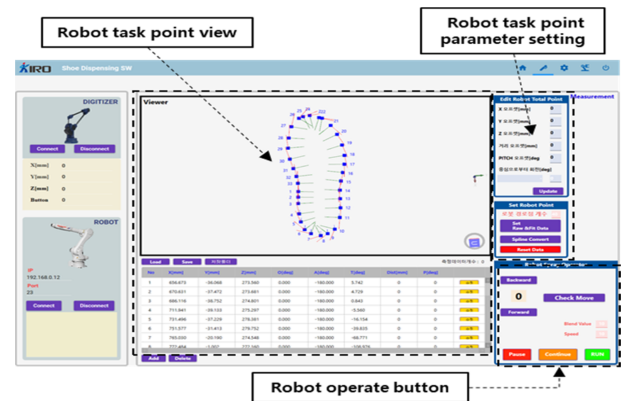


Fig. 16 GUI for measurement of shoe gauge line and set of robot task points for adhesive spraying

선정된 현재 작업 점과 다음 작업 점 간의 기울기 방향 벡터를  $\vec{R}_{Tool,x}$ , 동일한 평면에서  $\vec{R}_{Tool,x}$ 와 수직인 방향 벡터를  $\vec{R}_{Tool,y}$ , 두 개의 방향 벡터  $\vec{R}_{Tool,x}$ ,  $\vec{R}_{Tool,y}$ 를 외적인 방향 벡터를  $\vec{R}_{Tool,z}$ 로 하여 로봇 툴의 방향을 정의하였다.

앞서 기술한 로봇 작업 점 선정 알고리즘을 적용하기 위해 후처리 된 신발 게이지 라인을 Fig. 14(a)과 같이 약 8,000개의 데이터로 샘플링하였다. 샘플링 된 데이터를 바탕으로 로봇 작업 점 선정 알고리즘을 적용하였으며, Fig. 14(b)과 같이 로봇 작업 점 40개를 선정하였다. 마지막으로 로봇 툴 방향 정의에 따라 Fig. 14(c)과 같이 선정된 40개의 로봇 작업 점에 대해 툴 방향을 정의하여 로봇 교시 데이터로 표현하였다.

#### 4. 갑피 접착제 도포 SW 인터페이스 및 실증

본 논문에서 제안하는 로봇을 활용하여 신발 갑피 접착제 도포 자동화 방법을 적용하기 위해 Figs. 15, 16과 같은 사용자 인터페이스 SW를 개발하였다. 앞서 2장에서 기술한 방법들을



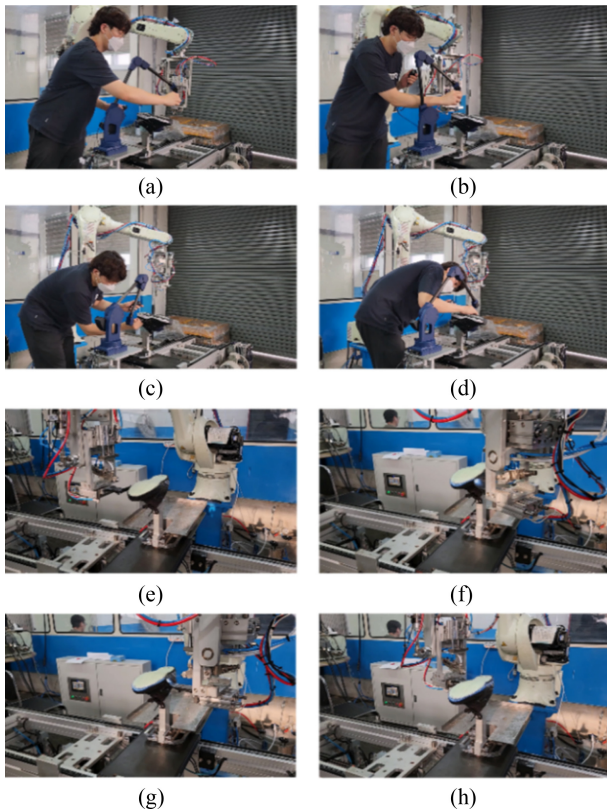


Fig. 17 Process of automation method of shoe upper adhesive spraying using a robot (a)-(b): the process of calibration of transform matrix, (c)-(d): a measure of shoe gauge line, (e)-(h), shoe upper adhesive spraying using a robot

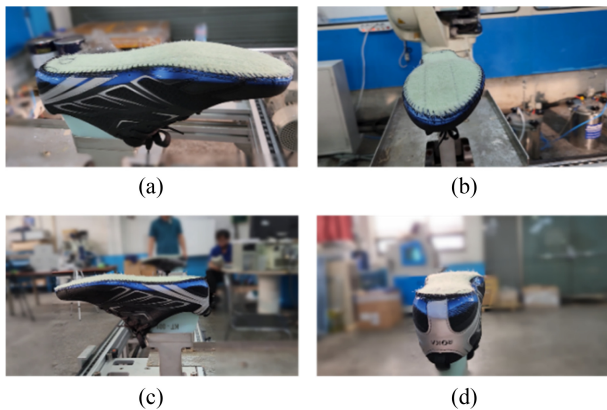


Fig. 18 Result of the experiment (a): right side view, (b): front view, (c) left side view, (d) rear view

하나의 SW에 기능을 추가하였다. Fig. 15에서 신발 갑피 작업 점을 추출하기 전에 최초 1회 로봇과 측정 장치 간 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션을 수행한다. 결과로 나온 보정된 변환 행렬 값은 데이터 베이스에 저장되어 이후 새로운 신발 모델이 추가되어 작업 점을 추출하기 위해서 별도의 캘리브레이션 작업을 수행하지 않아도 된다.

Fig. 16에서는 신발 갑피 작업 점을 측정한 후 측정된 데이터를

평활화하는 후처리 과정을 거치며, 로봇 작업 점 결과를 모니터링을 할 수 있게 그래픽 인터페이스를 추가하였다. 작업자가 신발 갑피 형태와 분사 조건에 따라 로봇 작업 점 개별 혹은 모든 작업 점에 대하여 분사 거리, 분사 각도, 분사 방향 등을 수정할 수 있도록 파라미터 설정 인터페이스를 추가하였다. 앞서 설정된 로봇 작업 점을 순차적으로 테스트할 수 있게 로봇 구동 기능을 추가하였다.

Figs. 17(a)와 17(b)에서 신발 갑피 접착제 도포 시스템을 설치하고 디지털타이저와 로봇 간 좌표계 캘리브레이션을 수행한다. Figs. 17(c)와 17(d)에서는 작업할 신발에 대하여 신발의 게이지 라인을 3D 디지털타이저로 측정한다. 측정된 데이터를 로봇 작업 데이터로 변환한 후 로봇 구동 명령을 수행하여 Figs. 17(e)부터 17(h)와 같이 주어진 작업 점에 대하여 로봇이 신발 갑피에 접착제를 도포한다. 도포 결과 Figs. 18(a)부터 18(d)와 같이 신발 갑피에 접착제가 도포되는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문은 신발 제조 공정 중 수작업으로 이루어지고 있는 신발 갑피 접착제 도포 공정을 로봇으로 활용하여 자동화하는 방법을 제안하였다. 신발 갑피 접착제 도포 자동화 과정에서 좌표계 변환 행렬 캘리브레이션을 수행하여 디지털타이저로 측정된 신발 접착제 도포 작업 점을 효과적으로 로봇에 활용할 수 있도록 하였다. 제안하는 로봇 자동화 방법을 하나의 사용자 인터페이스 SW로 개발 후 테스트 베드에 적용하여 검증하였다. 본 논문에서 제안하는 방법을 통해 로봇 비전문가인 작업자가 디지털타이저로 다양한 신발 모델의 게이지 라인 데이터를 측정하여 별도의 로봇 조작 없이 갑피 접착제 도포 자동화 공정을 수행할 수 있다.

향후 제안한 방법을 실제 공정에 적용하기 위한 고도화 개발을 수행할 예정이며, 신발 갑피 게이지 라인 측정 방법에 대해서 3차원 비전과 같은 비접촉식 센서를 사용하거나 수작업을 최소화하는 방법으로 적용할 계획이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상자원부 로봇산업핵심기술개발사업(No. 20023606, 조립 포장 검사 등을 포함하는 셀생산 공정에서의 신속한 자동화 적용수정을 위하여 빠르게 재구성이 가능한 로봇 톱 워크셀 기술)의 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

## REFERENCES

1. Kim, J., Park, S. H., Shin, D. G., Kim, M. G., Chung, S. Y.,

- Hwang, M. J., Jin, M., (2021), 3-D model-based trajectory generation algorithm for robotic shoe sole spray system, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 38(11), 825-832.
2. Oliver, G., Gil, P., Gomez, J. F., Torres, F., (2021), Towards footwear manufacturing 4.0: Shoe sole robotic grasping in assembling operations, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 114, 811-827.
3. Luh, Y.-P., Huang, L.-C., Lu, H.-J., Chu, C.-H., (2020), A smart manufacturing solution for multi-axis dispenser motion planning in mixed production of shoe soles, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 7, 769-779.
4. Kim, M.-G., Kim, J., Chung, S. Y., Jin, M., Hwang, M. J., (2022), Robot-based automation for upper and sole manufacturing in shoe production, Machines, 10(4), 255.
5. Wu, X., Li, Z., Wen, P., (2016), An automatic shoe-groove feature extraction method based on robot and structural laser scanning, International Journal of Advanced Robotic Systems, 14(1), 1729881416678135.
6. Lee, C.-Y., Kao, T.-L., Wang, K.-S., (2018), Implementation of a robotic arm with 3D vision for shoes glue spraying system, Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence, 562-565.
7. The SOLE PLANET, An A-Z sport shoe making process. <https://www.youtube.com/watch?v=nqQrSg-jq70>
8. Revware Inc., MicroScribe® M product overview. <https://revware.net/wp-content/uploads/2021/04/MicroScribe-M-Product-Sheet-Rev-I.pdf>
9. Craig, J. J., (2017), Introduction to robotics: Mechanics and control, Pearson Education. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/introduction-to-robotics-mechanics-and-control/P200000003304/9780133489798>
10. Jang, W. B., Park S. H., Jin. M (2021), A method of calibration transformation matrix between robot and measuring sensor for automation of shoe manufacturing process, Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering 2021 Spring Conference, 240.
11. Jang, W. B., Park, S. H., Lee, J. Y., Jin, M., Chung, S. Y., Hwang, M. J. (2021), Robot path smoothing using discrete measured points, Proceedings of the 36th ICROS Annual Conference on the Institute of Control, Robotics and Systems, 651-652. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10609486>
12. MathWorks®, Cubic smoothing spline. <https://www.mathworks.com/help/curvefit/csaps.html>



#### Won Bo Jang

Researcher at the Korea Institute of Robotics and Technology Convergence (KIRO). His research interests include robotic manipulations, kinematic calibrations, and automation.

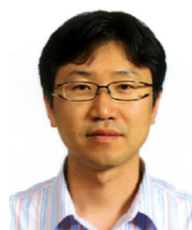
E-mail: onestep@kiro.re.kr



#### Sang Hyun Park

Principal Researcher at the Korea Institute of Robotics and Technology Convergence (KIRO). His research interests include robotic manipulations.

E-mail: shpark@kiro.re.kr



#### Seong Youb Chung

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation. His research interests include robot control and vision.

E-mail: sychung@ut.ac.kr



#### Myun Joong Hwang

Associate Professor in the Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul. His research interests include robot motion planning, motion control, and field robotics.

E-mail: mjhwang@uos.ac.kr



#### Murim Kim

Chief Researcher and Center Director with the Korea Institute of Robots and Convergence (KIRO). His research interests include robot motion control, disaster robotics, and factory automation.

E-mail: mulimkim@kiro.re.kr

## 유정압베어링 설계 최적화 모듈 개발

# Development of Design Optimization Module for Hydrostatic Bearings

김경호<sup>1,#</sup>, 오정석<sup>1</sup>

Gyungho Kim<sup>1,#</sup> and Jeong Seok Oh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 초정밀장비연구실 (Department of Ultra-Precision Machines & Systems, Korea Institute of Machinery and Materials)  
# Corresponding Author / E-mail: [gyungho@kimm.re.kr](mailto:gyungho@kimm.re.kr); TEL: +82-42-868-7105  
ORCID: 0000-0002-1130-3176

KEYWORDS: Hydrostatic bearing (유정압베어링), Design optimization (설계 최적화), Stiffness (강성), Load capacity (부하용량), Particle swarm optimization algorithm (입자 군집 최적화 알고리즘), Genetic algorithm (유전자 알고리즘)

*This paper presents the development of a design optimization module for achieving the best performance of hydrostatic bearings. The design optimization module consists of two components: a bearing performance analysis module and an optimization module that utilizes optimization algorithms. Widely recognized global search methods, genetic algorithm (GA), and particle swarm optimization (PSO) algorithm, were employed as the optimization algorithms. The design optimization problem was defined for hydrostatic bearings. Optimization design processes were carried out to improve load capacity, stiffness, and flow rate. Subsequent experimental validation was conducted through the fabrication of a practical experimental setup. The design optimization model demonstrated superior performance compared to the initial model while satisfying design conditions and constraints. This confirms the practical applicability of the design optimization module developed in this study.*

Manuscript received: August 29, 2023 / Revised: October 23, 2023 / Accepted: October 24, 2023

### 1. 서론

유정압베어링은 직선이나 회전운동을 하는 표면에서 비접촉 방식으로 부하를 지지하고, 원하는 방향으로 운동을 안내하는 기계요소로, 부하용량과 강성이 클 뿐만 아니라 저마찰로 인한 정밀한 이송이 가능하여 공작기계, 연삭기와 같은 다양한 생산 장비의 베어링으로 널리 사용되고 있다[1-3]. 유정압베어링은 구름 베어링과 달리 규격품이 없는 관계로 설계자가 직접 설계해서 사용해야 하며, 따라서 모세관이나 패드 사이즈, 공급압력, 간극 등의 설계정보로부터 부하용량이나 강성, 유량 등의 성능 해석을 통해 설계가 이루어진다. 그러나 목표로 하는 성능을 만족하지 못할 경우 이런 설계변수를 변경하여 재설계가 이루어져야 하며, 이때 유정압베어링의 특성에 대해 완벽하게 이해하지 못하면 설계변수 변경 시 상당한 어려움에 직면하게 된다. 특히, 성능에 대해 서로 상반된 결과를 도출하는 설계변수들이

있는 경우에는 유정압베어링에 대한 배경지식이 있다 해도 직접적인 설계가 어려울 수 있다.

따라서 이러한 문제 해결을 위해 유정압베어링의 설계 최적화에 대한 연구[4-15]가 진행되었다. 70-80년대에 수행된 연구[4-8]는 적절한 최적화 알고리즘의 부재로 인해 최적화 알고리즘을 직접적으로 적용한 것이 아니라 해석적인 방법을 통해 도표를 작성하고 이로부터 최적의 파라미터를 선정하는 방식으로 이루어져 복잡한 최적화 설계 문제에 대응하지 못하는 한계를 보이고 있다. 최근의 유정압베어링 최적설계 동향에 대해 살펴보면, 유정압베어링의 에너지(Minimum Power Loss) 측면에서의 최적화를 위해 순차적 이차 프로그래밍(Sequential Quadratic Programming, SQP) [9]과 향상된 회색늑대 알고리즘(Enhanced Grey Wolf Optimizer, EGWO) [10]을 사용한 연구가 진행되었다. 유정압베어링의 모세관 저항요소를 서보밸브로 대체한 서보 제어형 능동 유정압베어링을 개발하고, 제어



및 제어시스템의 최적화를 통해 유정압베어링의 성능을 향상시켰으며[11], 전산유체역학(CFD) 해석 결과를 기반으로 유정압베어링 패드의 기하학적 최적화(포켓 면적 및 위치)를 수행하였다[12]. 유정압베어링이 적용된 유니트, 장비 측면에서의 최적화를 살펴보면, 연삭기용 유정압 스프인들의 선단강성만을 대상으로 황금분할법(Golden Section Search) 알고리즘을 사용하여 최적화를 수행한 연구[13] 및 전체 공작기계 가이드웨이 설계측면에서의 유정압베어링 최적화를 다룬 연구가 진행되었다[14]. 이 논문에서는 기계 프레임의 구조적인 변형을 유한요소해석(FEM)을 통해 예측하고 이를 유정압베어링 설계(패드 위치 및 개수 등에 반영하였다. 이와 비슷하게, 슬라이드 캐리지(Carriage) 내의 유정압 램(Ram)의 정동적 성능을 향상시키기 위해 이분법(Bisection Method)을 이용하여 최적의 공급압력과 패드 사이스를 결정한 연구도 있다[15].

이와 같이 유정압베어링의 최적화는 설계목적에 맞게 부분적으로 진행되어 왔으나, 유정압베어링 자체의 다양한 설계변수 및 성능, 제한조건을 동시에 고려하여 종합적으로 최적설계를 수행한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이들을 모두 고려할 수 있도록 설계 최적화 모듈을 개발하였으며, 구축된 최적화 모듈을 통해 유정압베어링의 최적화를 수행하고, 실험장치를 제작하여 최적화 설계 결과를 검증하였다.

## 2. 유정압베어링 설계 최적화 모듈

### 2.1 설계 최적화 모듈의 구성

유정압베어링 설계 최적화 모듈은 기본적으로 유정압베어링의 성능을 해석하는 성능해석 모듈과 해석된 성능을 최적화하여 설계변수를 결정하는 최적화 모듈로 구성되어 있다. Fig. 1은 설계 최적화 모듈의 전체적인 구성도를 보여준다. 최적화 모듈에서 최적화를 위한 설계변수 및 목적함수, 제한조건 등을 정의하고, 주어진 조건에서 성능해석을 한 후 적합도를 평가하여 목표표로 하는 성능을 달성할 때까지 최적화 알고리즘을 통해 반복적인 계산이 수행된다.

### 2.2 유정압베어링 성능해석 모듈

유정압베어링은 저항요소(Restrictor)의 종류에 따라 크게 모세관(Capillary)과 정유량(Constant Flow) 타입으로 구분할 수 있으며, Fig. 2는 일반적으로 많이 사용되는 모세관형 유정압베어링의 구조 및 주요 변수를 보여준다.  $P_s$ 는 공급압력,  $P_a$ 는 대기압력,  $P_r$ 는 포켓 압력,  $h$ 는 간극,  $W$ 는 외부하중,  $Q_{in}$ 과  $Q_{out}$ 은 각각 유입유량 및 유출 유량을 의미한다.

유정압베어링의 주요성능은 레이놀즈 방적식으로부터 유도할 수 있으며[1-3], 최종적으로 부하용량( $C_p$ ), 강성( $K$ ), 유량( $Q$ )에 대한 수식을 간단히 정리하면 식(1)과 같다.  $A_{eff}$ 는 베어링 유효면적,  $b$ 는 압력비,  $B$ 는 베어링 유량계수,  $\mu$ 는 점성계수를 의미한다.

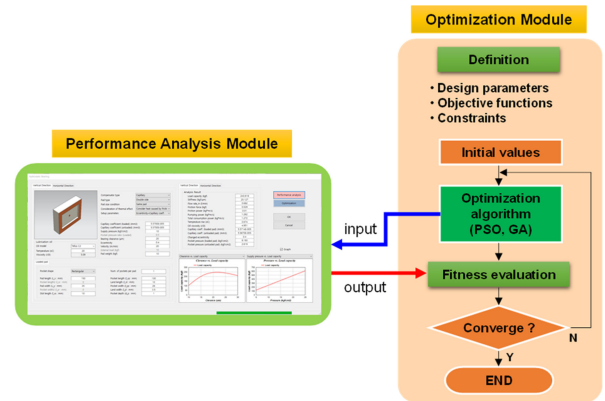


Fig. 1 Overall configuration of the design optimization module

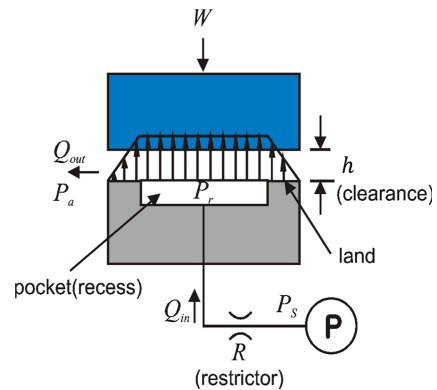


Fig. 2 Structure of capillary-type hydrostatic bearing

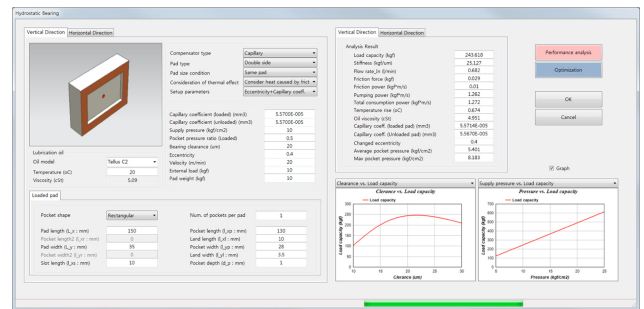


Fig. 3 Performance analysis module for hydrostatic bearings

$$C_p = A_{eff}(P_r - P_a)$$

$$K = \frac{3C_p(1-\beta)}{h} \quad (1)$$

$$Q = Bh^3/\mu(P_r - P_a)$$

Fig. 3은 유정압베어링에 대해 개발된 성능해석 모듈(S/W)을 보여주고 있다.

### 2.3 설계 최적화 모듈

#### 2.3.1 최적화 알고리즘

최적화 알고리즘에는 크게 도함수(Derivative)에 기반한 방법과

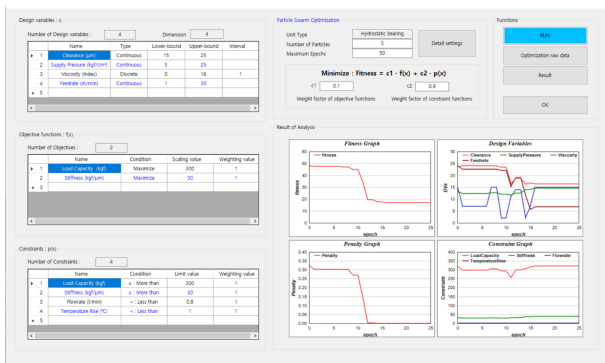


Fig. 4 Optimization module for hydrostatic bearings

도함수가 필요 없는 방법이 있다[16]. 도함수가 필요한 대표적인 방법 중 구배법은 빠른 계산속도를 보이지만 초기값을 잘못 선정하면 국소해에 빠지기 쉬우며 반드시 도함수가 필요한 단점이 있다. 유정압베어링의 경우, 성능 계산 시 비선형 방정식 사용으로 인해 도함수를 구하기 어려우므로 다수의 초기해를 이용하여 전역적으로 탐색하는 전역 최적화 방법을 이용하였다. 전역 최적화 방법 중 대표적으로 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 입자 군집 최적화 알고리즘(Particle Swarm Optimization, PSO)을 이용하여 최적화를 수행하였다.

