

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 4

APRIL 2023

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim

Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

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

Members of Editorial Board

Jangho Bae
Kyungsoong 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
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-II 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 4 / April 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 April 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 / <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

- 261 티타늄 소재 극저온 가공 시 극미량 윤활 조건에 따른 가공 특성 분석 연구
김동민, 박흥범, 김병국, 이훈희, 황영하, 김기혁, 신인수, 김도영
- 269 레이저를 이용해 증착된 세라믹 표면에서의 세균 배양에 대한 영향
윤상우, 김주한
- 275 Convolutional Neural Network를 활용한 SEM 영상품질 향상 및 영상품질 평가를 위한 MTF 측정기법
김찬기, 이응창, 김중배, 노진성
- 283 짐 윤반능력을 향상시키기 위한 수동 상지 외골격장치(H-Frame) 개발
정동현, 강도연, 이지석
- 291 초정밀 레이저를 이용한 연꽃잎 표면 자연 모사 연구
이창준, 최훈국, 손익부, 하준석
- 301 지자기센서를 이용하지 않는 6축 IMU 기반의 3차원 관절각 추정용 순환 신경망
이창준, 김우재, 이정근
- 309 밀폐형 공압회로 내 정밀압력제어를 위한 기계 구동식 가스 압력제어기의 제어특성 평가
박청용, 정욱철
- 319 Realization and Scheduling of Free Spot Assembly Method for Machine Tools Using Cooperative Industrial Robots
Kosuke Inoue and Hideki Aoyama
- 329 외란관측기를 이용한 비선형 자기부상 시스템의 제어 성능 향상
정우봉, 안형준
- 335 회전경사증착 기법을 이용한 Ni-GDC 연료극이 적용된 AAO 기반의 저온작동 박막 고체산화물 연료전지의 저항 특성 연구
유재원, 이명석, 김양재, 차석원

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 4 / April 2023

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

CONTENTS

REGULAR

- 261 Study on the Effect of MQL Spraying Condition on the Machinability in Titanium Cryogenic Machining
Dong Min Kim, Heung Bum Park, Byung-Gook Kim, Hoon-Hee Lee, Young Ha Hwang, Ki Hyuk Kim, In Su Shin, and Do Young Kim
- 269 Effect on Bacterial Culture on Ceramic Surfaces Deposited Using a Laser
Sangwoo Yoon and Joohan Kim
- 275 SEM Image Quality Improvement and MTF Measurement Technique for Image Quality Evaluation Using Convolutional Neural Network
Chan Ki Kim, Eung Chang Lee, Joong Bae Kim, and Jinsung Rho
- 283 Development of Passive Upper Limb Exoskeleton Device (H-Frame) for Augment the Load Carrying Capability of the Human
Dong-Hyun Jeong, Do Yeon Kang, and Ji Seck Lee
- 291 Laser Micro-Structuring of Super-Hydrophobic Surface for Lotus Effect
Chang Jun Lee, Hun Kook Choi, Ik Bu Sohn, and Jun Seok Ha
- 301 A Recurrent Neural Network for 3D Joint Angle Estimation based on Six-axis IMUs but without a Magnetometer
Chang June Lee, Woo Jae Kim, and Jung Keun Lee
- 309 Control Characteristics of a Mechanically Driven Gas Pressure Controller for a Closed Pneumatic Circuit
Cheongyong Park and Wukchul Joung
- 319 Realization and Scheduling of Free Spot Assembly Method for Machine Tools Using Cooperative Industrial Robots
Kosuke Inoue and Hideki Aoyama
- 329 Control Performance Improvement of a Nonlinear Magnetic Levitation System with a Disturbance Observer
Yupeng Zheng and Hyeong-Joon Ahn
- 335 Resistant Characteristics of AAO-Based Thin Film Solid Oxide Fuel Cells Using Ni-GDC Anode by GLAD Method
Jaewon Yoo, Myung Seok Lee, Yang Jae Kim, and Suk Won Cha

티타늄 소재 극저온 가공 시 극미량 윤활 조건에 따른 가공 특성 분석 연구

Study on the Effect of MQL Spraying Condition on the Machinability in Titanium Cryogenic Machining

김동민¹, 박흥범², 김병국², 이훈희¹, 황영하³, 김기혁⁴, 신인수⁴, 김도영^{5,#}
Dong Min Kim¹, Heung Bum Park², Byung-Gook Kim², Hoon-Hee Lee¹, Young Ha Hwang³, Ki Hyuk Kim⁴, In Su Shin⁴, and Do Young Kim^{5,#}

¹ 한국생산기술연구원 동남본부 진주뿌리기술지원센터 (Korea Institute of Industrial Technology)
² 낙원(주) (Nakwon Co., Ltd.)
³ 한국생산기술연구원 대경본부 (Korea Institute of Industrial Technology)
⁴ 한국항공우주산업(주) KFX사업본부 (Korea Aerospace Industries Co., Ltd.)
⁵ 경남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungnam University)
Corresponding Author / E-mail: doyoungk@kyungnam.ac.kr, TEL: +82-55-249-2685
ORCID: 0000-0001-6195-6098

KEYWORDS: Cryogenic machining (극저온 가공), Minimum quantity lubrication (극미량 윤활), Milling (밀링), Titanium (티타늄), Machinability (가공성)

Titanium alloys are used in various industries due to their superior mechanical strength and corrosion resistance. However, titanium is classified as a difficult-to-machine material due to its low thermal conductivity that consequently causes poor tool life. In this study, cryogenic+MQL milling was performed to improve the machinability of Ti-6Al-4V; a cryogenic coolant and a minimum quantity fluid were sprayed simultaneously. The machinability was analyzed according to the cooling and lubrication conditions, focusing on the cutting force and tool wear. When the minimum quantity fluid was injected using two nozzles during cryogenic machining, the cutting force remained low despite the increase in machining distance due to the effective lubrication. The average cutting force at the long machining distances (82-86 passes) was 14.8% lower than that under the wet condition. The tool wear progressed without chipping, and the flank wear length was 55.5% lower than that of the wet machining because the cryogenic cooling and minimum quantity lubrication reduced the tool temperature, friction, and thermal shock.

Manuscript received: December 7, 2022 / Revised: January 3, 2023 / Accepted: January 5, 2023

1. 서론

티타늄 합금은 우수한 기계적 물성을 보유하고 있어 다양한 산업 분야에서 각광을 받고 있다. 해당 소재는 강도 대비 높은 중량 비율을 보유하고 있으며, 우수한 내식성을 가진 것으로 알려져 있다[1,2]. 반면 낮은 열전도도를 비롯한 취약한 열적 특성을 보유하고 있어 절삭 가공이 어려운 단점이 있다. 위 특성은 가공 중 발생된 열을 전단 영역에 집중시키며, 가공 온도 및 공구 온도를 증가시켜 공구 수명을 단축시킨다[3,4]. 티타늄 소재의 가공성을 향상시키기 위해 실험적 연구가 요구되며, 공구

수명을 향상시킬 수 있는 가공 환경 도출이 필수적이다.

일반적으로 가공성이 취약한 소재들은 난삭재로 분류된다. 앞선 연구를 통해 난삭재의 가공성 향상을 위한 가공 방법들이 제안되어 왔으며, 해당 방법에는 극저온 가공과 극미량 윤활(MQL) 가공이 포함된다. 극저온 가공이란 액체 질소와 같이 극저온을 가지는 절삭유를 공구에 분사하는 공정이다. 분사된 액체 질소는 가공 온도를 감소시켜, 가공성을 향상시키는 것으로 알려져 있다[5-11]. 티타늄 합금 소재 가공 시 액체질소를 분사하는 경우, 공구의 기계적 물성이 향상되며 공구 수명이 증가하는 것으로 보고된 바 있다[5,6]. 인코넬 및 탄탈륨 소재에 극저온

가공을 적용하는 경우에도 공구 수명이 향상됨이 확인되었다 [9,10]. MQL 가공은 극미량의 유체를 절삭유로 적용하여 공구 표면 마찰 특성을 개선하는 공정이다. 분사된 유체는 공구 표면의 윤활 효과를 높이고 칩 배출을 원활하게 만들어, 절삭 가공 시 가공성을 향상시키는데 긍정적인 영향을 준다[12-15]. 앞선 연구를 통해 스틸 소재 가공 시 표면 조도를 감소시키고 공구 수명을 향상시키는 것으로 보고된 바 있다[14,15]. 일부 문헌에서는 극저온 액체 질소와 극미량 유체를 함께 분사하는 ‘극저온 MQL 가공’을 수행한 사례도 존재한다. 해당 공정은 공구 냉각과 함께 공구 표면 윤활이 동시에 이루어지므로, 공구 수명 향상에 효과적인 것으로 보고되고 있다[16,17]. 하지만 대다수의 연구가 짧은 가공 길이 또는 제한된 절삭유 분사 조건에서 수행되었으므로, 실험적 연구 성과가 미비한 상태이다. 극저온 MQL 가공은 공구 수명에 직접적인 영향을 주는 공정이므로, 긴 가공 길이를 바탕으로 가공량 변화에 따른 가공성을 지속적으로 분석할 필요가 있다. 또한, 두 종류의 절삭유가 미치는 영향을 상세히 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 티타늄 합금 소재에 대해 극저온 MQL 가공을 적용하였다. 밀링 가공을 수행하였으며, 절삭유 분사 및 윤활 조건별 가공 길이에 따른 절삭 부하의 변화 특성을 분석하였다. 또한 긴 길이 가공 후 공구 상태를 측정하였으며, 이를 바탕으로 티타늄 가공 시 절삭유의 영향을 규명하였다.

2. 절삭유 분사 메커니즘

극저온 MQL 가공의 절삭유 분사 메커니즘은 적용된 두 절삭유의 분사 방법에 따라 결정된다. 극저온 절삭유는 총 3가지의 방법으로 분사되며, 이에는 외부 분사(External), 내부 분사(Internal), 간접 분사(Indirect)가 포함된다[18]. 각 분사 방법은 절삭유의 영향부가 다르게 나타나며, 관련 모식도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. External은 외부 노즐을 통해 절삭유를 공구에 분사하는 방법이다. 공구로부터 일정한 거리를 두고 절삭유가 분사되므로, 영향부가 가장 넓다. 절삭유의 공구 접촉이 주목적이지만, 가공 소재에 함께 접촉하게 되어 소재 냉각을 유발한다. Internal은 내부 유로를 포함하는 스피들 및 공구 홀더를 적용한다. 내부 유로를 따라 공구 근처까지 도달한 절삭유는 분사구를 통해 외부로 분출되며 공구 끝단을 향해 분사된다. 외부 노즐에 비해 분사구와 공구 사이 거리가 짧아, 영향부가 좁으며, 소재 냉각의 정도가 작다. Indirect는 공구 내 유로를 통해 절삭유가 공구 내부를 순환하고 외부로 분사되도록 하는 방법이다. 공구에 직접 분사되지는 않지만, 내부 순환 과정을 통해 공구를 충분히 냉각시킬 수 있으며, 가공부가 아닌 외부로 분사되므로 소재 접촉이 없다. 절삭 가공 시 소재의 온도 감소는 가공 부하 증가를 초래할 수 있다[19]. 따라서 극저온 절삭유의 소재 접촉이 적을수록 가공성이 향상될 가능성이 높으며, 앞선 연구를 통해 Indirect 방법의 적용 시 우수한 가공성이 나타남이 검증된 바

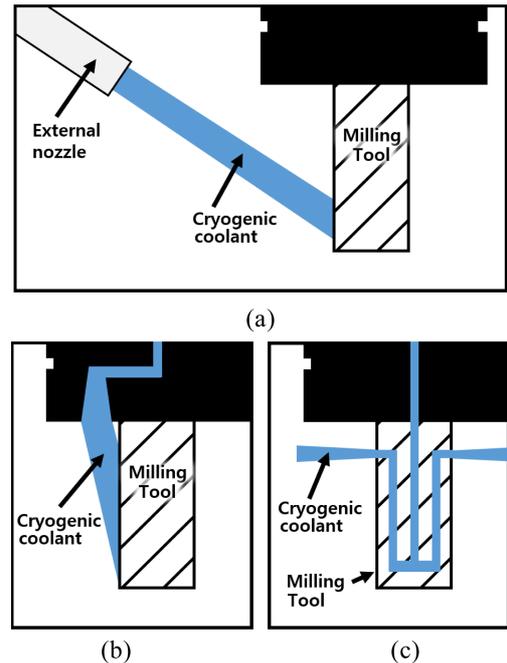


Fig. 1 Spraying mechanisms of (a) external, (b) internal, and (c) indirect methods in cryogenic machining

있다[20].

MQL 가공은 극미량의 유체를 절삭 공구 표면에 국부적으로 분사하는 공정이다. 미스트 형태의 유체를 공구와 소재 사이에 고압으로 분사하며, 공구 표면 윤활에 효과적이다[13]. 분사된 유체의 영향은 적절한 공구 표면 유입 및 마찰 특성 개선으로 나타난다. 감소된 표면 마찰 계수는 마찰열 감소 및 원활한 칩 배출을 가능케 한다. 기존 문헌에서 스틸 소재 MQL 터닝 가공 시, 위 효과로 인해 공구 마모가 감소함이 확인되었다[21].

가공성은 가공 부하와 공구 수명에 의해 크게 좌우되며, 가공 부하 감소 및 공구 수명 향상을 위해 적절한 윤활 및 가공열 감소가 필수적이다. 극저온 가공의 경우 Indirect 방법을 적용할 시, 절삭유의 소재 접촉을 최소화해 가공열 감소 효율을 유지하며 가공 부하 증가를 방지할 수 있다. MQL 가공의 경우 공구와 소재 접촉 시 극미량 유체가 공구 표면에 지속적으로 위치하고 있을수록, 마찰을 최소화하여 가공 부하 및 마찰열 감소에 긍정적인 영향을 줄 수 있다. Indirect 방법은 타 분사 방법과 달리 극저온 절삭유가 공구 표면을 흐르지 않으므로, 극미량 유체가 공구 표면에서 벗어날 가능성이 적다. 따라서 두 공정을 함께 적용하는 경우 가공성 향상에 큰 영향을 줄 수 있다. 해당 내용은 기존 문헌에서 확인된 바 있으며, Indirect 액체질소 분사 및 극미량 유체 적용 극저온 MQL 가공 시 공구 수명이 큰 폭으로 증가함이 보고되었다[18].

3. 실험 환경

본 연구에서는 티타늄 합금 소재에 대해 Indirect 방법 기반의



Fig. 2 Cryogenic machining tool including indirect spraying system

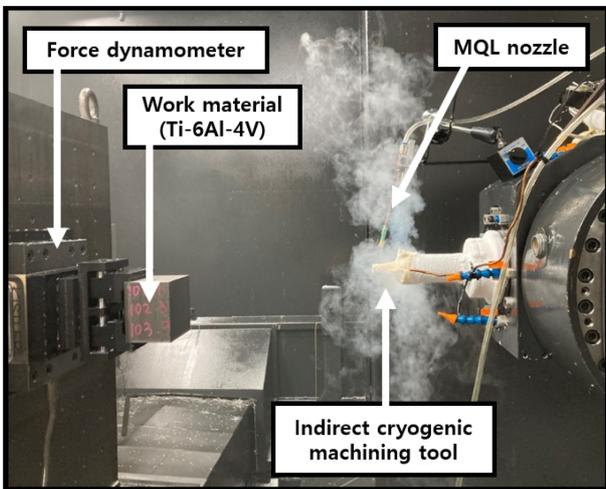


Fig. 3 Experimental setup for the cryogenic+MQL machining process

극저온 MQL 가공 실험을 수행하였다. 대표적인 합금인 Ti-6Al-4V 재료가 100 × 100 × 100 mm³ 블록 형태의 시편으로 적용되었으며, 자체 제작된 장비(HTC-1000, (주)한국정밀)를 활용하여 다운 밀링을 진행하였다. 가공 장비는 외부에 위치한 극저온 절삭유가 장비 주축을 관통하여 일정한 압력으로 공구 끝단에 분사되도록 구축되었으며, 절삭유로는 액체 질소가 적용되었다. Indirect 방법 적용을 위해 상용 공구(F1200, Walter) 내부에 유로를 형성하였으며, 내부 순환한 액체 질소가 외부로 분사되도록 분사 구멍을 만들었다. 제작된 공구는 Fig. 2에서 확인 가능하다. MQL 분사는 외부 노즐을 적용하여 수행되었다. 베지터블 오일 기반의 극미량 유체가 사용되었으며, 외부 노즐은 공구 표면을 향하도록 설정되었다. 액체 질소와 극미량 유체는 각각 4 bar와 7 bar의 고정 압력으로 분사되었으며, 실험 환경은 Fig. 3과 같다.

극저온 가공 시 윤활 정도에 따른 가공성 분석을 위해 두 종류의 극미량 유체 분사량이 적용되었다. 분사량은 외부 노즐 개수로 조절되었으며, 1개 노즐과 2개 노즐 조건에서 각각 실험이 수행되었다. 분사 환경에 따른 영향을 비교하기 위해 습식

Table 1 Experimental condition

Parameter	Value
Work material	Ti-6Al-4V
Machining type	Down milling
Cooling condition	Wet, Cryogenic+MQL (1 nozzle), Cryogenic+MQL (2 nozzle)
Tool diameter [mm]	16
Flute	6
Cutting speed [m/min]	90 (1,790 rpm)
Feed [mm/tooth]	0.08 (859 mm/min)
Axial depth [mm]	5
Radial depth [mm]	1
Number of pass	86

환경에서 추가 실험을 수행하였으며, 실험 조건은 Table 1에서 확인 가능하다. 빠른 가공 속도(90 m/min) 및 긴 가공 길이가 모든 절삭유 분사 환경에 적용되었다. 한 패스의 가공 길이를 100 mm로 정의할 때, 총 86 패스의 길이가 적용되었고, 분석 대상으로 절삭 부하와 공구 마모가 측정되었다. 절삭 부하의 경우 시편에 부착된 공구동력계(9139AA, Kistler)를 기반으로 측정되었으며, 가공 길이별 부하 변화를 분석하였다. 공구 마모의 경우 현미경(Leica Z16APO)을 활용하여 플랭크 면을 기준으로 측정되었으며, 동 가공 길이 조건에서 절삭유 분사 환경에 따른 마모 길이 차이를 분석하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 절삭 부하 분석

1개 및 2개의 극미량 유체 분사 노즐 적용 극저온 MQL 가공과 습식 가공 조건에서 가공 길이에 따른 절삭 부하를 측정하였으며, 비교 분석 연구를 수행하였다. 큰 절삭 부하는 가공 온도 증가, 소재 표면 품질 악화, 공구 수명 감소를 초래할 수 있다. 절삭 부하의 증가는 가공 응력 및 에너지의 증가를 의미하며, 가공부에서 발생하는 열의 증가를 야기한다. 절삭 부하가 클수록 공구의 진동이 커지며, 소재 표면의 표면 조도가 증가하게 된다. 앞선 현상들이 공구에 가해지는 충격을 증가시켜, 공구 마모 진전을 가속화한다. 이를 고려하여, 가공성에 큰 영향을 주는 최대 절삭 부하를 기준으로 연구가 수행되었다. 다운 밀링의 경우 공구의 소재 진입 시 넓은 면적을 가공하게 되며, 공구 회전에 따라 가공 면적이 감소하게 된다. 가공 면적은 절삭 부하에 직접적인 영향을 주는 변수이며, 최대 가공 면적 환경에서 최대 절삭 부하가 나타난다. 따라서 공구의 소재 진입 시 발생하는 절삭 부하를 기준으로 연구가 수행되었다. 공구동력계를 통해 x, y, z 방향의 부하를 측정하고, 합력을 도출하였다. 이후, 합력에 대해 RMS 데이터 처리를 통해 실험 데이터를 확보하였다.

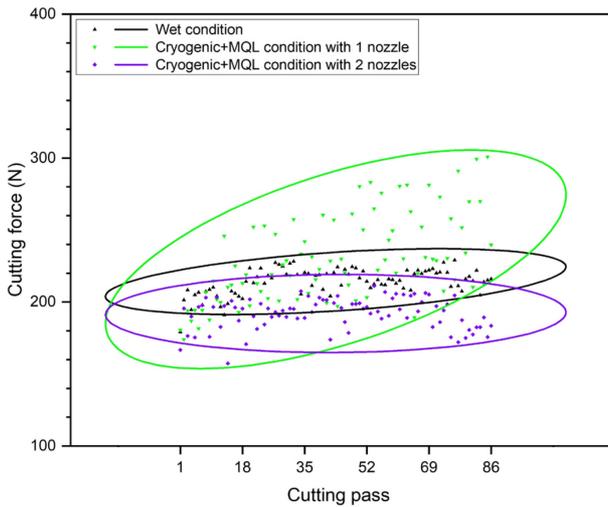


Fig. 4 Measured cutting forces according to machining distance

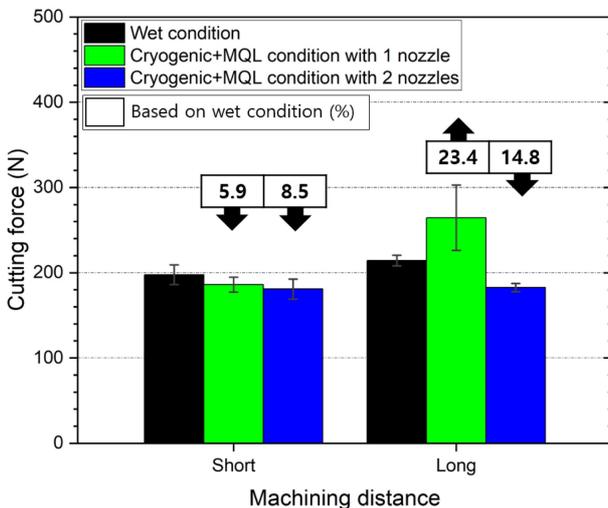


Fig. 5 Measured cutting forces at short (1-5 passes) and long (82-86 passes) machining distances

가공 길이 별 실험 결과는 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 분사 조건에 따른 가공 길이 영향을 파악하기 위해, 짧은 가공 길이(1-5 패스)와 긴 가공 길이(82-86 패스) 조건에서의 절삭 부하 평균값들을 비교 분석하였으며, 분석 결과는 Fig. 5에서 확인 가능하다.

일반적으로 건식 티타늄 가공의 경우 재료 물성의 영향으로 인해 공구 온도가 큰 폭으로 상승하고, 소재에 진입한 공구가 빠져나옴에 따라 온도가 감소한다. 해당 과정에서 절삭유가 분사되는 경우 윤활 및 냉각 효과로 인해 공구 온도의 변화 추이가 달라지게 된다. 적용된 절삭유의 윤활 효과가 클수록 공구와 칩 사이의 마찰이 감소하여 온도 증가 정도가 감소할 수 있다. 해당 현상으로 인해 습식 조건에 비해 MQL 분사 조건에서 공구 온도 상승 폭이 작을 것으로 사료된다. 또한 절삭유의 온도가 낮을수록 가공 전 공구의 온도가 낮을 수 있으며, 가공 후 상승된 공구 온도의 감소 속도가 빠를 수 있다. 이로 인해 습식 조건에 비해 액체 질소 분사 조건에서 공구의 초기 온도가 낮을

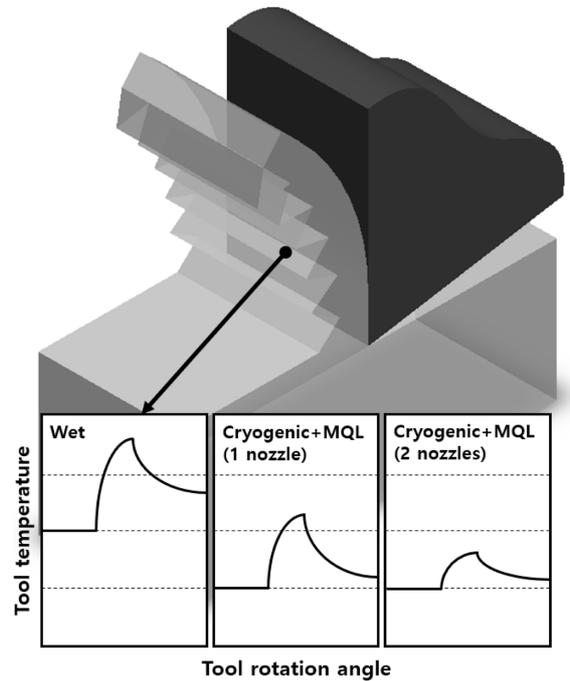


Fig. 6 Schematic diagrams of tool temperature changes under different cooling conditions

것으로 판단되며, 가공 시 상승했던 공구 온도가 급속도로 감소할 것으로 판단된다. 관련 내용은 Fig. 6에서 도식화되었으며, 이는 절삭 부하 측정 실험 결과를 뒷받침할 수 있다.