유전자 알고리즘[16]은 해의 잠재적인 집단이 형성된 후, 이로부터 각 개체에 대한 목적함수가 계산되고 각 개체들의 강점과 약점을 나타내는 적합도 함수가 평가되어 최적의 개체가 선택된다. 만약 종료 조건을 만족하지 않으면, 재생산, 교배, 돌연변이 연산자를 통해 새로운 해의 집단이 생성되고 이전과 같은 방법을 되풀이하여 최적화 과정이 수행된다. 입자 군집 최적화 알고리즘[17]은 비교적 최근에 개발된 알고리즘으로, 군집의 움직임과 지능에 기반한 최적화 방법이다. 각 입자는 하나의 군집 내에서 자신의 이전 최적해와 모든 군집들 중 현재까지 발견된 이전 최적해를 향하도록 앞으로의 탐색 궤적을 조정한다.

### 2.3.2 최적화 모듈

최적화 모듈에서 최적화를 위한 설계변수 및 목적함수, 제한 조건 등을 정의하고, 최적화 알고리즘과 연계하여 최적화를 수행하게 된다. 본 논문에서는 제한조건을 갖는 최적화 문제를 다루기 위해 벌점함수(Penalty Function)을 이용하였다. 벌점함수는 제약조건을 위반한 정도를 평가하여 위반 정도가 심할수록 벌점이 크게 부여되므로 다음 계산 과정에서 배제될 가능성이 커지게 되어 점차 적합한 영역에서의 해로 수렴하게 된다. Fig. 4는 구축된 유정압베어링 최적화 모듈(S/W)을 보여준다.

## 3. 유정압베어링 설계 최적화 및 실험적 검증

### 3.1 최적화 문제 정의

유정압베어링에서 양면 베어링 타입인 경우 베어링 간극을

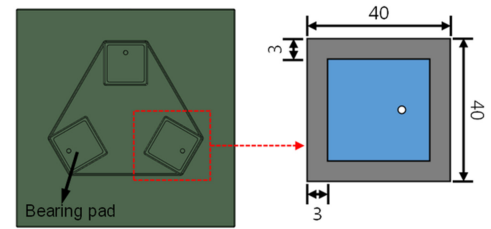


Table  
(a) Geometric dimension

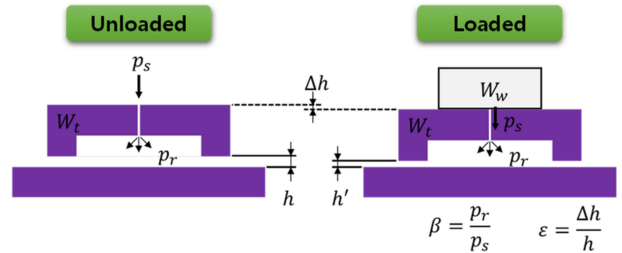


Fig. 5 Specification of a hydrostatic bearing for design optimization

맞추기 위한 정밀가공 등의 문제로 실제 최적화 전/후에 대한 실험장치를 제작하여 확인하는 것은 쉽지 않다. 따라서 보다 현실적인 실험적 검증을 위하여 단면 베어링에 대해 최적화를 수행하고 실험적으로 검증하였다.

3개의 단면패드를 갖는 테이블에 대한 유정압베어링 설계를 대상으로 하였으며, 하나의 패드에 대한 치수는 Fig. 5와 같다. 테이블의 자중( $W_t$ )만 고려한 경우를 무부하 상태로, 테이블의 자중에 공작물의 무게( $W_w$ )가 추가로 작용하는 경우를 부하상태로 정의한다. 유정압베어링 테이블에 부하가 가해지게 되면 간극  $h$ 는  $h'$ 로  $\Delta h$ 만큼 줄어들고, 이때 편심을  $e$ 는  $\Delta h/h$ 로 정의한다.

패드당 지지해야 하는 테이블과 공작물의 무게는 각각 60 kgf와, 30 kgf로 가정한다. 초기모델의 조건(공급압력 8 kgf/cm<sup>2</sup>, 간극 22  $\mu$ m, 압력비 0.5, 편심율 0.2)에 대해 무부하 상태와 부하상태의 해석을 통해 성능 기준을 선정하였다.

Fig. 6은 편심을 및 압력비에 따른 부하용량과 강성 변화를 보여준다. 테이블 자중만 고려된 무부하 상태인 경우(편심률 0), 압력비 0.5에서 부하용량은 54 kgf, 강성은 3.7 kgf/ $\mu$ m 정도 나오고 있으며, 부하 상태인 경우(편심률 0.2) 부하용량은 72 kgf, 강성은 4.2 kgf/ $\mu$ m를 보이고 있다. 설계하고자 하는 목표는 무부하상태에서 부하용량( $C_{p(unload)}$ )이 60 kgf 이상, 강성( $K_{unload}$ )은 4 kgf/ $\mu$ m 이상, 부하상태에서의 부하용량( $C_{p(load)}$ )은 90 kgf 이상, 강성( $K_{load}$ )은 무부하상태의 80% 이상 되기를 원한다. 이를 위한 설계변수는 공급압력( $p_s$ ), 간극( $h$ ), 압력비( $\beta$ ), 편심율( $\epsilon$ )로, 이를 기존의 성능해석을 통해 결정하기는 쉽지 않다. 설계변수들에 따라 서로 상반되는 성능들이 도출될 수 있으므로 유정압베어링의 특성을 충분히 이해하고 설계 변수 값을 바꿔가며 반복적인 계산을 수행해야 하기 때문이다.

따라서 본 논문에서 개발한 유정압베어링의 설계 최적화 모듈을 통해 설계를 수행하였다. 목적함수는 식(2)와 같이, 부하상태의 부하용량( $C_{p(load)}$ ), 무부하 상태의 강성( $K_{unload}$ ), 유량

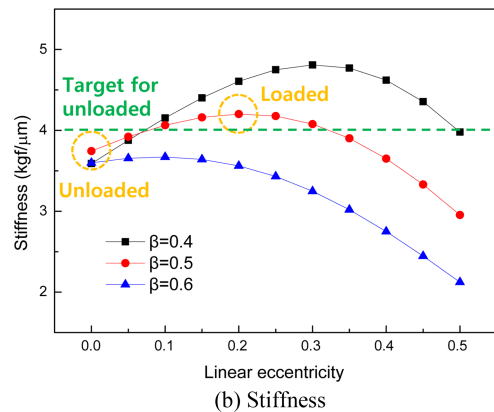
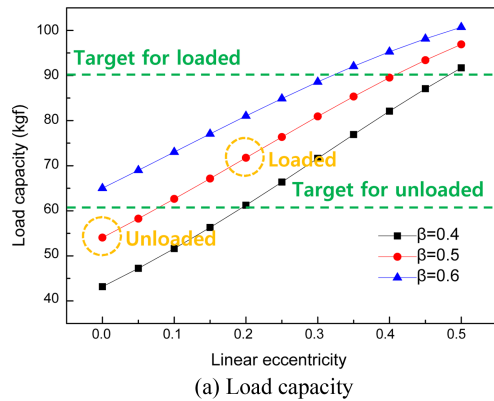


Fig. 6 Initial design results with eccentricity and pressure ratio

( $Q_{in}$ )을 두어, 부하용량과 강성은 최대화되고 유량은 최소화 되도록 정의하였다. 수식 내에서 윗첨자 \*는 각 변수의 무차원화 및 정규화(Normalization)를 위해 사용한 것을 의미한다. 설계변수들의 최대값 및 최소값의 범위는 식(2)에서 주어진다.

■Objective function	$f(\bar{x}) = \frac{1}{C_{p(load)}/C_p^*} + \frac{1}{K_{(unload)}/K^*} + \frac{Q_{in}}{Q^*}$	
■Design parameters	$\bar{x} = \{p_s, h, \beta, \varepsilon\}$ $5 \leq p_s \leq 12 (\text{kgf/cm}^2)$ $15 \leq h \leq 25 (\mu\text{m})$ $0.4 \leq \beta \leq 0.6$ $0 \leq \varepsilon \leq 0.3$	(2)
■Constraints	$W_t \leq C_{p(unload)} \leq W_t + 5$ $C_{p(load)} \geq W_t + W_w$ $K_{(unload)} \geq 4$ $0.8K_{(unload)} \leq K_{(load)} \leq 1.2K_{(unload)}$ $k_c \geq 2.5 \times 10^{-5}$	

제한조건은 모세관 계수( $k_c$ )를 포함하여 무부하 상태와 부하 상태에서의 부하용량과 강성을 설계 목표치 범위에 맞게 설정하였다. 제한조건 위배 시 벌점을 부가하였으며, 벌점함수  $p(\bar{x})$ 는 식(3)과 같이 정의하였다.  $\lambda_j$ 는  $j$ 번째 제한조건의 위배된

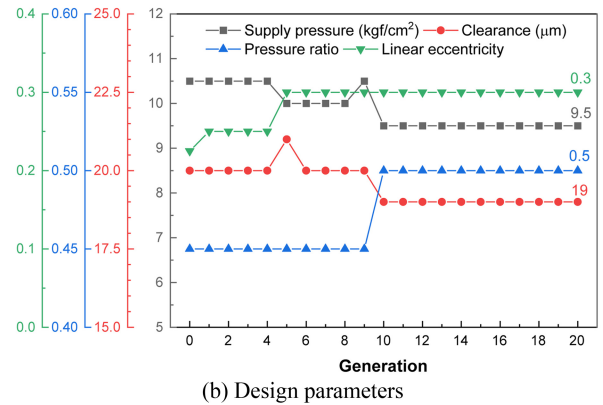
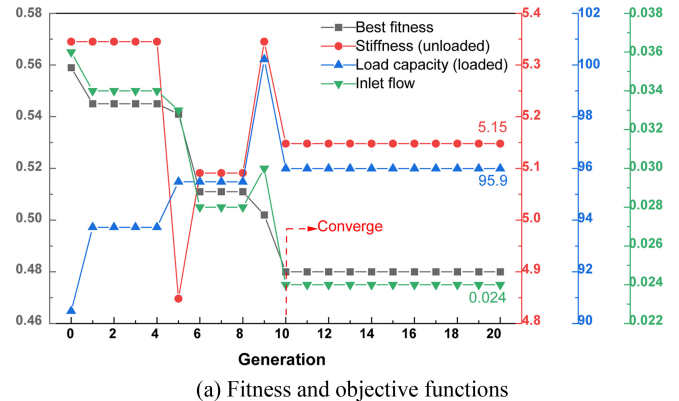


Fig. 7 Optimization process with generation

크기로 제한조건을 만족하면 0, 만족하지 않으면 위배된 양에 비례하여 커지게 된다.  $\lambda_j^*$ 는 정규화를 위해 사용한 변수이며,  $c_j$ 는 각 제한조건들의 상대적인 비중을 나타내는 값으로, 본 논문에서는 동일한 비중으로 설정하였다.

$$p(\bar{x}) = \sum_{j=1}^5 c_j \frac{\lambda_j}{\lambda_j^*} \quad (3)$$

최종적으로, 적합도(fitness)를 목적함수와 벌점함수의 합으로 정의하여, 적합도 값을 최소화하는 최적화 문제를 정의하였다.  $c$ 는 목적함수가 벌점함수에 비해 상대적으로 차지하는 비중을 나타내는 변수로, 본 논문에서는 0.3으로 설정하였다.

$$\text{fitness} = c \cdot f(\bar{x}) + (1 - c) \cdot p(\bar{x}) \quad (4)$$

### 3.2 최적화 결과

Fig. 7에서 보여진 바와 같이 최적화가 진행됨에 따라 적합도 값은 작아지고 있으며, 10세대만에 목적함수의 변수들은 제한조건을 만족하면서 잘 수렴하고 있으며, 설계변수도 주어진 설계 범위 내에서 잘 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 설계 최적화 전/후 목적함수 및 설계변수들의 변화를 보여주고 있다. 설계 최적화 후 강성과 부하용량은 초기 설계에 비해 모두 증가하고 있으며, 유량은 감소하는 결과를 볼 수 있다.



Table 1 Comparison between initial design and optimal design

	Load capacity [kgf]		Stiffness [kgf/ $\mu$ m]		Inlet flow [l/min]
	Unloaded	Loaded	Unloaded	Loaded	
Before optimization	54.1	71.8	3.74	4.20	0.042
After optimization	64.1	95.9	5.15	5.62	0.024

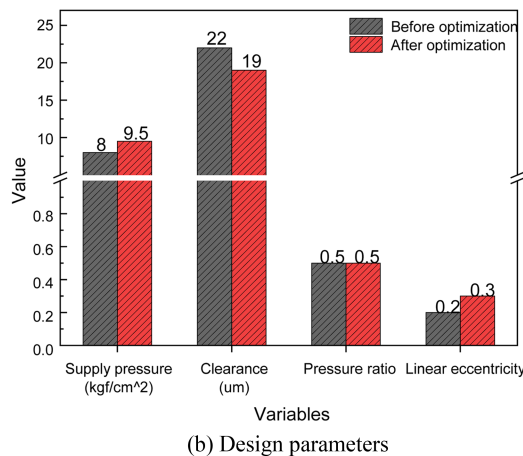
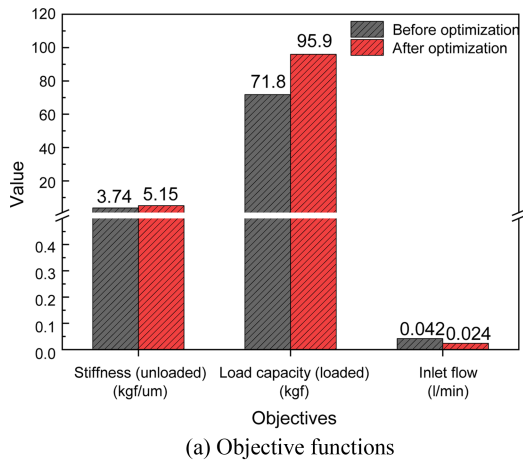


Fig. 8 Comparison of results before and after optimization

Table 1과 Fig. 9는 설계 최적화 전/후에 대한 무부하/부하상태에서의 부하용량 및 강성, 유량을 비교해서 보여주고 있으며, 최적설계 모델이 초기 모델에 비해 19-43% 정도 향상된 것을 확인할 수 있다.

참고로, 유전자 알고리즘과 입자 군집 최적화 알고리즘을 모두 사용하여 유정압베어링에 대한 최적화를 수행해 본 결과, 어느 알고리즘을 적용하던 제한조건을 만족하면서 최적화가 잘 수행되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 계산 속도면에서는 입자 군집 최적화 알고리즘이 유전자 알고리즘에 비해 2배 이상 빠른 계산능력을 보여주었다.

### 3.3 실험적 검증

최적화 결과를 검증하기 위해 유정압베어링 실험장치를 설계하고 제작하였다. 유정압베어링은 Fig. 5(a)에서 보여진 바와

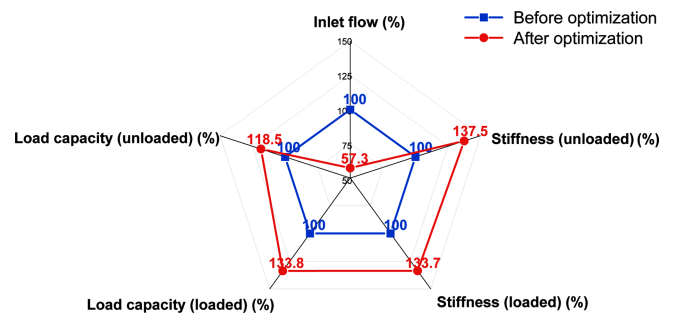


Fig. 9 Comparison between initial design and optimal design

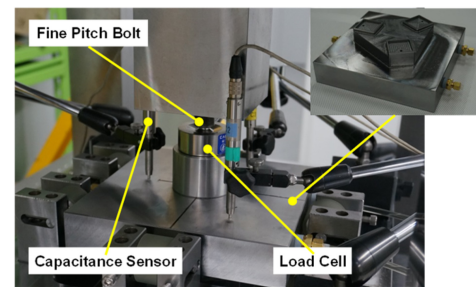
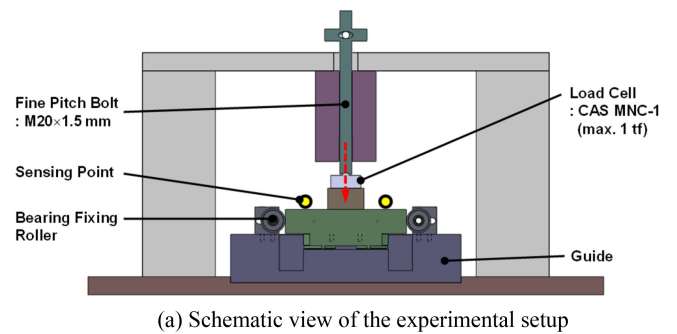
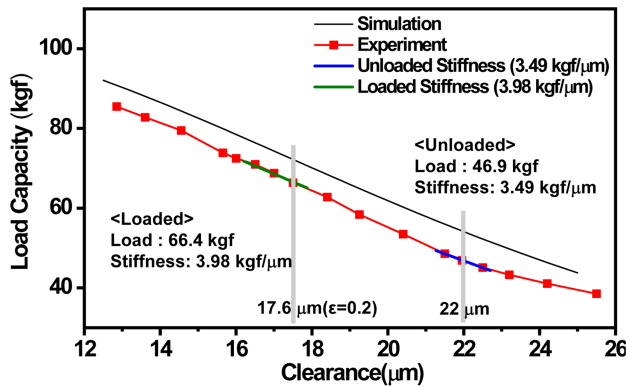


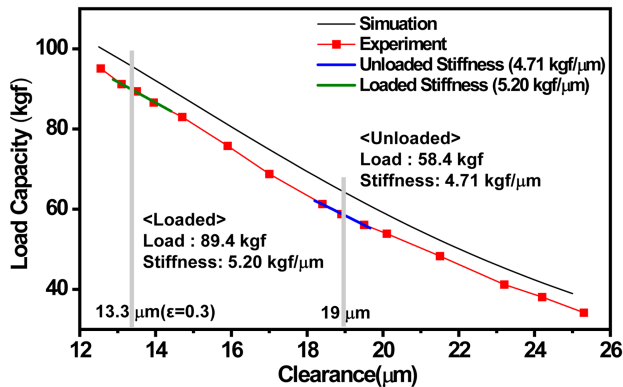
Fig. 10 Experimental setup for design optimization verification

같이 패드 3개로 구성된 테이블로 구성하여 부하를 가할 때 모멘트에 의한 영향이 최소가 되도록 하였다. Fig. 10은 실험장치의 셋업을 보여주는 것으로, 정밀한 부하 조절나사를 이용하여 테이블에 수직하중을 부가한 후 로드셀을 이용하여 부하용량을 측정하였고, 이때 발생하는 베어링의 간극 변화량은 정전용량형 변위센서를 이용하여 측정하였다. 패드의 압력비는 모세관 계수를 통해 조정하였다.

Figs. 11(a), 11(b)는 각각 설계 최적화 전/후 간극에 대해 부하용량을 측정한 결과를 시뮬레이션 값과 같이 보여준다. 강성은 부하용량을 간극에 대해 미분하여 계산하였다. 설계 최적화

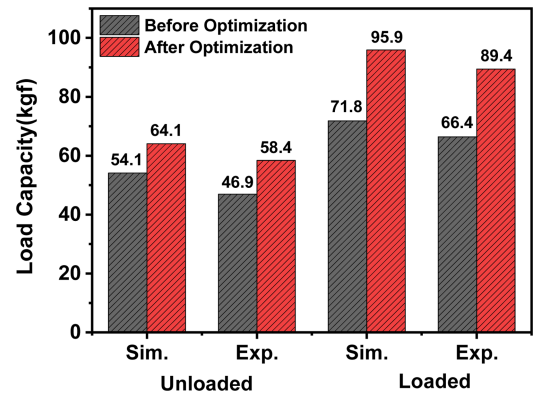


(a) Before optimization

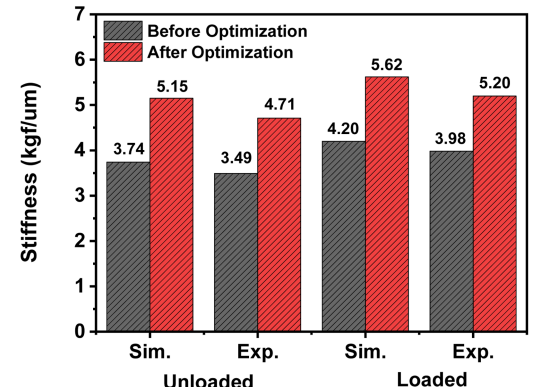


(b) After optimization

Fig. 11 Experiment and simulation results of load capacity and stiffness before and after optimization



(a) Load capacity



(b) Stiffness

Fig. 12 Comparison between initial design and optimal design

Table 2 Comparison between initial design and optimal design

	Load capacity [kgf]						Stiffness [kgf/μm]					
	Unloaded			Loaded			Unloaded			Loaded		
	Sim.	Exp.	Ratio [%]	Sim.	Exp.	Ratio [%]	Sim.	Exp.	Ratio [%]	Sim.	Exp.	Ratio [%]
Before optimization	54.1	46.9	86.7	71.8	66.4	92.5	3.74	3.49	93.3	4.20	3.98	94.8
After optimization	64.1	58.4	91.1	95.9	89.4	93.2	5.15	4.71	91.5	5.62	5.20	92.5
Ratio [%]	105.1			100.8			98.0			97.6		

전 무부하 상태에서의 간극은 22  $\mu\text{m}$ 이며, 부하상태에서는 편심율 0.2이 적용되어 17.6  $\mu\text{m}$ 가 되며, 최적화 후에는 무부하 상태에서의 간극은 19  $\mu\text{m}$ , 부하상태에서는 편심율 0.3에 의해 13.3  $\mu\text{m}$ 가 된다. 따라서 무부하 상태에서 부하용량 및 강성은 각각 최적화 전(초기설계) 46.9 kgf, 3.49 kgf/ $\mu\text{m}$ 에서 설계 최적화 후 58.4 kgf, 4.71 kgf/ $\mu\text{m}$ 까지 향상되었으며, 부하상태에서는 부하용량 및 강성이 각각 66.4 kgf, 3.98 kgf/ $\mu\text{m}$ 에서 89.4 kgf, 5.20 kgf/ $\mu\text{m}$ 까지 향상된 것을 볼 수 있다.

Table 2 및 Fig. 12는 무부하 상태 및 부하 상태에서의 부하용량과 강성에 대해 해석값 및 측정값을 설계 최적화 전/후에 대해 비교한 것이다. 부하용량 및 강성의 측정값은 해석값의 86.7-94.8% 수준을 보이고 있으며, 설계 최적화 전/후 해석값의 향상률 대비 측정값의 향상률의 비는 97.6-105.1% 수준을 보이고

있어 최적화가 잘 수행된 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 사용자의 직접 설계가 필요한 유정압 베어링에 대한 최적설계를 수행하기 위해 유정압 베어링의 설계 최적화 모듈을 개발하였다. 최적화 문제를 정의한 후, 부하용량과 강성 등에 대해 최적화를 수행하고, 실험장치를 제작하여 실험적으로 검증하였다. 초기설계 모델에 비해 최적설계 모델은 모든 항목에서 최적설계 조건을 만족하면서 우수한 성능을 보이고 있어 본 논문에서 개발한 설계 최적화 모듈이 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 무부하 상태에서 초기설계 모델의 부하용량과 강성은 각각 46.9 kgf, 3.49 kgf/ $\mu\text{m}$ 에서 설계 최적화 후 58.4 kgf, 4.71 kgf/ $\mu\text{m}$ 까지 향상되었으며, 부하 상태에서는 부하용량과 강성이 각각 66.4 kgf, 3.98 kgf/ $\mu\text{m}$ 에서 89.4 kgf, 5.20 kgf/ $\mu\text{m}$ 까지 향상되었다.
2. 부하용량 및 강성의 측정값은 해석값의 86.7-94.8% 수준이며, 설계 최적화 전/후 해석값의 향상률 대비 측정값의 향상률 비는 97.6-105.1% 수준을 보이고 있어 최적화가 잘 수행된 것을 확인하였다.
3. 본 연구에서 개발한 설계 최적화 모듈은 유정압 베어링 뿐만 다른 종류의 베어링이나 스테이지의 성능해석 모듈과도 연동할 수 있기 때문에 다양한 분야에서 최적설계 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20021902).

## REFERENCES

1. Rowe, W. B., (2012). Hydrostatic, aerostatic and hybrid bearing design, Elsevier.
2. Liu, Z., Wang, Y., Cai, L., Zhao, Y., Cheng, Q., Dong, X., (2017), A review of hydrostatic bearing system: Researches and applications, *Advances in Mechanical Engineering*, 9(10), 1687814017730536.
3. Michalec, M., Svoboda, P., Krupka, I., Hartl, M., (2021), A review of the design and optimization of large-scale hydrostatic bearing systems, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(4), 936-958.
4. Rowe, W. B., O'Donoghue, J., Cameron, A., (1970), Optimization of externally pressurized bearings for minimum power and low temperature rise, *Tribology*, 3(3), 153-157.
5. El-Sherbiny, M., Salem, F., El-Hefnawy, N., (1984), Optimum design of hydrostatic journal bearings Part I: Maximum load capacity, *Tribology International*, 17(3), 155-161.
6. El-Sherbiny, M., Salem, F., El-Hefnawy, N., (1984), Optimum design of hydrostatic journal bearings Part II: Minimum power, *Tribology International*, 17(3), 162-166.
7. Singh, C., Singh, D., (1977), Stiffness optimization of a variable restrictor-compensated hydrostatic thrust bearing system, *Wear*, 44(2), 223-230.
8. Rowe, W., Koshal, D., (1980), A new basis for the optimization of hybrid journal bearings, *Wear*, 64(1), 115-131.
9. Kentli, A., Sahbaz, M., (2014), Optimization of hydrostatic thrust bearing using sequential quadratic programming, *Oxidation Communications*, 37(4), 1144-1152.
10. Sahin, I., Dorterler, M., Gokce, H., (2019), Optimization of hydrostatic thrust bearing using enhanced grey wolf optimizer, *Mechanika*, 25(6), 480-486.
11. Rehman, W. U., Wang, X., Cheng, Y., Chen, Y., Shahzad, H., Chai, H., Abbas, K., Ullah, Z., Kanwal, M., (2021), Model-based design approach to improve performance characteristics of hydrostatic bearing using multivariable optimization, *Mathematics*, 9(4), 388.
12. Michalec, M., Ondra, M., Svoboda, M., Chmelik, J., Zeman, P., Svoboda, P., Jackson, R. L., (2023), A novel geometry optimization approach for multi-recess hydrostatic bearing pad operating in static and low-speed conditions using CFD simulation, *Tribology Letters*, 71(52), 1-14.
13. Lee, C., Park, C., Lee, H., (1996), The optimization of a hydrostatic spindle system for grinding machines, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 13(7), 140-147.
14. Mareš, M., Stach, E., Holkup, T., (2012), Applied method for design optimization of hydrostatic guideway on real machine tool, *Engineering Mechanics*, 857-868.
15. Wang, Y., Liu, Z., Cheng, Q., Zhao, Y., Wang, Y., Cai, L., (2019), Analysis and optimization of nonlinear carrying performance of hydrostatic ram based on finite difference method and Runge-Kutta method, *Advances in Mechanical Engineering*, 11(6), 1-12.
16. Jin, K. G., (2000), Genetic algorithms and their applications 2<sup>nd</sup> edition, Kyowoo. ISBN: 8981721912, 9788981721916
17. Nahvi, H., Mohagheghian, I., (2011), A particle swarm optimization algorithm for mixed variable nonlinear problems, *International Journal of Engineering (IJE) Transactions A: Basics*, 65-78.



**Gyungho Khim**

Principal researcher in the Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM). His research interests are precision machine design and analysis, error measurement, and compensation.

E-mail: gyungho@kimm.re.kr



**Jeong Seok Oh**

Principal researcher in the Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM). His research interests are precision machines and metrology.

E-mail: ojs6114@kimm.re.kr



# 이오노머 코팅층을 추가한 자가 가습 고분자 전해질막 연료전지

## Additional Ionomer-coated Layer for Self-humidifying Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells

박규태<sup>1,\*</sup>, 김동진<sup>1,\*</sup>, 윤준서<sup>1,\*</sup>, 박정현<sup>1</sup>, 오현명<sup>1</sup>, 박태현<sup>1,#</sup>  
Gyutae Park<sup>1,\*</sup>, Dongjin Kim<sup>1,\*</sup>, Junseo Youn<sup>1,\*</sup>, Junghyun Park<sup>1</sup>, Hyoun-Myoung Oh<sup>1</sup>, and Taehyun Park<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)  
# Corresponding Author / E-mail: taehyunpark@ssu.ac.kr, TEL: +82-2-820-0669  
ORCID: 0000-0002-1270-7703  
\*Gyutae Park, Dongjin Kim, Junseo Youn share equally first authorship

KEYWORDS: Self-humidifying (자가 가습), Polymer electrolyte membrane fuel cell (고분자 전해질막 연료전지), Low-humidity (저습), Deposition (증착)

*In this study, we aim to develop a self-humidifying polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) by depositing platinum (Pt) on a membrane using sputtering. After we coated it with a Nafion<sup>®</sup> ionomer solution. This is considered a solution that can prevent membrane degradation in low humidity conditions. By introducing this self-humidifying concept, we can expect improved performance compared to conventional PEMFCs. By managing the water content of Nafion<sup>®</sup>, we aim to improve both the stability and performance of the PEMFCs. This research contributes to the development of more efficient and reliable PEMFC systems, showing promise for advances in this field.*

Manuscript received: August 30, 2023 / Revised: September 11, 2023 / Accepted: September 11, 2023  
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2023

### 1. 서론

고분자 전해질막 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC) 기술은 화학 에너지를 효율적으로 전기 에너지로 변환시키는 친환경적인 기술로서[1,2], 이동식 전원으로의 확장 가능성이 크게 증가하고 있다[3,4]. PEMFC의 핵심 구성 요소인 전해질막은 연료전지의 성능과 안정성에 결정적인 영향을 미치는 중요한 요소이다.

연료전지 작동 시 충분한 수분 공급을 위해 설치되는 가습 장치는 연료전지 시스템 효율을 낮추는 문제를 야기한다. 이러한 이유로, 현재 연구 동향은 가습 장치를 배제한 방향으로 발전하고 있다[5].

전해질막은 우수한 양성자 전도성과 화학 안정성을 제공하지만, 연료전지 작동 중 수분 함량의 변화에 민감하게 반응한다. 특히, 저습 조건에서 전해질막의 수분 손실은 성능 하락과 내구성 감소를 야기할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자가

가습 기능을 갖춘 전해질막의 개발은 PEMFC의 안정성과 성능 향상을 위한 중요한 연구주제로 강조되고 있다[6-8].

Aylin Rahnavar 등의 연구에 따르면 이오노머는 뛰어난 수분 흡수 능력을 가지고 있어, 전해질막 내부의 수분 분포를 관리하고 안정한 양성자의 전도성을 유지하는데 도움이 된다. 따라서 우리는 이오노머를 이용하여 자가 가습이 가능한 전해질막을 제작하였다[9-12]. 또한, 스퍼터링 기술을 이용하여 전해질막과 이오노머 사이에서 반응을 유도하여 수분 공급을 원활하게 하였다. 이렇게 제작된 전해질막은 낮은 상대습도에서 성능 평가를 통해 자가 가습 효과의 효용성을 확인하였다.

### 2. 실험 준비

#### 2.1 백금 스퍼터링(Sputtering) 증착

Fig. 1(a)에서 나타난 대로, 백금 타겟(99.99 wt%, RND Korea,



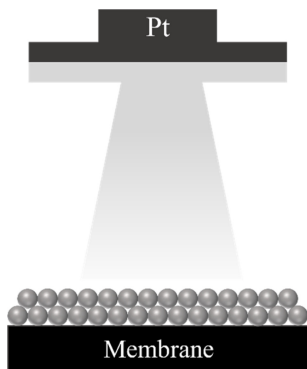
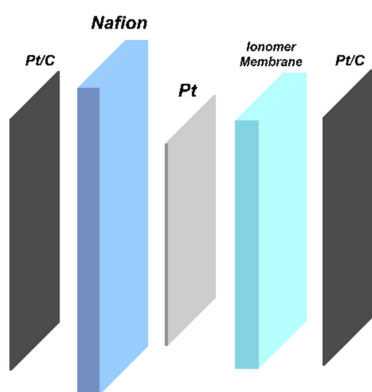
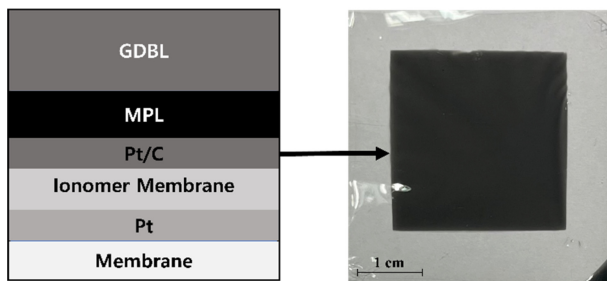


Fig. 1 The process of Pt deposition using DC magnetron sputtering



(a) Structure of self-humidifying membrane



(b) Cathodic cross-sectional schematics and top-view photographs of self humidifying MEA

Fig. 2 Components of the MEA (Membrane Electrode Assembly)

Republic of Korea)을 마그네트론 스퍼터링(Magnetron Sputtering) 기법을 사용하여 Nafion<sup>®</sup> 211에 증착하였다. 스퍼터링에는 직류(DC) 전력 발생기(적용 전력 30 W)가 사용되었다. 챔버의 작업 압력은 90 mTorr이며, He와 Ar의 유량은 각각 25 sccm이다. 이때, 챔버의 높은 압력과 He 가스의 사용으로 플라즈마의 자유 경로가 짧아져 백금 입자 크기가 작아진다[13,14]. 백금 증착량은 0.04 mg/cm<sup>2</sup>이다.

## 2.2 MEA (Membrane Electrolyte Assembly) 제작

Fig. 2(a)는 자가 가습 전해질막의 구성 요소이다. 백금 스퍼터링된 전해질막에 25.4  $\mu\text{m}$  두께로 Nafion<sup>®</sup> 이오노머 용액 500  $\mu\text{L}$  (5.0 wt%; Sigma-Aldrich, United States), 이소프로필 알

코올(Isopropyl Alcohol) 750  $\mu\text{L}$  (Daejung Chemical Co., Republic of Korea)의 혼합 용액을 분사했다. 비 자가 가습 전해질막의 경우 진공 챔버 안에서 백금 증착을 하지 않고, 열화만 시킨 후 그 위에 혼합액을 분사하여 Nafion<sup>®</sup> 211의 두께와 같은 층을 만들었다. 마지막으로, Nafion<sup>®</sup> 이오노머 용액, 이소프로필 알코올, 증류수와 함께 탄소 지지 백금(Pt/C, 40 wt%; Alfa Aesar, United States)을 혼합한 촉매 잉크를 30분 동안 초음파 처리하여 양극 및 음극 표면에 분사했다. 양극 및 음극의 백금 증착량은 0.12 mg/cm<sup>2</sup>이고, 각 활성 영역은 5.0 cm<sup>2</sup>의 정사각형 모양이다. 이후, 기체확산층(Gas Diffusion Layer, Sigracet 36BB, SGL carbon, Germany)과 Teflon 가스켓240  $\mu\text{m}$ 이 양극에 대칭적으로 삽입되었다. 기체 확산층은 수분 관리를 위해 폴리테트라플루오로에틸렌(Polytetrafluoroethylene) 처리된 기체확산지지체(Gas Diffusion Backing Layer) 및 미세다공층(Micro Porous Layer)으로 구성되었다. 이러한 과정을 통해 제작된 MEA는 Fig. 2(b)에 나타난다.

## 2.3 PEMFC 구성

양극과 음극 양쪽의 분리판은 그래파이트로 만들어진 단일 채널 사형 구조의 유동장을 가지며, 두께는 10 mm이다. 유동채널의 리브(Rib)와 너비는 각각 0.5 mm로 설정했다. 전류 집전체는 2 mm 두께의 황동에 금 도금 처리를 하여 만들어졌으며, 연료전지 반응에서 생성된 전자를 효과적으로 전달하기 위해 설계되었다. 엔드 플레이트(End Plate)는 알루미늄 재질로 만들어졌으며, 전기 절연을 위해 아노다이징(Anodizing) 공정이 수행되었다. 각각 8개의 구멍이 있어 볼트와 너트를 고정하며, 반응물과 생성물의 효과적인 분배를 통해 연료전지 내에서 효율적인 전기 화학 반응이 가능하도록 한다.

## 2.4 PEMFC 특성

제작된 MEA는 단위 셀에 조립되었다. 실험은 80°C의 셀 온도에서 30%의 상대습도로 수소와 산소 기체를 각각 음극과 양극으로 공급하였다. H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>는 0.15/0.3 sccm의 비율로 공급되었다. 또한 음극에는 1 bar<sub>g</sub>, 양극에는 1.5 bar<sub>g</sub>의 역압(Back Pressure)이 주어졌다. 연료전지의 성능을 평가하기 전에 MEA의 안정적인 운전을 위해 상대습도 30% 환경에서 30분간 활성화화를 진행하였다. 자가 가습 PEMFC와 비 자가 가습 PEMFC는 동일한 실험 조건에서 작동하였다.

MEA의 성능 특성을 파악하기 위해 전류 밀도 전압(j-V) 분극 곡선을 측정하였다. j-V 분극 곡선은 OCV (Open Circuit Voltage)로부터 셀 전압이 0.3 V(표준 전극 전위)까지 갈바노다이내믹(Galvanodynamic) 모드를 사용하여 40 mA/s의 속도로 측정되었으며, 이를 위해 PEMFC의 시험 장치(CNL Energy Inc., Republic of Korea)를 사용하였다. 또한 PEMFC 전해질막의 Pt 박막층의 표면 미세 구조는 전계 방출형 주사 전자 현미경(Field Emission-Scanning Electron Microscope, FE-SEM)을 사용하여 분석되었다.

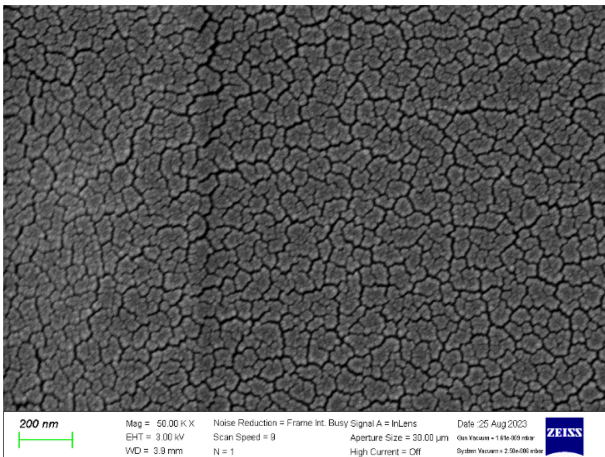


Fig. 3 FE-Sem image of Pt-deposited polymer electrolyte membrane ( $\times 50,000$ )

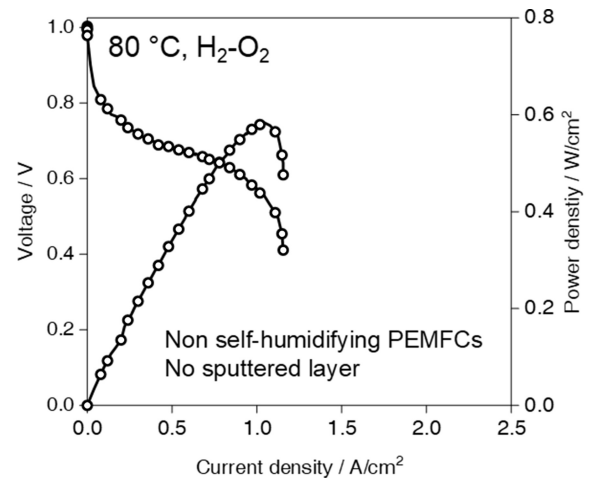
### 3. 연구 결과 및 고찰

Nafion® 전해질막에 직류 자기 스퍼터 방식으로 백금을 증착한 후, FE-SEM 분석을 통해 백금 증착 전해질막의 표면을 상세히 관찰하였다. Shinichi Hirano 등의 논문에 따르면, 스퍼터링을 통해 증착된 Pt는 얇은 활성층으로 질량 수송 손실을 최소화해 PEMFC의 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다[15]. FE-SEM 분석을 통해 백금이 Nafion® 전해질막에 성공적으로 증착되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 3에 나타난 FE-SEM 이미지를 통해, 백금이 균일하게 분포되어 있으며 나노 스케일의 입자로 구성되었음을 확인할 수 있었다.

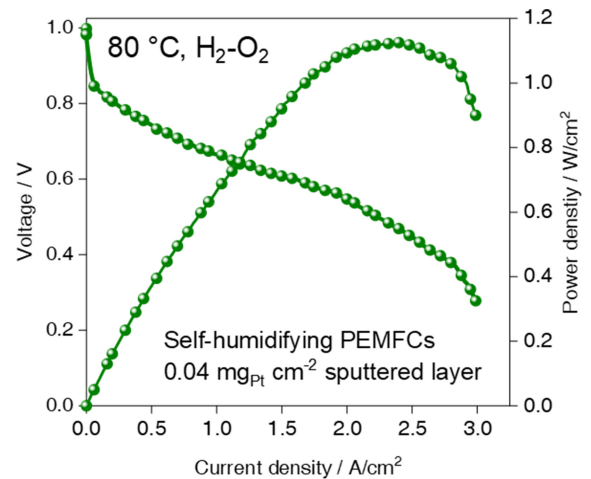
본 실험은 연료전지의 자가 가습 반응을 확인하기 위해 자가 가습 전해질막과 비 자가 가습 전해질 막을 낮은 상대 습도에서 비교 분석하였다. 두 연료전지의 성능을 직접 비교하기 위해 MEA를 제작하고, 80°C에서 상대습도 30%의 조건에서 성능을 측정했다. 또한 중간 백금층의 반응을 유도하기 위해 양극에 역압을 가해 크로스오버 반응을 유도했다.

Fig. 4는 자가 가습 PEMFC와 비 자가 가습 PEMFC의 실험 결과를 보여준다. 자가 가습 PEMFC의 최대 전력 밀도는 1.125 W/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 이에 비해 비 자가 가습 PEMFC의 최대 전력 밀도는 0.585 W/cm<sup>2</sup>로 측정되어, 저습 조건에서 자가 가습 전해질막을 사용했을 때 최대 전력 밀도는 192.3%가 증가한 것을 보였다. 전류 밀도 또한 258.7% 증가하였다. 이는 자가 가습 전해질막이 낮은 상대 습도 환경에서 PEMFC의 성능을 유의미하게 향상시키는 것으로 판단된다.

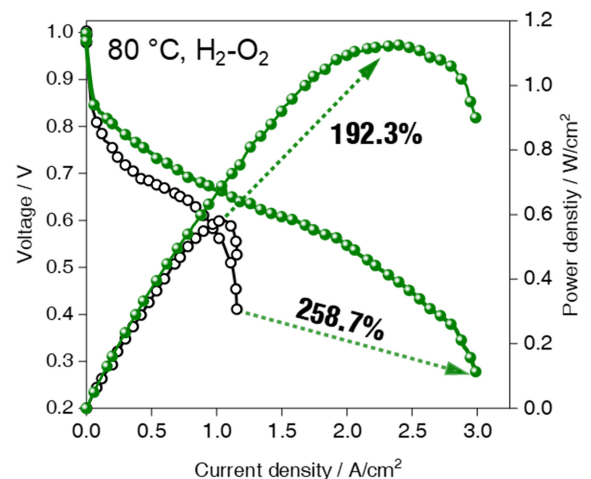
이러한 결과는 중간층의 증착된 백금과 추가적인 Nafion® 이 오노머 코팅층으로 인한 자가 가습 효과로 인해 발생할 것으로 생각된다. 가습 효과는 수소와 산소가 역압으로 인해 중간에 증착된 Pt와 만나 일어난 전기화학적 반응에 의한 것이다. 이 과정에서 전기화학적 반응에 의해 생성된 물은 전해질막에 흡수되어 자가 가습이 진행된다. 이 과정에서 Pt 입자는 전반적인



(a) Non-sputtered self humidifying membrane



(b) Pt sputtered self humidifying membrane



(c) Total self humidifying PEMFC

Fig. 4 Self humidifying PEMFC & non-self humidifying PEMFC performance

전기화학 반응에 기여하며, 이러한 이유로 자가 가습 PEMFC가 비 자가 가습 PEMFC보다 더 좋은 성능을 가질 것으로 생각된다.

이 연구 결과는 자가 가습 전해질막의 실용적인 적용 가능성을 강조하며, 낮은 상대 습도 조건에서의 PEMFC 성능 향상을 위한 새로운 접근 방식을 제시한다. 이러한 자가 가습 연료전지 시스템은 기존 연료전지 시스템보다 저습 조건에서 더욱 효율적이고 안정적인 시스템 구현을 위한 하나의 방향성을 제시한다.

#### 4. 결론

고분자 전해질막 연료전지(PEMFC)는 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 친환경적인 기술로 현재 주목받고 있다. 그러나 전해질막 가습을 위한 가습 장치는 연료전지 시스템의 효율을 낮추는 문제가 있다. 가습 장치에 사용되는 에너지를 줄이는 것은 이러한 문제의 해결책이 될 수 있다. 따라서, 우리는 외부의 가습의 부담을 줄일 수 있는 자가 가습 전해질막을 개발하였다.

위 연구에서 스퍼터링 기술을 활용하여 백금을 전해질막에 증착하고, 그 위에 Nafion® 이오노머를 코팅하여 자가 가습 기능을 갖춘 전해질막을 개발했다. 연구 과정에서 Nafion® 211 전해질막이 사용되었으며, 자가 가습 전해질막과 비 자가 가습 전해질막을 저습 조건에서 비교 실험하여 성능 차이를 분석하였다. 실험 결과, 자가 가습 전해질막에서 더 우수한 성능을 보여주는 것을 확인했다.

이번 연구에서 개발된 스퍼터링 기술을 적용한 자가 가습 전해질막은 저습 조건에서 우수한 성능을 보여준다. 이를 통해, 기존 연료전지 시스템에 사용되던 가습 시스템의 부담을 줄일 수 있으며, 동시에 연료전지 시스템의 효율과 안정성 또한 향상될 것으로 예상된다.