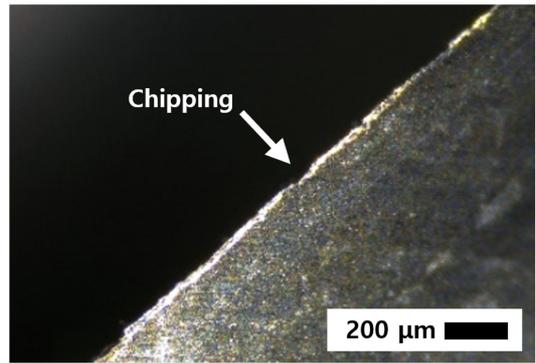
절삭 부하 측정 결과, 습식 조건의 경우 가공 길이가 증가함에 따라 절삭 부하가 증가하는 경향을 보였다. 가공량의 증가는 지속적인 열 발생과 함께 공구에 데미지를 가한다. 분사된 절삭유가 가공열을 일부 감소시키지만, 티타늄 합금의 취약한 열적 특성으로 인해 높은 가공 온도가 나타날 수 있으며, 공구 마모가 진전될 수 있다. 이로 인한 공구의 형상 변화는 절삭 부하를 증가시킬 수 있으며, 해당 영향으로 인해 위 현상이 나타난 것으로 판단된다. 반면, 2개의 노즐을 활용한 극저온 MQL 가공의 경우 가공 길이가 증가함에도 불구하고 절삭 부하 크기가 유지되었다. 일반적으로 가공 온도가 감소하면, 절삭 가공 시 전단 영역에서 큰 응력이 발생하게 된다. 따라서 액체 질소만 분사될 시 절삭 부하가 증가할 수 있다. 이와 반대로, 공구 표면의 적절한 윤활은 부하 감소를 야기할 수 있다. 윤활에 의한 표면 마찰 계수 감소가 마찰 부하 및 절삭 부하를 감소시키게 된다. 해당 조건에서는 액체 질소와 극미량 유체가 함께 분사되었다. 액체 질소가 공구를 냉각시킴으로써 가공열을 감소시키고, 충분한 유량의 유체가 적절한 윤활 환경을 마련함에 따라 마찰열을 감소시킨다. 이에 따라 낮은 공구 온도로 인해 공구 마모 진전이 늦춰지게 되어 위와 같은 현상이 나타난 것으로 보인다. 따라서 타 조건에 비해 작은 절삭 부하가 확인되었으며, 82 패스 이상의 긴 가공 길이에서 습식 조건과 비교하였을 때, 14.8% 작은 절삭 부하가 측정되었다. 하지만 1개의 노즐을 활용한 극저온 MQL 조건에서는 절삭 부하가 타 조건들보다 빠르게 증가하는

경향을 보였다. 노즐의 개수는 유체의 유량을 의미한다. 1개 노즐 조건의 경우 2개 노즐 조건에 비해 절반 수준의 유량을 가지게 된다. 따라서 불충분한 윤활 환경이 가공 부하를 충분히 감소시키지 못한 것으로 사료된다. 또한, 위 윤활 환경이 2개 노즐 적용 조건에 비해 큰 마찰열 및 공구 온도 상승을 유발하여 빠른 공구 마모 진전과 가공 부하 증가를 발생시킨 것으로 판단된다. 추가적으로 액체 질소가 급작스러운 공구 온도 감소를 유발할 수 있으므로, 공구의 파손 및 공구 마모 진전을 가속화할 수 있다. 액체 질소의 온도가 일반 절삭유보다 낮으므로, 습식 조건보다 빠른 절삭 부하 증가를 보인 것으로 사료된다. 위 결과를 고려할 때, 극저온 가공 시 절삭 부하 감소를 위해 충분한 윤활이 필수적인 것으로 판단되며, 2개 노즐 적용 극저온 MQL 조건이 절삭 부하 기준 최적인 것으로 사료된다.

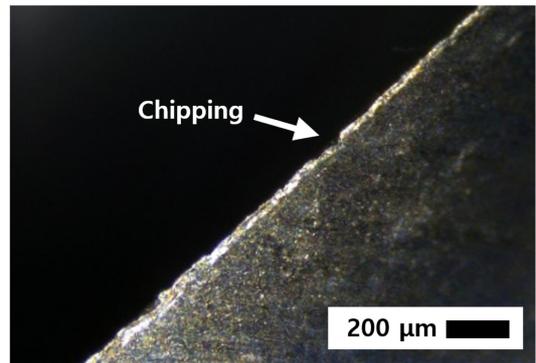
4.2 공구 마모 분석

제시된 모든 조건에서 특정 길이를 가공한 공구에 대해 마모 분석이 수행되었다. 냉각 및 윤활 환경의 가공성에 대한 영향을 명확히 분석하기 위해 86 패스에 해당하는 긴 가공 길이를 적용하였으며, 플랭크 면을 기준으로 발생된 마모의 종류를 분석하였다. 관련 내용은 Fig. 7에서 확인 가능하다. 분석 결과 모든 조건에서 플랭크 마모가 발생되었다. 지속적인 가공 진행으로 인해 공구에 가해지는 응력 및 열이 영향을 준 것으로 판단된다. 또한, 습식 및 1개 노즐 적용 극저온 MQL 가공 조건에서는 치핑 현상이 발견되었다. 치핑이란 공구가 깨지는 현상을 의미하며 급작스러운 충격, 열 변화 등이 나타났을 때 발생될 수 있다. 절삭 가공의 경우 공구의 소재 접촉 시 소재가 소성 변형되면서 전단영역에서 큰 열이 일차적으로 발생된다. 이후 소성 변형된 소재가 공구 표면을 지나며 마찰열이 발생된다. 두 차례 과정으로 상승한 공구 온도가 절삭유에 의해 급격히 감소하게 되고, 해당 온도 변화가 공구에 열 충격을 가한 것으로 사료된다. 반면, 2개 노즐 적용 극저온 MQL 가공 조건에서는 치핑 현상이 발견되지 않았다. 2개 노즐을 활용한 분사는 충분한 유량의 유체를 공구 표면에 위치 시킬 수 있다. 이는 공구 표면 마찰 계수를 낮출 수 있으며, 마찰열 감소를 야기할 수 있다. 마찰에 의한 열이 감소하므로, 타 냉각 조건과 달리 공구의 초기 상승 온도가 감소하게 된다. 따라서, 내부 순환된 액체 질소에 의한 온도 감소 폭이 줄어들어, 열 충격 효과가 감소한 것으로 판단된다. 관련된 사항은 Fig. 6에서도 확인 가능하다.

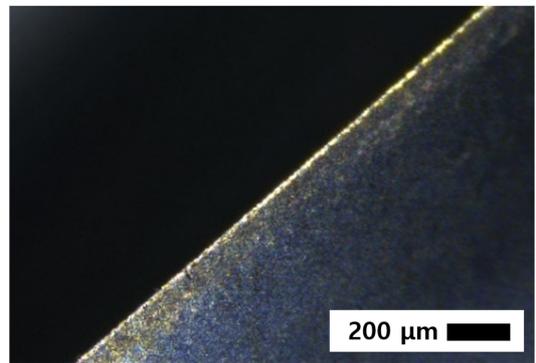
추가적으로 플랭크 마모 길이가 측정되었다. 측정 결과 습식, 1개 노즐 적용 극저온 MQL, 2개 노즐 적용 극저온 MQL 조건에 대해 각각 45, 55, 20 μm 의 마모 길이가 나타났다. 2개 노즐을 적용한 극저온 MQL 조건에서 최소값이 측정되었으며, 습식 조건에 비해 55.5% 적은 수준을 보였다. 열 충격이 줄어든 조건에서 공구 온도가 감소되었기 때문에, 해당 결과가 나타난 것으로 판단된다. 위 경향은 가공 길이에 따른 절삭 부하의 증가 경향과 유사하게 나타났다. 공구 마모가 클수록 절삭 부하가 빠르게 증가하였으며, 마모 진전으로 인한 공구 형상 변화가



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Flank faces of cutting tools at the machining distance of 86 passes under (a) wet, (b) cryogenic+MQL with 1 nozzle, and (c) cryogenic+MQL with 2 nozzle conditions

해당 현상을 초래한 것으로 보인다. 위 결과로 미루어 볼 때, 극저온 밀링 가공에서 공구 수명 향상 시 MQL 조건 적용이 효과적인 것으로 판단되며, 충분한 양의 유체를 분사할수록 가공성 개선 효과가 커지는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 티타늄 합금 소재에 대해 극저온 MQL 가공을 진행하였으며, 실험 결과를 토대로 가공성 분석을 수행하였다. 상세한 내용은 하단에 나타난 바와 같다.

(1) 극저온 MQL 가공 시 2개의 극미량 유체 분사 노즐을 적용한 경우 적절한 윤활 환경 조성 및 공구 냉각으로 인해 공구 온도가 낮게 유지됨에 따라 가공 길이의 증가에도 불구하고 절삭 부하가 유지되었다. 긴 가공 길이 조건에서 습식에 비해 14.8% 낮은 수준의 부하 값을 보였다.

(2) 습식 및 1개 노즐 극저온 MQL 조건에서 86 패스 가공의 경우 상승한 공구 온도가 큰 폭으로 감소함에 따라 열 충격에 의해 공구 치핑 현상이 발생했다. 반면, 2개 노즐 극저온 MQL 가공 시에는 온도 증가 및 감소 폭이 작으므로 해당 현상이 나타나지 않았다.

(3) 2개 노즐 극저온 MQL 조건에서 최소의 플랭크 마모 길이가 측정되었으며, 해당 값은 습식 조건 대비 55.5% 감소된 수준을 보였다.

(4) 2개 노즐 적용 극저온 MQL 가공 시 적은 절삭 부하와 공구 마모는 적절한 공구 냉각 및 윤활에 의한 것으로 판단되며, 티타늄 밀링 가공 시 다량의 MQL 분사를 동반한 극저온 조건이 가공성 향상에 적합한 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원(20206310200010, 국산 CNC 기반 산업기계 재제조 스펙업 및 보급·확산 기반 조성) 및 한국산업기술진흥원(P0015354, 난삭재 고난도 형상 가공 및 제어 기술 개발)의 지원을 받아 수행됨.

REFERENCES

- Castellani, C., Lindtner, R. A., Hausbrandt, P., Tschegg, E., Stanzl-Tschegg, S. E., Zanoni, G., Beck, S., Weinberg, A.-M., (2011), Bone-implant interface strength and osseointegration: Biodegradable magnesium alloy versus standard titanium control, *Acta Biomaterialia*, 7(1), 432-440.
- Lee, H.-H., Lee, S., Park, J.-K., Yang, M., (2018), Friction and wear characteristics of surface-modified titanium alloy for metal-on-metal hip joint bearing, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19(6), 917-924.
- Li, N., Chen, Y.-J., Kong, D.-D., (2018), Wear mechanism analysis and its effects on the cutting performance of PCBN inserts during turning of hardened 42CrMo, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19(9), 1355-1368.
- Choudhury, S., Bartarya, G., (2003), Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(7), 747-753.
- Hong, S. Y., Markus, I., Jeong, W.-C., (2001), New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(15), 2245-2260.
- Hong, S. Y., Ding, Y., Jeong, W.-C., (2001), Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(15), 2271-2285.
- Dhar, N., Paul, S., Chattopadhyay, A., (2001), The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels, *Wear*, 249(10-11), 932-942.
- Dhar, N., Kamruzzaman, M., (2007), Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5), 754-759.
- Wang, Z., Rajurkar, K., (2000), Cryogenic machining of hard-to-cut materials, *Wear*, 239(2), 168-175.
- Wang, Z., Rajurkar, K., Fan, J., Petrescu, G., (2002), Cryogenic machining of tantalum, *Journal of Manufacturing Processes*, 4(2), 122-127.
- Bertolini, R., Lizzul, L., Pezzato, L., Ghiotti, A., Bruschi, S., (2019), Improving surface integrity and corrosion resistance of additive manufactured Ti6Al4V alloy by cryogenic machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 2839-2850.
- Sidik, N. A. C., Samion, S., Ghaderian, J., Yazid, M. N. A. W. M., (2017), Recent progress on the application of nanofluids in minimum quantity lubrication machining: A review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 79-89.
- Roy, S., Kumar, R., Sahoo, A. K., Das, R. K., (2019), A brief review on effects of conventional and nano particle based machining fluid on machining performance of minimum quantity lubrication machining, *Materials Today: Proceedings*, 18, 5421-5431.
- Padmini, R., Krishna, P. V., Rao, G. K. M., (2016), Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel, *Tribology International*, 94, 490-501.
- Uysal, A., Demiren, F., Altan, E., (2015), Applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano MoS₂ reinforced vegetable cutting fluid, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2742-2747.
- Park, K.-H., Yang, G.-D., Suhaimi, M., Lee, D. Y., Kim, T.-G., Kim, D.-W., Lee, S.-W., (2015), The effect of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication on end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 5121-5126.
- Pereira, O., Rodríguez, A., Fernández-Abia, A., Barreiro, J., de Lacalle, L. L., (2016), Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304, *Journal of Cleaner Production*, 139, 440-449.
- Suhaimi, M. A., Yang, G.-D., Park, K.-H., Hisam, M. J., Sharif,

- S., Kim, D.-W., (2018), Effect of cryogenic machining for titanium alloy based on indirect, internal and external spray system, *Procedia Manufacturing*, 17, 158-165.
19. Kim, J., Kim, D. Y., (2022), Study on the machinability of cryogenic milling for compacted graphite iron, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(1), 13-19.
20. Bogajo, I. R., Tangpronprasert, P., Virulsri, C., Keeratihattayakorn, S., Arrazola, P. J., (2020), A novel indirect cryogenic cooling system for improving surface finish and reducing cutting forces when turning ASTM F-1537 cobalt-chromium alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 1971-1989.
21. Sayuti, M., Sarhan, A. A., Salem, F., (2014), Novel uses of SiO₂ nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel AISI4140 for less tool wear, surface roughness and oil consumption, *Journal of Cleaner Production*, 67, 265-276.



Hoon-Hee Lee
Senior Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest in machine tool metrology and aerospace manufacturing system.
E-mail: hhlee84@kitech.re.kr



Young Ha Hwang
Principal Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest in aerospace material fabrication.
E-mail: h69231@kitech.re.kr



Dong Min Kim
Senior Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest in aerospace manufacturing process.
E-mail: dkim0707@kitech.re.kr



Ki Hyuk Kim
Senior Research Engineer of Commercial Aircraft Design Team in Korea Aerospace Industries, Co., Ltd..
E-mail: kihyukkim@koreaaero.com



Heung Bum Park
Deputy General Manager in Nakwon Co., Ltd.. His research interest in machining technology for difficult-to-cut materials.
E-mail: hungbum@nakwon21.com



In Su Shin
Principal Research Engineer of Commercial Aircraft Design Team in Korea Aerospace Industries, Co., Ltd..
E-mail: mc2mc2@koreaaero.com



Byung-Gook Kim
CEO in Nakwon Co., Ltd. and Nakwon T&A Co., Ltd..
E-mail: kbg1341@nakwon21.com



Do Young Kim
Assistant Professor in the School of Mechanical Engineering, Kyungnam University. His research interest is machining.
E-mail: doyoungk@kyungnam.ac.kr

레이저를 이용해 증착된 세라믹 표면에서의 세균 배양에 대한 영향

Effect on Bacterial Culture on Ceramic Surfaces Deposited Using a Laser

윤상우¹, 김주한^{2, #}
Sangwoo Yoon¹ and Joohan Kim^{2, #}

¹ 서울과학기술대학교 미래기계기술연구소 (Future Mechanical Technology Research Center, Seoul National University of Science & Technology)
² 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology)
Corresponding Author / E-mail: joo Hankim@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6303
ORCID: 0000-0001-9412-3914

KEYWORDS: Laser induced backward transfer (레이저 후방산란 증착), Cell culture (세포 배양), Mass transfer (물질 전달)

The hydrophilicity of the cell culture substrate was controlled by depositing it on the alumina surface through the laser-induced backward transfer (LIBT) method. Alumina particles were sized using laser energy density and deposited on the soda lime glass surface. The particle size and hydrophilicity of the alumina deposition surface were evaluated by measuring the surface roughness, contact angle, and light diffusivity. As the particle size increased, the effect of alumina became stronger, and the deposited surface had relatively higher roughness, stronger hydrophilicity, and higher light diffusivity. The stronger the alumina effect, the lower the growth of Staphylococcus aureus on the deposited surface. In this study, it was confirmed that selective bacterial growth and culture could be controlled by adjusting the strength of the alumina coating using the LIBT process.

Manuscript received: December 1, 2022 / Revised: January 5, 2023 / Accepted: January 13, 2023

NOMENCLATURE

E_d = Laser Power Density
 P_{eff} = Laser Output Power
 v_s = Pattern Scanning Speed
 h = Hatch Distance
 d = Total Thickness
 θ = Contact Angle
 r = Roughness Factor
 F = View Factor
 A = Surface Area
 f = Contact Area Ratio
 θ = Normal Angle of Incident Light
 Φ = Normal Angle of Reflected Light

1. 서론

세라믹을 적용한 배양 배지 재료는 우수한 내 화학성, 다공성, 높은 가공성 및 생체 적합성을 가지고 있다. 또한, 세라믹 재료의 표면 개질은 세포 배양에 대해 세포의 운동, 부착 및 성장을 제어하는데 중요한 것으로 여겨지고 있다[1-5]. 예를 들어 세라믹 배양지에서 C-ZrO₂ 복합 기저는 자외선 레이저 조사에 의해 탄소 함량을 감소시켜 단백질 활성과 접착력을 증가시키는 것으로 Roy et al.에 의해 연구결과가 보고되었다[4]. 알루미늄 복합 기저는 그에 반해 단백질 부착을 방해하여 세포 배양을 막는 경향을 보인다고 Feng et al.에 의해 보고되었다[5]. 세라믹 재료는 일반적으로 소결을 통해 만들어지나 세라믹 미세 형상 제조에는 다양한 방법이 존재한다. 레이저는 고품질의 광 에너지를 정밀히 조절할 수 있는 특징을 갖고 있기에 세라믹 형상 제조에 적용될 수 있다. 세라믹 표면에서의 세포배양의 경우 표면의 여러 특성이 배양결과에 영향을 줄 수 있다. 특히

표면에서의 친/소수성은 배양결과에 중요할 수 있다. 레이저 가공을 통한 다양한 재료의 친/소수성 표면처리법에 대한 다수의 연구가 진행되었다[6-10]. 이러한 공정은 대부분 특별한 표면 재료에 한정되어 있으며 레이저에 의한 직접 표면 가공공정이다. 재료 표면의 다른 개질의 방법으로는 증착 공정을 고려할 수 있다. 레이저 유도 플라즈마에 의한 후방 산란 증착(Laser Induced Backward Transfer, LIBT)은 투명한 모재 뒤 공여체에 레이저 빔을 조사하여 조사 반대 방향으로 물질을 전달하여 모재 뒤편에 타겟물질을 증착하는 방법이다. 이러한 방법을 이용하면 직접 표면 가공이 아닌 마이크로/나노 입자의 레이저 증착을 통해 바이오 필름과 같은 세포 배양에 조절에 필요한 3차원 마이크로/나노 표면 형상을 국지적으로 형성할 수 있다[11]. 펨토초부터 나노초에 이르는 레이저 펄스의 적용은 재료 내에서의 비열 특성으로 인해 높은 피크 출력과 비선형 흡수 특성을 이용하는 것이 가능하다[12,13]. 따라서 생명공학에서 주로 사용하는 세라믹과 같이 단단하고 취성이 높은 생체 재료 가공 및 증착에 대해 높은 신뢰성과 고품질의 결과물을 기대할 수 있다. 또한, 세포배양 바이오 필름에 대한 레이저 패터닝 증착 처리는 정밀하게 가공된 세포 배양 재료 표면 구조의 형성이 가능하므로 효율적인 세포 배양 컨트롤이 가능하다.

본 연구에서는 모재인 소다 라임 글라스에 알루미나를 공여체로 사용하여 알루미나 입자를 LIBT 방법으로 증착했다. 알루미나는 레이저 패턴을 따라 증착 표면과 소결 표면을 형성하였으며 각각의 경우에서 배양배지의 세균 배양 효율의 증감을 확인하였다. 실험을 통해 만들어진 표면의 평가방법으로 거칠기 측정, 접촉각 측정, 스펙트로미터를 통한 광 확산성 측정을 진행하였다. 이러한 결과를 통해 레이저 알루미나 후방 산란 증착이 세균 증식에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 실험 방법

LIBT 공정의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 조사된 레이저 빔은 알루미나 표면에서 어블레이션 현상을 야기시킨다. 이 때 표면에서 발생한 플라즈마에 의해 알루미나는 표면에서부터 글라스 표면으로 전달되어 미세입자 형태로 증착 된다. 증착된 알루미나 입자는 사용된 레이저 패턴과 동일한 표면패턴을 따른다. 모재의 두께는 1 mm이며, 변수로 설정된 레이저의 영향을 충분히 무시할 수 있는 두께이다. 실험에서 사용된 레이저 매개변수는 Table 1에 나타나 있다. 사용된 타겟 재료는 알루미나(Al₂O₃, 97.50%)이다. 증착하고자 하는 패턴의 레이저 스캐닝 속도 조절을 통해 시간당 레이저 에너지밀도 변수를 설정하였으며 그 수치는 20-120 mm/s이다. 사용된 스캐닝 패턴은 10 × 10 mm²의 선형 패턴이며, 패턴 간 오버랩 비율은 0, 50%의 2가지 경우를 사용한다. 적층에 사용된 레이저 에너지 밀도는 다음과 같은 식이 적용되었다[14].

$$E_d = \frac{P_{eff}}{v_s \cdot h \cdot d} \tag{1}$$

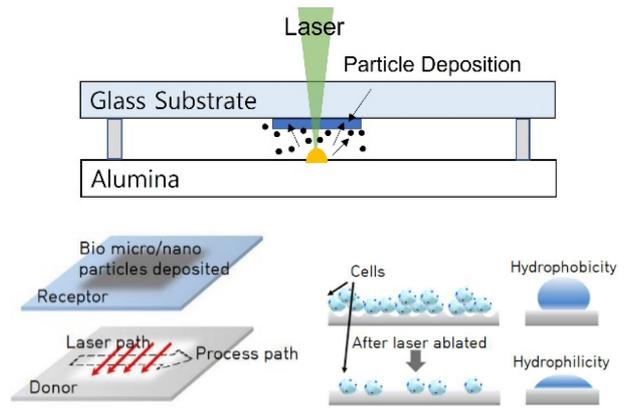


Fig. 1 Schematic of LIBT process

Table 1 Laser parameter and material setup

Wavelength [nm]	1,064
Energy density [J/mm ²]	16.7-100
Pulse duration [ns]	4
Beam spot size [μm]	50
Substrate	Soda lime glass
Target	Alumina (Al ₂ O ₃)

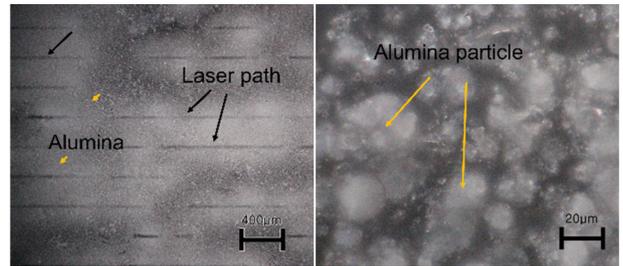


Fig. 2 OM image of Al₂O₃ particle deposition using LIBT

여기서, E_d는 3차원 레이저 에너지밀도, P_{en}는 출력, v_s는 스캐닝속도, h는 해치거리, d는 층 두께이다. 이 식을 이용하여 실험에서 사용된 단위공간 영역에서 레이저 에너지밀도를 환산하면 16.7-100 J/mm²이다.

실험결과는 광학현미경(BX51M, Olympus/Japan)을 통해 표면 형상을 확인하였고, 공초점 현미경(LSM 800 BIO, Carl Zeiss/Germany)의 표면 형상 측정과 접촉각 측정(CAM-200, KSV/Finland)의 결과를 통해 표면 거칠기 등의 미세 형상을 확인하였다. 미세 측정 된 표면 위에 황색포도상구균을 배양한 후 셀 카운트 결과를 통해 표면성질이 세균 증식에 미치는 영향을 확인하였다.

3. 실험 결과

3.1 미세 표면 형상 분석

Fig. 2는 LIBT로 증착된 알루미나 패턴의 증착 형상이다.

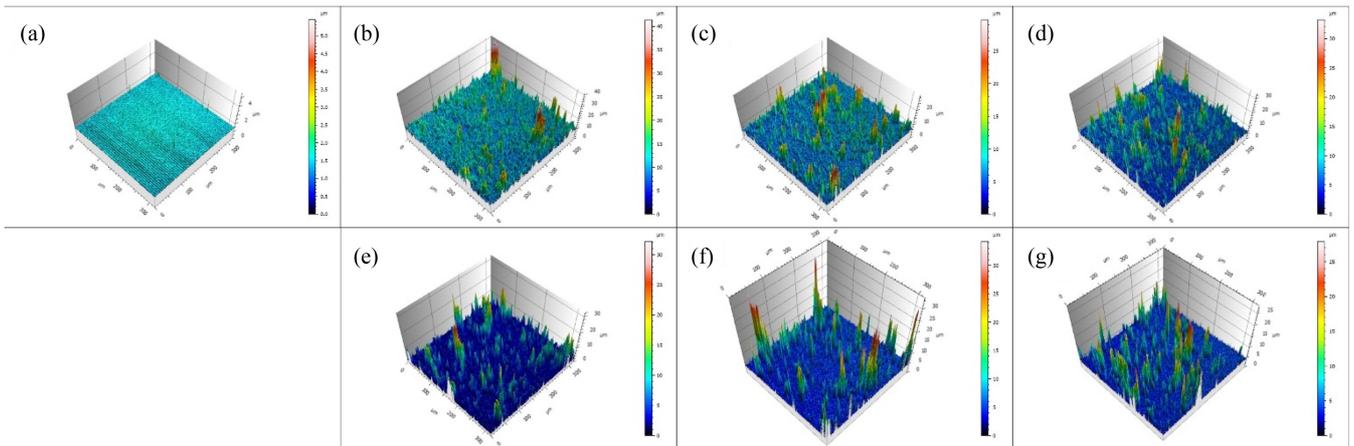


Fig. 3 (a) Soda lime glass surface. Alumina deposited surface using laser influence of (b) 16.7, (c) 20, (d) 33.3, (e) 35, (f) 50, (g) 100 J/mm³

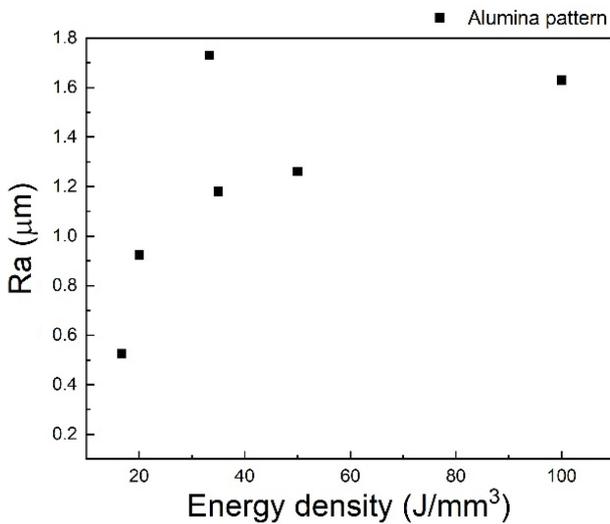


Fig. 4 Ra number of alumina surface samples

16.7 J/mm³ 에너지 밀도로 증착한 시편에서 알루미나 입자의 크기는 평균 직경이 약 500 nm, 100 J/mm³의 조건에서는 평균 약 10 μm의 직경을 갖는 것으로 측정되었다.

Fig. 3는 시편에서 표면들에 대한 공초점 현미경 측정 결과이다. 각 시편의 알루미나 패턴 표면 형상에 대한 3차원 이미지가 획득되었다. 이 데이터를 기반으로 각 패턴 경우의 표면 거칠기를 Ra 값을 통해 계산이 가능하였다. 레이저 에너지 밀도에 대한 알루미나 패턴의 표면 거칠기에 대한 그래프 결과가 Fig. 4와 같이 얻어졌다. 표면 거칠기 Ra 값은 16.7 J/mm³의 에너지 밀도에서 0.57 μm, 20 J/mm³에서 0.96 μm, 33.33 J/mm³에서 1.77 μm, 35 J/mm³에서 1.21 μm, 50 J/mm³에서 1.29 μm, 100 J/mm³에서 1.65 μm의 표면 거칠기로 측정되었다. 이는 에너지 밀도가 높을수록 상대적으로 큰 입자가 만들어져 거친 표면이 되고, 영역에 가해지는 레이저 빔의 에너지 밀도가 낮을수록 생성되는 입자의 크기가 작아져 상대적으로 매끈한 표면을 형성하는 것으로 볼 수 있다.