결론적으로, 백금 스퍼터링과 Nafion® 이오노머 코팅을 활용한 새로운 자가 가습 전해질막의 개발은 연료전지 분야에 새로운 가능성을 제시한 결과로 평가된다. 이러한 연구는 친환경 미래 에너지 발전에 큰 기여를 할 것이다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

박규태, 김동진, 윤준서 저자의 본 연구에 대한 기여도는 동일합니다. 본 연구는 한국연구재단(NRF)의 재원으로 수행되었으며, [RS-2023-00209146]로 지원받았습니다.

#### REFERENCES

- Gasteiger, H. A., Marković, N. M., (2009), Just a dream-or future reality?, *Science*, 324(5923), 48-49.
- O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F. B., (2016). *Fuel cell fundamentals*, John Wiley & Sons.
- Paulson, L. D., (2003), Will fuel cells replace batteries in mobile devices?, *Computer*, 36(11), 10-12.
- Dyer, C. K., (2002), Fuel cells for portable applications, *Journal of Power Sources*, 106(1-2), 31-34.
- Lee, S. Y., Chae, J. E., Choi, J., Park, H. S., Henkensmeier, D., Yoo, S. J., Kim, J. Y., Na, Y., Jang, J. H., Kim, H.-J., (2020), Dual exchange membrane fuel cell with sequentially aligned cation and anion exchange membranes for non-humidified operation, *Journal of Membrane Science*, 596, 117745.
- Zawodzinski Jr, T. A., Springer, T. E., Uribe, F., Gottesfeld, S., (1993), Characterization of polymer electrolytes for fuel cell applications, *Solid State Ionics*, 60(1-3), 199-211.
- Yang, T.-H., Yoon, Y.-G., Kim, C.-S., Kwak, S.-H., Yoon, K.-H., (2002), A novel preparation method for a self-humidifying polymer electrolyte membrane, *Journal of Power Sources*, 106(1-2), 328-332.
- Jang, S., Seol, C., Kang, Y. S., Kim, S. M., Yoo, S. J., (2019), Investigation of the effect of carbon-covering layer on catalyst layer in polymer electrolyte membrane fuel cell in low relative humidity condition, *Journal of Power Sources*, 436, 226823.
- Liu, F., Yi, B., Xing, D., Yu, J., Hou, Z., Fu, Y., (2003), Development of novel self-humidifying composite membranes for fuel cells, *Journal of Power Sources*, 124(1), 81-89.
- Watanabe, M., Uchida, H., Seki, Y., Emori, M., Stonehart, P., (1996), Self-humidifying polymer electrolyte membranes for fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society*, 143(12), 3847.
- Watanabe, M., Uchida, H., Emori, M., (1998), Analyses of self-humidification and suppression of gas crossover in Pt-dispersed polymer electrolyte membranes for fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society*, 145(4), 1137.
- Rahnavard, A., Rowshanzamir, S., Parnian, M. J., Amirkhanlou, G. R., (2015), The effect of sulfonated poly (ether ether ketone) as the electrode ionomer for self-humidifying nanocomposite proton exchange membrane fuel cells, *Energy*, 82, 746-757.
- Jeong, S., Kwon, O., Yoo, H., Kim, J., Choi, H., So, Y., Park, J., Lee, J., Jeong, Y., Park, T., (2023), High platinum utilization for proton exchange membrane fuel cells via low-temperature substrate sputtering on acid-treated carbon nanotube sheet, *Chemical Engineering Journal*, 466, 143135.
- Lai, Y. C., Huang, K. L., Tsai, C. H., Lee, W. J., Chen, Y. L., (2012), Sputtered Pt loadings of membrane electrode assemblies in proton exchange membrane fuel cells, *International Journal of Energy Research*, 36(8), 918-927.
- Hirano, S., Kim, J., Srinivasan, S., (1997), High performance proton exchange membrane fuel cells with sputter-deposited Pt layer electrodes, *Electrochimica Acta*, 42(10), 1587-1593.

**Gyutae Park**

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is in the field of fuel cells, with a specific focus on the application of nanomaterials. He is passionate about exploring the potential of nanomaterials in fuel cell technology and their potential for revolutionizing the field of energy conversion.

E-mail: gyutaepark37@soongsil.ac.kr

**Dongjin Kim**

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is improving water management via optimizing porous media. He is also interested in the diagnosis of catalyst degradation of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: ehdwls5025@soongsil.ac.kr

**Junseo Youn**

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is flexible power sources such as flexible polymer electrolyte membrane fuel cells. His goal is to develop these cells into practical and efficient power sources for the next generation of electronics.

E-mail: tts4917@soongsil.ac.kr

**Junghyun Park**

M.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. He is interested in the structural deformation of the catalyst layer through secondary pore formation by aggregation of catalysts.

E-mail: pjh981109@soongsil.ac.kr

**Hyoun-Myoung Oh**

M.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is the formation of porous catalyst layers for fuel cells using magnetron sputtering, a cutting-edge technique in materials science.

E-mail: hamma0325@soongsil.ac.kr

**Taehyun Park**

Associate Professor in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. He received his Ph.D. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University. His research interest is fuel cells (PEMFCs and SOFCs) and their systems for FCEVs, power plants, and portable power sources.

E-mail: taehyunpark@ssu.ac.kr





# 딥러닝 기반 일상 생활 및 낙상 위험도 예측

## Risk Prediction in Daily Activities and Falls based on Deep Learning

이승희<sup>1</sup>, 구범모<sup>1</sup>, 양수민<sup>1</sup>, 김동권<sup>1</sup>, 김영호<sup>1,#</sup>

Seunghee Lee<sup>1</sup>, Bummo Koo<sup>1</sup>, Sumin Yang<sup>1</sup>, Dongkwon Kim<sup>1</sup>, and Youngho Kim<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 의공학과 (Department of Biomedical Engineering, Yonsei University)

# Corresponding Author / E-mail: [younghokim@yonsei.ac.kr](mailto:younghokim@yonsei.ac.kr), TEL: +82-33-760-2859

ORCID: 0000-0001-7531-802X

KEYWORDS: Risk prediction (위험도 예측), Fall (낙상), Activity of daily living (일상 생활), Deep learning (딥러닝), Data augmentation (데이터 증강)

*Predicting fall risk is necessary for rescue and accident prevention in the elderly. In this study, deep learning regression models were used to predict the acceleration sum vector magnitude (SVM) peak value, which represents the risk of a fall. Twenty healthy adults (aged  $22.0 \pm 1.9$  years, height  $164.9 \pm 5.9$  cm, weight  $61.4 \pm 17.1$  kg) provided data for 14 common daily life activities (ADL) and 11 falls using IMU (Inertial Measurement Unit) sensors (Movella Dot, Netherlands) at the S2. The input data includes information from 0.7 to 0.2 seconds before the acceleration SVM peak, encompassing 6-axis IMU data, as well as acceleration SVM and angular velocity SVM, resulting in a total of 8 feature vectors used to model training. Data augmentations were applied to solve data imbalances. The data was split into a 4 : 1 ratio for training and testing. The models were trained using Mean Squared Error (MSE) and Mean Absolute Error (MAE). The deep learning model utilized 1D-CNN and LSTM. The model with data augmentation exhibited lower error values in both MAE (1.19 g) and MSE (2.93 g<sup>2</sup>). Low-height falls showed lower predicted acceleration peak values, while ADLs like jumping and sitting showed higher predicted values, indicating higher risks.*

Manuscript received: August 31, 2023 / Revised: September 21, 2023 / Accepted: September 22, 2023  
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2023

### 1. 서론

낙상 사고는 고령자에게 매우 치명적인 사고로 매년 68만여 명의 사상자가 보고된다[1]. 65세 이상 고령자에게는 약 30%가 85세 이상에서는 약 50%가 낙상 사고를 경험할 정도로 매우 빈번하게 나타나는 사고이다[2]. 낙상으로 인한 고관절 골절은 고령자에게 많은 합병증을 유발시키며 회복 후에도 영구적인 손상 남길 수 있다[3,4]. 따라서, 낙상 사고가 발생하였을 때 적절한 조치를 취하지 않으면 더 큰 사고로 이어질 가능성이 매우 크다[5]. 대한민국은 2022년 65세 이상의 고령인구가 대략 900만 명 이상으로 전체인구의 17.5%를 차지하며, 2025년에는 20% 이상으로 초고령사회에 진입할 것으로 예측된다[6]. 고령화 사회에 들어서며 낙상 사고를 적절하게 대응하는 것이 매우 중요하다[7].

낙상 감지 연구에서는 일반적으로 관성센서가 흔히 사용되는데, 관성센서는 가속도, 각속도, 지자계를 측정하는 센서로 소형화되어 웨어러블 센서로 많이 활용된다. 낙상 감지 알고리즘은 낙상 후 검출과 전 검출로 나눌 수 있다. Koo 등[8]은 관성센서를 통해 측정된 데이터를 SVM, ANN과 같은 머신러닝 모델에 적용하여 낙상 후 검출 정확도 약 99% 이상을 보고하였다. 해당 연구진은 학습데이터의 수가 증가했을 때 모델의 성능이 더 좋아진다고 보고하였다. 그러나 훈련하지 않은 동작에 대해서는 낮은 성능을 보인다고 보고하였다. Jung 등[9]은 관성 센서를 활용하여 30명의 피험자를 대상으로 14개의 일상 동작과 6개의 낙상 동작 데이터를 측정하였으며, ASVM (Acceleration Sum Vector Magnitude), GSVM (Angular Velocity Sum Vector Magnitude), 수직각도의 특성 벡터들을 추출하였다. 해당 연구진들을 ASVM, GSVM, 수직각도로 구성된 임계값 기반의 낙상

전 검출 알고리즘을 개발하여 98.4%의 정확도를 얻었으며, 공용 데이터셋인 Sisfall [10]을 활용하여 평가하였을 때는 92.4%의 정확도를 보고했다. Yu 등[11]은 KFall [12] 공용 데이터셋을 활용하여 머신러닝인 SVM 모델과 딥러닝 모델인 Conv-LSTM을 비교하였으며, 딥러닝을 적용한 낙상 검출 알고리즘에서 99.16%의 정확도를 보고하였다. 또한 해당 연구진들은 노인 낙상 데이터인 FARSEEING [13]을 개발된 모델로 평가하여 93.33%의 정확도를 달성하였다.

고령자에게 있어서 일상 생활 동작과 낙상 사고 발생시에 위험도를 파악하는 것은 매우 중요하며, 낙상 사고로 인한 응급상황 발생 시 빠른 대처 및 구조에 있어서 위험도를 알아야 한다. 최근 낙상 사고 시의 위험도를 가속도 값을 통해 분석하는 연구들이 진행되고 있다[14-17]. Arena 등[15]은 실험을 통해서 낙상 사고 발생 시 머리에 작용되는 가속도 값을 측정하여, 4-11 m/s<sup>2</sup>의 결과를 보고하였다. Kim 등[16]은 낙상 직전에 가속도 최대값을 LSTM 모델을 활용하여 예측하였으며, Mean Absolute Percent Error (MAPE) 값이 약 6.7%라고 보고하였다. 해당 연구진들은 낙상 방향에 따라서 충격량이 다르다는 것을 확인하였고, 낙상 사고 발생 시에 충격값을 예측하여 낙상 방향을 조절함으로써 부상을 최소화할 수 있다고 보고하였다. 그러나 이는 낙상 동작에만 국한되어 있기 때문에 일상 생활 동작의 위험도를 동시에 예측할 필요가 있다.

Lee 등[17]은 건설현장에서 발생할 수 있는 동작들과 추락 및 낙상 동작의 위험도를 CNN, LSTM 등 다양한 딥러닝 기법을 통하여 예측하였으며, 이를 기반으로 추락 동작을 분류하였다. 낙상은 추락과 비교했을 때 가속도 최대값이 작기 때문에 일상 생활 동작과 낙상 동작을 함께 훈련하여 이를 예측하는 것은 매우 도전적이다. 또한 낙상 데이터를 실제로 측정하기 힘들기 때문에 일상 생활 동작과 비교하여 데이터 불균형이 존재하며, 이를 극복하기 위해 데이터 증강기법이 사용되고 있다[16].

본 연구에서는 관성 센서에서 측정된 데이터와 증강기법을 적용한 데이터를 활용해 딥러닝 회귀분석을 진행하여, 일상 동작과 낙상 동작에 대한 위험도를 대변할 수 있는 가속도 SVM의 최대값을 예측하였다. 고령자의 낙상을 포함한 일상 생활 동작에서의 가속도 최대값을 예측하여 부상 위험도를 예측하는 모니터링 알고리즘을 개발하고자 하였다.

## 2. 방법

### 2.1 실험 대상자

본 연구를 위하여 20명의 건강한 성인 남녀(남 10명, 여 10명, 24.8±2.0세, 173.5±6.1 cm, 76.6±13.0 kg)를 모집하였다. 실험을 위하여 연세대학교 미래캠퍼스 생명윤리심의위원회의 승인(1041849-202204-BM-079-02)을 얻었으며, 실험대상자로부터 사전의 서면동의를 얻은 뒤 진행되었다.

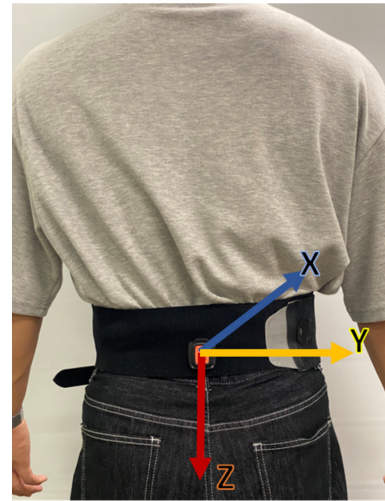


Fig. 1 IMU (Inertial Measurement Unit) sensor placement

### 2.2 실험 장비

실험 데이터 측정에는 관성센서(Movella Dot, Movella, Netherlands)를 활용하였다. 관성센서는 피험자의 S2 위치에 부착되었으며, 60 Hz의 샘플링 주파수로 3축의 가속도 신호와 3축의 각속도 신호를 획득하였다. 실험 데이터는 블루투스를 통하여 스마트폰으로 csv 파일의 형태로 저장하였고, 실험 동작들은 영상과 함께 측정하여 동기화하였다. 수집된 데이터는 python 3.9 (Python Software Foundation, USA) 환경에서 TensorFlow 2.0 (Google, USA) 라이브러리를 통해 분석되었다. 데이터 분석은 intel i7-12700 2.1 GHz, 32 GB RAM, NVIDIA GeForce RTX3060, and Windows 11의 PC를 통해 진행되었다.

### 2.3 실험 동작

본 연구의 실험 동작은 11개의 일상 생활 동작(ADL)과 14개의 낙상 동작(Fall)으로 구성 되어있으며, 각 동작들은 피험자당 3회씩 반복 측정하였다(Table 1).

### 2.4 데이터 전 처리

일상 생활 동작의 데이터는 ASVM의 최대값의, 낙상 동작은 낙상 Impact 시점의 이전 0.7 s에서 0.2 s의 총 0.5 s 간의 Window를 추출하였다. 추출한 Window에서 3축의 가속도, 3축의 각속도와 연산을 통한 ASVM, GSVM을 입력 데이터로 활용하였다.

$$ASVM = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (1)$$

$$GSVM = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} \quad (2)$$

### 2.5 데이터 증강기법

일상 생활 동작과 낙상 간의 데이터 불균형을 해소하기 위하여 Noise Injection [18], Window Slicing [19], Scaling [20]의 전통적인 데이터 증강기법을 활용하였다. Noise Injection은 데이터에

Table 1 Experimental movements

ADL	D01. Stand
	D02. Sit and stand up from floor
	D03. Squat
	D04. Waist bending
	D05. Walking
	D06. Jogging
	D07. Stumble while walking
	D08. Jogging in place
	D09. Jumping
	D10. Walk upstairs and downstairs
	D11. Sit and stand up from stool
	D12. Collapse in a stool when trying to stand up
	D13. Lying on the mattress
	D14. Slowly sit and stand up from a low-height mattress
Fall	F01. Backward fall while walking caused by a slip
	F02. Forward fall while walking caused by a trip
	F03. Forward fall while jogging caused by a trip
	F04. Backward fall when trying to sit down
	F05. Forward fall while sitting
	F06. Lateral fall while sitting
	F07. Backward fall while sitting
	F08. Forward fall when trying to get up
	F09. Forward fall
	F10. Lateral fall
	F11. Backward fall

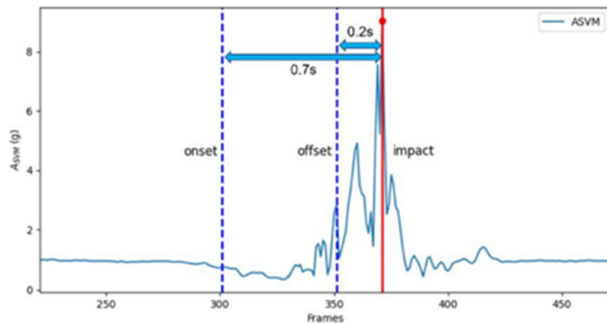


Fig. 2 Windowing example: fall movement

평균이 0, 분산이 0.01인 Gaussian Normal Distribution을 더하는 방식으로 기존의 데이터에 무작위의 잡음을 더하는 기법이다[18]. Window Slicing 기법은 추출한 Window의 데이터 중 90%만 다시 추출하여 구성한 뒤 기존 데이터와 동일하게 Up Sampling하는 기법이다[19]. 마지막으로 Scaling 증강기법은 데이터에 0.8에서 1.2 사이의 난수를 랜덤하게 정한 뒤 곱하는 방식이다[20]. 모델 훈련을 위해서 낙상 데이터에만 증강기법을 적용하여 ADL과 낙상 동작 간의 데이터 비율을 조절하였다. Fig. 3는 실제 측정된 낙상 동작에 각각의 증강기법을 적용하여 증강된 데이터의 그래프이다.

## 2.6 딥러닝 모델

가속도의 최대값을 예측하기 위하여 딥러닝 모델을 활용하였다. 본 연구에서는 Conv1D와 LSTM 모델을 결합한 Conv-

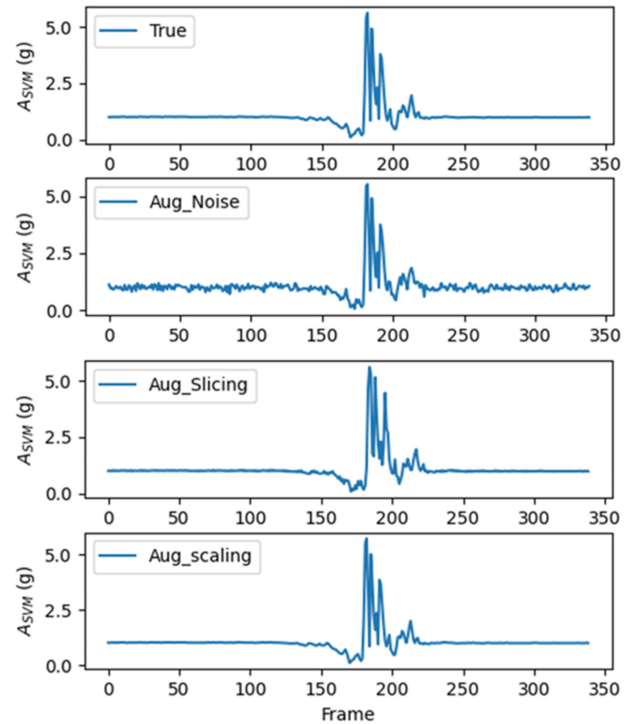


Fig. 3 Data augmentation examples

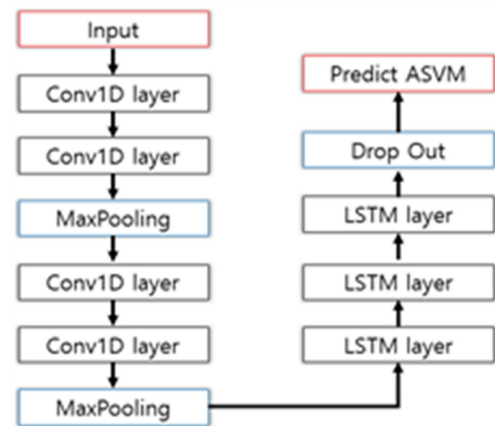


Fig. 4 Deep learning model structure

LSTM 모델을 활용하였다. Huang 등은[21] 이미지 특성 추출에서 흔히 많이 사용되는 Conv1D 모델이 시계열 데이터 분류 및 예측에서도 활용도가 높다고 보고하였다. LSTM 모델은 기존 시계열 데이터를 위해 개발된 RNN 모델에서 Vanishing Gradient Problem을 개선한 모델이다[22]. Lee 등[17]은 시계열 데이터 예측에 있어서, CNN 모델을 통해 데이터의 특성을 추출하여 LSTM 모델로 예측하였을 때 CNN 모델만 사용했을 때보다 성능이 좋아지는 것을 확인하였다.

관성센서의 6축 신호와 ASVM, GSVM의 총 8개의 특성이 입력데이터로 활용되었으며, 이를 통해 Impact 순간의 가속도 SVM의 최대값을 예측하는 회귀 모델을 구성하였다.

## 2.7 모델 평가

전체 데이터를 4 : 1 비율로 나누어 모델 훈련과 모델 평가에 사용하였다. 딥러닝 모델 훈련 및 평가를 위한 오차함수로 MAE (Mean Absolute Error)와 MSE (Mean Square Error)를 사용하여 비교하였다.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (4)$$

이때  $\hat{y}_i$ 는 모델을 통해 예측된 가속도 최대값이고,  $y_i$ 는 실제 측정된 가속도 최대값을 의미한다.

## 3. 결과

Table 2는 데이터 증강여부에 따른 모델의 가속도 최대값 예측 오차를 나타낸다. 일상 생활 동작의 오차를 살펴보면, 데이터 증강을 적용하였을 때 MAE, MSE에서 각각 1.09 g, 2.53 g<sup>2</sup>의 오차를 보였으며, 증강기법을 적용하지 않았을 때 각각 1.15 g, 2.85 g<sup>2</sup>의 오차를 보였다. 낙상 동작에 데이터 증강을 적용하였을 때 MAE, MSE 각각 1.32 g, 3.43 g<sup>2</sup>의 오차를 보였으며, 증강기법을 적용하지 않았을 때 각각 1.38 g, 3.19 g<sup>2</sup>의 오차를 나타냈다. 낙상 데이터 중 MSE의 경우 증강기법을 적용하였을 때 오차가 더욱 커지는 경향을 확인할 수 있다. 데이터 증강기법을 적용하지 않은 경우 MAE에서 1.25 g의 오차를 보였으며, MSE의 경우는 3.00 g<sup>2</sup>의 오차를 가지며, 두 가지 모두 데이터 증강 기법을 활용한 경우(MAE: 1.19 g, MSE: 2.93 g<sup>2</sup>)보다 더 큰 오차를 보였다. 모든 경우에서 일상 생활 동작에서의 오차가 낙상 동작에서의 오차보다 작은 경향을 확인하였다.