3.2 표면 접촉각 분석

표면 성질인 친/소수성을 구분하는 방법으로 액체의 접촉각 이론을 적용하였다. 접촉각 이론은 크게 표면을 완전히 적시는 경우의 Wenzel Model과 완전히 적시지 못하는 경우 접촉하는 면적의 비율을 설명하는 Cassie-Baxter Model이 있다[15,16]. 각각의 이론에서 설명하는 접촉각은 식(2)와 식(3)을 통해 나타낼 수 있다.

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_s \tag{2}$$

$$\cos \theta_{CB} = f \cos \theta_s + (1-f) \cos \theta_{air} \tag{3}$$

식(2)는 Wenzel의 Model, 식(3)은 Cassie-Baxter Model에 적용되는 관계를 나타낸다. 식(2)에서 r 은 거칠기 계수이며 고체와 액체간 접촉면적을 투영면적으로 나눈 값이다. θ_s 는 매끄러운 고체표면에서의 접촉각이다. θ_w 는 액체의 접촉각을 나타낸다. θ_s 값이 90° 이하인 경우 친수성 표면을 나타내며 r 이 증가할 때 θ_w 가 감소한다. θ_s 가 90° 이상인 경우 소수성 표면이며 r 이 증가할 때 θ_w 가 증가한다. 식(3)에서 f 는 접촉면적을 전체면적으로 나눈 값이다. 접촉면적비가 f 인 표면에서 공기의 접촉면적비는 $(1-f)$ 로 정의한다. θ_{air} 는 공기 접촉각이며, 이것은 180°이다.

Fig. 5는 레이저 에너지밀도 16.7-100.0 J/mm³에서 각각의 경우에 대한 접촉각 측정 결과이다. 코팅을 한 기저에 알루미나 입자가 증착되었다. 기준이 되는 유리 기저 표면의 접촉각은 101.4°이다. 에너지밀도 100 J/mm³로 증착된 알루미나 표면의 접촉각은 45.7°이며 이는 친수성 표면으로 판별되었다. 50 J/mm³의 경우 접촉각은 73.2°이므로 역시 친수성 표면으로 확인되었다. 에너지밀도가 35 J/mm³ 이하의 경우에는 알루미나 계면이 기저의 표면특성에 영향을 끼치지 못하는 것으로 나타났다. 이를 종합해 볼 때, 낮은 스캐닝 속도에서 레이저 에너지밀도가 50-100 J/mm³으로 충분한 경우 표면 특성은 알루미나에 의해 접촉각이 73° 이하가 되어 친수성 표면이 되는 것을 확인하였다.

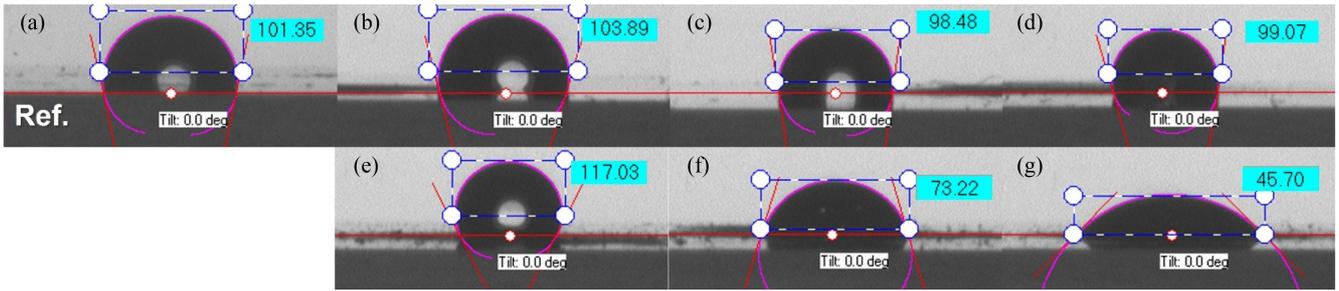


Fig. 5 (a) Hydrophobic coated soda lime surface. Alumina deposited surface using laser power (b) 16.7, (c) 20, (d) 33.3, (e) 35, (f) 50, (g) 100 J/mm³

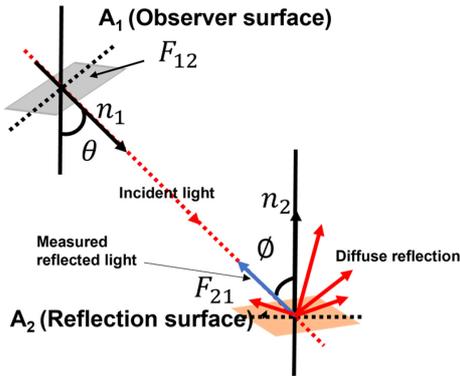


Fig. 6 Schematic of view factor theory

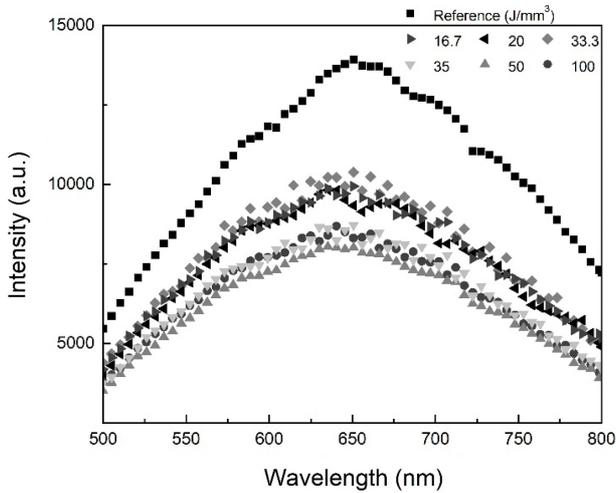


Fig. 7 Spectrometer intensity of alumina surface about laser influence

3.3 광 확산성 분석

표면 분석에 있어서 광 확산성 측정법은 표면의 난반사광 휘도를 측정하여 표면의 미세 형상의 균일도를 확인하는 방법이다. 사용된 스펙트로미터 장비(HR4000, Ocean Insight/USA)의 측정방법에 대한 개략도가 Fig. 6에 있으며 일반적인 스펙트로미터 측정방법에서 기준광의 반사도를 확산면을 기준으로 사용한다. 두 물체 사이의 형상계수(View Factor)를 F_{12} 라 정의하며 다음과 같은 식(4)로 나타낼 수 있다[17].

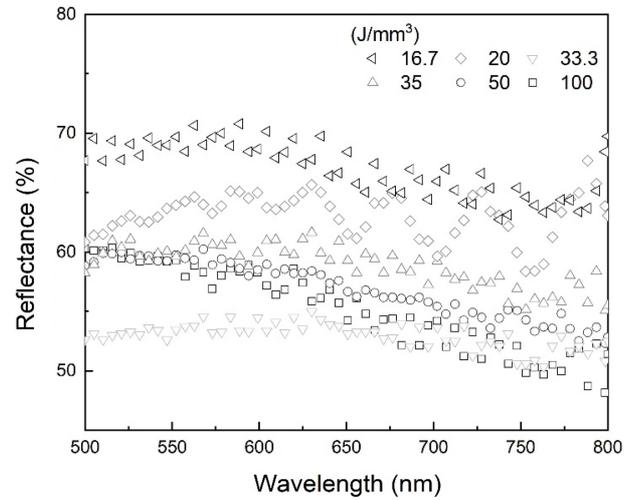


Fig. 8 Reflectance of alumina surface vs. reference of diffuse surface

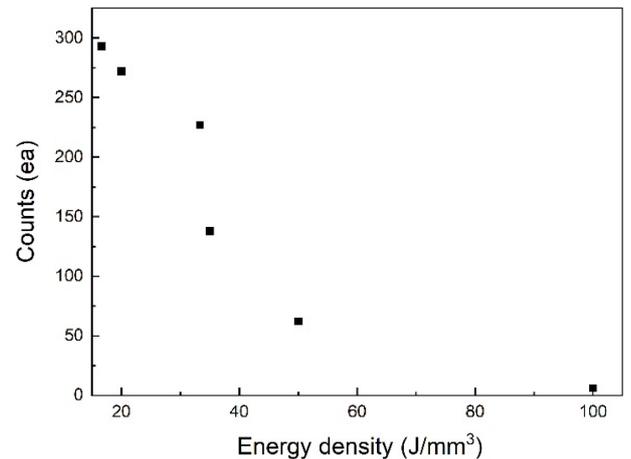


Fig. 9 Cell counts graph of each samples 16.67-100 J/mm³

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta \cos \phi}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (4)$$

A_1 에서 A_2 로의 입사광은 시편표면에서 난반사에 의해 확산되어 일부만 스펙트로미터로 되돌아온다. 이 때 되돌아온 광의 세기를 기준광과 비교하여 정반사율이 낮을수록 확산성이 높고,

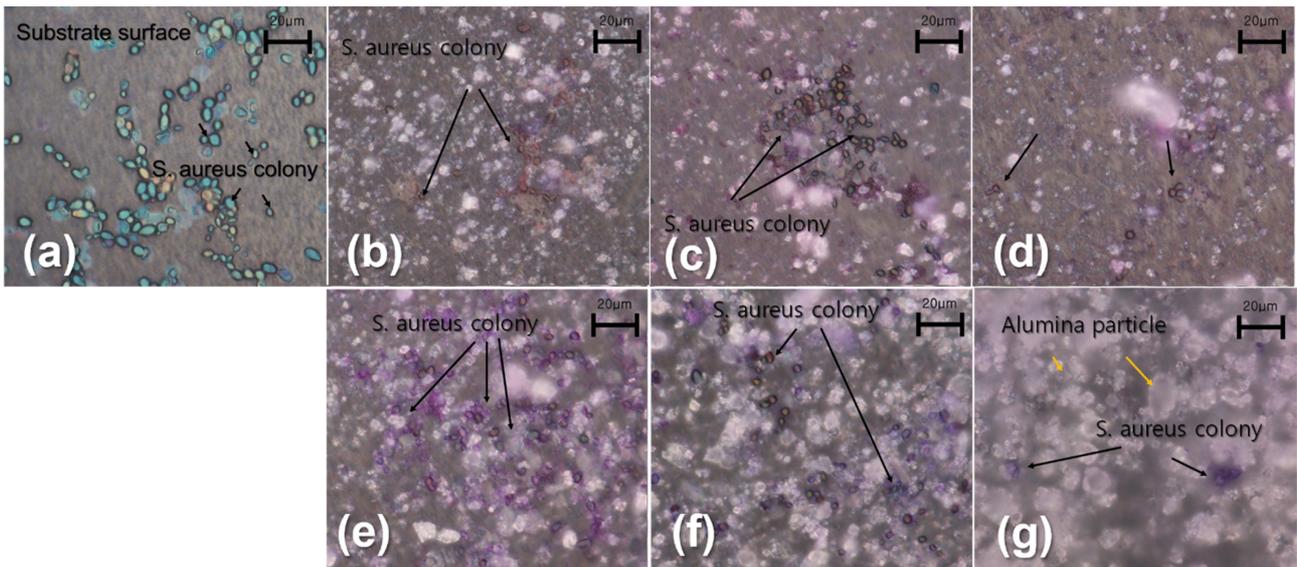


Fig. 10 Bacterial culture results of (a) soda lime surface, (b) 16.7, (c) 20 (d) 33.3 (e) 35 (f) 50 (g) 100 J/mm³ alumina surface

정반사율이 높을수록 확산성이 낮다고 할 수 있다. Figs. 6과 7은 알루미나 표면의 광 반사율을 통해 간접적으로 광 확산성을 측정된 결과 그래프이다. 16.7 J/mm³의 낮은 에너지밀도로 알루미나를 증착한 표면의 경우 상대적으로 높은 광 반사율을 보이므로 보다 매끈하고 작은 입자로 이루어져 있으며 기저표면의 영향을 받는 특성을 보인다고 할 수 있다. 반면 100 J/mm³의 높은 레이저 에너지밀도의 경우에는 상대적으로 큰 알루미나 입자에 의한 난반사로 인해 높은 광 확산성을 갖는 표면이라고 볼 수 있다. 이러한 표면 성질은 세포 배양에 있어 세포 성장을 컨트롤할 수 있는 요소로 확인하였다. 이러한 원리를 적용하면 레이저 에너지 밀도에 따른 세라믹 적층의 조건에 따라 세포 배양의 효과를 조절할 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

3.4 황색포도상구균 배양 분석

Figs. 10(a)는 글라스에 증착된 알루미나의 표면이며, 10(b)부터 10(g)는 알루미나가 증착된 표면에서 배양된 황색포도상구균의 샘플 사진이다. 높은 에너지밀도로 증착된 알루미나 표면에서는 세균이 잘 자라지 못하게 되는 결과를 얻었다. 앞의 실험에서 상대적으로 큰 입자로 이루어진 알루미나 표면은 큰 친수성을 갖게 되며, 상대적으로 작은 입자로 구성된 알루미나 표면은 보다 작은 친수성을 띄는 것과 관계가 있다고 판단된다. 기저 표면의 표면에너지가 높을수록 또는 친수성 표면에서 세균이나 세포의 부착이 잘 일어난다는 연구결과들이 있다[7-10,18]. 따라서 일반적인 친수성 기저에서의 세균/세포 증식이 소수성 기저에서 보다 더 잘 일어나는 것을 예측할 수 있다. 하지만 알루미나 코팅면에서는 이러한 경향이 반대로 나타난다[1,5] 선행 연구에 따르면 알루미나 코팅은 친수성 형태를 가지지만 분자구조가 단백질과의 결합을 방해하기 때문에 높은 표면에너지에도 불구하고 세포의 분열과 성장을 억제한다고 보고하고 있다[5].

Fig. 10은 레이저 에너지 밀도에 따른 세균 배양 결과이다. 낮은 레이저 에너지 밀도로 적층된 경우에는 작은 입자의 구조적 특성과 입자로 코팅이 되지 않는 간헐적인 유리기저의 영향으로 세균의 증식이 많이 일어난 것으로 보인다. 반면에 알루미나 입자의 영향은 에너지밀도 30 J/mm³ 이상일 때 평균 약 5 µm 크기의 입자에서 나타나기 시작해서 100 J/mm³의 약 15 µm 크기의 입자환경에서는 균의 성장이 억제되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 LIBT를 통해 증착된 알루미나 표면에서 그 입자의 크기에 따라 세균의 증식을 조절할 수 있는 방법을 갖는다고 볼 수 있다.

4. 결론

LIBT 공정을 통해 알루미나 입자 물질전달 방식의 표면처리를 통해 배양기저의 표면에너지를 변화시키는 실험이 수행되었다. 알루미나 증착 표면의 특성은 표면 거칠기, 접촉각, 광확산성 측정을 통해 평가되었다. LIBT에 적용되는 시간당 레이저 에너지밀도가 높아질수록 큰 직경의 알루미나 입자가 산란 증착되었다. 입자크기가 커질수록 상대적 거칠기는 커지고 접촉각은 감소하였으며, 광확산성은 증가하였다. 증착 입자의 크기가 클수록 모재 표면의 영향이 줄고 알루미나 증착 표면의 영향이 강해졌다. 이 알루미나 표면에 황색포도상구균을 배양하였을 때 알루미나의 영향이 강해질수록 균의 증식을 억제하게 되었다. 따라서 상대적으로 레이저 적층 공정을 통해 알루미나의 코팅의 강도를 조절할 수 있을 것으로 판단되며 이를 통해 선택적 세균 배양 또는 증식을 조절할 수 있다. 이러한 원리는 세균 배양에 있어 그 목적에 따라 다양한 형태로 적용될 수 있을 것으로 판단한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1F1A1045844).

REFERENCES

- Chen, Z.-C., Chang, T.-L., Liu, C.-C., Hsiao, W.-T., Huang, C.-H., (2020), Picosecond laser surface modification of aluminum oxide with fish-scale structures for cell culture, *Ceramics International*, 46(11), 17651-17658.
- Angelaki, D., Kavatzikidou, P., Fotakis, C., Stratakis, E., Ranella, A., (2020), Laser-induced topographies enable the spatial patterning of co-cultured peripheral nervous system cells, *Materials Science and Engineering: C*, 115, 111144.
- Moritz, J., Abram, A., Čekada, M., Gabor, U., Garvas, M., Zdovc, I., Dakskobler, A., Cotič, J., Ivičak-Kocjan, K., Kocjan, A., (2019), Nanoroughening of sandblasted 3Y-TZP surface by alumina coating deposition for improved osseointegration and bacteria reduction, *Journal of the European Ceramic Society*, 39(14), 4347-4357.
- Roy, M., Pompella, A., Kubacki, J., Piosik, A., Psiuk, B., Klimontko, J., Szade, J., Roy, R. A., Hedzelek, W., (2017), Photofunctionalization of dental zirconia oxide: Surface modification to improve bio-integration preserving crystal stability, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 156, 194-202.
- Feng, G, Cheng, Y., Wang, S.-Y., Hsu, L. C., Feliz, Y., Borca-Tasciuc, D. A., Worobo, R. W., Moraru, C. I., (2014), Alumina surfaces with nanoscale topography reduce attachment and biofilm formation by *Escherichia coli* and *Listeria spp*, *Biofouling*, 30(10), 1253-1268.
- Hanada, Y., Sugioka, K., Kawano, H., Tsuchimoto, T., Miyamoto, I., Miyawaki, A., Midorikawa, K., (2009), Selective cell culture on UV transparent polymer by F2 laser surface modification, *Applied Surface Science*, 255(24), 9885-9888.
- Tsibouklis, J., Stone, M., Thorpe, A. A., Graham, P., Peters, V., Heerlien, R., Smith, J. R., Green, K. L., Nevell, T. G., (1999), Preventing bacterial adhesion onto surfaces: The low-surface-energy approach, *Biomaterials*, 20(13), 1229-1235.
- Lim, J. Y., Shaughnessy, M. C., Zhou, Z., Noh, H., Vogler, E. A., Donahue, H. J., (2008), Surface energy effects on osteoblast spatial growth and mineralization, *Biomaterials*, 29(12), 1776-1784.
- Harnett, E. M., Alderman, J., Wood, T., (2007), The surface energy of various biomaterials coated with adhesion molecules used in cell culture, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 55(1), 90-97.
- Pfleging, W., Bruns, M., Welle, A., Wilson, S., (2007), Laser-assisted modification of polystyrene surfaces for cell culture applications, *Applied Surface Science*, 253(23), 9177-9184.
- Kuznetsov, A., Koch, J., Chichkov, B., (2009), Laser-induced backward transfer of gold nanodroplets, *Optics Express*, 17(21), 18820-18825.
- Werner, D., Hashimoto, S., (2011), Improved working model for interpreting the excitation wavelength-and fluence-dependent response in pulsed laser-induced size reduction of aqueous gold nanoparticles, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(12), 5063-5072.
- Jeon, J.-W., Yoon, S., Choi, H. W., Kim, J., Farson, D., Cho, S.-H., (2018), The effect of laser pulse widths on laser-Ag nanoparticle interaction: Femto-to nanosecond lasers, *Applied Sciences*, 8(1), 112.
- Ullah, A., Ur Rehman, A., Salamci, M. U., Pıtır, F., Liu, T., (2022), The influence of laser power and scanning speed on the microstructure and surface morphology of Cu2O parts in SLM, *Rapid Prototyping Journal*, 28(9), 1796-1807.
- Uelzen, T., Müller, J., (2003), Wettability enhancement by rough surfaces generated by thin film technology, *Thin Solid Films*, 434(1-2), 311-315.
- Ceyhan, U., Tiktaş, A., Özdoğan, M., (2020), Pinning and depinning of Wenzel-state droplets around inclined steps, *Colloid and Interface Science Communications*, 35, 100238.
- Sparrow, E., (1963), A new and simpler formulation for radiative angle factors, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 85(2), 81-87.
- Eosoly, S., Vrana, N. E., Lohfeld, S., Hindie, M., Looney, L., (2012), Interaction of cell culture with composition effects on the mechanical properties of polycaprolactone-hydroxyapatite scaffolds fabricated via selective laser sintering (SLS), *Materials Science and Engineering: C*, 32(8), 2250-2257.



Sangwoo Yoon

Ph.D. in the Future Mechanical Technology Research Center, Seoul National University of Science & Technology. His research interest is laser processing and analysis.
E-mail: yoonsw@seoultech.ac.kr



Joohan Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science & Technology. His research interest is laser processing.
E-mail: joohankim@seoultech.ac.kr

Convolutional Neural Network를 활용한 SEM 영상품질 향상 및 영상품질 평가를 위한 MTF 측정기법

SEM Image Quality Improvement and MTF Measurement Technique for Image Quality Evaluation Using Convolutional Neural Network

김찬기¹, 이응창², 김종배³, 노진성^{1,#}

Chan Ki Kim¹, Eung Chang Lee², Joong Bae Kim³, and Jinsung Rho^{1,#}

¹ 한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University)

² 삼성전자 메모리사업부 (Memory Business, Samsung Electronics)

³ 국립공주대 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University)

Corresponding Author / E-mail: jinsung.rho@hanbat.ac.kr; TEL: +82-42-821-1155

ORCID: 0000-0002-4525-8860

KEYWORDS: Semiconductor (반도체), Deep learning (딥러닝), Image quality (영상품질), Scanning electron microscopy (전자주사현미경), Modulation transfer function (변조전달함수), Convolutional neural network (합성곱 신경망)

As the size of semiconductor devices gradually decreases, it is important to measure and analyze semiconductor devices, to improve the image quality of semiconductors. We use VDSR, one of the Super-Resolution methods to improve the quality of semiconductor devices' SEM images. VDSR is also a convolutional neural network that can be optimized with various parameters. In this study, a VDSR model for semiconductor devices' SEM images was optimized using parameters such as depth of layers and amount of training data. Meanwhile, the quantitative evaluation and the qualitative evaluation did not match at the low scale factor. To solve this problem, we proposed an MTF measurement method using the slanted edge for better quantitative evaluation. This method was verified by comparing the results with the PSNR and SSIM index results, which are known as quality indicators. Based on the results, it was confirmed that using the MTF value could be a better approach for the evaluation of SEM images of the semiconductor device than using PSNR and SSIM.

Manuscript received: December 31, 2022 / Revised: February 12, 2023 / Accepted: February 14, 2023

NOMENCLATURE

I_k = Intensity of Image
 σ_x = Standard Deviation of Pixels of Image
 μ_x = Mean of Pixels of Image

1. 서론

반도체 소자는 과거 무어의 법칙에 따라 주요 모듈의 크기가 지속적으로 작아졌으며, 최근에도 NAND, DRAM, Logic에서

여전히 스케일링이 이뤄지고 있다[1]. 반도체 소자의 모듈 구조가 점차 미세화 됨에 따라 반도체 제품 개발에 있어서 반도체 구조 분석 및 계측 기술은 더욱 중요해지고 있으며, 선명한 영상을 얻어내기 위해서 계측 설비의 성능 향상도 중요하지만, 영상처리방법을 이용해서 영상품질을 향상시키는 연구도 저비용으로 영상품질을 개선할 수 있기 때문에 꾸준히 연구되고 있다. 최근 정밀가공 등 다양한 분야에서 나노마이크로 스케일의 구조 분석 측정에 Scanning Electron Microscopy (SEM)이 이용되고 있다[2,3]. 특히 반도체 구조계측은 미세한 구조를 관찰하기 위해서 고분해능 전자 빔 기반의 계측이 활용되고 있다. 그러나 SEM은 주사방식의 관찰방식으로 인해 고분해능 모드에서는

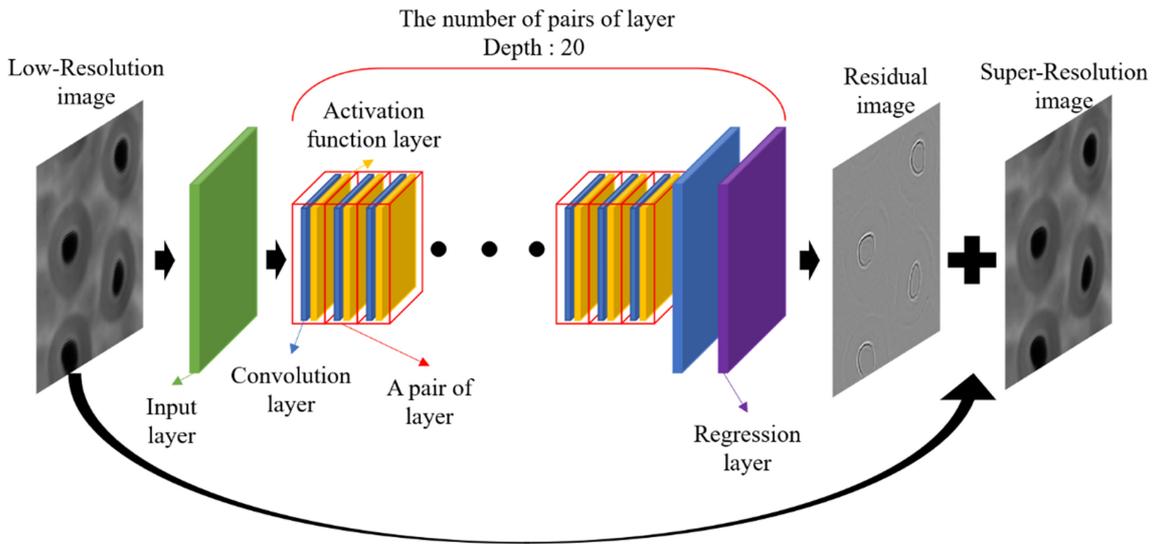


Fig. 1 A structure of VDSR model

영상 획득 속도가 느리다는 특징이 있다. 따라서 다양한 분야에서 소개되고 있는 딥러닝 기법을 반도체 구조 계측 영상처리에 활용하면 촬상 속도를 빠르게 함에도 불구하고 고분해능 영상 획득이 가능하여 반도체 구조계측 공정에 있어서 고생산성에 기여할 수 있다[4-8].