Fig 5는 각 모델에 따른 실험 동작에 대한 가속도 최대값의 예측값과 실제값을 평균과 표준편차로 나타낸 그래프이다. Fig 5의 A와 B의 경우 모두에서 ADL은 약 4 g보다 낮은 값으로 예측되었고, 낙상 동작들은 대략 4 g 이상의 높은 값을 보였다. F04와 F06의 경우 각각 앉으려다가 뒤로 넘어지기, 앉아있다가 옆으로 넘어지기로 비교적 낮은 높이에서의 낙상 동작이다. 이 동작들은 다른 낙상 동작들에 비해서 낮은 가속도 값을 가지며 예측 또한 낮게 되었다. D02와 D09는 각각 바닥에 앉았다 일어나기, 제자리에서 점프하기로 ADL 동작 중에서 다소 높은 가속도 최대값을 나타냈다. 모델 예측도 마찬가지로 다른 ADL에 비해서 높게 나타났다.

## 4. 토의

데이터 증강기법에 따른 예측 오차를 비교하였을 때 모든 증강 기법을 동시에 적용하였을 때가 가장 좋았으며, 이를 증강기법을

Table 2 Performances of models

Conv-LSTM	MAE [g]			MSE [g <sup>2</sup> ]		
	ADL	Fall	All	ADL	Fall	All
Augmentation	1.09	1.32	1.19	2.53	3.43	2.93
Non augmentation	1.15	1.38	1.25	2.85	3.19	3.00

적용하지 않았을 때와 비교하였다. Table 2의 데이터 증강 적용 여부에 따른 결과를 비교해 보았을 때 증강을 적용한 경우에서 더 낮은 오차를 보였다. 이는 데이터 증강기법으로 낙상 데이터에 더욱 큰 가중치를 둘 수 있었기 때문이다[19].

MAE와 MSE는 예측값과 실제값의 오차를 나타내는 방식으로 MAE는 값의 차이를 단순히 더하는 형태지만, MSE의 경우에는 값의 차이를 제곱의 형태로 더하는 형태이다. 따라서 MSE는 큰 오차에 더욱 민감하게 적용되어 값의 분포가 큰 높은 곳에서의 추락의 경우 MAE보다 MSE가 훈련에 더욱 적합했다 [17]. 그러나 낙상의 경우 ADL과 비교하였을 때, 가속도 최대값의 분포 차이가 크지 않기 때문에 MAE와 MSE의 큰 차이는 나타나지 않았다.

증강 기법에 따라서 일상 생활 동작은 모두 오차가 더 줄어드는 모습을 볼 수 있는데, 낙상 데이터를 증강시켜 낙상 동작에 대한 가중치를 늘렸음에도 불구하고 MSE에서 낙상 동작의 오차가 커진 것을 확인할 수 있다.

F04, F07, F11과 같은 후방 낙상 동작에서 F04는 낮은 가속도 값을 보였지만[16] F11과 같은 동작은 다른 낙상 동작과 비슷한 결과를 나타냈다. F04, F06과 같은 의자에서 낙상이 발생하는 동작은 낮은 높이에서 발생하는 낙상으로 그 충격이 적기 때문에 예측되는 가속도 최대값 또한 작게 나타났다. 이 동작들은 치명적인 사고로 이어질 가능성이 적어 위험한 동작이 아니라고 판단된다. D02, D07, D09와 같은 ADL 동작 중에서도 위험도가 있는 동작들은 높은 가속도 최대값을 나타냈다. D02는 바닥에 앉는 동작으로 동작 수행 시 몸에 충격이 가해지며, D07은 발을 헛디디는 동작, D09는 점프 동작으로 해당 동작들 모두 충분히 낙상으로도 이어질 수 있는 위험한 동작이라고 볼 수 있다.

F01, F02, F03과 같은 동작의 경우 낙상이 발생하기 직전에 걷기와 뛰기와 같은 어느정도 가속도 값이 나타나는 동작이 수반되는 경우 예측값이 실제값보다 더 낮게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 동작에서 발생한 가속도 값의 편차가 큰 편에 속하며 이로 인하여 예측값과의 차이가 크게 나타났다. 그러나 4 g 이상의 큰 가속도 최대값이 나타나는 것을 확인할 수 있기 때문에 ADL보다는 위험한 동작이라고 판단된다. ADL 중 D04 동작은 허리 숙여 물건 줍기의 동작으로 예측값이 크게 나타나는데, 이는 갑작스러운 각속도의 변화로 인해 나타난 결과라고 생각된다.

한편 실험 피험자들은 모두 젊은 건강한 남녀로 진행되었기 때문에 실제 고령자들에게 적용될지 모른다는 한계점을 가지고



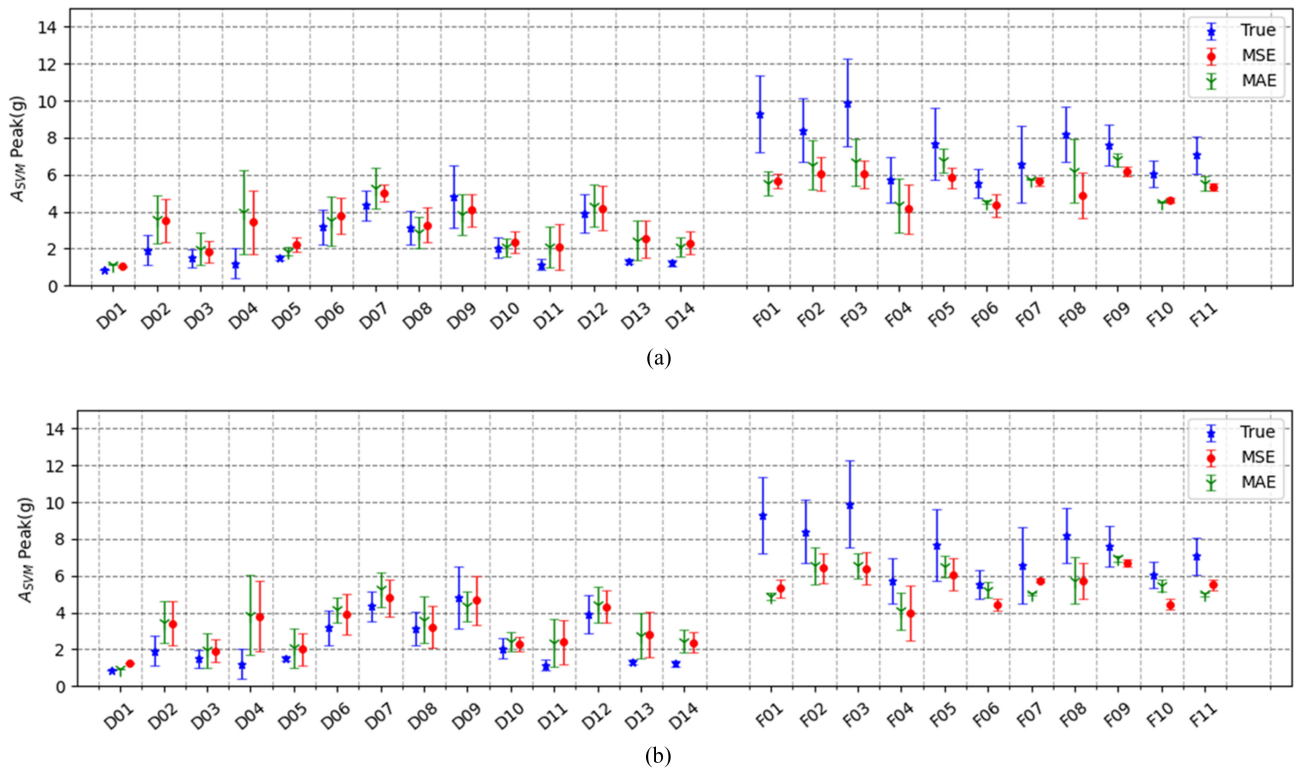


Fig. 5 True and predicted values (MAE vs MSE): A is the augmentation model and B is not

있다. 추후에는 고령자들을 대상으로 측정된 공용 데이터셋 등을 통해 연구를 진행할 예정이다. 또한 Noise Injection, Window Slicing, Scaling과 같은 전통적인 방식의 데이터 증강기법뿐만 아니라 GAN 모델을 활용한 딥러닝 기반의 데이터 증강기법을 통해 모델을 고도화시킬 예정이다. 이를 통해 실제값보다 낮게 예측되는 F01, F02, F03와 같은 동작들과 실제값보다 높게 예측되는 D04와 같은 동작들의 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 미래에는 위험도를 기반으로 환자의 상태를 모니터링 할 수 있는 어플리케이션 개발을 통해 계속해서 위험도를 확인하여 낙상 사고 혹은 위험한 동작이 발생했을 때 알람을 통하여 보호자의 빠른 대처를 기대할 수 있는 시스템을 개발할 예정이다.

## 5. 결론

본 연구진은 S2에 위치한 관성센서를 통해 딥러닝 기반의 회귀 모델을 활용하여 일상 생활 동작 및 낙상 동작에서 발생하는 가속도 SVM 최대값으로 대변되는 위험도를 예측하였다. MAE와 MSE의 두 가지 방식으로 딥러닝 모델을 훈련 및 평가하였다. 데이터 증강기법을 적용하였을 때 두가지 오차함수 모두 (MAE: 1.19 g, MSE: 2.93 g<sup>2</sup>) 더 좋은 성능을 보여 전통적인 증강기법이 모델 성능에 좋은 영향을 끼쳤다고 판단된다. 고령자의 낙상 동작을 포함한 일상 생활 동작의 부상 위험도를 예측하는 모니터링 알고리즘을 개발하였다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “R&D재발견프로젝트”의 지원(P0024994)과 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2022RIS-005)의 결과이다.

## REFERENCES

1. World Health Organization, Falls. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls>
2. National Institute for Health and Care Excellence, Falls in older people: Assessing risk and prevention. <https://www.nice.org.uk/guidance/cg161/chapter/introduction>
3. Hagen, G., Magnussen, J., Tell, G., Omsland, T., (2020), Estimating the future burden of hip fractures in Norway. A NOREPOS study, Bone, 131, 115156.
4. Haslam-Larmer, L., Donnelly, C., Auais, M., Woo, K., DePaul, V., (2021), Early mobility after fragility hip fracture: A mixed methods embedded case study, BMC Geriatrics, 21, 1-14.
5. Blackburn, J., Ousey, K., Stephenson, J., Lui, S., (2022), Exploring the impact of experiencing a long lie fall on physical and clinical outcomes in older people requiring an ambulance: A systematic review, International Emergency Nursing, 62, 101148.



6. Statistics Korea, 2022 elderly statistics. [https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060500&bid=10820&act=view&list\\_no=420896&tag=&nPage=1&ref\\_bid=](https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060500&bid=10820&act=view&list_no=420896&tag=&nPage=1&ref_bid=)
7. Boyé, N. D., Van Lieshout, E. M., Van Beeck, E. F., Hartholt, K. A., Van der Cammen, T. J., Patka, P., (2013), The impact of falls in the elderly, *Trauma*, 15(1), 29-35.
8. Koo, B., Kim, J., Nam, Y., Kim, Y., (2021), The performance of post-fall detection using the cross-dataset: feature vectors, classifiers and processing conditions, *Sensors*, 21(14), 4638.
9. Jung, H., Koo, B., Kim, J., Kim, T., Nam, Y., Kim, Y., (2020), Enhanced algorithm for the detection of preimpact fall for wearable airbags, *Sensors*, 20(5), 1277.
10. Sucerquia, A., López, J. D., Vargas-Bonilla, J. F., (2017), SisFall: A fall and movement dataset, *Sensors*, 17(1), 198.
11. Yu, X., Jang, J., Xiong, S., (2021), A large-scale open motion dataset (KFall) and benchmark algorithms for detecting pre-impact fall of the elderly using wearable inertial sensors, *Frontiers in Aging Neuroscience*, 13, 692865.
12. Yu, X., Koo, B., Jang, J., Kim, Y., Xiong, S., (2022), A comprehensive comparison of accuracy and practicality of different types of algorithms for pre-impact fall detection using both young and old adults, *Measurement*, 201, 111785.
13. Klenk, J., Schwickert, L., Palmerini, L., Mellone, S., Bourke, A., Ihlen, E. A., Kerse, N., Hauer, K., Pijnappels, M., Synofzik, M., (2016), The FARSEEING real-world fall repository: A large-scale collaborative database to collect and share sensor signals from real-world falls, *European Review of Aging and Physical Activity*, 13, 1-7.
14. Hajiaghamemar, M., Seidi, M., Ferguson, J. R., Caccese, V., (2015), Measurement of head impact due to standing fall in adults using anthropomorphic test dummies, *Annals of Biomedical Engineering*, 43, 2143-2152.
15. Arena, S. L., Davis, J. L., Grant, J. W., Madigan, M. L., (2016), Tripping elicits earlier and larger deviations in linear head acceleration compared to slipping, *PloS one*, 11(11), e0165670.
16. Kim, T. H., Choi, A., Heo, H. M., Kim, H., Mun, J. H., (2020), Acceleration magnitude at impact following loss of balance can be estimated using deep learning model, *Sensors*, 20(21), 6126.
17. Lee, S., Koo, B., Yang, S., Kim, J., Nam, Y., Kim, Y., (2022), Fall-from-height detection using deep learning based on IMU sensor data for accident prevention at construction sites, *Sensors*, 22(16), 6107.
18. Iglesias, G., Talavera, E., González-Prieto, Á., Mozo, A., Gómez-Canaval, S., (2022), Data augmentation techniques in time series domain: A survey and taxonomy. <https://arxiv.org/abs/2206.13508>
19. Wen, Q., Sun, L., Yang, F., Song, X., Gao, J., Wang, X., Xu, H., (2020), Time series data augmentation for deep learning: A survey, *arXiv preprint arXiv:2002.12478*.
20. Um, T. T., Pfister, F. M., Pichler, D., Endo, S., Lang, M., Hirche, S., Fietzek, U., Kulić, D., (2017), Data augmentation of wearable sensor data for parkinson's disease monitoring using convolutional neural networks, *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, 216-220.
21. Huang, S., Tang, J., Dai, J., Wang, Y., (2019), Signal status recognition based on 1DCNN and its feature extraction mechanism analysis, *Sensors*, 19(9), 2018.
22. Hochreiter, S., Schmidhuber, J., (1997), Long short-term memory, *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.

**Seunghee Lee**

M.S. candidate in the Department of Biomedical Engineering, Yonsei University. His research interests are biomechanics, elderly fall detection, risk prediction, data augmentation and AI.

E-mail: fhrm502@yonsei.ac.kr

**Bummo Koo**

Ph.D. in the Department of Biomedical Engineering, Yonsei University. His research interests are biomechanics, elderly fall detection, anomaly detection and AI.

E-mail: beommo@yonsei.ac.kr

**Sumin Yang**

M.S. candidate in the Department of Biomedical Engineering, Yonsei University. Her research interests are biomechanics, gait analysis and AI.

E-mail: abbey0909@yonsei.ac.kr

**Dongkwon Kim**

B.Sc. candidate in the Department of Biomedical Engineering, Yonsei University. His research interests are biomechanics and elderly fall detection.

E-mail: 2020272102@yonsei.ac.kr

**Youngho Kim**

Professor in the Department of Biomedical Engineering, Yonsei University. His research interests are musculoskeletal biomechanics and rehabilitation engineering.

E-mail: younghokim@yonsei.ac.kr



# 다관절 로봇시스템을 이용한 차체 금형 자동화 열처리 방안 연구

## Study on Automated Heat Treatment for Car-body Mold Using an Articulated Robot System

박기진<sup>1</sup>, 윤성호<sup>2, #</sup>

Kee Jin Park<sup>1</sup> and Sung Ho Yoon<sup>2, #</sup>

1 대구기계부품연구원 (Daegu Mechatronics & Materials Institute)

2 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

# Corresponding Author / E-mail: shyoon@kumoh.ac.kr, TEL: +82-54-478-7299

ORCID: 0000-0003-3430-1381

KEYWORDS: Articulated robot system (다관절 로봇시스템), Automated heat treatment (자동화 열처리), Car-body mold (차체 금형), High frequency induction heat treatment (고주파 유도 열처리), Laser heat treatment (레이저 열처리)

*The quality and quantity of heat treatment in mold processing can vary depending on the skill level of the equipment operator. Therefore, study on ways to overcome these disadvantages are essential. This study aimed to increase the anti-wear properties of molds through high-frequency induction heat treatment and laser heat treatment processes. The heat treatment was applied to the surfaces of molds used in car body production using an articulated robot, to achieve long-term use and quality maintenance. Additionally, an articulated robot system based on redundant degrees of freedom suitable for mold heat treatment processes was designed, and its operational efficiency was verified through virtual environment simulations. Furthermore, heat treatment was validated through on-site testing of the robot system. Its effects were analyzed according to mold materials and shape conditions, ultimately deriving the optimal robot heat treatment conditions. Finally, off-line programming (OLP) in virtual processes was proposed to minimize robot setup time and maximize production efficiency. The conditions for articulated robot automated heat treatment obtained in this study can be pre-applied in simulation environments when generating heat treatment robot programs based on OLP. They can be utilized for optimizing the quality of mold heat treatment in car body production.*

Manuscript received: September 7, 2023 / Revised: October 24, 2023 / Accepted: October 27, 2023

### 1. 서론

차체 금형 표면의 내마모성 향상을 위해 고주파 유도열처리 (High-frequency Induction Heat Treatment) 및 레이저열처리 (Laser Heat Treatment) 공정을 적용하고 있다. 고주파 유도 열처리 공정은 고주파 전류에서 발생하는 유도 가열을 이용하여 금속 표면을 경화시키는 방법으로 금형 표면에 열처리로 인한 열변형을 제거하기 위해 후가공이 필요하다는 단점이 있다. 레이저 열처리 공정은 고에너지의 레이저 빔을 이용하여 금속 표면을 경화시키는 방법으로 고주파 유도 열처리 공정과는 달리 금형 표면에 열처리로 인한 열변형이 크지 않아 후가공을 하지

않더라도 고품질 금형을 얻을 수 있지만 열처리 장비에 적용되는 다이오드나 디스크 레이저가 고가라는 단점이 있다.

최근에는 열처리 공정에 다관절 로봇을 이용하려는 시도가 행해지고 있다. Lee 등[1]은 레일, 갠트리 장치, 가열코일유닛, 인버터 장치, 고주파전류 증폭장치 등으로 구성된 고주파 유도 열처리 자동화 장치를 제안하였다. Hwang [2]은 자동차 차체 제작용 대형 금형 표면의 경도를 높이고 순간가열성능을 향상시킬 수 있는 레이저 열처리 장치 및 방법을 제안하였다. Nyameke [3]는 고주파 유도 열처리용 다관절 산업로봇에 대한 질적 연구를 수행하여 수작업과 산업로봇 적용에 따른 비용 분석 결과 및 수익성 창출 효과 방안을 제시하였다. Smalcerz 등

[4]은 수치해석과 측정을 통해 고주파 유도 열처리 공정에 적용되는 산업로봇 위치가 유도 가열 시스템의 전자기장 분포에 미치는 영향을 조사하였다. Park 등[5]은 작업자 숙련도에 영향을 받는 수작업의 한계를 극복하고 안정화된 품질을 얻을 수 있기 위해 OLP (Off-line Programming) 방식 시뮬레이터가 적용된 고주파 열처리 로봇시스템을 제안하였으며 차체 금형의 열처리 기준에 부합하는 데이터베이스 구축 방안도 제시하였다. 그러나 많은 연구결과에도 불구하고 산업로봇을 차체 금형의 열처리에 효율적으로 적용하기 위해서는 복잡한 곡면부를 가진 차체 금형 전체 영역의 열처리가 가능하고 작업시간도 최소화할 수 있는 열처리 경로 정밀 제어에 대한 연구도 수행될 필요가 있다.

본 연구에서는 차체 금형의 열처리 공정용 다관절 로봇 시스템의 작업 효율성을 높이기 위해 가상 환경 시뮬레이션을 수행하였으며 금형 소재들에 대한 다양한 열처리 조건에 따른 열처리 효과를 제시하였다. 아울러 가상 환경에서 현장 로봇의 열처리 프로그램을 사전에 코딩하여 작업시간을 최소화하며 가상 환경과 실제 환경 사이에서 발생하는 로봇의 기구학적 위치 및 방향 오차를 보정하기 위한 방안도 제시하였다.

## 2. 가상 환경 시뮬레이션

### 2.1 여유자유도를 가진 다관절 로봇

복잡한 곡면부를 가진 금형 표면 열처리에 6축 자유도를 가진 다관절 로봇을 적용하더라도 곡면부 표면을 가진 경우에는 균일하게 열처리하기 위한 작업 자세 잡기가 용이하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 6축 다관절 로봇에 1축 또는 2축 여유자유도를 부가하여 특이점 회피, 장애물 회피, 관찰한 계 회피 등과 같은 기능을 갖게 하여 작업영역을 확장하는 방법이 시도되고 있다. 그러나 여유자유도가 부가된 다관절 로봇은 위치 정보를 통해 조인트 각도를 구할 수 있는 로봇의 역기구학(Inverse Kinematics)을 적용하며 이러한 경우 제어하기에 어려움이 발생할 수 있다. 특히 Pseudo-inverse 또는 Generalized Inverse 기법을 적용하여 로봇의 역기구학 제어하는 경우 조인트 속도나 가속도의 급격한 증가로 인해 로봇 시스템이 불안정해진다. 본 연구에서는 여유자유도 로봇의 장점은 살리면서 산업현장에서 쉽게 사용될 수 있는 실용적인 로봇을 개발하기 위해 여유자유도를 가진 다관절 로봇에 순기구학(Forward Kinematics)을 적용한 단순화 모델을 제안하였다. Fig. 1에는 6축 다관절 로봇의 축 끝단에 1축 또는 2축 여유자유도가 부가된 로봇 축의 설계 형상과 동작 메커니즘이 나타나 있다.

Fig. 2에는 6축 다관절 로봇(BX200L, Kawasaki, Japan)에 1축 또는 2축 여유자유도가 부가된 다관절 로봇의 시뮬레이션 모델이 나타나 있다. 해석 모델은 6축 다관절 로봇에 역기구학이 적용되어 있으며 다관절 로봇 끝단에 부가된 1축 또는 2축

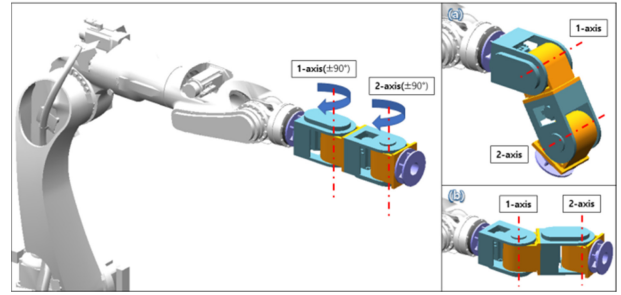


Fig. 1 Design concept of redundancy to the end of 6-axis articulated robot

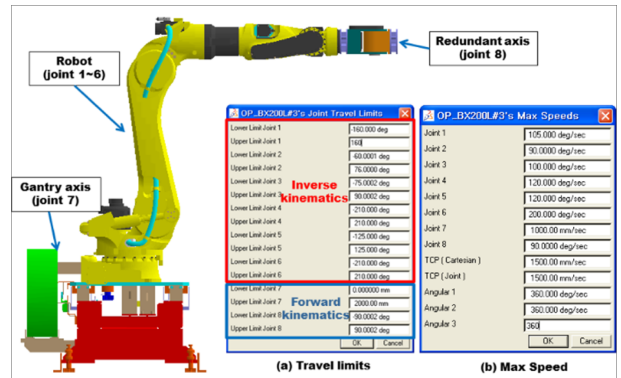
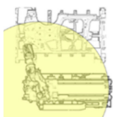
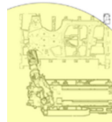
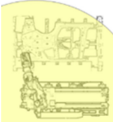


Fig. 2 Design concept of articulated robot with 1-axis redundancy and 1-axis gantry

Table 1 Working area of robots without or with redundancy

Robot type	6-axis robot	7-axis robot	8-axis robot
Work area [%]			
	100	120	125

여유자유도는 부가 축으로 정의한 순기구학이 적용되어 있다. 또한 로봇의 TCP (Tool Center Point) 최대속도는 1,500 mm/sec를 적용하였다.

Table 1에는 Delmia Igrip (Delmia, Dassault Systemes, France)을 적용하여 분석된 6축 다관절 로봇, 7축 다관절 로봇, 8축 다관절 로봇의 작업 가능 영역이 비교되어 나타나 있다. 작업 영역 분석에 요구되는 여유자유도의 끝단은 여유자유도가 장착된 다관절 로봇 축 끝단에서의 TCP 위치로 정의하였다. 여기에서 보면 1축 또는 2축 여유자유도가 부가된 7축 다관절 로봇 또는 8축 다관절 로봇은 6축 다관절 로봇의 경우에 비해 20~25% 정도 작업 영역이 넓게 나타났다.

### 2.2 7축 다관절 로봇의 가상 환경 시뮬레이션

Fig. 3에는 복잡한 곡면부를 가진 차체 금형의 고주파 유도



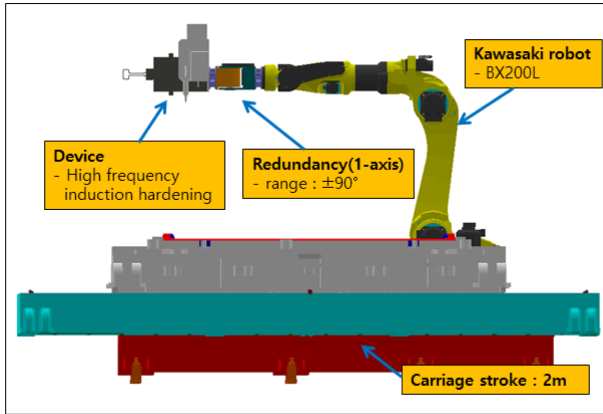


Fig. 3 High-frequency induction heat treatment robot with 1-axis redundancy

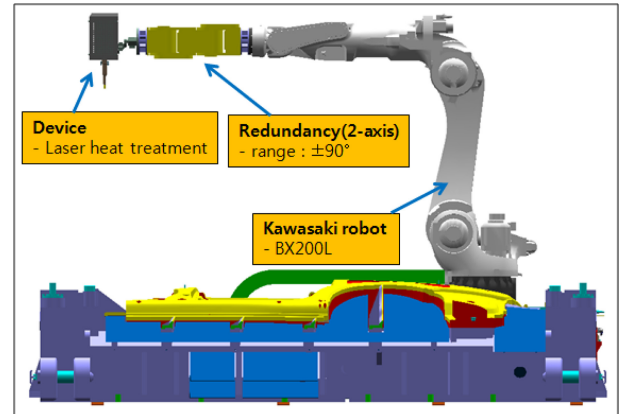


Fig. 5 Laser heat treatment robot with 2-axis redundancy

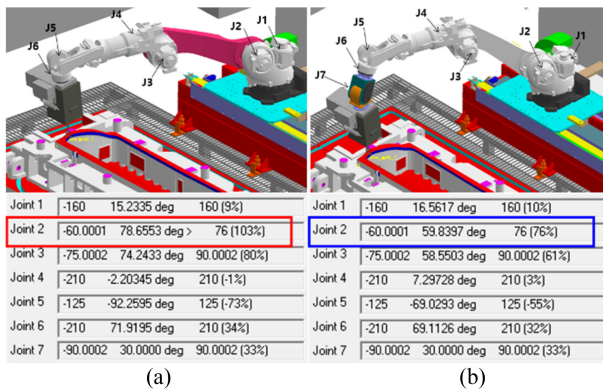


Fig. 4 Simulation results of high-frequency induction heat treatment on the robot: (a) with 6-axis robot (b) with 7-axis robot

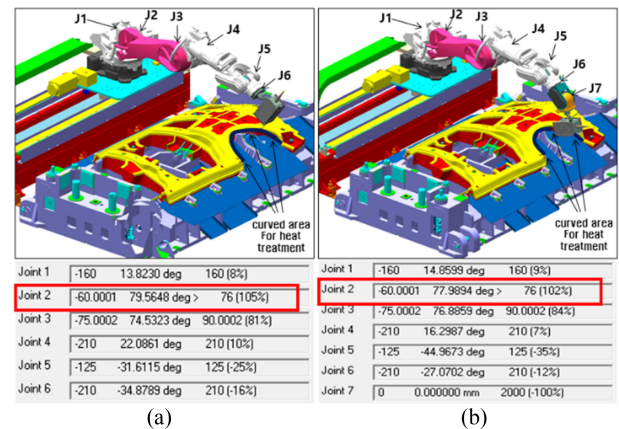


Fig. 6 Simulation results of laser heat treatment on the robot (a) with 6-axis robot and (b) with 7-axis robot

열처리 작업 가능 여부를 검증하기 위한 7축 다관절 로봇의 시뮬레이션 모델이 나타나 있다. 해석 대상은 6축 다관절 로봇의 끝단에 1축 여유자유도를 부가한 경우로서 로봇 본체와의 충돌을 고려하여 여유자유도의 회전 각도는  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ 로 제한하였다. 또한 링크의 길이는 여유자유도의 필요성이 열처리 톨의 각도 조절에 있음을 고려하여 제작 및 조립이 가능한 최소의 링크 길이를 적용하여 설계하였으며, 실제 현장의 로봇과 동일한 작업 모션을 구현할 수 있도록 하였다[6,7].

Fig. 4에는 6축 다관절 로봇과 7축 다관절 로봇의 시뮬레이션 결과가 비교되어 나타나 있다. 6축 다관절 로봇을 이용하여 금형 반대쪽 표면을 열처리하는 경우 Fig. 4(a)와 같이 로봇의 Joint 2번의 허용 범위가 100% 이상으로 초과되는 상태로 나타났지만 7축 다관절 로봇의 경우는 추가적인 여유각도를 가질 수 있는 상태이기 때문에 Fig. 4(b)와 같이 금형 반대쪽 표면을 포함한 전체 영역을 열처리할 수 있음이 확인되었다. 따라서, 테일게이트 금형을 적용한 고주파 유도 열처리 공정의 경우 1축 여유자유도 로봇이 열처리 작업에 효율적이며 실용적인 로봇으로 판단된다.

### 2.3 8축 다관절 로봇의 가상 환경 시뮬레이션

Fig. 5에는 복잡한 곡면부를 가진 금형의 레이저 열처리 작업 가능 여부를 검증하기 위한 8축 다관절 로봇의 시뮬레이션 모델이 나타나 있다. 해석 대상은 6축 다관절 로봇의 끝단에 2축 여유자유도를 추가한 경우로서 여유자유도의 회전 각도는  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ 로 제한하여 실제 현장의 로봇과 동일한 작업 모션을 구현할 수 있도록 하였다. 8축 다관절 로봇은 복잡한 곡면부를 가진 금형 표면에 레이저를 수직하게 분사할 수 있기 때문에 6축 또는 7축 다관절 로봇으로는 작업자세를 잡기가 어려운 대형 금형 표면의 곡면부 열처리가 가능함을 알 수 있었다.

Fig. 6에는 6축 및 7축 다관절 로봇을 이용한 레이저 열처리 작업의 시뮬레이션 결과가 나타나 있다. 여기에서 보면 금형 반대쪽 곡면부를 열처리하는 경우 로봇 Joint 2번의 허용 범위가 100% 이상으로 초과되는 상태로 나타나 작업이 불가능하였지만 Fig. 7(a)와 같이 8축 다관절 로봇을 이용한 레이저 열처리 작업 시에는 Fig. 7(a)에서와 같이 금형 반대쪽 곡면부뿐 아니라 Fig. 7(b)에서와 같이 금형 내면 곡면부를 열처리하는 경우에도

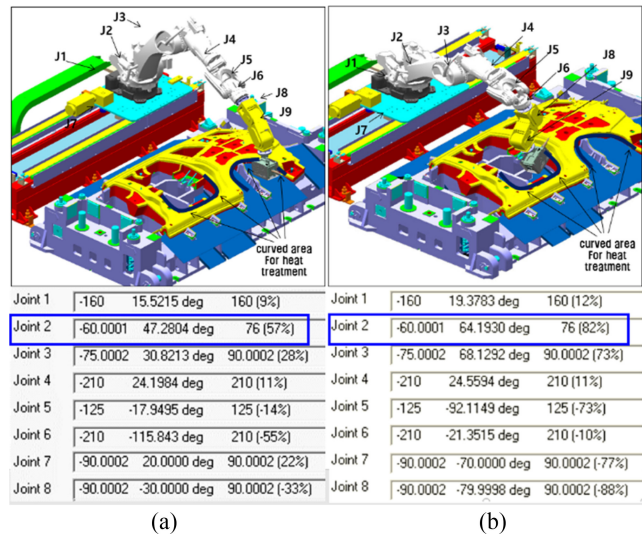


Fig. 7 Simulation results of laser heat treatment on the robot with 2-axis redundancy: (a) for the other side curved part of mold and (b) inner curved part of mold

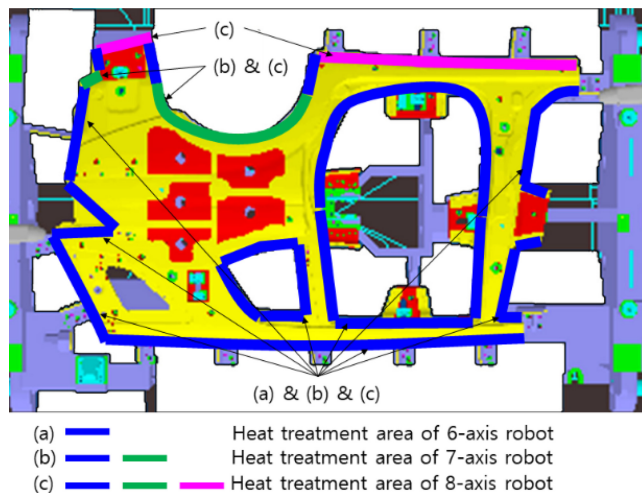


Fig. 8 Comparison of working area for laser heat treatment by applying 6-axis to 8-axis articulated robots

로봇의 각 축 조인트 정보가 허용범위 내에 있기 때문에 작업자 세를 잡는 것이 가능하여 금형 표면 곡면부의 넓은 영역을 열처리할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8에는 6축 다관절 로봇, 7축 다관절 로봇, 8축 다관절 로봇의 작업 영역이 비교되어 나타나 있다. 차체 금형 열처리를 위해 레이저 열처리 공정에 6축 다관절 로봇을 적용하는 경우 전체 열처리 영역 중 78% 정도 열처리 작업이 가능하였고 7축 다관절 로봇을 적용하는 경우 전체 열처리 영역의 89% 정도 열처리 작업이 가능하였으며 8축 다관절 로봇을 적용하는 경우 전체 열처리 영역의 100%가 열처리 가능하였다. 따라서 사이드 아우터 금형을 적용한 레이저 열처리 공정의 경우 2축 여유자 유도 로봇이 열처리 작업에 효율적이며 실용적인 로봇으로 판단된다.

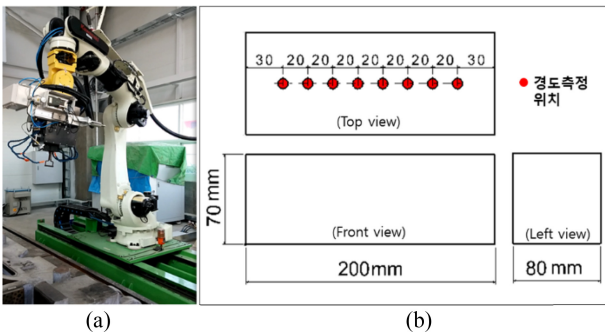


Fig. 9 Specimen configuration and measured points for high-frequency induction heat treatment

Table 2 Test conditions for high-frequency induction heat treatment

No.	Transfer speed [mm/sec]	Electric power [w]	Distance [mm]
0	Untested specimens		
1	4	2,000	2
2	4	2,500	3
3	4	3,000	4
4	5	2,000	3
5	5	2,500	4
6	5	3,000	2
7	6	2,000	4
8	6	2,500	2
9	6	3,000	3

### 3. 열처리 시험 및 효과성 분석

#### 3.1 고주파 유도 열처리 시편 형상 및 시험 조건

Fig. 9와 Table 2에는 고주파 유도 열처리 시험에 적용된 시편 형상과 시험 조건이 나타나 있다. 시편의 소재는 HD700, HCI350, FCD550이고 크기는  $200 \times 70 \times 80 \text{ mm}^3$ 이며 설계인자는 이송속도, 전력, 시편과 코일 간의 간격으로 설정하였다. 시험 조건은 다구찌 실험계획법에 근거하여 도출하였으며 도출된 시험조건은 9개의 시편에 적용하였다. 열처리 효과는 준비된 시편에 대해 규정된 시험조건으로 열처리한 후 일정 간격 떨어진 8개 지점에서의 경도를 측정하여 검증하였다.

Fig. 10과 Table 3에는 레이저 열처리 시험에 적용된 시편 형상과 시험 조건이 나타나 있다. 시편의 소재는 HD700, HCI350, FCD550이고 크기는  $150 \times 800 \times 200 \text{ mm}^3$ 이며 설계인자는 이송 속도, 온도, 빔 크기로 설정하였다. 시험 조건은 고주파 유도 열처리 시험에서와 마찬가지로 다구찌 실험계획법에 근거하여 도출하였다. 본 연구에서는 빔 크기의 경우 시편의 형상과 너비를 고려하여  $5 \times 40 \text{ mm}$ 로 고정하였으며 각 시험 조건을 적용하기 위해 9개의 시편을 준비하였다. 열처리 효과는 준비된 시편에 대해 규정된 시험 조건으로 열처리한 후 일정 간격 떨어진 8개 지점에서의 경도를 측정하여 검증하였다.

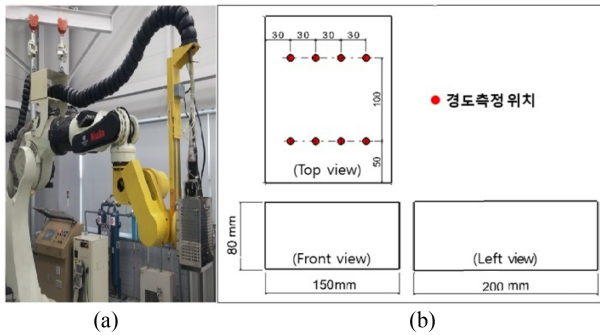


Fig. 10 Specimen configuration and measured points for laser heat treatment

Table 3 Test conditions for laser heat treatment

No.	Transfer speed [mm/sec]	Temperature [°C]	Beam size [mm]
0	Untested specimens		
1	3	1,000	5 × 40
2	3	1,100	5 × 40
3	3	1,200	5 × 40
4	4	1,000	5 × 40
5	4	1,100	5 × 40
6	4	1,200	5 × 40
7	5	1,000	5 × 40
8	5	1,100	5 × 40
9	5	1,200	5 × 40

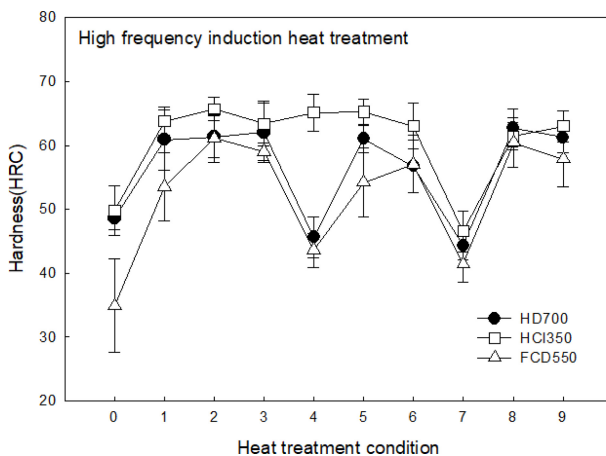


Fig. 11 Hardness results of high-frequency induction heat treatment

### 3.2 고주파 유도 열처리 시험 결과

Fig. 11에는 고주파 유도 열처리 시편에서 측정된 경도가 나타나 있다. HD700의 경우 열처리 전 48.6 HRC가 열처리 후에는 시험조건 1, 2, 3, 5, 8, 9번에서 60.0 HRC 이상의 경도가 나타났고 HCI350의 경우 열처리 전 49.9 HRC가 열처리 후에는 시험조건 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9번에서 60.0 HRC 이상의 경도가

Table 4 Test conditions of design parameters for high-frequency induction heat treatment

Material	Transfer speed [mm/sec]	Electric power [w]	Distance [mm]
HD700	6	2,500	2
HCI350	4	2,500	3
FCD550	4	2,500	3

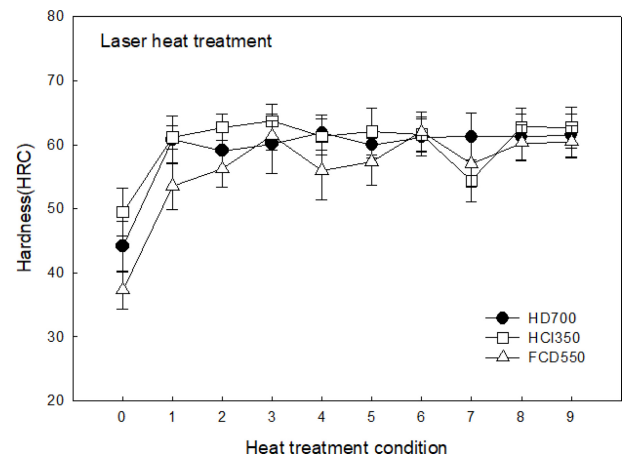


Fig. 12 Hardness results of laser heat treatment

나타났으며 FCD550의 경우 열처리 전 34.9 HRC가 열처리 후에는 시험조건 2, 8번에서 60.0 HRC 이상의 경도가 나타났다. 그러나 일부 열처리 조건에서는 열처리 효과가 명확하게 나타나지 않은 경우도 관찰되었지만 적용 소재에 따라 적절한 열처리 조건이 적용될 필요가 있음을 알 수 있었다.

Table 4에는 고주파 유도 열처리 시에 가장 높은 경도를 얻을 수 있는 시험 조건이 정리되어 있다. HD700의 경우 이송속도는 6 mm/sec, 전력은 2,500 W, 시편과 코일 간의 간격은 2 mm, HCI350의 경우 이송속도는 4 mm/sec, 전력은 2,500 W, 시편과 코일 간의 간격은 3 mm, FCD550의 경우 이송속도는 4 mm/sec, 전력은 2,500 W, 시편과 코일 간의 간격은 3 mm가 바람직한 열처리 조건으로 나타났다.

### 3.3 레이저 열처리 시험 결과

Fig. 12에는 레이저 열처리 시편에서 측정된 경도가 나타나 있다. HD700의 경우 열처리 전 43.4 HRC가 열처리 후에는 시험조건 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9번에서 60.0 HRC 이상의 경도가 나타났고 HCI350의 경우 열처리 전 52.2 HRC가 열처리 후에는 시험조건 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9번에서 60.0 HRC 이상의 경도가 나타났으며 FCD550의 경우 열처리 전 38.4 HRC가 열처리 후에는 시험조건 3, 6, 8, 9번에서 60.0 HRC 이상의 경도가 나타났다. 그러나 Fig. 13에서와 같이 HD700과 FCD550 소재에서는 열처리 온도가 1,250°C 이상이 되면 소재 표면에 용융 현상이 관찰되었다. 이로 미루어 판단하면 적용 소재에 따라 소재 표면이 용융되지 않는 적절한 열처리 온도의 적용이 필요함을 알 수



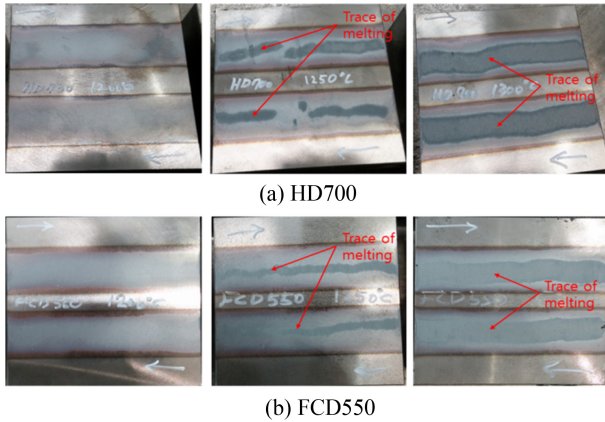


Fig. 13 Traces of melting at temperatures above 1,250°C for laser heat treatment

Table 5 Test conditions for design parameters for laser heat treatment

Material	Transfer speed [mm/sec]	Temperature [°C]	Beam size [mm]
HD700	4	1,000	5 × 40
HCI350	4	1,000	5 × 40
FCD550	3	1,200	5 × 40

있었다.

Table 5에는 레이저 열처리 시에 가장 높은 경도를 얻을 수 있는 시험조건이 정리되어 있다. HD700의 경우 이송속도는 4 mm/sec, 온도는 1,000°C, HCI350의 경우 이송속도는 4 mm/sec, 온도는 1,000°C, FCD550의 경우 이송속도는 3 mm/sec, 온도는 1,200°C가 바람직한 열처리 조건으로 나타났다.

#### 4. 다관절 로봇의 위치 및 방향 오차 보정 방안

가상 환경에서 현장 로봇의 열처리 프로그램을 사전에 코딩하는 OLP (Off-line Programming) 공정은 현장 로봇의 교시 작업시간을 줄일 수 있는 방안 중 하나로서 가상 환경과 실제 환경 사이에서 발생하는 로봇의 위치 및 방향에 대한 오차 보정이 필수적이다[8-10]. 특히 로봇의 정밀한 위치 보정을 위해서는 로봇의 기구학적 설계 오차 보정과 작업대상물 사이의 위치 오차 보정이 동시에 이루어져야 한다. 본 연구에서는 레이저 트래커와 같은 정밀 측정 장치를 이용하여 로봇의 손끝 위치와 공정상의 작업 대상물을 측정한 후 측정된 데이터와 오차 보정 알고리즘을 이용하여 로봇의 변수 및 위치를 구하였다.