본 논문에서는 Convolutional Neural Network (CNN)에 기반한 Very Deep Super Resolution (VDSR) 알고리즘을 사용하여 반도체 소자 구조의 SEM 영상의 품질을 향상시키고 정량적으로 검증하였다. 반도체 소자 SEM 영상의 품질을 향상시키기 위해 VDSR의 매개 변수를 변경하여 다양한 신경망을 만들었고, 각 신경망에 반도체 소자 SEM 영상을 넣어 변경된 매개 변수에 따른 결과 영상의 품질을 나타내는 지표인 Peak Signal to Noise (PSNR)와 Structure Similarity Image Measurement (SSIM)를 이용하여 결과 영상의 품질을 비교 평가하였다. 그러나 영상 품질을 정량화 한 수치 결과와 육안으로 직접 확인한 영상 대비 결과가 다르게 나타나는 것을 확인하였고, 이를 극복하고자 영상의 품질을 대비(Contrast)를 기반으로 정량화 할 수 있는 Modulation Transfer Function (MTF)를 사용할 것을 제안한다.

2. CNN을 활용한 SISR

2.1 VDSR

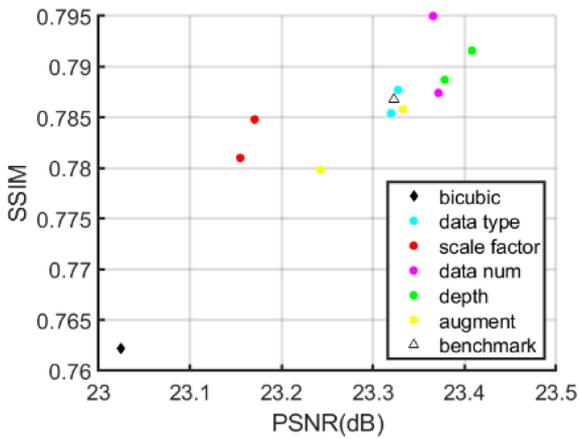
2015년에 CNN을 이용한 방법이 처음 소개되고 최근에 이르기까지 다양한 구조의 CNN을 활용한 Single Image Super Resolution (SISR)이 연구되었다[9]. 본 논문에서는 여러 CNN 기법들중에 VDSR 모델을 활용하여 SEM으로 촬상한 반도체 NAND Flash Memory의 주요 구조인 Channel Hole 영상 향상 연구를 진행하였다.

VDSR은 Fig. 1과 같은 구조를 띄고 있으며, 다른 CNN의 모델들과 달리 영상의 적합한 잔차 영상을 생성하여 입력 영상에 더해 선명한 영상을 얻는 방식으로 CNN 모델을 구축하였다. VDSR에서는 3×3의 크기인 필터 64개로 연산을 진행하는 합성곱 층과 활성화 함수층을 한 쌍으로 20개의 층을 이루고 마지막 합성곱층을 통해 잔차 영상을 출력하는 구조로 구성된다. 이러한 구조에서 처음 설정한 VDSR 모델에서는 층의 깊이는 20개의 층, 훈련 영상의 개수는 200개, 유형은 일반 사진의 유형으로 구성했다. 훈련 데이터 증강 방식은 Down-Sampling 2, 3, 4배 변화와 무작위 회전 및 대칭을 활용했다. 데이터 증강(Data Augmentation)을 진행하여 반도체 소자 SEM 구조 영상의 품질 향상을 위해 모델을 구축하였고, 다양한 매개 변수인 층의 깊이, 훈련 데이터 증강 방식, 훈련 영상 유형 및 훈련 영상 개수의 변화를 주어 반도체 소자 구조에 적합한 모델을 얻었다. 특히, 훈련 영상의 유형에서는 일반 영상과 SEM 영상을 조합하여 훈련 영상에 변화를 주었다. 매개 변수가 변경된 여러 VDSR 모델의 결과 영상을 정성평가를 하였고, PSNR과 SSIM을 이용하여 정량 평가를 진행했다[10,11].

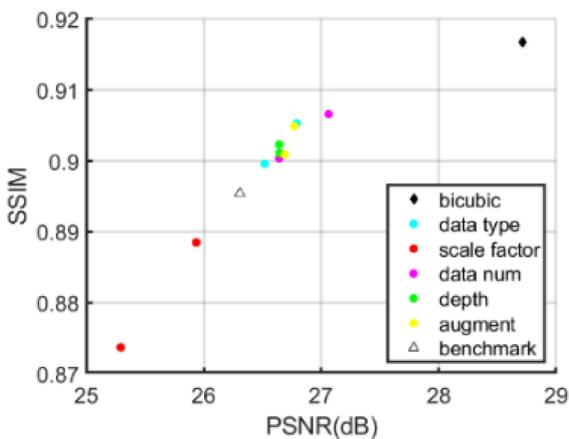
2.2 반도체 소자 구조 SEM 영상에서의 모델 평가

Fig. 2(a)에서 보면 4배의 Up-Sampling을 적용하여 초기 VDSR 결과에서 PSNR과 SSIM수치가 Bicubic 보간법보다 높은 값을 보였다. 정성평가에서 모두 동일한 픽셀의 수를 가졌음에도 Bicubic 보간법보다 VDSR로 향상한 영상이 구조 경계가 선명하게 보이는 것을 확인할 수 있었다. 정성평가와 정량평가가 일치하는 Up-Sampling 설정이므로 VDSR 매개 변수의 변화에 따른 반도체 소자 SEM 영상품질 향상 영향을 볼 수 있다.

여러 매개 변수 변화 모델 중 훈련모델 레이어 수와 훈련 영상의 개수에 변화를 준 모델에서 PSNR과 SSIM이 초기 설정한 VDSR 모델 결과보다 좋았다. 데이터 증강 방식과 훈련 영상



(a) Scale factor = 4



(b) Scale factor = 2

Fig. 2 Comparative results of high-resolution images and super-resolution images of models which parameters are changed in different ways such as data type, scale factor, layer depth, number of training data and data augmentation

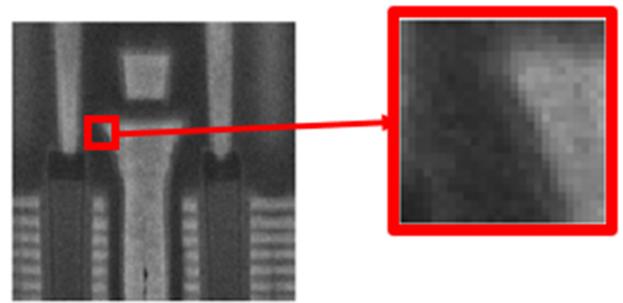
유형의 변화보다 훈련모델 레이어 수와 훈련 영상의 개수 변화가 반도체 소자 구조 SEM 영상에서 VDSR 모델의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인했다.

Fig. 2(b)에서와 2배 Up-Sampling을 적용한 경우 VDSR에서 진행한 결과 모두 Bicubic 보간법을 적용한 결과보다 정량적으로 좋지 못한 것을 알 수 있었다.

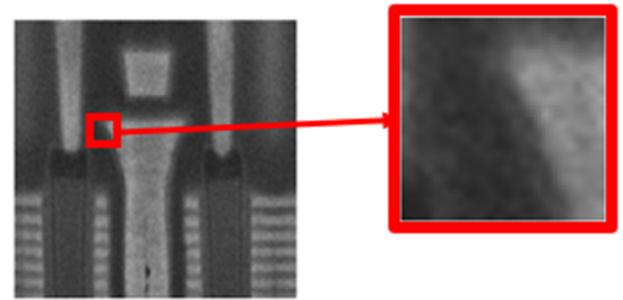
그러나 정량적 비교 수치와 달리 Fig. 3에서 영상의 결과를 확대하여 육안으로 비교해 보면 PSNR과 SSIM에서의 수치적 결과와 다르게 영상의 품질이 좋아진 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로 본 논문에서는 자주 사용되는 영상 성능 지표인 PSNR과 SSIM이 아닌 다른 수치를 적용하여 결과 영상의 정량 평가를 보완하려 한다

2.3 영상 성능 지표

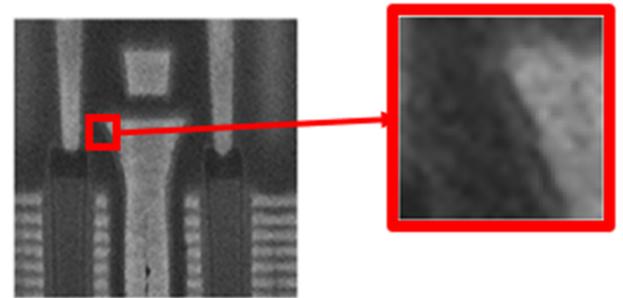
여러 SISR 기법에서 입력 영상과 출력 영상의 수치 비교를 위해 PSNR과 SSIM이 사용되었다. 본 연구도 VDSR의 반도체 소자 구조 영상에서의 결과 영상을 비교하는 과정에서 PSNR과



(a) Low resolution image



(b) Bicubic interpolation image



(c) VDSR image

Fig. 3 Low-resolution and image processed images (Scale factor = 2)

SSIM를 이용하였다.

PSNR은 영상처리에서는 화질에 대한 손실 정보를 평가하기 위해 쓰이고 참조 영상과 출력 영상을 넣어 참조 영상 대비 출력 영상의 품질을 나타낸다. 최대 신호 대 잡음비로 신호가 가질 수 있는 최대 값에 대한 잡음의 값이며, 값이 클수록 좋은 품질의 영상이고, 식(1)과 같이 수치를 구할 수 있다. MAX_I 는 영상에서의 최대값으로 255의 값을 가진다. Mean Square Error (MSE)는 평균 제곱 오차를 말하고 영상처리 분야에서 CNN의 손실 함수로 많이 사용되며 식(2)과 같다. M, N은 영상 화소의 높이와 너비를 의미한다.

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \tag{1}$$

$$MSE = \frac{\sum_{M,N} [I_1(x,y) - I_2(x,y)]^2}{M \cdot N} \tag{2}$$

SSIM은 구조적인 유사도 영상 측정수치로 2개 영상의 유사도를

휘도, 대비, 구조의 3가지 요소를 이용하며 다음 식(3)과 같다. SSIM의 결과값은 0-1 사이의 값이 나오며 1에 가까울수록 영상들이 유사함을 의미한다.

$$SSIM(x, y) = l(x, y) \cdot c(x, y) \cdot s(x, y) \tag{3}$$

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \tag{4}$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \tag{5}$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x + \sigma_y + C_3} \tag{6}$$

식(4)부터 식(6)은 SSIM을 이루는 휘도, 대비, 구조의 요소들을 나타낸 식이다. $l(x, y)$ 은 휘도비교함수로 영상의 픽셀값을 이용한다. C_1 은 식의 안정성을 위해 추가한 상수로 보통 6.5025를 이용한다. $c(x, y)$ 는 대비비교함수를 나타낸다. 대비는 표준편차를 이용하여 픽셀 간 값의 차이를 정량화할 수 있다. C_2 역시 식의 안정성을 위해 추가한 상수값으로 58.5225의 값을 가진다. $s(x, y)$ 은 영상 구조에 관한 식으로 픽셀값의 구조적인 차이점을 나타내기 위해 평균과 표준편차를 이용하여 정규화된 픽셀값의 분포에서 픽셀값을 다시 정의한다. C_3 은 $C_2/2$ 의 값을 가진다.

PSNR은 영상의 픽셀값을 기반으로 계산이 진행되기에 인간이 시각적으로 느끼는 품질 차이를 표현한 방법이 아니다. 이와 달리 SSIM은 수치적인 차이가 아닌 인간의 시각적 화질 차이를 평가하기 위해 고안된 방법이지만 참조 영상 대비 출력 영상에 대한 값을 나타내기 위해 두 영상의 유사도가 떨어지면 값이 작을 수 있다. PSNR과 SSIM은 여러 요소를 사용하여 값을 나타내지만 CNN을 이용한 SISR에서는 인간의 눈으로 하는 평가와 일치하지 않는 면이 있다[12]. 이를 극복하고자 Slanted Edge를 활용하여 MTF를 만들어 영상의 품질을 평가를 진행하였다.

3. 영상 향상 품질 평가를 위한 MTF 측정

3.1 Modulation Transfer Function

Modulation Transfer Function는 식(7)과 같이 정의되고 이는 신호의 최대 세기와 최소 세기를 이용하여 신호의 대비 값을 구하게 된다.

$$Modulation = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{7}$$

또한 MTF는 주로 광학에서 렌즈의 성능을 평가하는데 사용되는 매개변수로 공간 주파수를 이용하여 영상의 대비를 보여 주어 렌즈 능력을 측정한다[13]. MTF 그래프의 x축은 단위 픽셀당 몇 개의 선이 있는지를 표현하는 분해능에 관한 값이고, y축은 대비를 의미한다. 따라서 높은 분해능에서 대비가 좋을수록 영상의 품질이 좋다고 판단할 수 있다.

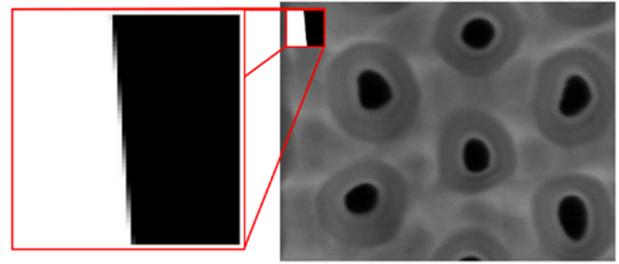


Fig. 4 A slanted edge image applied to the upper right corner of the NAND flash channel hole image

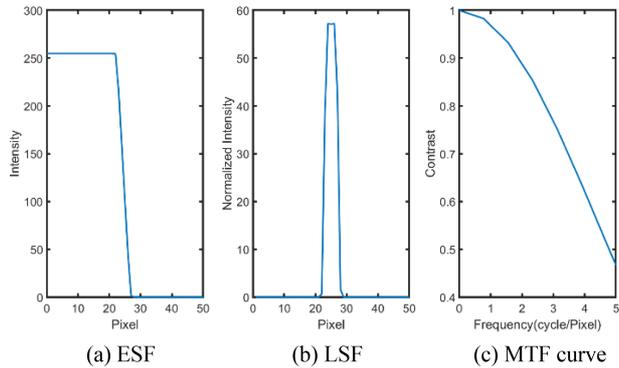


Fig. 5 MTF measurement process

3.2 Slanted Edge 기법

본 연구에서는 MTF를 VDSR과 같은 신경망의 능력을 측정하는데 이용한다. 반도체 소자 구조 SEM 영상의 MTF를 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 영상 부분에 직접 MATLAB으로 만든 Slanted Edge Image를 삽입하였다[14]. MTF 곡선은 초분해능을 통해 품질이 향상된 영상의 Slanted Edge를 통해서 구해 낸다.

Fig. 5은 MTF 곡선을 획득하는 과정을 순차적으로 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 Edge Spread Function (ESF)이며, Slanted Edge를 설정한 구역에서 픽셀 위치에 대한 각 행들의 평균을 나타낸 값이다. Edge가 기울어진 각도만큼 세기의 변화가 있다. 가로축은 해당 픽셀의 위치를 나타내며, 세로축은 픽셀의 값인 세기를 말한다. Fig. 5(b)는 Line Spread Function (LSF)이며, ESF의 값을 미분하여 나타낸 값이다. 가로축은 픽셀 영역을 나타내고, 세로축은 픽셀의 세기를 정규화하여 나타낸 값이다. 마지막 Fig. 5(c) MTF Curve의 가로축은 단위 픽셀안에 들어있는 패턴의 반복 횟수를 의미하는 공간주파수를 말한다. 픽셀 영역인 LSF를 공간주파수 영역으로 변환한 결과이며, Figs. 5(b)와 5(c) 사이에 푸리에 변환이 관계된 것을 알 수 있다[15]. LSF에서 Fast Fourier Transform을 진행하여 Fig. 5(c)와 같은 완전한 MTF 곡선을 산출했다.

MTF 곡선은 공간주파수에 대한 대비와 분해능을 나타내는 지표이지만 그래프이기에 PSNR 및 SSIM과의 성능 비교 평가를 위해 MTF 곡선의 y축 대비가 0.5일 때 공간주파수의 값으로 나타낸 수치인 MTF 50%를 이용한다.

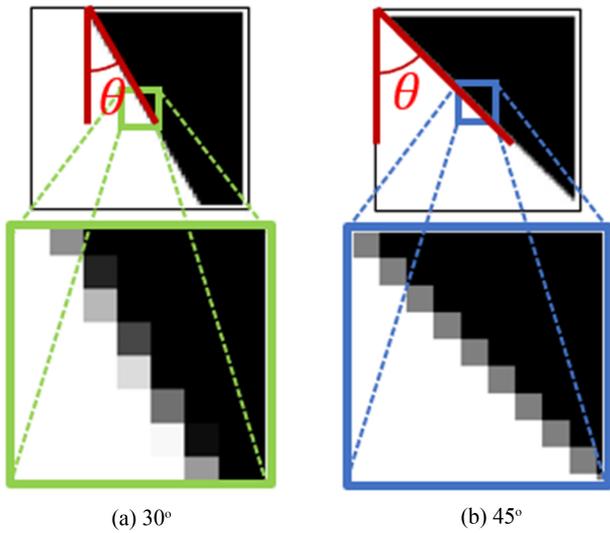


Fig. 6 Slanted edge images at 30° and 45°

3.3 Slanted Edge 각도 설정

Slanted Edge를 활용하기에 앞서 Edge가 이루는 각도에 따라 결과값이 달라지기 때문에 선행 연구에서 다양한 Slanted Edge 각도로 다양한 영상을 평가한 결과, 각도가 5°인 경우 MTF 수치화에서 우수한 평가를 받을 수 있었다[16,17]. 본 연구에서 15°보다 높은 각에서 픽셀 분포, ESF, LSF 및 MTF 곡선의 형태를 비교할 필요가 있었다. 30°와 45°의 기울기를 가진 Slanted Edge를 넣어 비교하였다.

Fig. 6에서 흑색 과 백색 픽셀의 기울기가 전보다 커지면서 Edge 구간에서 세로방향에 따라 각도가 클수록 적은 픽셀로 색 변화가 표현된다. 색 변화가 뚜렷한 형태를 띄면 SISR을 진행할 경우 개선되는 영역이 크지 않고 영상 향상 평가가 제대로 이뤄지지 않는다.

Fig. 7(a)는 각도가 점차 커지면서 세기의 변화 구간이 늘어나 ESF 변동 영역이 늘어나기 때문에 Fig. 7(b)에서 미분을 진행하면 정규화된 세기가 높은 픽셀 영역이 늘어난다. 각이 커질수록 높은 픽셀 영역은 늘어나 45°에서는 일정한 값을 갖게 된다. MTF 곡선인 Fig. 7(c)에서 MTF 10%를 비교했을 때, 30°는 공간주파수가 2인 반면 45°는 1 이하에서 값을 갖고 공간주파수의 영역이 점차 짧아진다. 이를 통해 검증된 각도인 5°를 유지하여 평가를 진행하였다.

4. 실험 및 검증

Fig. 8에서 Up-Sampling을 4배로 진행하였을 때 VDSR과 Bicubic 보간법, Lanczos 보간법에 따른 영상 처리 결과를 확인할 수 있다. 안정적인 결과로는 VDSR이 다른 보간법에 비해 Channel Hole 구조의 경계가 확연히 선명한 것을 알 수 있다. Table 1에서 VDSR의 PSNR 수치가 Bicubic 보간법과 Lanczos

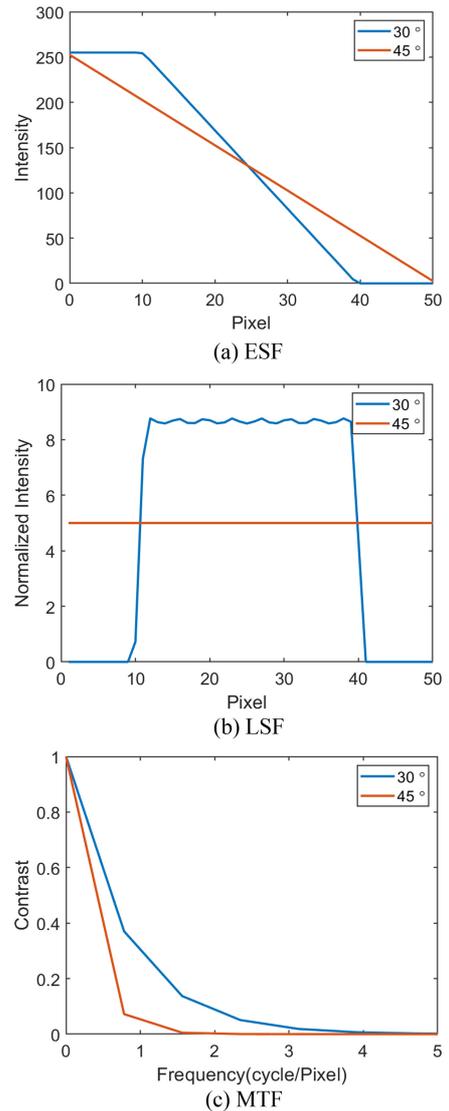


Fig. 7 Edge spread function, Line spread function and Modulation transfer function at 30° and 45°

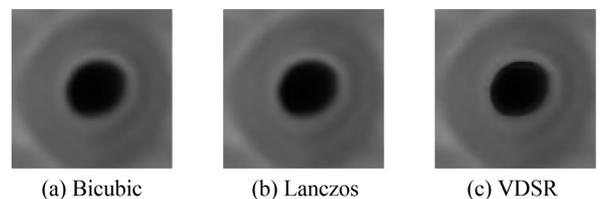


Fig. 8 Super-Resolution images using bicubic, Lanczos interpolation and VDSR (Scale factor = and 4)

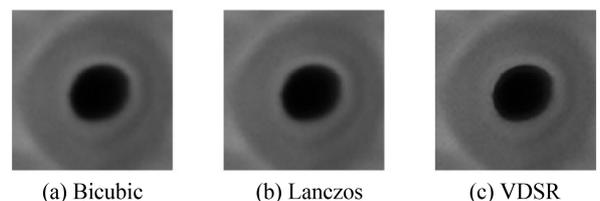
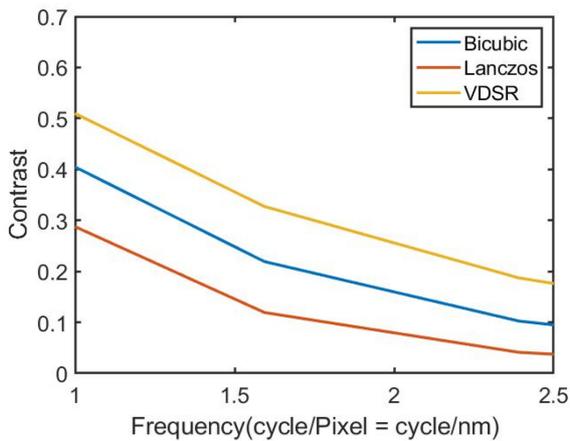


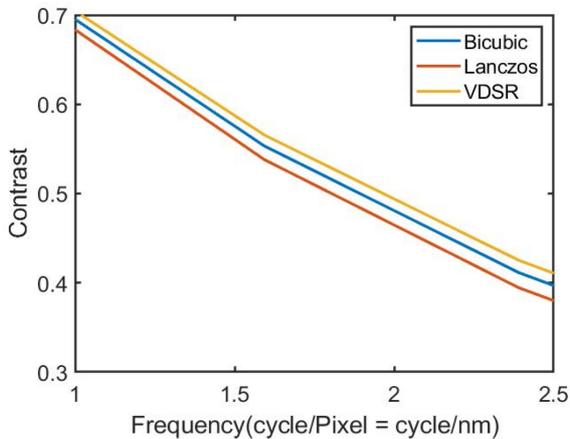
Fig. 9 Super-Resolution images using bicubic, Lanczos interpolation and VDSR (Scale factor = 1.5)

Table 1 A comparison of results measured image quality in Bicubic, Lanczos interpolation and VDSR

Scale factor		VDSR	Bicubic	Lanczos
4	PSNR [dB]	31.4212	30.5594	30.7945
	SSIM	0.9586	0.9557	0.9562
	MTF 50%	1.0456	0.7154	0.6086
1.5	PSNR [dB]	33.2131	33.9317	34.0116
	SSIM	0.9679	0.9774	0.9778
	MTF 50%	1.9773	1.9139	1.8042



(a) Scale factor = 4



(b) Scale factor = 1.5

Fig. 10 MTF curve at bicubic interpolation and VDSR (Scale factor = 4 and 1.5)

보간법의 수치보다 각각 0.8618, 0.6267 dB 높게 측정되고, SSIM은 0.0029, 0.0024 높게 측정된다. 이러한 결과들은 VDSR에서의 영상처리 결과가 다른 보간법보다 영상 품질이 높게 측정됨을 의미하고 육안으로 확인하는 정성평가와 PSNR 및 SSIM을 이용한 정량평가가 일치하는 모습을 보인다. 하지만 Table 1에서 Up-Sampling을 1.5배로 Sampling 계수를 낮게 설정하여 진행한 결과 PSNR과 SSIM를 이용한 영상 품질 평가 지표의 신뢰성은 낮아지는 것을 볼 수 있다. VDSR의 수치는 Bicubic과

Lanczos 보간법에 비해 PSNR은 0.7186, 0.7985 dB 낮게 측정되고, SSIM은 0.0095, 0.0099 낮게 측정되어 수치상으로는 VDSR의 영상 처리 결과가 다른 보간법들보다 영상 품질이 안 좋다는 것을 보여주지만 Fig. 9에서 Up-Sampling을 1.5배로 진행하였을 때 영상처리 결과들을 정성적으로 비교하였을 경우, VDSR이 다른 보간법에 비해 선명한 것을 알 수 있다.

Up-Sampling을 낮게 진행할 경우 PSNR과 SSIM을 이용한 영상 품질 평가는 정성평가와 일치하지 않는 것을 보여주기에 본 연구에서는 PSNR과 SSIM으로 영상 품질 평가를 하는 것이 아닌 MTF 곡선을 이용하여 영상 품질을 비교하는 것을 제안한다.

Slanted Edge를 이용하여 MTF 곡선을 측정할 경우 Fig. 10에서와 같이 나온다. PSNR과 SSIM을 MTF에서의 수치와 비교하기 위해 MTF 곡선에서 대비가 0.5일 때의 수치인 MTF 50%를 이용하여 Table 1에 나타내었다. Up-Sampling 4배를 진행한 경우 MTF 50%는 VDSR의 결과가 Bicubic과 Lanczos 보간법에 비해 0.3302, 0.6086 c/p (cycle/pixel) 높게 측정되었고, Up-Sampling 1.5배를 진행한 경우 0.0634, 0.1731 c/p 높게 측정된다. 공간주파수가 높을수록 해당 영상의 분해능이 작아 영상의 품질이 좋음을 의미하며 Up-Sampling의 변화에 상관없이 VDSR의 품질이 좋음을 나타낸다. 정성평가와 동일하게 VDSR의 MTF 50%가 높게 측정되어 영상 품질이 좋은 것을 보여줌으로써 MTF에서의 영상 품질 측정은 반도체 구조 SEM 영상에서 우수함을 확인했다.

5. 결론

반도체 구조 SEM 영상의 분해능 향상을 위해 VDSR 기법을 활용하여 합성곱 신경망의 여러 매개 변수들을 변경하며 적합 모델의 탐색을 수행하였다. 적합 모델 간의 비교분석을 위해 정량평가를 진행하였고 이 과정에서 PSNR과 SSIM이 사용되었다. 하지만 이러한 평가과정에서 육안으로 직접 판별하는 결과와 PSNR과 SSIM 결과의 불일치가 발생하였고, 이외에 신경망 모델에서 PSNR과 SSIM으로 진행한 정량평가가 육안으로 판별되는 정성평가와 일치하지 않는 경우도 있었다. 본 연구에선 낮은 배율의 Up-Sampling을 진행한 경우 정량평가와 정성평가가 일치하지 않는 점을 발견하여 PSNR과 SSIM을 사용한 영상품질 향상에 있어서 정량평가가 보완되어야 한다고 판단했다. 이를 위해 분해능별 영상의 대비를 나타내는 MTF 곡선을 도입하여 초분해능 영상에서의 영상품질 수치를 측정하는 것을 제안하였다. MTF 곡선을 측정하는 방법엔 여러 방법들이 존재하며 본 연구에선 이 중 Slanted Edge 영상을 활용하여 향상된 영상 품질을 수치화하였다. MTF 곡선을 만든 뒤 MTF 50%의 값을 이용하여 영상처리 알고리즘을 비교 평가했다. MTF 50%는 PSNR과 SSIM의 수치들과 비교하였을 때, Up-Sampling을 작게 진행해도 Bicubic 보간법보다 VDSR의 초분해능 결과가 정성 평가와 일치하는 것을 확인할 수 있었으며 Up-Sampling을 작게 진

행한 경우 동일하게 MTF 곡선이 차이가 나는 것을 확인함으로써 MTF 곡선이 PSNR 및 SSIM에서의 정량평가와 다르게 MTF 곡선을 이용한 정량평가는 영상품질 향상 평가의 지표로서 잘 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-004) 및 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 (Nos. 22-CM-EC-23, 22-CM-EC-35) 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Moore, G. E., (1998), Cramming more components onto integrated circuits, *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 82-85.
- Lee, H. J., Cho, Y. T., Kim, S., (2021), Unconventional additive manufacturing for multiscale ceramic structures, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(9), 639-650.
- Park, J. A., Lee, U. S., Kim, B. H., (2020), Micro pin fabrication of tungsten carbide using polycrystalline diamond, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(11), 791-796.
- Johnson, P. M., Recht, M. P., Knoll, F., (2020), Improving the speed of MRI with artificial intelligence, *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 12-20.
- Jung, J., Na, J., Park, H. K., Park, J. M., Kim, G., Lee, S., Kim, H. S., (2021), Super-resolving material microstructure image via deep learning for microstructure characterization and mechanical behavior analysis, *npj Computational Materials*, 7(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41524-021-00568-8>
- Tang, L., Liu, G., Xiao, G., Bavirisetti, D. P., Zhang, X., (2022), Infrared and visible image fusion based on guided hybrid model and generative adversarial network, *Infrared Physics and Technology*, 120, 103914.
- Yang, W., Zhang, X., Tian, Y., Wang, W., Xue, J.-H., Liao, Q., (2019), Deep learning for single image super-resolution: A brief review, *IEEE Transactions on Multimedia*, 21(12), 3106-3121.
- Kim, J., Lee, J. K., Lee, K. M., (2016), Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1646-1654.
- Dong, C., Loy, C. C., He, K., Tang, X., (2014), Learning a deep convolutional network for image super-resolution, *Proceedings of the Computer Vision-ECCV 2014*, 184-199.
- Liu, Y., Sun, Q., Lu, W., Wang, H., Sun, Y., Wang, Z., Lu, X., Zeng, K., (2019), General resolution enhancement method in atomic force microscopy using deep learning, *Advanced Theory and Simulations*, 2(2), 1800137.
- Hore, A., Ziou, D., (2010), Image quality metrics: PSNR vs. SSIM, *Proceedings of the 2010 International Conference on Pattern Recognition*, 2366-2369.
- Ledig, C., Theis, L., Huszár, F., Caballero, J., Cunningham, A., Acosta, A., Aitken, A., Tejani, A., Totz, J., Wang, Z., (2017), Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4681-4690.
- Lee, S., Lee, H., (2021), Developed an in-line system of measuring MTF for automating the assembly process of lens-module in a smartphone camera, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(5), 359-363.
- Vint, D., Di Caterina, G., Soraghan, J., Lamb, R., Humphreys, D., (2019), Evaluation of performance of VDSR super resolution on real and synthetic images, *Proceedings of the 2019 Sensor Signal Processing for Defence Conference (SSPD)*, 1-5.
- Zhang, X., Kashti, T., Kella, D., Frank, T., Shaked, D., Ulichney, R., Fischer, M., Allebach, J. P., (2012), Measuring the modulation transfer function of image capture devices: What do the numbers really mean?, *Image Quality and System Performance IX*, 64-74.
- Roland, J. K., (2015), A study of slanted-edge MTF stability and repeatability, *Image Quality and System Performance XII*, 181-189.
- Viallefont-Robinet, F., Helder, D., Fraisse, R., Newbury, A., van den Bergh, F., Lee, D., Saunier, S., (2018), Comparison of MTF measurements using edge method: Towards reference data set, *Optics Express*, 26(26), 33625-33648.

**Chan Ki Kim**

B.S. Student in Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University. His research interest is image processing of semiconductor devices.

E-mail: rlackr178@gmail.com

**Eung Chang Lee**

Principle Engineer in Memory business at Samsung Electronics. His research interests include advanced semiconductor package technology and thermal analysis of semiconductor devices.

E-mail: echang.lee@samsung.com

**Joong Bae Kim**

Assistant Professor in Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. His research interests are thermal management systems for electronic devices.

E-mail: joongbae.kim@kongju.ac.kr

**Jinsung Rho**

Assistant Professor in Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University. His research interests include metrology technology of semiconductor devices and imaging processing.

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

짐 운반능력을 향상시키기 위한 수동 상지 외골격장치(H-Frame) 개발

Development of Passive Upper Limb Exoskeleton Device (H-Frame) for Augment the Load Carrying Capability of the Human

정동현^{1,#}, 강도연¹, 이지석¹
Dong-Hyun Jeong^{1,#}, Do Yeon Kang¹, and Ji Seck Lee¹

¹ 현대로템 로봇개발팀 (Robot Development Team, Hyundai Rotem)
Corresponding Author / E-mail: donghei@hyundai-rotem.co.kr, TEL: +82-31-596-9660
ORCID: 0000-0003-3988-4723

KEYWORDS: Exoskeleton device (외골격 장치), Passive upper limb (수동식 상지), Metabolic (호흡가스분석), Electromyography (근전도), Compression force sensor (압박력 센서), Load cell (로드셀)

Carrying heavy objects in agricultural and industrial sites is the most basic labor, which requires a lot of energy. Many equipment such as crane, chain block, elevator, and forklift truck has been developed to reduce human power. Nevertheless, many tasks require human labor. In addition, rapid aging is increasing musculoskeletal diseases in industrial workers. Consequently, various muscle auxiliary wear robots and devices are being developed. In this study; a passive upper limbs exoskeleton (H-Frame) was developed to help carry over 20 kg of weight in industrial and agricultural sites. For the functional test of the developed H-Frame, tests were carried out for 20, 30, and 40 kg of each box. To measure the objective and numerical data of the H-Frame, various sensor values such as EMG (Electromyography), harness compression force sensor, and load cell value of side support and rope were measured. EMG and metabolic experiments were also performed on 8 subjects before and after wearing the device. The average value of the upper extremity muscle showed a 44% reduction effect after wearing. The device helped the wearer when carrying heavy objects. It could help prevent musculoskeletal diseases in industrial and agricultural fields.

Manuscript received: September 26, 2022 / Revised: December 2, 2022 / Accepted: December 16, 2022

1. 서론

농업 및 산업현장에서 무거운 물건을 들고 운반하는 작업은 가장 기본적인 노동으로 많은 인력이 필요로 한다. 이러한 인력소모를 줄이기 위해 거중기, 승강기, 지게차와 같은 많은 장비들이 개발되었다. 그럼에도 불구하고 아직 중장비 도입이 어려운 환경에서는 사람이 직접 운반해야 하는 작업들이 많다. 그리고 급속도로 진행되는 고령화로 인해 산업현장 노동자들의 근골격계 질환이 증가하고 있다[1]. 근골격계 질환을 예방하기 위하여 다양한 근력보조 착용로봇 및 장치들이 많이 개발되고 있다.

하반신형 외골격 착용로봇으로 UC Berkeley 대학에서 개발된 Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) [2]는 유압식

착용로봇으로 착용자가 34 kg의 무게를 등에 매고 약 1.3 m/s의 속도로 보행이 가능하다. 하지만 동력원으로 유압파워팩이 필요하다. 현대자동차그룹에서 개발된 Human Universal Mobility Assist (HUMA) [3]는 전기식 착용로봇으로 다중링크 구조의 생물학적 무릎관절 설계를 통하여 20 kg의 무게를 매고 약 2.7 m/s의 속도로 달리기 가능하다. 대우조선해양에서 개발된 Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Hydraulic Wearable Robot (DSME HWR) [4]은 무릎관절에 유압실린더와 스프링구조를 이용하여 무릎각도 0-120° 구간에서 중량물 35 kg을 들어 올릴 수 있다. 유압식이지만 배터리를 이용하여 독립적 구동이 가능하다. 현대로템에서 개발된 Human Universal Mobility Assist-Hybrid (HUMA-H) [5]는 무릎관절에 큰 힘을 낼 수 있도록 단동 다단실린더를 적용하여 무릎관절의 전회전구간에서 높은

토크를 가지도록 설계하였고, 허리관절에는 전기모터 구동기를 사용하여 앞뒤 방향에 대한 균형을 잡을 수 있도록 설계 제작하였다. 전기 및 유압 동력원을 복합적으로 사용하여 20 kg의 무게를 매고 1.1 m/s의 속도로 보행이 가능하다. 하지형 착용로봇의 경우 대부분 짐을 등에 매고 운반하는 형태로 시스템이 매우 복잡하며 착용자의 보행의도파악의 문제시 전도의 큰 위험성을 가진다. 당장 산업현장에 사용하기에는 많은 비용과 개선점들이 필요하다.

상반신형 외골격 장치로 Ekso-BIONICS에서 개발된 EksoVest [6]는 수동식 상체 외골격으로 스택 링크 구조는 전체동작범위에서 사용자의 팔과 팔꿈치를 매끄럽게 따라가며 반복적인 움직임에 불편함이 없고 가스스프링으로 오버헤드에서 사용자가 짊어진 하중을 부분적으로 지지함으로 작업자의 부하와 피로도를 줄여준다. 오버헤드 작업을 시뮬레이션 하여 EksoVest의 성능을 평가한 결과 오버헤드 드릴링 작업 중 척추 하중이 약 30% 정도 줄어든 결과를 얻었다[7]. Levitate Technologies에서 개발된 AIRFRAME [8]은 스프링력을 이용하여 팔의 무게를 어깨, 목, 등 상부에서 엉덩이 바깥쪽으로 전달하여 에너지를 고르게 분산시켜 근육 스트레스를 줄인다[9]. COMAU에서 개발된 MATE-XT [10] 또한 스프링력을 이용한 상지 지지 착용로봇으로 Proto-MATE를 사용하면 상지 근육의 근전도(Electromyography, EMG)를 최대 43%까지 줄일 수 있다[11]. Ottobock에서 개발된 Paexo Shoulder [12]는 2 kg 미만의 가벼운 무게와 생체역학적 디자인으로 모든 상황에서 움직임의 완전한 자유와 빠른 착용 및 탈의를 보장하며 어깨 근육과 관절에 가해지는 스트레스를 40% 이상 줄여준다[13]. 이와 같은 상체형 외골격 장치는 팔의 무게를 받쳐 줌으로 어깨의 부하를 줄여 주는 효과가 있다. 전기구동기 없는 스프링과 같은 탄성체를 이용한 수동식 장치로 이루어져 상용화가 되어 산업현장에 적용되어지고 있다. 하지만 20 kg 이상의 무거운 중량물을 들고 운반하는 작업에는 큰 도움을 줄 수 없다.

수동식 허리보조 외골격 장치로 Laevo-Exoskeletons에서 개발된 Laevo [14]는 가슴, 허리, 허벅지 3지점에 체결이 되며 허리를 구부리는 동안 탄성 빔과 스프링 하중 조인트로 인해 가슴과 다리에 저항이 가해져 등 근육 모멘트와 평행한 모멘트를 생성한다. 장치 착용 전과 후를 비교하여 등 근육 활동의 상당한 감소(11-57%)가 되었다[15]. SuitX에서 개발된 backX [16]는 보행 시에는 작동하지 않아 저항이 없고 착용자가 허리 굽힘 동작에서만 가스 스프링이 압축되어 적절한 양의 지지 토크가 발생된다. 앞으로 구부리는 자세를 유지한 남성과 여성 대상에서 척추근의 평균 근육 활동이 장치 착용 전과 후 각각 75% 및 56% 감소하였다[17]. 탄성체를 적용하여 기구적으로 허리 굽힘 동작에서 도움을 줄 수 있는 수동식 허리보조장치이다. 하지만 상체의 무게를 지지 해줄 수 있는 정도의 지지력이며 산업안전보건공단에서 지양하는 허리 굽혀 들기(Stooped Lift) 자세에서의 지원 장치라 볼 수 있다. 산업안전보건공단에서는 다리근육이 허리근육보다 강하기 때문에 쪼그려 앉아 들기(Squat Lift)

자세를 취할 경우 허리근력 부하가 감소되어 부상을 예방할 수 있다[18].

본 논문에서는 무거운 중량물을 들고 운반하는 작업에 도움을 줄 수 있는 수동형 상지 외골격장치(H-Frame)를 개발하였다. Fig. 1과 같이 상체에 착용하는 형태로 기능실험과 효과실험을 통하여 본 개발품의 성능을 평가하였다. 기능실험으로는 착용자의 상지 근육의 근전도 비교와 압박센서를 활용한 착용압박감을 측정 비교하였다. 그리고 효과실험으로 호흡가스분석 실험을 통해 정량적 성능검증을 실시하였다.

2. 수동형 상지 외골격장치 설계 및 기능실험

2.1 수동형 상지 외골격장치(H-Frame) 설계

산업현장에서 20 kg 중량물을 들고 운반하는 작업에 도움을 줄 수 있는 수동형 상지 외골격장치를 개발하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발된 H-Frame의 주요 구성 품을 보여 준다. 장치의 전체 크기는 너비 350 mm, 높이 700 mm, 깊이 260 mm로, 사람이 착용했을 때 어깨, 허리 그리고 허벅지 벨트로 체결이 된다. 프레임은 경량화를 위해 알루미늄으로 제작하였으며 J바와 측면 지지대로 구성되어 있다. 어깨와 허리는 QR 레버를 이용하여 손쉽게 착용자의 신체에 맞게 길이조절 가능하도록 하다. 전체 무게는 그리퍼 포함하여 약 2 kg이며 로프를 이용하여 로프의 길이조절 가능하다. 작업 대상물에 따라 적합한 그리퍼로 교체 가능하다.

Fig. 2는 H-Frame의 착용 모습을 보여준다. 착용자의 신체에 맞게 J바의 높이를 조절하여 착용한다. 어깨로부터 5-10 cm 이상이 적당하다. 그리고 로프의 길이는 로프를 이용하여 양팔을 폈을 때 보다 로프의 길이를 짧게 줄여 조절한다. 로프는 하나로 연결되어 한 팔을 접게 되면 다른 한 팔은 자유롭게 움직일 수 있다.

2.2 수동형 상지 외골격장치 작동 원리

현실적으로 무거운 물건을 들기 위한 자세로는 허리와 무릎을 굽혀 물건을 잡고 들어 올리게 된다. Fig. 3과 같이 장치를 입지 않고 물건을 들게 되면 중량물의 무게는 상지 힘(F_A)을 통해 몸으로 전달되어 허리 회전력(T_W)과 다리 힘(F_L)으로 들게 된다. 장치를 착용하고 물건을 들게 되면 중량물의 무게는 상지 힘(F_A)과 로프의 장력(F_R)으로 분산되며 로프로 전달된 무게는 프레임을 통해 측면지지대(F_B)와 어깨(F_S), 허리(F_W) 하네스로 힘이 분산된다. 따라서 장치를 착용하게 되면 상지의 힘이 보다 적게 사용된다.

● 중량물 무게(Without H-Frame) = 상지 힘(F_A) + 허리 회전력(T_W) + 다리 힘(F_L)

● 중량물 무게(With H-Frame) = 상지 힘(F_A) + 로프 장력(F_R) + 측면지지대힘(F_B) + 어깨 압박력(F_S) + 허리 압박력(F_W) + 허리 회전력(T_W) + 다리 힘(F_L)



Fig. 1 Elements of the H-Frame



Fig. 2 How to wear the H-Frame

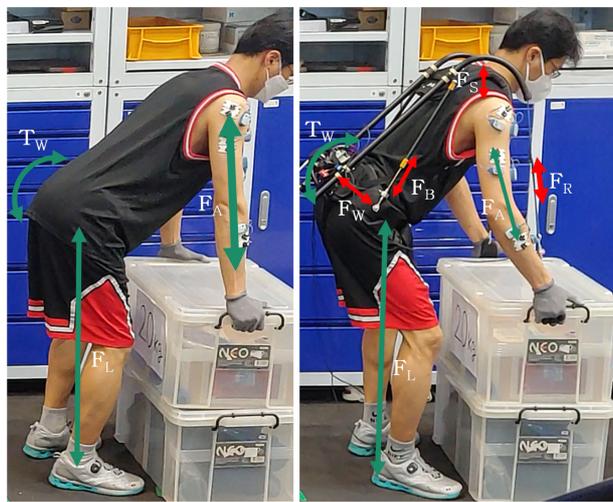


Fig. 3 Comparison of forces acting on the H-Frame

2.3 수동형 상지 외골격장치 기능실험

사람이 착용을 하는 외골격 장치의 경우 착용자의 장치 사용 숙련도에 따라 결과에 큰 영향을 끼친다. 본 기능실험에서는 장치의 이해도가 높고, 3개월 이내 근골격계 질환 없는 건강한 성인 남성 피험자(나이: 39세, 체중: 67 kg, 키: 175 cm)가 실험에 참가하였다. 정량적 측정을 위해 근전도센서, 압박력센서, 인슐 센서, 로드셀을 Fig. 4와 같이 장착하였다. 오른쪽 상지와 허리에 근전도를 측정하기 위해 센서를 붙이고 어깨와 허리 하네스의 압박력을 측정하기 위해 압박센서를 장착하였다. 그리고 로프의

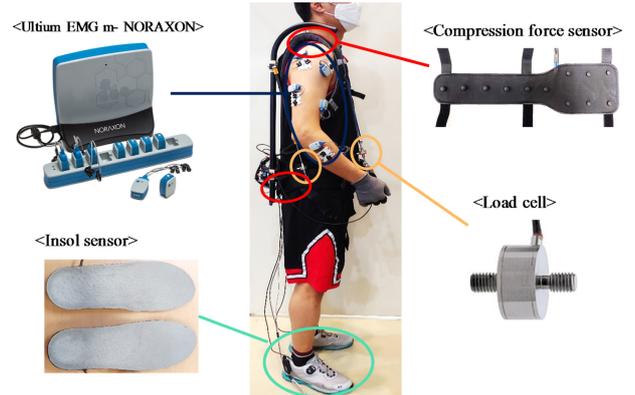


Fig. 4 Measuring devices for functional experiment



(a) Experimental setup



(b) Without H-Frame (c) With H-Frame

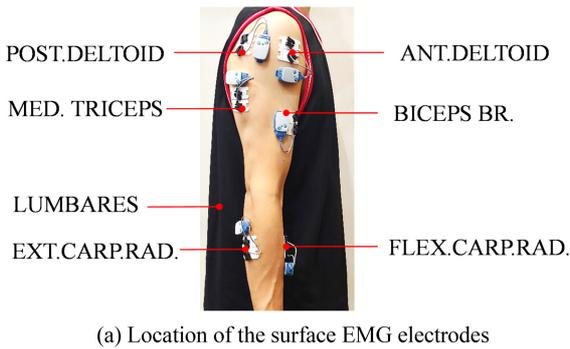
Fig. 5 Functional experiment of the H-Frame

장력과 측면지지대의 힘을 측정하기 위해 로드셀을 장착하였다. 끝으로 착용자의 보행을 파악하기 위해 인슐센서를 삽입하여 측정하였다. 기능실험으로 물건운반 동작실험을 수행하였다. Fig. 5(a)와 같이 지면으로부터 300 mm 높이의 상자(400 × 600 × 300 mm)를 들고 3 m 이동 후 내려놓기 동작으로 4회 반복 측정하였다. 그리고 상자의 무게를 20, 30, 40 kg에 대해서 각각 장치를 착용 전과 후에 대해서 반복 실험 측정하였다. Fig. 5(b)는 장치를 착용하지 않고 중량물을 옮기는 실험이고 Fig. 5(c)는 장치를 착용하고 중량물을 옮기는 실험을 수행하였다.

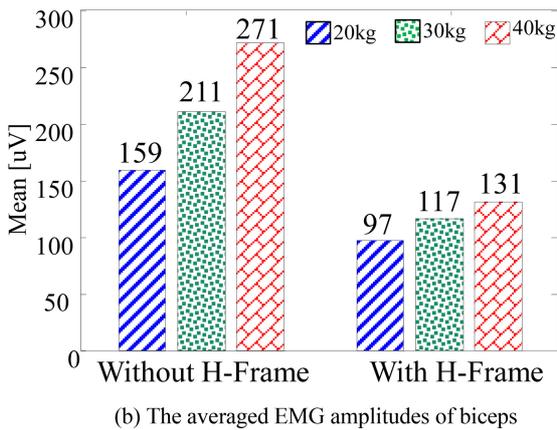
2.4 수동형 상지 외골격장치 기능실험 결과

기능실험결과와 표면 근전도 측정값, 로프와 측면 지지대의 로드셀 측정값, 어깨와 허리 하네스 압박력 측정값에 대하여 각각 분석한다.

먼저 근활도를 측정하기 위해 NORAXON 사 Ultium EMGm 을 Fig. 6(a)와 같이 오른쪽 상지와 허리에 위치하는 수근굴근, 수근신근, 상완이두근, 상완삼두근, 전면삼각근, 후면삼각근, 요추근 7곳의 표면 근전도를 측정하였다. 샘플링 속도: 2,000 samples/s, 대역 필터: 20-400 Hz이다. 상자의 무게가 증가함에



(a) Location of the surface EMG electrodes



(b) The averaged EMG amplitudes of biceps

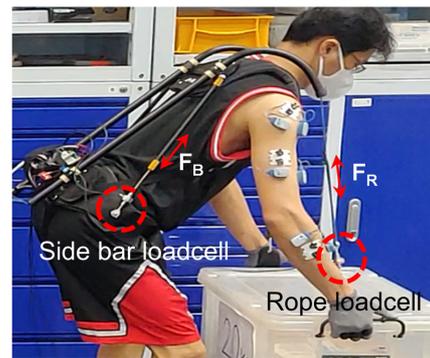
Fig. 6 Results of EMG measurement experiments

근전도 값이 증가하였으며 H-Frame 장치를 착용 시 높은 감소를 확인할 수 있다. 전체 근전도 평균 값이 20 kg 운반 시 37%, 30 kg 운반 시 32%, 40 kg 운반 시 41% 장치를 착용 시 감소효과를 보였다. 특히, 중량물을 들 때 가장 큰 힘이 필요한 상완이두근의 경우 Fig. 6(b)와 같은 결과를 얻었으며 20 kg 운반 시 39%, 30 kg 운반 시 45%, 40 kg 운반 시 52% 장치를 착용 시 근전도 감소효과를 보였다. 상자의 무게가 증가함에 감소효과가 더욱 증가함을 볼 수 있다.

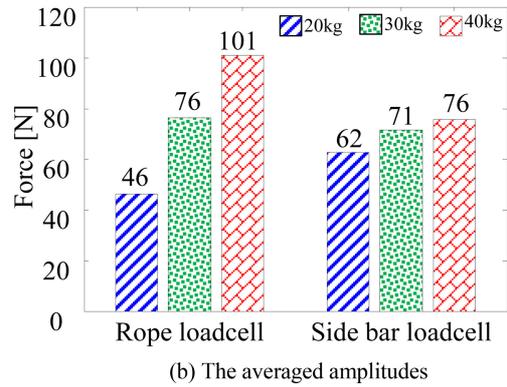
또한 로프와 측면지지대에 작용하는 힘을 측정하기 위해 BONGSHIN 사 CDFSFA 소형 로드셀을 Fig. 7(a)와 같이 로프와 그리퍼 사이와 측면지지대 연결부에 각각 장착하였다. 측정된 결과 상자를 들기 위해 허리를 굽히고 펴는 동작에서 측면지지대의 힘이 많이 걸리고 허리를 펴게 되면 로프에 장력이 걸리게 된다.

기능실험으로 측정된 값의 평균값으로 정리하면 Fig. 7(b)와 같이 상자의 무게 증가에 따라 로드셀에 걸리는 힘이 증가함을 알 수 있다. 특히, 로프에 걸리는 장력은 상자 무게에 따라 20 kg 운반 시 46%, 30 kg 운반 시 51%, 40 kg 운반 시 50%의 감소효과를 보였다. 근전도와 유사하게 상당한 감소효과를 확인할 수 있다.