Fig. 14에는 레이저 트래커(FARO Laser Tracker, MetrologyWorks, USA)로 측정된 로봇과 기준좌표계의 위치를 소프트웨어(Delmiа, Dassault Systems, France)에 적용하여 실제 환경과 가상 환경 사이의 위치 및 방향 오차를 보정하는 공정 사례가 나타나 있다. 레이저 트래커로 로봇의 다양한 위치를 측정하여

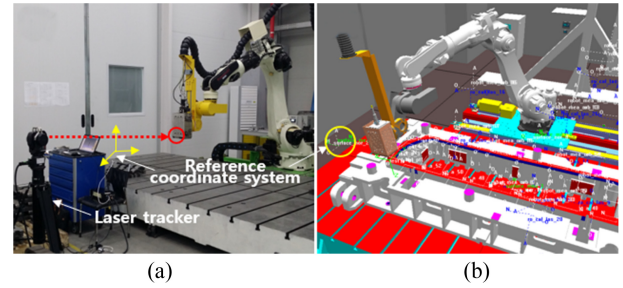


Fig. 14 Calibration of OLP using a laser tracker: (a) real environment and (b) virtual environment

Table 6 Error analysis between OLP coordinates and actually measured coordinate values of high-frequency heat treatment robot

	Command value (OLP)			Measured value (Laser tracker)			Error
	X <sup>1</sup> [mm]	Y <sup>1</sup> [mm]	Z <sup>1</sup> [mm]	X <sup>2</sup> [mm]	Y <sup>2</sup> [mm]	Z <sup>2</sup> [mm]	
1	4977.3	402.8	148.6	4977.9	402.3	149.8	1.4
2	5959.6	-316.8	-381.3	5960.1	-317.7	-381.9	1.2
3	4935.9	-215.4	-937.1	4936.3	-216.4	-937.0	1.0
4	4207.9	-87.0	377.5	4207.5	-87.6	377.1	0.8
5	4018.9	172.3	-450.6	4018.8	171.7	-450.9	0.7
6	4972.0	1469.6	-462.9	4972.0	1470.3	-463.0	0.7
7	5430.4	497.3	-398.2	5430.7	496.9	-398.7	0.7
8	5240.9	996.9	16.9	5240.5	997.1	17.0	0.4
9	5176.0	-10.9	79.7	5176.2	-11.3	79.9	0.6
10	5439.4	1451.0	-141.0	5439.2	1451.5	-141.7	1.0
11	5458.3	1779.2	-787.2	5458.3	1778.9	-787.1	0.3
12	3865.6	1329.0	102.6	3865.7	1329.0	102.9	0.3
13	4674.4	2334.9	-206.7	4674.5	2334.3	-207.2	0.7
14	4212.7	421.0	-406.8	4212.8	421.7	-407.2	0.7
15	4209.2	2365.3	-183.2	4208.9	2365.8	-183.5	0.7
16	5358.5	2506.1	-405.8	5359.1	2506.7	-406.0	0.9
17	4712.5	1410.0	-74.4	4713.2	1410.3	-73.6	1.1
18	5541.7	-483.8	-227.7	5541.3	-484.3	-227.4	0.7
19	5265.4	1086.5	-229.3	5265.1	1086.4	-229.1	0.4
20	5215.7	1584.0	-230.5	5215.5	1584.5	-230.5	0.6
21	5166.0	2081.5	-231.7	5165.7	2082.2	-231.7	0.8
22	5116.4	2579.0	-232.9	5116.4	2580.0	-232.7	1.0

$$Error = \sqrt{(x^2 - x^1)^2 + (y^2 - y^1)^2 + (z^2 - z^1)^2}$$

로봇의 기구학적 설계 오차 및 로봇과 작업대상물 사이의 오차를 보정하였다.

Tables 6과 7에는 고주파 유도 열처리 및 레이저 열처리 로봇에 대한 가상 환경과 실제 환경 사이의 위치 및 방향 오차 보정 후의 위치 오차 분석 결과가 나타나 있다. 이때 측정점은 금형

Table 7 Error analysis between OLP coordinates and actually measured coordinate values of laser heat treatment robot

	Command value (OLP)			Measured value (Laser tracker)			Error
	X <sup>1</sup> [mm]	Y <sup>1</sup> [mm]	Z <sup>1</sup> [mm]	X <sup>2</sup> [mm]	Y <sup>2</sup> [mm]	Z <sup>2</sup> [mm]	
1	3862.2	-2537.1	-422.6	3861.6	-2536.0	-424.0	1.9
2	2921.8	-2121.7	-501.3	2920.8	-2122.2	-500.5	1.4
3	2579.6	-2095.5	-158.7	2580.5	-2096.3	-157.1	2.0
4	2623.6	-1592.7	-686.5	2622.5	-1592.3	-687.5	1.5
5	4293.3	-1459.1	-677.1	4292.4	-1457.9	-675.5	2.2
6	4291.4	-1459.2	-674.7	4292.4	-1457.9	-675.5	1.7
7	4351.9	-599.3	30.9	4352.9	-599.8	30.0	1.5
8	3714.7	-462.9	-629.3	3713.8	-464.2	-628.4	1.8
9	2913.0	-402.4	-635.2	2911.7	-403.5	-634.2	1.9
10	2970.4	392.3	-585.3	2971.7	393.4	-586.4	2.0
11	3810.9	194.2	-391.9	3809.5	193.2	-390.7	2.2
12	4418.9	208.3	-681.0	4417.8	206.8	-681.9	2.1
13	4490.1	1205.2	-684.4	4490.8	1204.2	-683.0	1.8
14	3743.1	1261.9	-689.5	3742.2	1260.8	-688.5	1.7
15	3264.6	1037.6	-780.8	3265.9	1038.4	-782.0	2.0
16	3263.8	1037.5	-288.1	3262.3	1038.8	-290.0	2.8
17	3249.3	166.7	-290.8	3248.2	165.7	-289.4	2.1
18	3175.2	-779.4	-288.2	3176.7	-778.5	-289.1	2.0
19	3805.8	-1064.6	-669.2	3805.0	-1065.8	-670.6	2.0
20	2683.5	-938.6	-679.6	2682.4	-939.8	-678.2	2.1
21	3684.7	-1288.2	-380.0	3683.8	-1287.2	-381.4	2.0
22	3644.8	-1853.8	-381.5	3643.3	-1855.2	-380.4	2.3

$$Error = \sqrt{(x^2 - x^1)^2 + (y^2 - y^1)^2 + (z^2 - z^1)^2}$$

표면의 전체 열처리 영역을 포함하는 22개 지점으로 설정하였다. 여기에서 보면 오차는 전체 금형 열처리 영역에서 3 mm 이내로서 특정 영역에 편중되어 나타나지 않았다. 특히 최대 오차와 평균 오차는 고주파 유도 열처리 로봇의 경우 1.4 mm와 0.8 mm, 레이저 열처리 로봇의 경우 2.8 mm와 2.0 mm로 나타났다. 이로 미루어 보면 산업용 다관절 로봇의 위치정밀도가 ±0.05 mm, 차체 금형의 치수정밀도가 0.01 mm 이내인 점을 고려할 때, 로봇의 종류와 금형 형상이 변경되더라도 열처리 로봇의 위치 오차는 유사한 결과가 나타날 것으로 예상되기 때문에 경량화된 제품이나 공간을 활용한 제품에 적용 가능할 것으로 판단된다.

Table 8에는 OLP 프로그램이 지원되지 않은 열처리 공정에 대한 실제 현장에서 측정한 로봇 교시시간과 가상 환경 기반 OLP 프로그램이 적용된 열처리 공정에 대한 실제 현장에서 측정한 로봇 교시시간이 비교되어 있다. OLP 프로그램이 적용된 로봇 교시시간은 레이저 트래커를 활용한 가상 환경과 실제

Table 8 Effect of heat treatment time to create robot work path according to the application of OLP

Heat treatment (Mold)	Heat treatment length [m]	Robot teaching time [hr]	Robot teaching time with OLP [hr]
High frequency heat treatment (Tail gate)	6.5	5	3.0
Laser heat treatment (Side outer)	14.5	8	3.5

환경 사이의 위치 오차 보정시간이 포함되어 있으며 위치 오차 보정이 완료된 OLP 프로그램을 업로드하여 로봇 교시를 수행하고 열처리 작업을 진행하였다. OLP 프로그램이 적용되면 로봇 교시시간은 고주파 열처리 작업의 경우 40%, 레이저 열처리 작업의 경우 56% 단축시킬 수 있음을 현장 측정을 통해 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 차체 금형 열처리 공정에 적용하기 위한 다관절 로봇 시스템의 작업효율성을 분석하고 다양한 금형 소재에 대한 열처리 시험 수행을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 7축 또는 8축 다관절 로봇은 6축 다관절 로봇에 비해 작업 영역을 20-25% 넓힐 수 있으며 7축 다관절 로봇은 고주파 열처리 공정, 8축 다관절 로봇은 레이저 열처리 공정에 효율적인 것으로 나타났다.

2. 고주파 유도 열처리 시에는 금형 소재에 따라 다소 차이는 있지만 이송속도는 4-6 mm/sec, 전력은 2,500 W, 시편과 코일 간의 간격은 2-3 mm가 바람직한 공정 변수임을 알 수 있었다.

3. 레이저 열처리 시에는 고주파 유도 열처리와 마찬가지로 금형 소재에 따라 다소 차이는 있지만 이송속도는 3-4 mm/sec, 온도는 1,000-1,200°C가 바람직한 공정 변수임을 알 수 있었다.

4. 가상 환경과 실제 환경 사이의 위치 오차 보정이 적용된 OLP 기반의 열처리 로봇 교시시간은 기존의 로봇 교시시간보다 40-56% 단축시킬 수 있었다.

5. 가상 환경과 실제 환경 사이에서 발생하는 로봇의 기구학적 위치 및 방향 오차가 보정되면 가상 환경에서 현장 로봇의 열처리 프로그램을 사전에 코딩하는 OLP (Off-line Programming) 공정을 통해 현장 로봇의 교시 작업시간을 최소화할 수 있으며 차체 금형 열처리 품질의 최적화에도 활용될 수 있다.

## REFERENCES

1. Lee, H. C., (2009), High frequency induction heating gantry robot, KR 10-2009-0130473.
2. Hwang, H. T., (2009), Local heat treatment device and heat

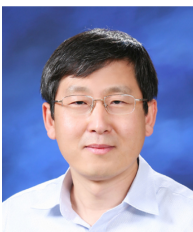


- treatment method of large casting mold for press using semiconductor laser, KR 10-2009-0113837. <https://doi.org/10.8080/1020090113837>
3. Nyameke, E., (2013), Feasibility study of implementing an industrial robot for induction hardening machine, Vaasa University of Applied Sciences.
  4. Smalcerz, A., Przyłucki, R., (2013), Electromagnetic field analysis of inductor-robot-work-piece system, *Metalurgija*, 52(2), 223-226.
  5. Park, K.-J., Kim, Y.-S., Development of the induction heat treatment robot system for the car-body mold using OLP simulator, SAE Technical Paper, 2014.
  6. Hildenbrand, D., Lange, H., Stock, F., Koch, A., (2008), Efficient inverse kinematics algorithm based on conformal geometric algebra-Using reconfigurable hardware. <https://doi.org/10.5220/0001094603000307>
  7. Tsai, L.-W., Morgan, A. P., (1985), Solving the kinematics of the most general six-and five-degree-of-freedom manipulators by continuation methods, *Journal of Mechanical Design*, 107(2), 189-200.
  8. Robinson, P., Orzechowski, P., James, P., Smith, C., (1997), An automated robot calibration system, ISIE'97 Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, SS285-SS290. <https://doi.org/10.1109/ISIE.1997.651777>
  9. Menq, C.-H., Borm, J.-H., Lai, J. Z., (1989), Identification and observability measure of a basis set of error parameters in robot calibration, *Journal of Mechanical Design*, 111(4), 513-518.
  10. Zhuang, H., Roth, Z. S., Hamano, F., (1990), Observability issues in kinematic error parameter identification of manipulators, Proceedings of the 1990 American Control Conference, 2287-2293.



#### **Kee Jin Park**

Principal Researcher in the Machinery & Robot Research Headquarter, Daegu Mechatronics & Materials Institute. Research interests are design, analysis, simulation, OLP and calibration of articulated robot system.  
E-mail: [kjpark@dmi.re.kr](mailto:kjpark@dmi.re.kr)



#### **Sung Ho Yoon**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Research interests are design, analysis, test, evaluation, and life prediction of advanced composite structures.  
E-mail: [shyoon@kumoh.ac.kr](mailto:shyoon@kumoh.ac.kr)

## 창간

(사)한국정밀공학회에서 발행한 한국정밀기계학회는 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 심사위원에 의해 진행되며 심사 및 게재여부 판정 절차는 논문심사규정에 따른다.

### 제8조 (저작권)

- ① 논문내용에 대한 책임은 저자(들)에게 있다.
- ② 저자(들)는 제출된 논문의 저작권을 학회에 양도하여야 하며, 이를 위해 교신저자는 '한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서(Research Ethics and Copyright Transfer Agreement)'를 제출하여야 한다.
- ③ 게재된 논문 및 기타 투고물의 저작권은 학회에 있으며, 학회의 승인 없이 무단으로 복제할 수 없다.
- ④ 저자(들)는 자신(들)의 다른 연구물에 학회지에 게재된 논문 및 기타투고물의 일부를 사용할 수 있으나, 그 내용의 출처로 게재 논문을 인용해야 한다.

### 제9조 (자료공개)

학회는 논문 및 기타 투고물을 인쇄물과 온라인 출판물 등의 형태로 공개할 수 있다.

### 제10조 (원고작성요령)

- ① 학회에 투고하는 원고의 작성방법 및 편집은 별도로 규정된 '논문집필요령'에 따른다.
- ② 편집위원회는 채택된 원고에 대하여 용어, 문자, 맞춤법 등을 '논문집필요령'에 부합되도록 수정할 수 있다.

### 제11조(게재료)

저자는 학회지에 게재된 논문에 대하여 소정의 게재료를 납부하여야 한다. 규정면수를 초과한 논문의 경우 초과 면에 대한 게재료를 납부하여야 한다. 게재료는 이사회에서 결정한다.

## 논문집필요령

1. 논문원고를 투고할 때는 한국정밀공학회지 양식에 맞춰 <https://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 심사과 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 기본요건이 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](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 '이중게재'란 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

### 제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

- ⑦ 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.
- ⑧ 연구에 학술적으로 기여하지 않았거나 기여도가 현저히 떨어지는 자를 학문 외적인 이유로 공저자로 기재하는 것은 학문의 권위를 실추시키는 부도덕한 행위이다.
- ⑨ 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.

#### 제7조 (편집위원 준수사항)

- ① 편집위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문에 대한 판정업무를 정해진 규정에 따라 공정하고 객관적으로 수행하여야 한다.
- ② 편집위원은 투고된 논문에 대한 심사위원의 심사결과를 바탕으로 일관된 기준으로 논문의 재심 여부나 게재 여부를 결정하여야 한다.
- ③ 투고논문의 연구분야에 대한 편집위원의 지식이 부족하여 심사결과를 판정하는데 곤란함이 있다고 판단될 경우에는 해당 분야에 전문적인 지식을 가진 자로부터 자문을 받을 수 있다.
- ④ 편집위원은 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 학술지가 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당 논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
- ⑤ 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.
- ⑥ 편집위원은 투고된 논문이 자신과 직접적인 이해관계가 있는 논문일 경우, 편집인에게 보고하여 다른 편집위원이 해당 논문을 담당하게 하여야 한다.
- ⑦ 편집위원이 담당 업무를 신속하게 처리하지 못할 사유가 발생할 경우 학회 사무국 혹은 해당 편집인에게 보고하는 것이 바람직하다.
- ⑧ 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)

- ① 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.
- ② 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.
- ③ 심사위원은 전문 지식인으로서의 저자의 인격을 존중하여야 한다. 개인적이고 주관적인 평가나 불쾌한 표현을 자제하고 학문적으로 검소한 자세에서 객관적인 심사의견서를 작성하도록 노력하여야 한다. 심사논문에 대한 자신의 판단과 보완이 필요하다고 생각되는 내용을 그 이유와 함께 상세하게 명시하여야 한다.
- ④ 심사위원의 개인적인 목적을 위하여 저자에게 추가 자료나 해명을 요구하는 것을 금지한다.
- ⑤ 이미 다른 학술지에 공개된 논문의 내용과 유사한 내용이 심사논문에 인용 없이 포함되었을 경우에는 편집위원회에게 그 사실을 상세하게 알려주어야 한다.
- ⑥ 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 편집위원회에게 이를 통보한다.

### 제 4 장 검증 절차와 기준

#### 제9조 (윤리위원회)

- ① 우리 학회는 학술활동 윤리 위반 및 의심사례 발생 시 윤리위원회(이하 '위원회'라 한다)를 구성, 그 진위를 조사할 수 있다.
- ② 위원회 구성 및 직무
  1. 위원회는 위원장 1명과 위원 5명으로 구성한다.
  2. 위원장은 학술담당 부회장이 하며, 위원은 이사회에서 선출, 회장이 임명한다.
  3. 위원장과 위원의 임기는 1년으로 1월 1일부터 12월 31일까지로 하며, 연임이 가능하다.
  4. 위원장은 위원회를 대표하고 학회의 윤리에 관한 업무를 총괄한다.

#### 제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

- ① 연구윤리 수립 및 추진
- ② 연구 부정행위의 예방과 방지
- ③ 연구 부정행위 심의 및 의결
- ④ 부정행위자에 대한 제재내용 결정 및 이사회에 결과보고
- ⑤ 기타 연구 윤리의 개선 및 증진에 관한 사항

## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

### 제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

- ① 위원회는 위원장이 필요에 따라 소집하며, 위원 과반수의 출석으로 개최하고 출석위원 2/3의 찬성으로 의결한다.
- ② 의결된 내용은 부정행위 의심자(피제소자)에게 통보하고 15일 이내에 서면으로 소명 의견을 받아야 한다.
- ③ 위원회에서는 부정행위 의심자로부터 받은 소명자료를 검토하거나 필요 시 의견을 청취하여 최종 의결토록 한다.
- ④ 의결된 내용은 이사회에 보고하여 최종 결정한다.
- ⑤ 위원장이 필요하다고 판정할 경우, 외부 인사나 위원이 아닌 자의 의견을 청취할 수 있다.
- ⑥ 위원회에서 참가자 발표내용 및 회의내용은 비공개를 원칙으로 한다.

### 제12조 (연구 부정행위의 제보)

- ① 연구 부정행위의 제보는 육하원칙에 따라 관련 자료를 첨부하여 서면으로 제출하여야 한다. 단, 익명제보라 하더라도 제보의 육하원칙이 명백한 제보의 경우, 위원회에서 조사개시에 대한 검토를 할 수 있다.
- ② 학회는 제보자가 부정행위 신고를 이유로 불이익, 차별, 부당한 압력 또는 위해 등을 받지 않도록 노력한다.
- ③ 제보자의 신원에 관한 사항은 정보공개 대상이 되지 않으며, 신원이 노출되지 않도록 최선의 조치를 취한다.
- ④ 제보자가 부정행위의 신고 이후에 진행되는 조사 절차 및 일정 등에 대하여 알고자 할 경우 학회는 이에 성실히 응하여야 한다.
- ⑤ 제보 내용이 허위인 줄 알았거나 알 수 있었음에도 불구하고 이를 신고한 제보자는 보호 대상에 포함되지 않는다.

### 제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

- ① 연구 부정행위가 확인된 저자에게는 위원회 결정에 따라 부정행위의 경중을 고려하여 다음의 제재를 선택하여 가할 수 있다.
  1. 해당 발표연구물에 대한 학회 간행물에 게재취소
  2. 5년간 학회 발행 학술지에 투고금지
  3. 5년간 학회 학술대회 발표금지
  4. 해당 논문이 이미 출판된 경우에는 해당 학술지에 게재 취소를 공지하고, 부정행위자 소속기관에 부정행위 내용 통보
  5. 학회 회원자격 박탈
- ② 제보자가 고의로 허위제보를 하였을 경우 위원회의 결정에 따라 연구 부정행위자 수준과 동일한 제재를 가할 수 있다.

### 제14조 (피조사자 권리 보호)

- ① 피조사자는 제보 또는 학회 및 관련기관의 인지에 의하여 부정행위의 조사 대상이 된 자 또는 조사 수행 과정에서 부정행위에 가담 한 것으로 추정되어 조사의 대상이 된 자를 말하며, 조사과정에서의 참고인이나 증인은 이에 포함되지 아니한다.
- ② 학회는 검증과정에서 피조사자의 명예나 권리가 부당하게 침해되지 않도록 주의하여야 한다. 또한 결과가 확정되기 이전까지는 이의 제기 및 변론의 기회가 동등하게 주어져야 하며, 관련절차를 사전에 알려주어야 한다.
- ③ 부정행위에 대한 의혹은 판정 결과가 확정되기 전까지 외부에 공개되어서는 아니 된다. 다만, 공공의 복리 등 사회 통념에 중대한 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 (조사결과와 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 이의제기 또는 변론 내용과 그에 대한 처리결과
- ③ 연구 부정행위에 대한 최종결과가 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안 된다.

# 한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

저자(들)는 위 논문이 한국정밀공학회지에 게재되기를 희망하며 아래와 같은 사항들에 대하여 확인하고 동의합니다.