외골격 장치는 사람 몸에 직접 착용함으로써 인체와의 작용점의 영향이 매우 중요하다. 이를 정량적 비교를 위해 체결 하네스와 착용자 간의 압박력을 측정 가능한 측정장치를 개발하였다. Fig. 8(a)와 같은 형상의 압박력 센서 한 개에는 12개의 FSR



(a) Location of the sensor



(b) The averaged amplitudes

Fig. 7 Results of loadcell measurement experiments

(Force Sensing Resistor)이 일정한 간격으로 배치되어 있으며 각 6개의 센서로 구역을 구분하였다. Fig. 8(b)와 같이 어깨와 허리 하네스에 장착하였다. 어깨에 위치한 센서 S-1은 장치로부터 사람에게 수직으로 누르는 힘을 측정하고 등에 위치하는 센서 S-2는 장치로부터 착용자의 등을 미는 힘을 측정한다. 허리에 위치하는 센서 W-1과 W-2는 측면지지대와 엉덩이로부터 받는 힘을 측정한다. 실험 절차에 따라 20, 30, 40 kg에 대해 각각 측정 결과 Fig. 8(c)와 같이 평균전압으로 나타낼 수 있다. 상자의 무게가 증가함에 따라 압박력이 증가함을 알 수 있다. 측정된 결과 값을 힘의 값으로 변환하는 것은 어려움으로 무게 변화에 따른 상대적 값으로 차이를 비교한다.

3. 수동형 상지 외골격장치 효과실험

3.1 효과실험 방법

수동형 상지 외골격장치의 효과검증을 위하여, 3개월 이내 근골격계 질환 없는 8명의 건강한 성인 남성 피험자(나이: 38.9±3.3세, 체중: 68.4±7.2 kg, 키: 172.5±4.3 cm)가 실험에 참가하였다. 객관적 검증실험을 위해 실험 전 간단한 사용법만 안내되었고 사전연습은 실시하지 않았다. 효과검증실험을 위해 다음과 같이 프로토콜을 선정하였다. 첫째, 긴장완화를 위해 제자리 선 자세로 2분간 대기한다. 둘째, 준비운동으로 제자리걸음 3분을 실시한다. 셋째, 0.3 m 높이의 20 kg 상자를 들고 3 m 이동 후



(a) Compression force sensor (b) Location of the sensor

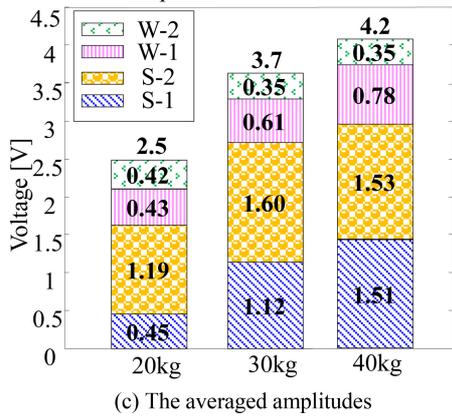
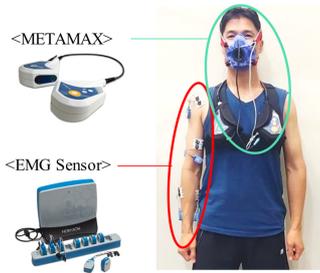


Fig. 8 Results of compression force measurement experiments



(a) Measuring devices for effect experiment



(b) Without H-Frame (c) With H-Frame

Fig. 9 Effect experiment of the H-Frame with 20 kg payload

내려 놓기를 30회 반복한다(소요 시간 약 8분). 넷째, 다시 제자리걸음 3분을 한다. 마지막으로 제자리 선 자세로 1분 유지하였다. 이와 같은 프로토콜로 H-Frame 장치를 착용했을 때와 착용하지 않았을 때의 근전도와 호흡가스분석기를 측정하였다. Fig. 9(a)는 측정장치 장착 모습을 보여준다. 각 실험 간 1시간이

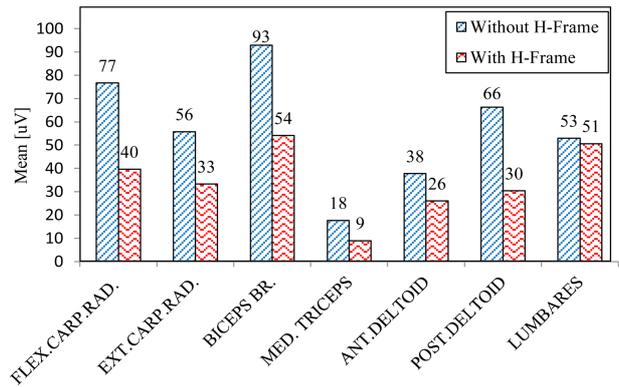


Fig. 10 Results of EMG measurement experiments with and without the H-Frame

상의 충분한 휴식 시간을 보장하였다. 그리고 장치의 착용 순서 조건의 효과를 제거하기 위해 피험자 4명은 먼저 착용하지 않고 실험을 수행하고 나머지 4명은 먼저 착용하고 실험을 수행하였다. Figs. 9(b)는 착용하지 않은 모습이고 9(c)는 착용했을 때의 실험동작 모습을 보여준다.

3.2 근전도 실험 결과

근전도 측정장치는 기능실험의 Fig. 6(a)와 같이 동일하게 7 곳의 표면 근전도를 장착하여 피험자 8명의 데이터를 수집 및 분석하였다. Fig. 10과 같이 H-Frame 착용 전과 후의 근전도 평균값을 비교하였다. 그 결과 수근굴근 48%, 수근신근 40%, 상완이두근 41%, 상완삼두근 49%, 전면삼각근 31%, 후면삼각근 54%, 요추근 4% 감소효과를 가졌으며, 측정된 전체 근전도에 대해서 평균 38% 근전도 감소효과가 있었다. 요추근을 제외한 상지근에 대해서는 44%의 감소효과를 보였다. H-Frame 착용으로 상지근에 확실한 도움이 됨을 알 수 있다. 실험 후 피험자들의 인터뷰에서도 허리의 큰 도움보다는 상지 근육에 확실한 도움을 느낀다고 말하였다.

3.3 호흡가스분석 실험 결과

에너지 소비량 비교를 위해 호흡가스분석기(Meta Max 3B, CORTEX, Germany)를 사용하여 측정하였다. 실시간으로 데이터를 수집, 분석할 수 있는 Meta Max 3B 호흡가스 분석기는 호흡상의 산소(O₂)와 이산화탄소(CO₂)의 농도를 측정할 수 있는 감지기가 있다. 이를 컴퓨터와 연결시켜 안정 시와 운동 시 호흡순환기능의 변인들을 혼합 챔버(Mixing Chamber)인 호기가스 추출법으로 호기마다 측정할 수 있고, 자동분석 프로그램(Meta Soft)으로 산소소비량(Oxygen Consumption, VO₂), 호흡교환율(Res Piratory Exchange Ratio, RER), 심박수(Heart Rate, HR) 등을 산출할 수 있다[19]. 그 결과 Fig. 11과 같이 에너지 소비량을 비교할 수 있다. 피험자1: 5%, 피험자 2: 15%, 피험자 3: 10%, 피험자 4: 9%, 피험자 5: 10%, 피험자 6: 15%, 피험자 7: 19%, 피험자 8: 6%의 감소효과를 보였다. H-Frame 착용한 경우 착용하지 않은 경우보다 평균 에너지 소비량 11% 감소

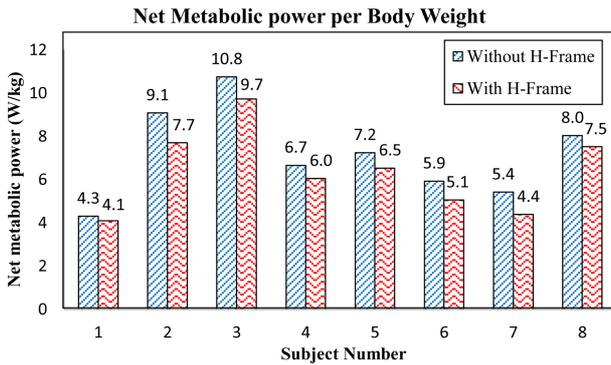


Fig. 11 Results of Gas analyzer measurement experiments with and without the H-Frame

효과를 보였다. 참고로 Harvard Biodesign Lab의 Soft Exosuits는 34.6 kg 부하를 가지고 걷는 동안 동력이 없는 상태와 동력을 사용한 경우 비교했을 때 평균 6.4%의 에너지 소비량 감소를 보여주었다[20].

4. 결론

본 연구에서는 산업 및 농업현장의 20 kg 이상 중량물을 들고 운반하는 작업에 도움을 줄 수 있는 수동형 상지 외골격장치를 개발하였다.

개발된 H-Frame의 기능실험을 위해 상자 20, 30, 40 kg에 대해 들고 운반하는 실험을 수행하였다. 수동식 장치이므로 객관적이고 정량적인 데이터 측정을 위하여 표면 근전도 센서, 하네스 압박력 센서, 로프와 측면지지대의 로드셀 값을 측정하여 분석하였다. 상자 무게 증가에 따라 측정값이 비례적으로 증가함으로 장치 기능의 이상 없음을 입증하였다.

또한 장치의 효과실험을 위해 8명 피험자를 대상으로 장치 착용 전과 후의 근전도와 호흡가스분석 실험을 수행하였다. 근전도 실험결과 상지근 전체의 평균값이 착용 후 근전도 44% 감소 효과를 보였으며 호흡가스분석 실험 결과 착용 후 평균 에너지 소비량 11% 감소 효과를 보였다. 이를 통하여 중량물 운반 시 착용자에게 도움이 되고 있음을 정량적으로 볼 수 있다. 끝으로 중량물 운반에 H-Frame을 착용함으로 산업 및 농업현장의 근골격계 질환 예방에 큰 도움을 줄 수 있기를 기대한다.

REFERENCES

1. Yang, Y., (2010), The responding strategies of musculoskeletal disease in aging society, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 29(4), 505-511.
2. Steger, R., Kim, S. H., Kazerooni, H., (2006), Control scheme and networked control architecture for the Berkeley lower

extremity exoskeleton (BLEEX), *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3469-3476.

3. Hyun, D. J., Park, H., Ha, T., Park, S., Jung, K., (2017), Biomechanical design of an agile, electricity-powered lower-limb exoskeleton for weight-bearing assistance, *Robotics and Autonomous Systems*, 95, 181-195.
4. Choo, J., Park, J. H., (2017), Increasing payload capacity of wearable robots employing linear actuators and elastic mechanism, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18, 661-671.
5. Jeong, D. H., Kang, D. Y., Lee, J. S., (2020), Development of lower-limb wearable robot with single acting hydraulic telescopic cylinder electro hydrostatic actuator (SAT-EHA) for handling of heavy loads, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(8), 579-585.
6. EksoBIONICS, EksoVest. <https://eksobionics.com/>
7. Kim, S., Nussbaum, M. A., Esfahani, M. I. M., Alemi, M. M., Jia, B., Rashedi, E., (2018), Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II-“Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading, *Applied Ergonomics*, 70, 323-330.
8. Levitate technologies, Inc., AIRFRAME. <https://www.levitatetech.com/airframe/>
9. Gillette, J. C., Stephenson, M. L., (2019), Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks, *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 302-310.
10. MATE-XT. <https://mate.comau.com/>
11. Pacifico, I., Scano, A., Guanziroli, E., Moise, M., Morelli, L., Chiavenna, A., Romo, D., Spada, S., Colombina, G., Molteni, F., (2020), An experimental evaluation of the proto-mate: A novel ergonomic upper-limb exoskeleton to reduce workers' physical strain, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 27(1), 54-65.
12. Ottobock, Paexo Shoulder. <https://paexo.com/>
13. Maurice, P., Čamernik, J., Gorjan, D., Schirmeister, B., Bornmann, J., Tagliapietra, L., Latella, C., Pucci, D., Fritzsche, L., Ivaldi, S., (2019), Objective and subjective effects of a passive exoskeleton on overhead work, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(1), 152-164.
14. Laevo. <https://www.laevo-exoskeletons.com/>
15. Koopman, A. S., Kingma, I., Faber, G. S., de Looze, M. P., van Dieën, J. H., (2019), Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks, *Journal of Biomechanics*, 83, 97-103.
16. ottobock, Backx. <https://www.suitx.com/backx>
17. Kazerooni, H., Tung, W., Pillai, M., (2019), Evaluation of trunk-supporting exoskeleton, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1080-1083. <https://>

journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1071181319631261

18. Korea Occupational Safety and Health Agency, Proper handling of goods. https://kosha.or.kr/kosha/data/musculoskeletalPreventionData_G.do?mode=download&articleNo=296617&attachNo=167197
19. Cortex, MetaMax 3B. <https://cortex-medical.com/DE/METAMAX-3B.htm>
20. Asbeck, A. T., De Rossi, S. M., Holt, K. G., Walsh, C. J., (2015), A biologically inspired soft exosuit for walking assistance, The International Journal of Robotics Research, 34(6), 744-762.



Dong-Hyun Jeong

Senior Research Engineer in the Robot Development Team, R&D Center, Hyundai Rotem. His research interest is wearable robot, rehabilitation robot.

E-mail: donghei@hyun-rotem.co.kr



Do Yeon Kang

Research Engineer in the Robot Development Team, R&D Center, Hyundai Rotem. Her research interest is wearable robot control and sensor.

E-mail: kangdoyeon@hyun-rotem.co.kr



Ji Seck Lee

Senior Research Engineer in the Robot Development Team, R&D Center, Hyundai Rotem. His research interest is wearable robot, exoskeleton suit.

E-mail: mr.lee@hyun-rotem.co.kr

초정밀 레이저를 이용한 연꽃잎 표면 자연 모사 연구

Laser Micro-Structuring of Super-Hydrophobic Surface for Lotus Effect

이창준^{1,3}, 최훈국², 손익부^{2,#}, 하준석³

Chang Jun Lee^{1,3}, Hun Kook Choi², Ik Bu Sohn^{2,#}, and Jun Seok Ha³

¹ 전남대학교 광공학협동과정 (Department of Interdisciplinary Program for Photonic Engineering, Chonnam National University)

² 광주과학기술원 고등광기술연구소 (Advanced Photonics Research Institute)

³ 전남대학교 화학공학부 (School of Chemical Engineering, Chonnam National University)

Corresponding Author / E-mail: ibson@gjst.ac.kr, TEL: +82-62-715-3337

ORCID: 0009-0002-9717-050X

KEYWORDS: Superhydrophobic (초소수성), Superhydrophilic (초친수), Laser micromachining (레이저 가공), Picosecond laser (피코초 레이저), Femtosecond laser (펨토초 레이저)

In a pilot natural super-hydrophobic surfaces study, a super-hydrophobic surface was made by coating, etching, laser ablation, chemical vapor deposition and lithography. In this study, cone-shaped periodic micro and nano-structures were constructed on a silica surface with femtosecond and picosecond laser, and the period of micro-structures between cone shape patterns was increased with 10 μm intervals. The contact angle and image of the super-hydrophobic surface were analysed and the cone (Aspect-ratio 1.27) shape model with micro-protrusion structure similar to the surface of the lotus leaf was made to measure the contact angle. To analyse the differences in the contact angles between the cone shapes and heights of the micro-protrusion, different samples with cone (Aspect-ratio 1.27), sphere (Aspect-ratio 1.00) shapes were made through laser micro-machining technology. To mimic the natural lotus leaves, the optimum condition was a cone shape. Samples of PDMS with different shapes and mixed micro/nano-structures were fabricated with a PDMS mold insert. The largest contact angle was measured at 170.42° which is similar to the contact angle of the lotus leaf. This mold insert could be used repeatedly. The molding process is advantageous for large areas and mass production.

Manuscript received: October 14, 2022 / Revised: January 2, 2023 / Accepted: January 6, 2023

1. 서론

자연계의 현상을 모사하기 위한 연구가 다양한 분야에서 진행 중이다. 연꽃 잎의 표면은 수많은 돌기들이 있고, 돌기들의 표면에는 나노 크기의 구조로 인해 초소수성(초발수, Super-Hydrophobic) 특성을 가진다. 초소수성 특성은 표면에 붙어있는 오물, 흙을 물이나 빗방울로 쉽게 제거해 자기 정화기능(Self-Cleaning)이라 부른다[1,2]. 초소수성 표면은 여러 산업 분야에서 적용되고 있는데 초소수성 특성을 금속에 적용할 경우 부식을 방지하고, 온도가 낮은 겨울에는 물에 의한 결빙을 억제할 수 있다. 액체의 방향과 각도를 조절하기 위해 초소수성 특성을 활용하기도 하며, 물과 기름을 분리하는 분리막으로 적용하는 등 다양한 연구들이 진행 중이다. 초소수성 표면 모사를 위한

연구는 대표적으로 고체 표면에 다른 물질을 코팅하거나 증착하는 상향식 방법과 고체 표면에 미세 구조를 제작하는 하향식 방법이 있다. 대표적인 상향식 방법에는 리소그래피(Lithography) 방식이 있고, 표면에 포토 레지스트(Photoresist, PR)를 코팅하고 리소그래피 장비를 이용해 표면을 제작하는 방식이며[3,4], 화학 기상 증착(Chemical Vapor Deposition) 방식을 이용해 표면에 증착하는 방법도 사용된다[5,6]. 또 하향식 방법으로는 PDMS 표면을 직접 레이저 가공을 하거나 PDMS에 다른 물질을 혼합해 초소수성 표면을 제작하는 방식이 있다[7-11]. 선행 연구에서 피코초 레이저를 이용한 스캐너 가공으로 격자 형상을 5-30회 반복 가공을 하고, PDMS 금형을 제작하여 마이크로와 나노 스케일의 구조를 제작하고, 제작된 PDMS 표면에 초소수성 특성을 보고한 연구가 있다[12]. 본 연구는 하향식 방식 중 하나인 레이저

가공 방식을 이용하여 고체 표면의 형상을 정밀하고 빠르게 가공하는 방법을 연구하였으며[13,14], 이를 이용해 금형을 제작하고 PDMS의 표면에 연꽃잎 표면을 모사하는 연구를 진행하였다.

2. 연꽃잎 효과 및 접촉각 이론

연꽃잎의 표면에는 수많은 마이크로, 나노 크기의 미세 돌기가 있고, 나노 구조가 표면에 복합적으로 존재한다. 이러한 구조로 인해 표면에 이물질이 물이나 빗방울에 의해 쉽게 제거가 된다. 이를 연꽃잎 효과(Lotus Effect)라고 부르며, 마이크로, 나노 복합 구조의 장점은 표면을 항상 깨끗하게 유지하여 광합성을 하는 식물에게 매우 효과적이다. 실제 연꽃잎의 표면 형상을 확인하기 위해 전계방사-주사전자현미경 FE-SEM (Field Emission-Scanning Electron Microscopy, S-4700)으로 연꽃잎 표면의 이미지를 측정하였다. Figs. 1(a)는 실제 생태공원에서 서식하고 있는 연꽃잎의 사진이고, 1(b)는 연꽃잎의 표면에 물방울이 떨어져 있을 때의 모습이다. Fig. 1(c)는 연꽃잎을 500배율로 분석한 것이고, 표면에 수많은 돌기들이 표면 전체에 분포된 것을 확인할 수 있다. Fig. 1(d)는 연꽃잎 표면을 2,000배율로 확대한 이미지이며, 미세 돌기들은 유사한 크기와 형태를 유지하는데, 미세 돌기의 폭과 높이는 약 6-10 μm 크기로 모든 표면에 고르게 분포되어 있었다. Fig. 1(e)는 4,500배율의 이미지이며, 바닥과 돌기를 포함한 모든 표면에 미세한 나노 구조가 있고, 이를 고배율로 관찰한 것이 Fig. 1(f)이다. 15,000배율로 나노 크기의 복합 구조를 확인할 수 있고 연꽃잎의 표면의 마이크로 돌기를 포함한 모든 표면에 고르게 분포된 것을 확인할 수 있었다.

접촉각 이론은 고체 표면의 형상에 따라 달라지는데 Fig. 2에서 고체 표면에 미세 구조가 존재하지 않는다고 가정한 Young's 이론과 표면에 작고 미세한 돌기가 존재한다고 가정한 Wenzel's 이론 그리고 고체 표면의 미세 돌기 구조 위에 액체가 떠받쳐 있다고 가정한 Cassie-Baxter's 이론으로 구분할 수 있다.

Fig. 2(a)에서 Young's의 이론 모델은 고체 표면에 미세 구조가 없는 평평한 표면이라고 가정을 했고, θ_0 는 평평한 표면에서 접촉각이다. 고체(Solid), 액체(Liquid), 기체(Air)의 상호간 계면 에너지는 γ_{SL} 은 고체(S)-액체(L)의 계면 에너지, γ_{LA} 는 액체와 기체 간의 계면 에너지, γ_{SA} 는 고체와 기체의 계면 에너지를 나타낸다. 따라서 고체표면의 액체의 접촉각은 고체를 구성하는 성분에 따라 고유의 접촉각을 가진다[15,18].

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LA}} \tag{1}$$

실제 고체표면은 평평하지 않고, 특히 Fig. 1의 연꽃잎의 표면과 같이 마이크로 크기의 돌기들이 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 해석하기 위해서는 Wenzel's과 Cassie-Baxter's 이론을 적용한다.

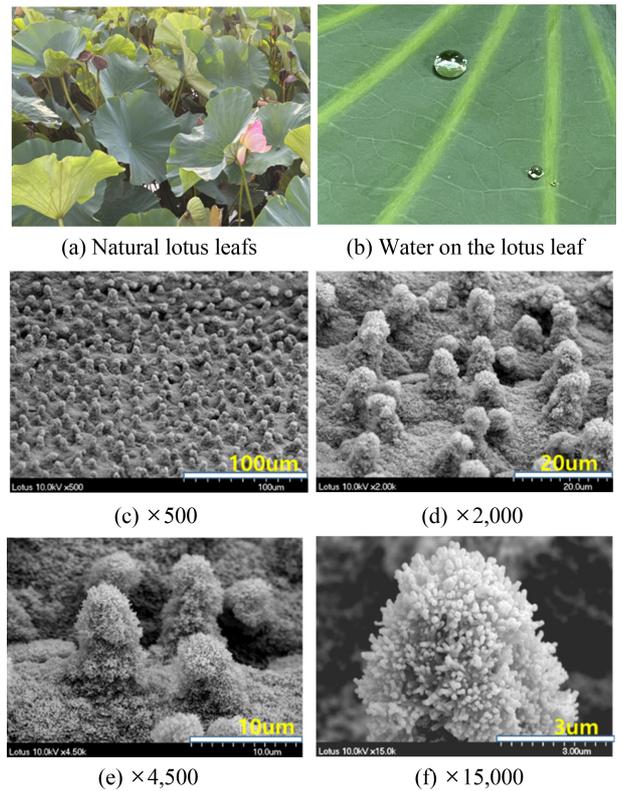


Fig. 1 Digital camera images natural lotus leaves and (b) Water on the lotus leaf. FE-SEM (c)-(d) Image of lotus leaf

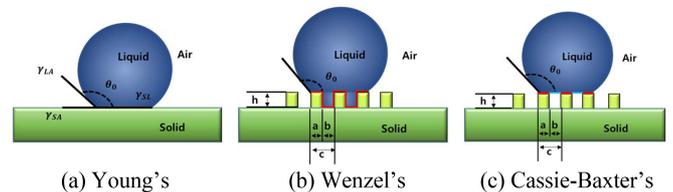


Fig. 2 A schematic diagram of the theory models for contact angle

Fig. 2(b)에서 Wenzel's의 이론 모델은 고체 표면에 미세한 돌기들이 존재하고, 액체와 돌기가 완전히 접촉하였다고 가정을 하였다. 거칠기율(γ , Roughness Factor)은 액체가 실제로 고체 표면에 접촉한 전체 면적($n = a + b + h$)을 표면 위에 투영된 액체의 면적(C)로 나눈 값이다. 평평한 표면은 $\gamma = 1$ 이고, 거칠기가 있는 표면은 $\gamma > 1$ 이 된다. $\theta_0 = 90^\circ$ 이하는 표면 거칠기가 증가하면 접촉각이 감소해 친수성이 되고, $\theta_0 = 90^\circ$ 이상은 표면 거칠기가 증가하면 접촉각도 증가하여 소수성(발수) 표면이 된다[16,18].

$$\cos \theta_w = \gamma \cos \theta_0 \tag{2}$$

$$\gamma = \frac{a + b + h}{C} = \frac{n}{C} \tag{3}$$

Fig. 2(c)에서 Cassie-Baxter's 이론 모델은 고체 표면의 미세 돌기들 위에 액체가 떠있다는 가정하였다. 단면의 구조를 보면 고체 표면(a)과 기체가 만나는 면(b)이 있다. 여기서 f_a 는

고체표면 돌기에 닿은 액체를 투영된 면적(C)으로 나눈 것 ($f_a = a/C$), f_b 는 액체가 기체에 닿은 면을 투영된 면적(C)으로 나눈 값이다($f_b = b/c$). f_a 와 f_b 를 합한 값은 1이 된다. 따라서 $f_b = 1 - f_a$ 로 표현할 수 있다[17,18].

$$\cos \theta_{CB} = f_a \cos \theta_a + f_b \cos \theta_b \tag{4}$$

$$\cos \theta_{CB} = f_a(1 + \cos \theta_a) - 1 \tag{5}$$

이때 고체분율(Solid Fraction)인 f_a 는 전체 투영면적에서 액체와 고체 표면이 접촉한 부분의 비로 1보다 작은 값을 가진다. 물방울의 접촉면적이 작아져 f_a 가 0에 가까워질수록 접촉각은 180° 근접해진다.

3. 실험 장치

이번 연구에서 연꽃잎의 모사를 위해 사용된 레이저는 펨토초와 피코초 레이저를 사용하였다. 펨토초 레이저는 Light Conversion 사의 Pharos 레이저로 기준 파장 1,030 nm, 평균 출력 6 W, 반복률 100 kHz, 펄스 폭 250 fs의 사양을 가진다. 펨토초 레이저를 이용해 실리카 표면 가공 실험을 진행하였다. 피코초 레이저는 Advanced Optowave 사의 AOPico AMT 1064 모델이고, 기준 파장은 1,064 nm, 평균 출력 20 W 반복률 50-200 kHz, 펄스 폭은 12 ps이다. 표면 형상 제작을 위해 Scanner 가공 방식을 사용해 실험을 진행하였다.

펨토초 레이저의 가공 조건은 파장 1,030 nm, 펄스 반복률 100 kHz, 레이저 파워 1,287 mW, 스캐너 가공 속도 0.1 mm/sec, 가공에 사용된 스캐너는 SCANLAB's hurrySCAN, F-Theta lens, f = 100 mm 피코초 레이저의 가공 조건은 파장 1,064 nm, 펄스 반복률 50 kHz, 레이저 파워 380 mW, 스캐너 가공 속도 10 mm/sec, 가공에 사용된 스캐너는 SCANLAB's hurrySCAN, F-Theta lens, f = 100 mm를 사용하였고 형상의 주기와 높이를 변경하며 실험을 진행하였다. 연꽃잎의 형상과 비슷한 가공 조건을 찾기 위해서 펨토초와 피코초 레이저로 음각 형태로 실험을 진행하였고, 가공 속도 및 형상에 대한 비교 실험을 진행하였다.

금형(성형) 제작에 사용한 PDMS는 SYLGARD 184 SILICONE ELASTOMER KIT를 사용하였다. 실험이 완료된 샘플은 전계방사-주사전자현미경(Field Emission-Scanning Electron Microscopy, S-4700)을 이용해 표면 분석을 진행하였으며, 레이저를 이용하여 제작된 형상의 초소수성 특성을 확인하기 위하여 접촉각 측정기를 사용하였다. 접촉각 측정기는 Surface & Electro-Optics 사의 Phoenix-MT이고, 측정에 사용한 접촉각 측정기의 측정 범위는 0-180 deg, 오차범위 0.1 deg이다. 소프트웨어 의한 자동, 수동 측정 및 12배울 줌렌즈 카메라를 사용하며, DI 워터는 3차 증류수를 사용하였고 측정에 사용된 양은 약 5.62(uL)를 사용해 접촉각을 측정하였다.

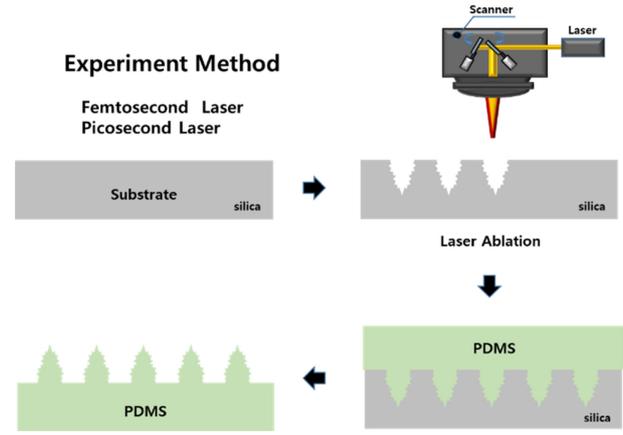


Fig. 3 Schematic diagram of laser micro-structuring for lotus effect of experiment method

4. 실험결과

본 연구에서는 연꽃잎의 표면을 모사하여 마이크로 미세 돌기의 형상 제작하여 초소수성 특성을 갖는 표면 제작을 목표로 하였다. 초소수성 표면 모사를 위해 연꽃잎과 가장 유사한 원뿔형상에서 주기를 10 μm 간격으로 증가시키며 실험을 하였고, 그에 따른 접촉각을 측정하였다. 이후 실리카 금형의 반복사용 실험 및 접촉각을 비교하는 실험을 진행했다. 또한 원뿔형상의 종횡비를 조절하여 접촉각을 비교하는 실험을 진행하였다.

Fig. 3은 초정밀 레이저 가공 시스템을 이용하여 연꽃잎 표면과 유사한 형상 제작을 위해 실험을 진행한 내용을 그림으로 표현한 것이다. 첫째, 실리카에 형상을 제작하고 초음파 세척 및 클리닝 과정을 거쳐 이물질을 제거하였다. 두 번째로 PDMS를 합성해 실리카 표면에 고르게 도포하였으며, 실리카와 PDMS 금형을 분리하여 초소수성 PDMS 표면을 제작하였다. PDMS의 합성은 Sylgard 184 Silicone Elastomer Base와 Sylgard 184 Silicone Elastomer Curing Agent를 10 : 1의 비율로 혼합하고, 두 물질의 혼합 과정에서 발생된 기포를 제거하기 위해 진공 챔버에서 30분간 탈포 작업을 진행하였으며, PDMS를 가공된 실리카 위에 도포해 금형을 제작하였다.

초소수성 표면을 제작하기 위해 연꽃잎 표면과 유사한 원뿔형상을 먼저 가공하였다. 원뿔형상을 제작하기 위해 펨토초, 피코초 레이저의 스캐너 가공을 동일한 방법으로 가공을 진행해 가공 시간이 짧은 조건을 찾는 실험을 진행하였다. 기초 실험에서 선, 격자 가공을 진행해 실리카 표면의 전체와 선의 주기를 변경하며 레이저 가공하여 PDMS 금형을 제작해 표면의 형상을 비교하였다. 펨토초로 제작된 금형은 표면에 미세한 나노 구조가 제작되었지만 PDMS 금형 제작하고 실리카 표면을 확인하면 PDMS 물질이 잔존하여 재사용에 영향을 주는 것을 확인하였다. 피코초 레이저로 제작한 실리카는 금형 제작 후 현미경으로 확인하면 잔존하는 PDMS 물질의 양이 적었으며, 펨토초 레이저에 비해 빠른 가공속도와 적은 시간으로 제작이 가능함

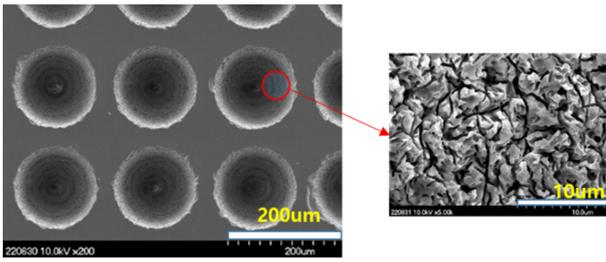


Fig. 4 The FE-SEM image of micro hole of silica glass micro-structured by picosecond laser. Nano structures are visible on the micro hole surface

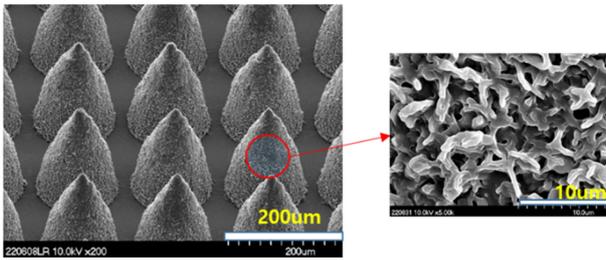


Fig. 5 The FE-SEM image of micro-protrusion of PDMS after mold process. Nano-structures are visible on the micro-protrusion surface

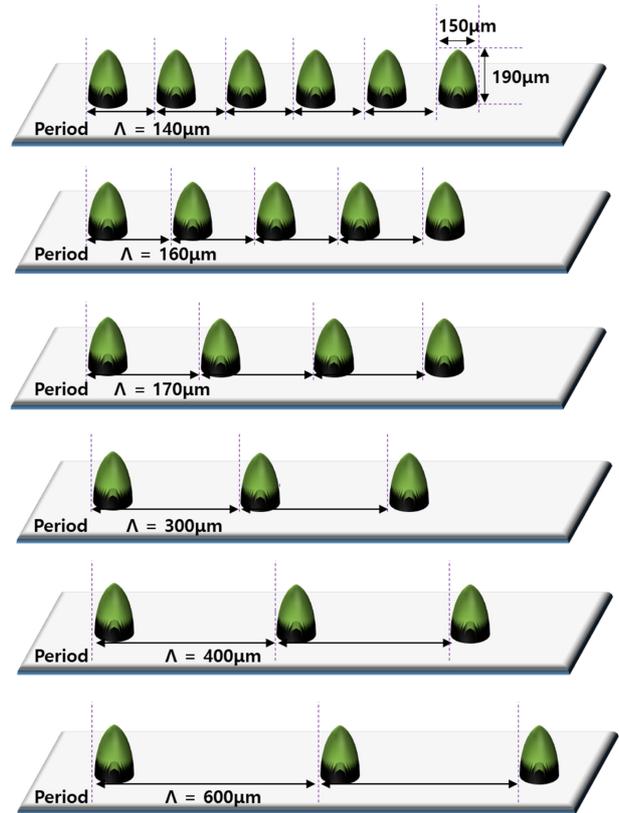


Fig. 6 Schematic diagram of laser micro-structuring of micro-protrusion with different periods

을 확인하였다. 피코초 레이저를 이용하여 홀 가공을 진행하였으며, Z축을 변경하며 4회 반복으로 가공하였다. 5 mm 정사각형의 범위를 4회 반복 가공을 하면 60초의 짧은 시간에 실리카 금형을 제작할 수 있었다. 가공된 실리카와 PDMS의 표면을 FE-SEM 이미지 분석을 진행하였고, 샘플의 표면과 45° 기울인 상태에서 5,000배율로 확대하여 표면 분석을 진행하였다.

피코초 레이저를 이용해 제작한 실험은 Fig. 4에서 실리카 표면이 음각으로 가공되고, 레이저 의해 가공된 표면은 나노 크기의 미세 구조가 실리카 표면에 형성되었다. Fig. 5에서 보듯이 실리카에 제작된 미세 구조는 금형 제작한 PDMS 표면에 미세 구조가 그대로 구현됨을 확인할 수 있다.

연꽃잎을 모사한 실험의 개념도는 Fig. 6이며 원뿔 형상의 대한 실험 조건을 표현하였다. 형상 간 주기 간격은 10 µm 간격으로 증가되고 제작된 시료는 127-600 µm까지 원뿔 형상의 주기를 변경하여 실험을 진행하였다. 원뿔의 높이는 190 µm, 폭 150 µm으로 고정하였고, 종횡비는 1.27 (Aspect-ratio 1.27)의 비율을 갖는다.

피코초 레이저를 이용해 제작된 PDMS 금형의 원뿔 형상에 대해 FE-SEM을 사용하여 이미지를 분석하였다. Fig. 7은 금형 제작된 원뿔 형상에서 주기의 변화를 이미지 분석을 하였고, 원뿔 형상은 10 µm의 주기 간격으로 127-600 µm까지 제작하였다. Figs. 7(a)의 주기의 간격은 140 µm, 7(b) 160 µm, 7(c) 170 µm, 7(d) 300 µm, 7(e) 400 µm, 7(f) 600 µm이다. 형상은 이미지에서 보듯이 동일한 크기와 높이를 가지며 주기의 간격만 증가된 것을 확인할 수 있었다.

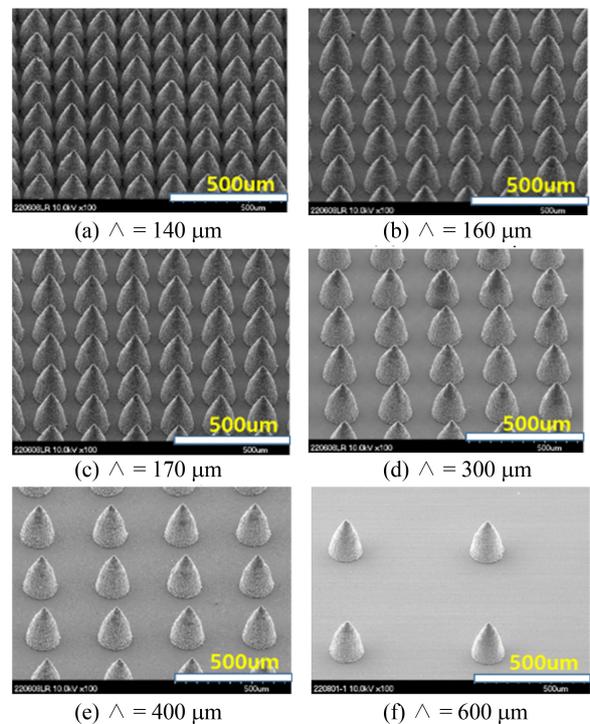


Fig. 7 The FE-SEM image of micro-protrusion of PDMS with different periods of micro-protrusion. The periods of micro-protrusion are (a) 140 µm, (b) 160 µm, (c) 170 µm, (d) 300 µm, (e) 400 µm, (f) 600 µm

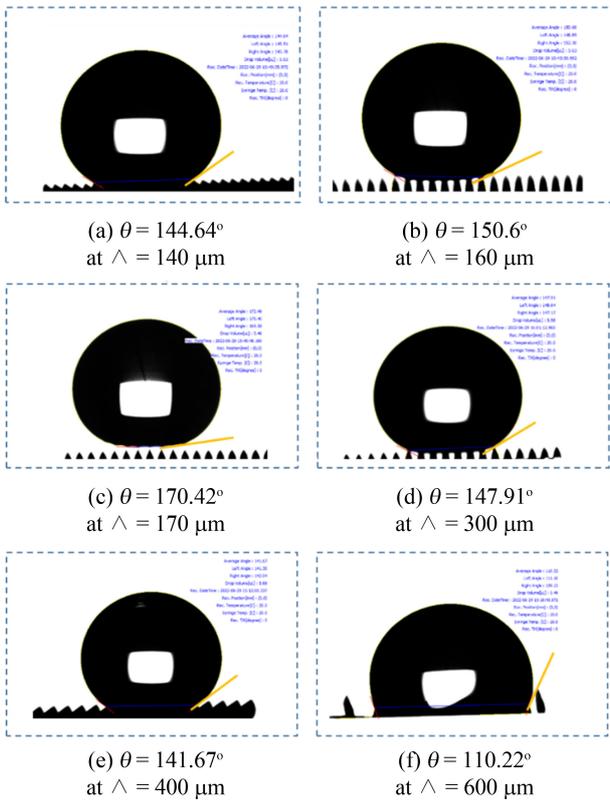


Fig. 8 The contact angles of periodic micro-protrusion of PDMS with different periods of (a) 140 μm, (b) 160 μm, (c) 170 μm, (d) 300 μm, (e) 400 μm, (f) 600 μm. The contact angle are (a) 144.64°, (b) 150.6°, (c) 170.42°, (d) 147.91°, (e) 141.67°, (f) 110.22°

접촉각 측정기를 사용하여 주기 간격에 따른 접촉각을 비교하였다. Fig. 8은 주기 간격에 대한 초소수성 특성을 확인하기 위하여 접촉각 측정을 진행한 결과이며, 140 μm의 주기에서 144.64°의 접촉각이 나타나고, 주기가 증가할수록 접촉각은 증가하여 170 μm 주기에서 170.42°의 최대 각도가 측정되었다. 이후 주기가 증가될수록 접촉각이 감소함을 확인하였다. 초소수성 표면으로 제작된 주기 170 μm는 Casiee-Baxter’s의 이론과 일치하고, 마이크로 돌기 위에 물방울이 올라가 있는 것을 확인할 수 있었다. 접촉각 측정은 동일 조건으로 3회 반복 측정하였고, 이를 평균 값으로 계산하면 약 170°의 각도가 측정되었다. Figs. 8(a) 144.64°, 8(d) 147.91°, 8(e) 141.67°의 각도가 측정되어 소수성 표면으로 제작되었고. 액체와 원뿔의 접촉면이 증가하였다. Figs. 8(b) 147.91°와 8(c) 170.42°는 액체가 원뿔 형상 위에 위치하며 초소수성 접촉각을 보였다. Fig. 8(f) 110.22°에서는 액체가 미세 돌기와 접촉면적이 증가하며, PDMS 표면에 완전히 접촉하는데 고체 표면과 완전히 접촉된 것을 확인할 수 있었다.

측정된 접촉각을 기준으로 Fig. 9와 같이 그래프로 나타냈다. 금형으로 제작한 127-600 μm의 원뿔 형상에서 주기가 증가될 때의 접촉각 변화를 나타낸 것으로 처음 141.45° 접촉각이 측정되었고 주기가 170 μm에서 최대 접촉각인 170.42°의 접촉각이

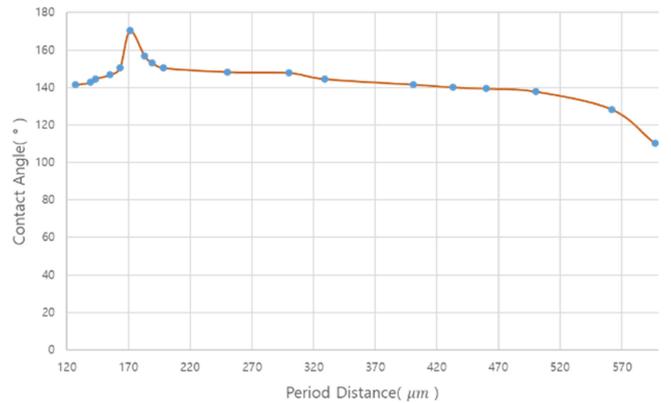


Fig. 9 The graph of contact angle with different periods of PDMS sample

측정됨을 확인하였다. 형상의 주기가 증가할수록 접촉각은 점차 감소되어 110.22°까지 하락하며, 가공하지 않은 PDMS의 접촉각을 측정하면 100.59°로 측정이 되는데 주기가 600 μm 샘플은 순수 PDMS의 접촉각과 유사한 각도를 가지게 된다. 원뿔 형상이 마이크로, 나노 복합 구조로 연꽃잎과 유사한 모양으로 제작되지만 주기의 간격에 따라 초소수성 특성이 변하는 것이 실험을 통해 확인되었다.

연꽃잎을 모사한 원뿔(Aspect-ratio 1.27) 실리카 금형을 반복 사용하였을 때 PDMS의 변화를 확인하기 위하여 실리카 금형을 10회 재사용 실험을 진행하였다. Figs. 10(a)와 10(b)는 4회, 6회 반복 사용한 PDMS의 마이크로 구조 표면이고 나노 구조가 선명하게 보이는 것을 확인할 수 있다. Figs. 10(c)는 8회, 10(d)는 10회 반복한 이미지이다. 1-9회까지는 나노 구조가 유사하게 제작되지만 10회에서는 나노 구조의 형태가 점점 흐릿하게 제작되었다. 실리카 금형을 9회까지는 정상적으로 반복 사용이 가능한 것을 확인하였다.

실리카 금형을 1-10회 반복 제작한 PDMS의 접촉각 변화를 비교 실험하였다. 정확한 측정을 위해 접촉각을 3회 측정하여 평균값을 사용하였다. Figs. 11(a) 162.39°, 11(b) 161.77°, 11(c) 159.79°, 11(d) 156.12° 각도가 측정되었고, 금형이 반복 사용될수록 접촉각이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 1-3회 재사용에서는 약 172-166°의 접촉각이 측정되었으나 금형을 반복 사용할수록 접촉각이 줄어들었고, 특히 나노 구조의 형상이 변화된 10회는 접촉각이 156.12°로 감소한 것을 확인할 수 있다.

실리카 금형을 반복 사용하여 제작된 모든 PDMS의 접촉각 변화를 그래프로 표현한 것이고, Fig. 12는 실리카 금형을 1-10회 반복 사용한 시료에서 측정된 접촉각으로 1-2회 반복 제작에서 약 170°의 접촉각이 측정되었으나 금형이 반복 사용될수록 접촉각이 점차 감소하였다. 접촉각의 차이는 있으나 10회 반복 제작하여도 초소수성 표면이 제작되는 것을 확인하였다.

연꽃잎을 모사한 원뿔 형상에서 가장 높은 접촉각이 측정되었고, 종횡비에 따른 접촉각 변화를 확인하기 위해 비교실험을 진행하였다. 원뿔 형상의 높이는 190 μm이고, 폭은 150 μm의

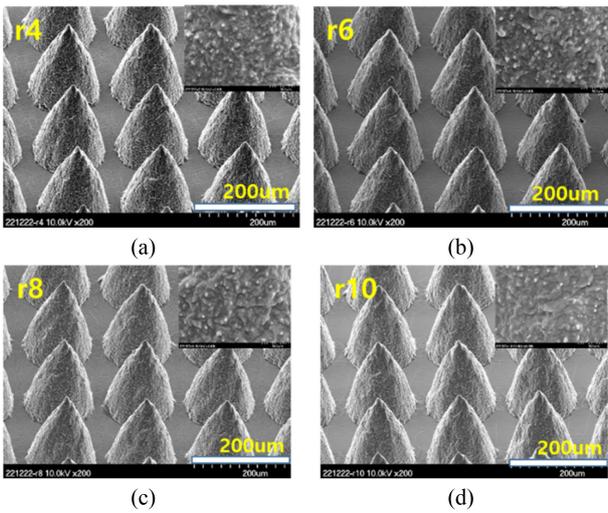


Fig. 10 The FE-SEM image of micro-protrusion of PDMS with mold used repeatedly. The micro-protrusion of silica mold repeatedly used are (a) Repeat 4th reuse, (b) Repeat 6th reuse, (c) Repeat 8th reuse, (d) Repeat 10th reuse

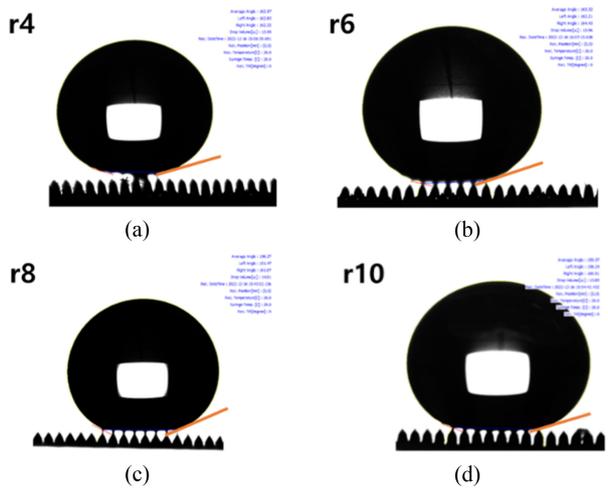


Fig. 11 The FE-SEM image of micro-protrusion of PDMS with mold used repeatedly. The contact angle of micro-protrusion of silica mold repeatedly used are (a) 162.39°, (b) 161.77°, (c) 159.79°, (d) 156.12°

크기를 가진다. Fig. 13에서 원뿔 형상을 기준으로 원뿔, 형상 제어를 통해 연꽃잎 표면과 다른 형상에서의 초소수성 특성을 비교하는 연구를 진행하였다. 마이크로 구조의 종횡비를 조절하여 접촉각 변화를 확인하기 위하여 끝 모양을 원뿔(Aspect-ratio 2, 1.54, 1.27), 구면(Aspect-ratio 1.00) 형태로 제작하였으며, 형상 간의 주기 간격을 증가시키며 조절하여 접촉각 변화를 관찰하였다. 형상 간 주기 간격은 170 µm 간격으로 동일한 조건에서 원뿔 형상의 종횡비를 변경하여 실험을 진행하였다.

종횡비의 비율에 따른 접촉각 변화를 확인하기 위해 비교 실험을 진행하였다. Figs. 14(a)부터 14(c)는 끝 모양이 원뿔 형상이고, 종횡비는 2, 1.54, 1.27이고 14(d)는 구면 형상의 종횡비는

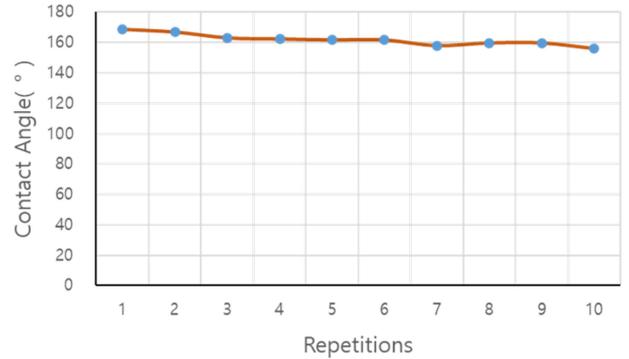


Fig. 12 The graph of contact angle with micro-protrusion of silica mold repeatedly used

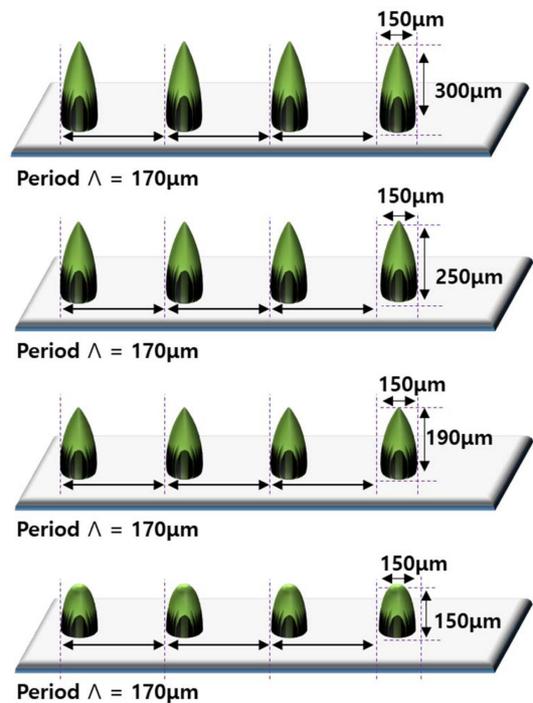


Fig. 13 Schematic diagram of laser micro-structuring of micro-protrusion with different aspect-ratio

1의 비율을 가진 PDMS 금형을 제작하였다. 종횡비의 비율을 조절하여 제작한 PDMS 샘플에서도 동일하게 마이크로 구조 위에 나노 구조가 제작되어 복합 형상으로 제작이 되었다.

접촉각 측정기에서 종횡비가 조절된 원뿔, 구면, 형상에서 접촉각을 측정하여 각 형상에서의 초소수성 특성을 확인하였다. Figs. 15(a) 146.16°, 15(b) 152.22°, 15(c) 170.42°, 15(d) 156.79°로 접촉각이 측정되었고, 원뿔(Aspect-ratio 1.27 : 1) 형상에서 170.42° 최대 접촉각이 측정되었다. 종횡비에 따라서 접촉각이 차이를 보이며, 미세 돌기의 높이를 증가시켜도 접촉각은 커지지 않고 일정하게 유지되며, 종횡비 1.27에서 최대 접촉각이 측정된다. 액체와 접촉하는 표면의 형상을 관찰하였을 때 종횡비가 1.27인 원뿔 형상은 액체와 접촉면이 가장 적었고, 종횡비가 1인 경우 액체와 접촉면이 증가하는 것을 확인할 수

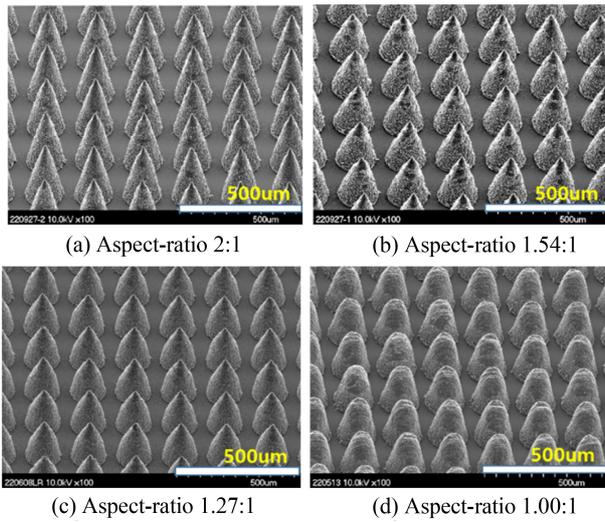


Fig. 14 The FE-SEM image of micro-protrusion of PDMS with different aspect-ratio of micro-protrusion. The aspect-ratio of micro-protrusion are (a) 2, (b) 1.54, (c) 1.27, (d) 1.00

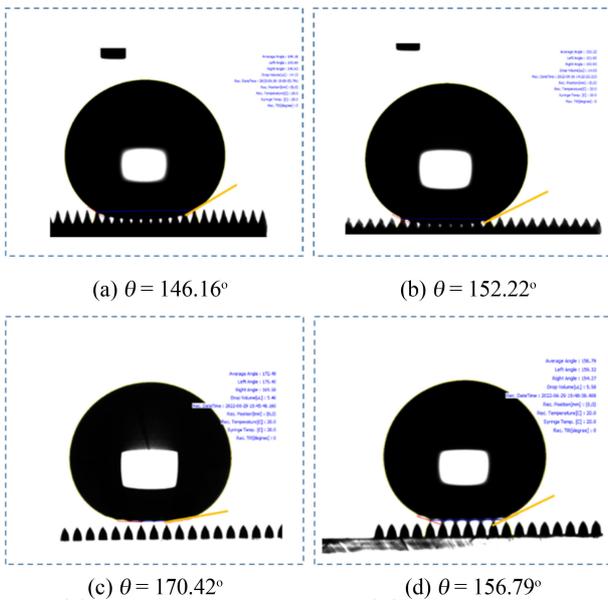


Fig. 15 The FE-SEM image of micro-protrusion of PDMS with different aspect-ratio of micro-protrusion. The contact angle of micro-protrusion are (a) 146.16°, (b) 152.22°, (c) 170.42°, (d) 156.79°

있었다.