1. 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
2. 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 받았습니 다.
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/출간하 고자 할 때에는 무료로 사용할 수 있습니다. 이 경우 이 같은 사실과 타당한 이유를 한국정밀공학회에 알려야 하고, 위 논문을 해 당 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](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

- KJSPE, IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology의 출판에 탁월한 공헌을 한 심사위원(Reviewer)

### JKSPE, IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST Award

- KJSPE, 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 the 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](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 24 · Number 12 · December 2023

## REGULAR PAPERS

### Ultra-Precision Diamond Turning Error Compensation via Iterative Learning from On-machine Measured Data

Z. Chen · W. Huang · Z. Zhu · X. Zhang · L. Zhu · X. Jiang 2181

### Quality-Related Process Monitoring Based on a Bayesian Classifier

H. Zhou · X. Kong · J. Luo · Q. An · H. Li 2197

### Analysis and Optimization of an Internal Feedback Hydrostatic Turntable Oil Pad Power Consumption Based on Finite Difference Method

C. Yang · S. Shao · Y. Cheng · Z. Liu · Y. Zhao 2211

### The Effect of Temperature, Pressure and Stretch Bar on Product Quality in Production of 0.5 L Pet Bottle

M. Timur 2229

### Optimizing Biomachining Material Removal Rate Through Oxygen Addition to the Bacteria's Culture by an Air Supply System

M.A. Indianto · I. Santoso · J. Istiyanto · T.J. Ko 2239

### Dual-Amplifier Driving in Sequence Method with Switches for Piezoelectric Stack Actuators to Reduce Hysteresis

L. Zhang · S. Hao · P. Zhang · Q. Huang · R. Cheng · R. Li · P. Wang 2249

### Development of an Intelligent Gripper that Determines the Gripping Force According to the Weight of the Object

H.-S. Kim · G.-S. Kim 2259

### Selection of Motors and Gear Reducers for Four-Axis Palletizing Robots Considering the Motion Characteristics and Dynamic Coupling Effect

I.H. Park · D.S. Hong 2269

### 5-Axis Robot Design for Loading and Unloading Workpieces

H.-S. Kim · G.-S. Kim 2279

### Optimal Design of Body Profile for Stable Stair Climbing Via Tri-wheels

Y. Kim · D. Son · J. Shin · T. Seo 2291

### Distal End Force Estimation of Tendon-sheath Mechanism Using a Spring Sheath

J. Kim · K. Kim · Y. Seo · J. Park · B.G. Kim · S. Choi · C. Kim · D. Hong 2303

## REVIEW

### Research on Production Scheduling Optimization of Flexible Job Shop Production with Buffer Capacity Limitation Based on the Improved Gene Expression Programming Algorithm

D. Chang · H. Shi · C. Han · F. Meng 2317

## REGULAR PAPERS

### Hexahedral Mesh Quality Improvement with Geometric Constraints

W. Peng · X. Mei · K. Shao · C. Song · X. Wu 2337

### Mechanism of Knee Adduction Moment Reduction Through Contralateral Cane Use in Healthy Subjects

H.-S. Shin · J.-Y. Lee · Y.-J. Cho · M.-J. Kim · G.-M. Eom 2349

### Design and Characterization of Flexible Strain Sensors Using Pressure-Sensitive Material with Multi-walled Carbon Nanotubes and Polydimethylsiloxane

S. Kim · C.Y. Park · C. Kim · H.-C. Kim · I.H. Lee 2361

Further articles can be found at [link.springer.com](http://link.springer.com)

Abstracted/Indexed in BFI List, Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency (JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at [www.springer.com/12541](http://www.springer.com/12541)

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 10 · Number 6 · November 2023

## REGULAR PAPERS

### **A Novel Technique for Dressing Fixed Abrasive Lapping Pad with Abrasive Water Jet**

Z. Wang · Y. Yang · Z. Zhang · M. Pang · M. Liang · L. Ma · J. Su 1351

### **An Analysis of the Uneven Tool Electrode Wear Mechanism in the Micro-electrical Discharge Machining Process**

Z. Zou · X. Zhang · K. Chan · T. Yue · Z. Guo · C. Weng · J. Liu 1375

### **Comparison of Tool Wear, Surface Morphology, Specific Cutting Energy and Cutting Temperature in Machining of Titanium Alloys Under Hybrid and Green Cooling Strategies**

M.K. Gupta · P. Nieslony · M.E. Korkmaz · M. Kuntoğlu · G.M. Królczyk · M. Günay · M. Sarikaya 1393

### **Energy Efficiency Assessment in Plunge-Face Grinding of Cemented Tungsten Carbide Cutting Inserts**

L.A.S. Carreira · A. Hassui · C.E.H. Ventura 1407

### **Simple Fabrication of Transparent Triboelectric Nanogenerator Based on Coffee-Ring-Free AgNW Electrode via Spray Deposition with Surfactant**

B. Kim · J.Y. Song · D.Y. Kim · J.G. Kim · J.-Y. Lee · D. Choi · S.M. Park 1417

### **Mechanisms of Droplet Formation and Deposition in Drop-On-Demand Needle-Valve Inkjets for Precision 3D Microprinting**

J. Wang · M. Li · T. Nguyen 1433

### **A New Mechanical Cold Trimming Process Assisted by Dashed Lined Infrared Heat Treatment of Martensitic Steel Considering Energy Efficiency**

T.-H. Kim · S.-H. Park · E.-H. Lee · Y.H. Kang · J.S. Chung · J. Ha 1447

### **Flashlight-Induced Explosive Chemical Reaction for Fabrication of Flameproof Nickel Electrode**

T.H. Yun · N.B. Velhal · J. Ahn · D. Lee · T. Kim · J. Kim · C. Yim 1469

### **Collaborative Impact of Cryo-Treated Cutting Tool and Hybrid Milling Environment Towards Improved Sustainable Milling of ASTM F2063 Ni<sub>55.6</sub>Ti<sub>44.4</sub> Alloy**

R. Davis · A. Singh · R.B.D. Pereira · R.M. Sabino · K. Popat · P. Soares · L.C. Brandão 1485

### **Development of a High-Frequency Discharge Power Source with Non-Equal Energy Relaxation Oscillator Circuit Applied to $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Microstructure Array Wire Electric Discharge Machining**

S.-T. Chen · S.-Y. Chen 1511

### **Efficient Solar Heat Absorption and Counter Passive Air Cooling Using Supersonically Sprayed rGO/AgNW Nanotextured Surface for Solar Devices**

K. Jang · C. Park · T. Kim · A. Aldalbahi · M. El-Newehy · B.-H. Bang · S.S. Yoon 1529

### **High Performance Triboelectric Nanogenerator Based on Ultrastretchable Composite Electrode**

J. Kim · H. Park · G. Kim · J.-H. Lee · J. Park · S.Y. Kim 1543

### **Energy-Saving Strategy for Speed Cruise Control Using Pulse and Glide Driving**

T. Kim · W. Lee · D. Park · J. Jung · N. Kim 1553

### **Disassembly Process Planning and Its Lines Balancing Prediction**

M. Aicha · I. Belhadj · M. Hammadi · N. Aifaoui 1565

### **Adhesion with Aluminum for Material Surfaces Additively Manufactured by Directed Energy Deposition**

J.-Y. Jeong · H.-S. Kang · S.-H. Kim · K.-Y. Lee · D.-J. Kim · D.-S. Shim 1579

## SHORT COMMUNICATION

### **A Novel Additive Texturing of Stainless Steel 316L Through Binder Jetting Additive Manufacturing**

S. Dwivedi · A.R. Dixit · A.K. Das · A. Nag 1605

## REVIEWS

### **A Review of Physics-based Models in Prognostics and Health Management of Laminated Composite Structures**

A. Khan · M.M. Azad · M. Sohail · H.S. Kim **1615**

### **A State-of-the-Art Review on Recently Developed Sustainable and Green Cooling/Lubrication Technologies in Machining Metal Matrix Composites (MMCs)**

R.A. Laghari · N. He · M. Jamil · M.I. Hussain · M.K. Gupta · G.M. Krolczyk **1637**

## REVIEW PAPER

### **A Review of Recent Manufacturing Technologies for Sustainable Soft Actuators**

M. Lalegani Dezaki · M. Bodaghi **1661**

**Further articles** can be found at [link.springer.com](http://link.springer.com)

**Abstracted/Indexed** in Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, EI Compendex, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency (JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang

**Instructions for authors** for *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* are available at [www.springer.com/40684](http://www.springer.com/40684)

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 1 · Number 2 · July 2023

## REGULAR PAPERS

### **Digital Twin Based Machining Condition Optimization for CNC Machining Center**

B. Sim · W. Lee 115

### **Fiber Optic Sensor for Smart Manufacturing**

F. Zhou · X. Fu · S. Chen · E. Kim · B.-G. Jun 125

### **Development of Melt-pool Monitoring System based on Degree of Irregularity for Defect Diagnosis of Directed Energy Deposition Process**

J. H. Kong · S. W. Lee 137

### **A Design Optimization Framework for 3D Printed Lattice Structures**

W. R. Jerin · S. J. Park · S. K. Moon 145

### **Surface Topography of Transparent Plate Using Fizeau Interferometer with Suppression of Intensity Modulation**

S. Kim · Y. Kim · N. Sugita · M. Mitsuishi 157

## REVIEWS

### **Smart Factory Transformation Using Industry 4.0 toward ESG Perspective: A Critical Review and Future Direction**

H. Kim · Y.-J. Quan · G. Jung · K.-W. Lee · S. Jeong · W.-J. Yun · S. Park · S.-H. Ahn 165

### **Digitalization in Production Logistics: How AI, Digital Twins, and Simulation Are Driving the Shift from Model-based to Data-driven Approaches**

Y. Jeong 187

### **AI-assisted Monitoring of Human-centered Assembly: A Comprehensive Review**

V. Selvaraj · S. Min 201

### **Review on Machine Learning Based Welding Quality Improvement**

I.-S. Kim · M.-G. Lee · Y. Jeon 219

### **Effectiveness of Mental Health Care by Using Machine Learning on Manufacturing Worker**

J. Lim · S. Lee · J. Noh · W. Lee · P.-C. Su · Y.-J. Yoon 227

## INDUSTRY CASE STUDY

### **An Exemplary Case of Industrial Metaverse: Engineering Product Demonstration Using Extended Reality Technologies**

C.-H. Chu · D. K. Baroroh · J.-K. Pan · S.-M. Chen 243



# 2023년 사단법인 한국정밀공학회 임원

## 회장

이석우(한국생산기술연구원)

## 수석부회장

민병권(연세대학교)

## 부회장

안성훈(서울대학교)

이상원(성균관대학교)

배규호(DN솔루션즈)

김정(KAIST)

## 감사

김재환(인하대학교)

송창규(한국기계연구원)

## 총무이사

김동성(POSTECH)

김보현(숭실대학교)

신현정(KAIST)

## 재무이사

김창주(한국기계연구원)

송용남(고려대학교)

정영훈(경북대학교)

## 편집이사

강현욱(UNIST)

고승환(서울대학교)

곽문규(경북대학교)

김규만(경북대학교)

김남근(서강대학교)

김동립(한양대학교)

김석민(중앙대학교)

김양진(부산대학교)

김영진(KAIST)

문두환(고려대학교)

박근(서울과학기술대학교)

박영빈(UNIST)

손정우(금오공과대학교)

안지환(POSTECH)

안형준(숭실대학교)

이광일(경일대학교)

이창우(건국대학교)

이현섭(동아대학교)

장진아(POSTECH)

정구현(울산대학교)

정훈의(UNIST)

주백석(금오공과대학교)

천두만(울산대학교)

추원식(경상국립대학교)

황지홍(서울과학기술대학교)

## 사업이사

강태준(인하대학교)

권지연(동국대학교)

김무림(한국로봇융합연구원)

김승중(고려대학교)

김진호(영남대학교)

김태곤(한국생산기술연구원)

박상후(부산대학교)

박용재(강원대학교)

손용(한국생산기술연구원)

이경창(부경대학교)

이동원(전남대학교)

이문구(아주대학교)

이영수(삼성전자)

이인환(충북대학교)

이지혜(한국기계연구원)

임지석(영남대학교)

전용호(아주대학교)

주기남(조선대학교)

현승민(한국기계연구원)

홍성태(울산대학교)

## 기획홍보이사

노유정(부산대학교)

류시형(전북대학교)

이주연(서울과학기술대학교)

이현욱(한국철도기술연구원)

장원석(한국기계연구원)

최영재(한국생산기술연구원)

## 국제이사

Martin B. Jun(Purdue Univ.)

Simon Park(Univ. of Calgary)

김대욱(Univ. of Arizona)

김범준(Univ. of Tokyo)

문승기(Nanyang Tech. Univ.)

민상기(Univ. of Wisconsin-Madison)

여운홍(Georgia Inst. of Tech.)

이동진(건국대학교)

이지현(Univ. of Calgary)

이차범(Texas A&M Univ.)

정용국(KTH Royal Inst. of Tech.)

정하승(Michigan State Univ.)

조영태(창원대학교)

차석원(서울대학교)

최재원(The Univ. of Akron)

## 대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원)

김경동(한국공작기계산업협회)

김종혁(현대위아)

서진호(부경대학교)

이강재(DN솔루션즈)

조영환(LIG넥스원(주))

조정대(한국기계연구원)

## 부문회장

김건희(한밭대학교)

진종한(한국표준과학연구원)

정재일(국민대학교)

이동윤(한국생산기술연구원)

박형욱(UNIST)

오정석(한국기계연구원)

김종백(연세대학교)

엄광문(건국대학교)

김호찬(안동대학교)

김영범(한양대학교)

## 특별회원사

### 다아아몬드

DN솔루션즈  
(주)케이씨텍  
화천기공(주)

LIG넥스원(주)  
(주)키슬러코리아

(주)스맥  
한국화낙(주)

신도리코(주)  
현대위아(주)

(주)이수페타시스  
(주)화신정공

### 골드

(주)마리알로  
(주)프로토텍

(주)에비던트코리아  
핵사곤

(주)에이스나노캠

(주)엔도로보틱스

지앤피테크놀로지(주)

### 패밀리

(주)웨이퍼펍

한국공작기계산업협회

## Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

강성목  
대구가톨릭대학교

김양진  
부산대학교

박민수  
서울과학기술대학교

이인환  
충북대학교

정구현  
울산대학교

천두만  
울산대학교

고승환  
서울대학교

김호찬  
안동대학교

박상후  
부산대학교

이창우  
건국대학교

정영훈  
경북대학교

추원식  
경상국립대학교

곽문규  
경북대학교

문두환  
고려대학교

박형욱  
UNIST

이창환  
서울과학기술대학교

주백석  
금오공과대학교

황지홍  
서울과학기술대학교

김동성  
POSTECH

손정우  
금오공과대학교

안지환  
POSTECH

이현섭  
동아대학교

진중환  
한국표준과학연구원

## Members of Editorial Board

김기주  
동명대학교

박정재  
한국표준과학연구원

손용  
한국생산기술연구원

윤해성  
한국항공대학교

장진아  
POSTECH

최동휘  
경희대학교

태기식  
건양대학교

김우균  
Univ. of Cincinnati

김무림  
한국로봇융합연구원

박정환  
영남대학교

송철기  
경상국립대학교

이광일  
경일대학교

전용호  
아주대학교

최영만  
아주대학교

황영국  
조선이공대학교

민상기  
Univ. of Wisconsin-Madison

김재열  
조선대학교

박준  
한국광기술원

왕덕현  
경남대학교

이봉기  
전남대학교

정재일  
국민대학교

최정욱  
중앙대학교

김갑용  
Iowa State Univ.

Simon Park  
Univ. of Calgary

김창주  
한국기계연구원

배창호  
경성대학교

윤성호  
금오공과대학교

이종길  
안동대학교

조영학  
서울과학기술대학교

최진승  
건국대학교

김범준  
Univ. of Tokyo

Patrick Kwon  
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

**VOLUME 40, NUMBER 12/ December 2023**

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

월간 · 제40권 제12호 [통권 제393호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 11월 25일

발행일 2023년 12월 1일

발행인 이석우

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](mailto:kspe@kspe.or.kr)

JKSPE(한국정밀공학회지), IJPEM-ST 강수현 / (02)518-2928 / [paper@kspe.or.kr](mailto:paper@kspe.or.kr), [ijpem.st@kspe.or.kr](mailto:ijpem.st@kspe.or.kr)

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

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

회계 감사원 / (02)393-0724 / [account@kspe.or.kr](mailto: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 4<sup>th</sup> industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST) is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:

- ✓ Big Data Analytics and Informatics
- ✓ Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- ✓ Prognostics and Health Management (PHM)
- ✓ Industrial Internet of Things (IIOT)
- ✓ Industrial Artificial Intelligence
- ✓ Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- ✓ Augmented, Virtual and Extended Reality
- ✓ Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- ✓ Autonomous Things

### IJPEM-ST covers various kinds of papers:

Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

#### • Publication Date (Scheduled)

**Vol. 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



## 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.

## 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 1  
JANUARY 2023

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



INDEXED IN  
SCOPUS, Korea Citation Index (KCI) and  
Korea Science

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

## Editorial Board

### • Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim(Soongsil University)

### • Editors

Jihwan An (Seoul National University of Science & Technology)

Baeksuk Chu (Kumoh National Institute of Technology)

Won-Shik Chu (Gyeongsang National University)

Doo-Man Chun (University of Ulsan)

Koo Hyun Chung (University of Ulsan)

Duhwan Mun (Korea University)

Jihong Hwang (Seoul National University of Science & Technology)

Young Hun Jeong (Kyungpook National University)

Jonghan Jin (Korea Research Institute of Standards & Science)

Dong Sung Kim (POSTECH)

Ho-Chan Kim (Andong National University)

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)

In Hwan Lee (Chungbuk National University)

Hyung Wook Park (UNIST)

Min Soo Park (Seoul National University of Science & Technology)

Sang-Hu Park (Pusan National University)

Jung Woo Sohn (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 JKSPE Search for JKSPE

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



+82-518-2928(T)  
+82-518-2937(F)



[paper@kspe.or.kr](mailto: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) 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

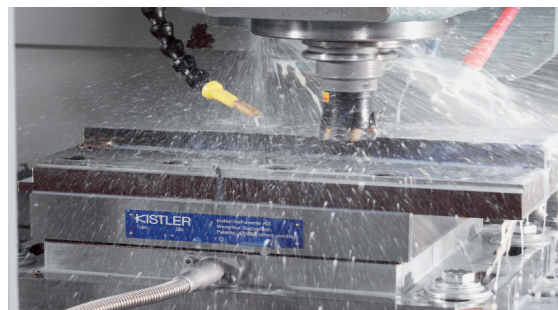
## 한국정밀공학회지(JKSPE)

- |              |   |
|--------------|---|
| <b>발행간기</b>  | 월간 (매월 1일 발행)   |
| <b>등재여부</b>  | SCOPUS, KCI 등재지   |
| <b>투고방법</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 온라인 투고 (<a href="http://article.kspe.or.kr/">http://article.kspe.or.kr/</a>)</li> <li>• JKSPE 저널 홈페이지 (<a href="http://jkspe.kspe.or.kr/">http://jkspe.kspe.or.kr/</a>)</li> </ul> |
| <b>투고자격</b>  | 학회 회원   |
| <b>제출분야</b>  | 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계및재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술  |
| <b>관련 상훈</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 한국정밀공학회지 최우수논문상 (상장, 상금)</li> <li>• 백암논문상 (상장, 상금)</li> <li>• 학술상 (상장, 상금)</li> </ul>  |



## 절삭력측정을위한공구동력계

Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement



경기도 성남시 분당구 판교로 253 판교이노밸리 C동 702호 < Tel: 031-8045-0907 >

담당자: 최 장원 과장 , 010-2675-9466 [www.kistler.com](http://www.kistler.com)





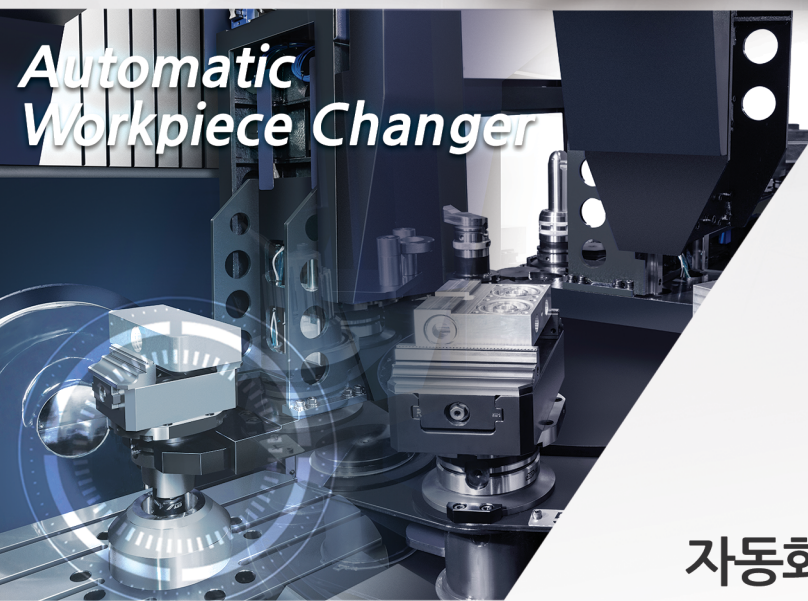
■ 경제적인 5축 가공 솔루션  
뛰어난 생산성 / 설치공간 최소화

■ 뛰어난 접근성  
작업자 / 로봇트  
공작물 자동 교환장치

**5-Axis  
Dynamic  
Performance**



\*본 제품의 설계 및 사양은 제품개선을 위하여 예고 없이 변경 될 수 있습니다.



**D2-5AX**

**자동화 시스템에 최적화된 5축 솔루션**

**화천**

대한민국 대표 공작기계 전문기업, 화천

화천기계 본사  
화천기공 본사

서울특별시 서초구 방배로 46 (방배동) TEL.(02)523-7766  
광주광역시 광산구 하남산단4번로 123-17 (장덕동) TEL.(062)951-5111

[www.hwacheon.com](http://www.hwacheon.com)

[www.facebook.com/hwacheonofficial](https://www.facebook.com/hwacheonofficial)  
[www.youtube.com/Thehwacheon](https://www.youtube.com/Thehwacheon)  
카카오톡에서 '화천기계'를 친구로 추가 해보세요!





\*SK실트론 웨이퍼에  
회로 패턴이 새겨진 모습입니다

## 미래 세상의 판, 누가 바꿀까?

지능형 로봇  
자율주행 자동차  
인공위성까지

미래 세상의 판을 바꾸는 건  
웨이퍼 위에서 가능한 이야기-

SK실트론의 웨이퍼에서  
세계의 반도체가 태어나고  
그 반도체로부터 세상이 바뀌기 때문입니다

세상의 판을 바꿉니다

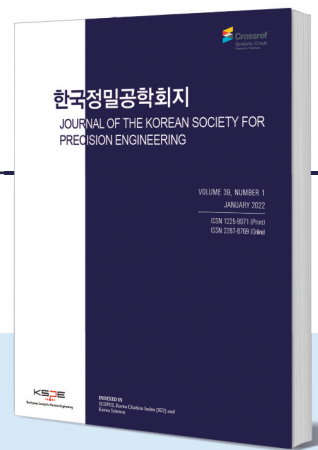


# 한국정밀공학회지(JKSPE)

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.
칼라광고 500,000원	12회 정가의 50%		* 특별회원사: 칼라광고 연간 무료제공 (최대 3회)
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

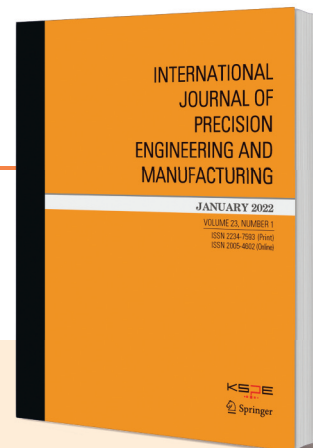
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality
- Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- Autonomous Things

## WEBSITE

www.ijpem-st.org

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

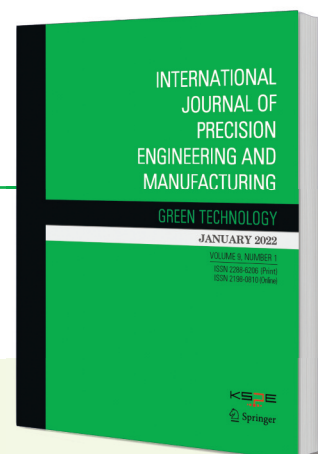
- Precision Manufacturing Processes
- Measurements and Control
- Robotics and Automation
- Manufacturing System
- Design and Materials
- Machine Tools
- Nano/Micro Technology
- Bio Health
- Additive Manufacturing

### SPECIAL ISSUE

**TOPIC** | 2023: Robots for Manufacturing Processes and Systems

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
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- Design and Manufacturing of Green Products
- Materials for Green Manufacturing
- Management and Policy for Sustainable Manufacturing

### SPECIAL ISSUE

**TOPIC** | 2016: Hybrid Manufacturing  
2017: 4D Printing  
2018: Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution  
2019: Energy Harvesting  
2020: Green Smart Manufacturing  
2021: Soft and Green Manufacturing and Applications  
2022: Green Manufacturing Coping with Climate Change and Pandemics  
2023: NetZero, Achievable by Manufacturing?  
2024: Advanced Manufacturing for ESG



한국정밀공학회

Korean Society for Precision Engineering

# 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  
PRrecision Engineering and Sustainable 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 $\mu$ 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

## 적용 분야



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