중횡비에 따른 접촉각 변화를 그래프로 표현한 것이고 Fig. 16에서 PDMS 표면에 제작된 중횡비에 따라 접촉각이 변화하며, 초소수성 특성이 달라짐을 알 수 있었다. 초소수성 접촉각이 가장 높게 나타난 중횡비 1.27보다 비율을 증가시켜 제작한 중횡비 2와 1.54는 접촉각이 더 좋아지지 않고 감소하였고, 비율이 1.27의 형상에서 가장 좋은 접촉각이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 중횡비가 1인 비율에서 구면 형상은 PDMS 표면과 마이크로-나노 복합 구조가 물방울 접촉하는 면적이 증가하였고,

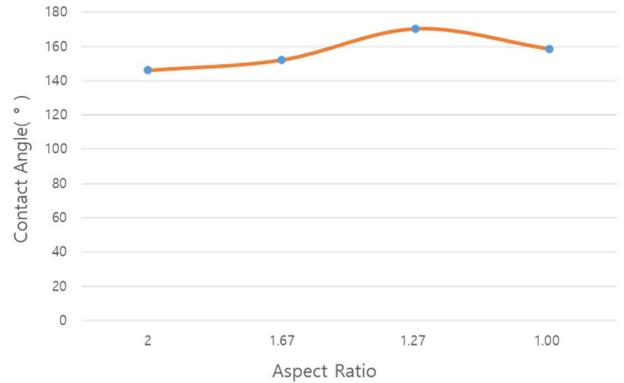


Fig. 16 The graph of contact angle with different aspect-ratio of PDMS sample

낮은 접촉각이 나타났다. 액체와 직접 접촉하는 마이크로 나노 구조의 끝 형상이 중횡비가 따라 다르게 측정된 것이라 생각한다.

5. 결론

본 연구는 연꽃잎을 모사하기 위해 연꽃잎의 미세 돌기와 가장 유사한 원뿔 형상을 실리카에 음각 형태로 제작했고, 이를 PDMS으로 금형 제작하여 연꽃잎 모사 실험을 진행하였다. 원뿔 형상의 주기에 따른 접촉각의 변화와 원뿔의 중횡비에 따른 접촉각의 변화를 확인 하기위한 실험을 진행하였고 원뿔 (Aspect-ratio 1.27) 구조를 170 µm의 주기로 제작하면 170.42°의 접촉각을 가지는 초소수성 표면이 제작되는 것을 확인하였다. 실제 연꽃잎은 170°의 접촉각을 가지고 있는데, 실험을 통해 연꽃잎의 초소수성 표면 모사를 하였고, 접촉각 또한 연꽃잎의 표면과 유사하게 제작할 수 있었다. 실리카 금형을 사용하여 초소수성 표면을 빠르게 제작하고 10회까지 재사용이 가능함을 확인하였다.

펨토초, 피코초 레이저 스캐너 가공 방식을 이용할 경우 대물 렌즈를 이용한 가공 방식에 비해 매우 빠른 속도로 제작할 수 있었으며, 이번 연구에서는 5 mm 정사각형 가공 면적에 4회 반복 가공 시간이 약 60초 정도 소요되었고, 레이저를 이용한 형상 제작의 시간을 줄일 수 있었다.

중횡비에 따른 접촉각의 변화를 확인하기 위해 PDMS 금형으로 제작된 마이크로 돌기의 중횡비를 2, 1.54, 1.27, 1의 비율로 제작해 접촉각의 변화를 연구하였다. 그 결과 원뿔(Aspect-ratio 1.27 : 1)의 비율을 가지는 원뿔 형상에서 가장 높은 초소수성 표면 제작이 되는 것을 확인하였다. 연꽃잎과 유사한 원뿔 형태의 구조가 존재해도 형상의 주기가 증가할수록 접촉각이 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 원뿔, 구면 형상의 중횡비에 따른 접촉각 결과에서 확인할 수 있듯이 마이크로 돌기 위에 액체와의 접촉면이 증가할수록 접촉각이 낮아져 초소수성 특성이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

실제 연꽃잎은 표면에 마이크로, 나노 크기의 복합 구조와 왁스 성분이 표면에 존재해 초소수성 특성을 가지는데 본 연구에서는 왁스성분이나 다른 물질의 코팅을 하지 않고 초소수성 특성을 가진 표면 제작이 가능함을 실험 결과를 통해 확인하였다. 실리카로 제작된 금형은 반복 사용이 가능하여 비용과 시간을 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 이번 연구를 통해서 연꽃잎의 표면을 모사하였으며, 연꽃잎과 동일한 초소수성 특성을 가지는 표면 제작을 위한 형상 구조의 주기와 종횡비에 대한 조건을 찾을 수 있었다. 레이저 가공 방식을 적용하면 초소수성 표면 제작 시간이 빠르고 재사용이 가능해 산업화에 적용하기 유리할 것이다. 금형의 반복사용시 마이크로 구조 표면에 나노 구조가 없더라도 초소수성 표면의 특성을 유지하여 태양광 패널에 응용할 수 있을 것이라 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 광주과학기술원 지스트 개발 과제의 지원을 받아 수행된 연구임. 본 연구는 중소벤처기업부의 창업 성장 기술 개발 사업의 지원에 의한 연구임(S3164978).

REFERENCES

- Koch, K., Bhushan, B., Barthlott, W., (2009), Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics, *Progress in Materials Science*, 54(2), 137-178.
- Darmanin, T., Guittard, F., (2015), Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature, *Materials Today*, 18(5), 273-285.
- Feng, J., Tuominen, M. T., Rothstein, J. P., (2011), Hierarchical superhydrophobic surfaces fabricated by dual-scale electron-beam lithography with well-ordered secondary nanostructures, *Advanced Functional Materials*, 21(19), 3715-3722.
- Thieme, M., Streller, F., Simon, F., Frenzel, R., White, A., (2013), Superhydrophobic aluminium-based surfaces: Wetting and wear properties of different CVD-generated coating types, *Applied Surface Science*, 283, 1041-1050.
- Bang, S. W., Rho, H., Bae, H., Kang, S.-J., Ha, J.-S., (2018), Improvement of electrochemical reduction characteristics of carbon dioxide at porous copper electrode using graphene, *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 25(4), 105-109.
- Fang, C., Zheng, J., Zhang, Y., Li, Y., Liu, S., Wang, W., Jiang, T., Zhao, X., Li, Z., (2018), Antireflective paraboloidal microlens film for boosting power conversion efficiency of solar cells, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(26), 21950-21956.
- Wang, N., Wang, Q., Xu, S., Zheng, X., (2019), Mechanical stability of PDMS-based micro/nanotextured flexible superhydrophobic surfaces under external loading, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(51), 48583-48593.
- Bai, R., Gao, Y., Lu, C., Tan, J., Xuan, F., (2021), Femtosecond laser micro-fabricated flexible sensor arrays for simultaneous mechanical and thermal stimuli detection, *Measurement*, 169, 108348.
- Palaniappan, V., Masihi, S., Panahi, M., Maddipatla, D., Bose, A., Zhang, X., Narakathu, B., Bazuin, B., Atashbar, M., (2019), Laser-assisted fabrication of flexible micro-structured pressure sensor for low pressure applications, *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*, 1-3.
- Dos Santos, A., Pinela, N., Alves, P., Santos, R., Farinha, R., Fortunato, E., Martins, R., Águas, H., Igreja, R., (2019), E-skin bimodal sensors for robotics and prosthesis using PDMS molds engraved by laser, *Sensors*, 19(4), 899.
- Yong, J., Chen, F., Yang, Q., Zhang, D., Bian, H., Du, G., Si, J., Meng, X., Hou, X., (2013), Controllable adhesive superhydrophobic surfaces based on PDMS microwell arrays, *Langmuir*, 29(10), 3274-3279.
- Cho, I.-H., Lee, J.-H., Noh, J.-W., Lee, S.-W., (2012), A study on surface fabrication of super hydrophobic using pico second laser, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 29(2), 161-169.
- Sohn, I.-B., Choi, H.-K., Noh, Y.-C., Kim, J., Ahsan, M. S., (2019), Laser assisted fabrication of micro-lens array and characterization of their beam shaping property, *Applied Surface Science*, 479, 375-385.
- Choi, H.-K., Ahsan, M. S., Yoo, D., Sohn, I.-B., Noh, Y.-C., Kim, J.-T., Jung, D., Kim, J.-H., Kang, H.-M., (2015), Formation of cylindrical micro-lens array on fused silica glass surface using CO2 laser assisted reshaping technique, *Optics & Laser Technology*, 75, 63-70.
- White, L. R., (1977), On deviations from Young's equation, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 73, 390-398.
- Wenzel, R. N., (1936), Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8), 988-994.
- Cassie, A., Baxter, S., (1944), Wettability of porous surfaces, *Transactions of the Faraday Society*, 40, 546-551.
- Oh, J.-H., (2019), Superhydrophobic textiles using nanotexturing and thermal aging, Ph.D. Thesis, Seoul National University.



Chang Jun Lee

Master's Course candidate in the Department of Interdisciplinary Program for Photonic Engineering, Chonnam National University. His research interest is laser micromachining.

E-mail: lcj8390@gmail.com



Hun Kook Choi

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Hankook University. His research interest is femtosecond laser micromachining and its application to optical devices.

E-mail: hunkook.choi@gist.ac.kr



Ik Bu Sohn

Ph.D. in the Department of Mechanical Engineering, Hankook University. His research interest is femtosecond laser micromachining and its applications to optical devices and nano photonics.

E-mail: ibson@gist.ac.kr



Jun Seok Ha

Professor in the School of Chemical Engineering, Chonnam National University. His research interest is compound semiconductors, photoelectrochemical water splitting.

E-mail: jsha@jnu.ac.kr

지자기센서를 이용하지 않는 6축 IMU 기반의 3차원 관절각 추정용 순환 신경망

A Recurrent Neural Network for 3D Joint Angle Estimation based on Six-axis IMUs but without a Magnetometer

이창준¹, 김우재², 이정근^{3,#}
Chang June Lee¹, Woo Jae Kim², and Jung Keun Lee^{3,#}

¹ 한경대학교 융합시스템공학과 (Department of Integrated Systems Engineering, Hankyong National University)
² 한경대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hankyong National University)
³ 한경대학교 ICT로봇기계공학부 (School of ICT, Robotics and Mechanical Engineering, Hankyong National University)
Corresponding Author / E-mail: jklee@hknu.ac.kr, TEL: +82-31-670-5112
ORCID: 0000-0003-0288-157X

KEYWORDS: Joint angle estimation (관절각 추정), Inertial measurement unit (관성측정장치), Magnetometer (지자기센서), Recurrent neural network (순환 신경망), Joint constraint (관절 구속조건)

Inertial measurement unit (IMU)-based 3D joint angle estimation have a wide range of important applications, among them, in gait analysis and exoskeleton robot control. Conventionally, the joint angle was determined via the estimation of 3D orientation of each body segment using 9-axis IMUs including 3-axis magnetometers. However, a magnetometer is limited by magnetic disturbance in the vicinity of the sensor, which highly affects the accuracy of the joint angle. Accordingly, this study aims to estimate the joint angle using the 6-axis IMU signals composed of a 3-axis accelerometer and a 3-axis gyroscope without a magnetometer. This paper proposes a recurrent neural network (RNN) model, which indirectly utilizes the joint kinematic constraint and thus estimates joint angles based on 6-axis IMUs without using a magnetometer signal. The performance of the proposed model was validated for a mechanical joint and human elbow joint, under magnetically disturbed environments. Experimental results showed that the proposed RNN approach outperformed the conventional approach based on a Kalman filter (KF), i.e., RNN 3.48° vs. KF 10.01° for the mechanical joint and RNN 7.39° vs. KF 21.27° for the elbow joint.

Manuscript received: September 19, 2022 / Revised: December 12, 2022 / Accepted: December 26, 2022

1. 서론

3차원 관절각 추정은 보행 분석[1-3]과 외골격 로봇 제어[4,5] 등의 다양한 응용분야에서 중요한 부분을 차지한다. 기존에는 관절각을 추정하기 위해 주로 적외선 카메라를 통해 광학 마커를 추적하는 방식인 광학모션캡처(Optical Motion Capture, OMC) 시스템이 사용되었다. 하지만 이 시스템은 카메라가 갖춰진 실험실 내에서만 활용 가능하기 때문에, 응용분야가 매우 제한된다는 한계점을 지닌다. 최근에는 이러한 카메라 기반의 시스템 대신, 공간의 제약을 받지 않고 원격 감지가 가능한 관성

측정장치(Inertial Measurement Unit, IMU)가 활발하게 활용되고 있다. 저가 및 경량의 센서 모듈인 IMU는 신체에 쉽게 부착되어 야외와 같은 환경에서도 관절각[6-12]이나 위치[13-15]와 같은 다양한 물리량들을 추정할 수 있다는 이점을 지닌다.

관절각은 해당 관절로 연결된 인접한 두 분절 간의 상대적인 자세를 나타내며, 이를 얻기 위해서는 각 분절의 3차원 자세 정보가 요구된다. 이에 따라서 기존에는 두 분절 각각의 자세를 9축 IMU를 이용하여 추정한 후에, 두 분절의 자세를 결합하여 관절각을 결정하였다. 여기서 9축 IMU는 3축 자이로스코프, 3축 가속도계, 그리고 3축 지자기센서로 구성된다. 9축 IMU를

통한 자세 추정의 기본 절차는 자이로스코프의 각속도 신호를 스트랩다운 적분하여 자세를 예측하되[16], 각속도계와 지자기 센서 신호를 통해 기울기와 헤딩에 발생하는 표류오차를 지속적으로 보정하는 것이다. 즉, 3차원 자세의 추정을 위해서는 헤딩보정을 위하여 칼만필터(Kalman Filter)와 같은 융합 알고리즘 내에서 6축 IMU와 함께 지자기센서가 필수적으로 사용되고 있다[17-20]. 여기서 6축 IMU는 9축 IMU에서 지자기센서가 제외된 것이다.

지구자기장을 감지하는 지자기센서는 헤딩 정보를 추정함에 있어서 필수적이지만, 지구자기장뿐만이 아닌 외부 환경이나 자성체에 의한 자기장을 함께 감지하는 일명 자기교란(Magnetic Disturbance) 문제를 지닌다. 이러한 자기교란은 헤딩 추정에 있어서 오차를 발생시키는 요인으로, 이는 관절각의 정확도 저하 문제로 이어지게 된다. 헤딩의 정확도를 향상시키기 위해 칼만 필터 내에 자기교란 보상 메커니즘이 삽입되어 사용되기도 하였지만[17-20], 자기교란으로 인한 오차 발생 문제는 여전히 발생하고 있다.

이러한 문제를 갖는 지자기센서를 사용하는 대신 관절이 갖는 구속조건을 활용하는 연구들이 진행된 바 있다. Seel 등[6]은 무릎 관절을 굴절/신전이 이뤄지는 1자유도의 경첩 관절로 가정하여 무릎의 관절각을 추정하는 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 두 분절 좌표계에서 공통된 회전축과 관절중심점을 갖는다는 가정을 바탕으로 한 조건식을 활용하여 무릎의 굴절/신전 각도를 추정하였다. 또한 Müller 등[7]과 Laidig 등[8]은 두 개의 회전 축을 갖는 2자유도 관절의 회전 각도를 추정함에 있어서, 각각의 회전 축이 특정 분절 좌표계에 대해서 고정되어 있다는 조건을 활용하였다. 예로 팔꿈치 관절의 경우, 굴절/신전 축은 윗팔 좌표계에, 그리고 회내/회외 축은 아랫팔의 좌표계에 고정되어 있는 것으로 가정되었다. 참고문헌[9-12]에서는 두 분절 좌표계에서 계산된 관절중심점의 가속도가 일치해야 하는 구속 조건 식을 칼만필터와 최적화 기반 스무딩 기법 등에 적용하여 3차원 관절각을 추정하였다. 두 가지 방법 모두 동적조건에서 높은 추정 성능을 보였으나, 추정에 앞서 적절한 공분산의 선정과 바이어스 제거 등의 과정이 요구된다.

최근에는 다양한 물리량의 추정 문제에 기계학습(Machine Learning) 기술이 활발하게 적용되고 있다. 기계학습은 역학에 기반한 수학적 모델링 없이 데이터를 바탕으로 모델을 구현할 수 있으며, 학습 과정을 통하여 데이터 내에서 자동적으로 패턴을 찾아낸다는 이점을 지닌다. 이러한 기계학습 기법 중 하나인 순환 신경망(Recurrent Neural Network, RNN)은 시계열 데이터를 추정하는데 효과적으로 활용된다. 예로, Weber 등[21]은 IMU를 통해 기울기 자세 쿼터니언(Quaternion)을 추정하기 위하여 순환 신경망의 한 종류인 게이트 순환 유닛(Gated Recurrent Unit, GRU)을 적용한 방법을 개발하였다. 이 연구에서는 IMU 신호를 입력으로 자세 쿼터니언을 출력하는 모델을 구현하였으며, 다양한 데이터셋을 대상으로 한 검증 결과에서 높은 성능이 확인되었다. 순환 신경망을 활용하여 관절각을

추정하는 연구들도 진행된 바 있다. Hernandez 등[22]과 Hossain 등[23]은 합성곱 층(Convolutional Layer)과 순환 층(Recurrent Layer)을 결합한 형태의 신경망을 통하여 걷기와 달리기 등의 동작에 대한 하체 관절각을 추정하였다. Sharifi Renani 등[24]은 보행 중 고관절과 무릎의 관절각을 추정하기 위해 양방향 순환 신경망을 적용하였다. 상기 연구들은 순환 신경망을 통해 관절각을 추정하였다는 점에서 의미를 갖지만, 모두 보행과 같은 특정한 동작에 대해서만 응용 가능하다는 한계점을 지닌다. 예로 팔꿈치나 어깨 관절은 무릎 관절에 비해 더 다양한 방향의 회전이 이뤄지기 때문에, 상체의 동작에 대해서는 적용되기는 어려울 것으로 예측된다.

본 논문에서는 지자기센서를 이용하지 않고 6축 IMU만을 이용하여 3차원 관절각을 추정하는 순환 신경망 모델을 제안한다. 제안하는 신경망은 Weber 등[21]이 개발한 기울기 자세 추정용 신경망 모델을 기반으로 설계되었다. 제안방법에서는 자기교란 문제를 갖는 지자기센서를 사용하지 않고 3차원 관절각을 추정하기 위해 관절의 기구학적인 구속조건을 간접적으로 활용한다. 제안된 신경망 모델의 학습 및 검증은 기계 관절과 팔꿈치 관절을 대상으로 진행되었다.

2. 방법

2.1 관절각 추정 순환 신경망

관절각은 두 분절 좌표계 간의 상대적인 자세에 해당하며, 이를 표기하는 방법 중 하나로 쿼터니언이 있다. 예로, 고정 관성 좌표계에서 관찰된 어느 한 분절 좌표계 $\{i\}$ 의 자세를 나타내는 쿼터니언을 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\mathbf{q}_i = [q_0 \ \mathbf{e}] \quad (1)$$

여기서, q_0 는 스칼라 성분이며, $\mathbf{e} (= [q_1 \ q_2 \ q_3])$ 는 벡터 성분이다. 이와 같은 방식으로 하나의 관절로 연결된 인접한 두 분절의 좌표계 $\{i\}$ 와 $\{j\}$ 의 자세를 표현하였을 때, 두 분절 간의 상대자세를 나타내는 쿼터니언은 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{q}_{ij} = \mathbf{q}_i^{-1} \otimes \mathbf{q}_j \quad (2)$$

여기서 \otimes 는 쿼터니언 곱셈 연산자이다.

본 논문에서는 시계열 데이터의 추정 문제에 적합한 순환 신경망을 활용하여 쿼터니언 \mathbf{q}_{ij} 를 추정하고자 한다. 하지만 기본적인 순환 신경망 셀은 장기 의존성 문제를 가지기 때문에, 긴 시퀀스의 관절각 추정 문제에서는 높은 성능을 기대하기 어렵다. 이에 제안방법에서는 기존의 순환 신경망 셀을 변형시킨 장단기 메모리(Long Short-Term Memory, LSTM)를 적용한다.

순환 신경망을 통하여 관절각을 높은 성능으로 추정하기 위해서는 신경망 입력 데이터의 선정이 중요하다. 기존에는 두 분절에 부착된 IMU와 지자기센서 신호를 이용하여 각 분절의 3차원 자세를 추정한 후에 관절각을 결정하였지만, 이는 자기

교란으로 인한 부정확성 문제를 지닌다. 대신, 최근 연구에서는 IMU 신호와 구면 관절이 갖는 기구학적 구속조건을 활용하여 관절각을 추정하는 기법들이 개발된 바 있다[9-12]. 이에 활용되는 구속조건 식은 두 분절로부터 전파된 관절 중심점의 가속도가 동일해야 함을 나타내는 식에 해당하며, 이는 다음과 같다.

$$\mathbf{q}_i \otimes \mathbf{a}_{CoJ,i} \otimes \mathbf{q}_i^{-1} = \mathbf{q}_j \otimes \mathbf{a}_{CoJ,i} \otimes \mathbf{q}_j^{-1} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{a}_{CoJ,i}$ 와 $\mathbf{a}_{CoJ,i}$ 는 각각 분절 i 와 j 로부터 계산된 관절중심점의 가속도 벡터에 해당한다. 예로 분절 i 의 경우, 관절 중심 가속도는 다음과 같이 계산 가능하다.

$$\mathbf{a}_{CoJ,i} = \mathbf{a}_i + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \mathbf{s}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{s}_i) \quad (4)$$

여기서 \mathbf{a}_i 는 선형 가속도, $\boldsymbol{\omega}_i$ 는 회전 각속도, $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ 는 회전 각 가속도, 그리고 \mathbf{s}_i 는 분절 좌표계부터 관절중심점까지의 벡터 (Segment-to-Joint Vector, S2J 벡터)에 해당한다. 이 중 선형 가속도 정보는 가속도계 신호에, 그리고 회전 각속도와 각가속도 정보는 자이로스코프 신호에 포함된다. 또한 S2J 벡터는 주로 캘리브레이션을 통하여 고정 상수의 형태로 사전에 미리 결정된다[25]. 이러한 점을 바탕으로 제안방법에서는 두 분절의 IMU 신호와 S2J 벡터를 입력 데이터로 사용할 때, 구면 관절의 구속조건을 활용하는 것과 동일한 효과를 얻을 것으로 가정하였다. 이에 따라서 두 분절의 IMU 신호와 S2J 벡터를 입력 데이터로 선정하였다.

제안하는 순환 신경망은 다음과 같은 구조로 구성된다: 18차원의 입력(두 센서의 3축 가속도계 및 3축 자이로스코프 신호, 그리고 S2J 벡터)을 받는 1개의 입력층, 각각 300차원의 은닉 유닛(Hidden Unit)을 갖는 2개의 LSTM층, 은닉 유닛을 쿼터니언의 차원수인 4차원으로 감소시키는 1개의 선형층, 그리고 출력된 쿼터니언을 크기가 1인 단위 쿼터니언으로 정규화시키는 정규화층. Fig. 1은 제안하는 신경망의 구조를 보여준다. 입력층에서 6축 IMU 신호는 평균이 0, 그리고 표준편차가 1이 되도록 표준화를 시킨다.

관절각의 오차로는 실제 관절각 \mathbf{q}_{ij} 와 추정된 관절각 $\hat{\mathbf{q}}_{ij}$ 간의 상대자세 쿼터니언, 즉 오차 쿼터니언 \mathbf{q}_{err} 의 회전 각도 α_{err} 를 사용하며, 오차 쿼터니언과 회전 각도는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{q}_{err} = \mathbf{q}_{ij}^{-1} \otimes \hat{\mathbf{q}}_{ij} \quad (5)$$

$$\alpha_{err} = 2 \arccos |q_{err,0}| \quad (6)$$

여기서 $q_{err,0}$ 는 오차 쿼터니언의 스칼라 성분이다. 손실함수로는 평균 제곱 오차(Mean Squared Error, MSE)를 사용하였으며, 최적화 기법으로는 PyTorch에서 제공하는 RAdam (Rectified Adaptive Moment Estimation)과 Lookahead를 결합한 Ranger가 적용되었다. 본 연구에서 다루지는 관절각 추정과 같이 긴 시퀀스의 추정 문제에서는 시간에 따른 역전파(Backpropagation through Time, BPTT) 과정에서 기울기가 소실되거나 폭주하는 문제가 흔히 발생하게 된다. 이를 방지하기 위하여 본 방법에서는

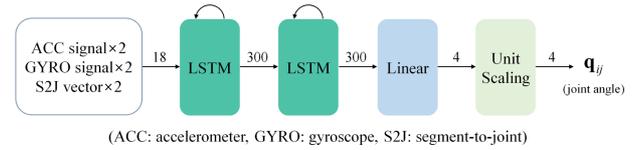


Fig. 1 Structure of the proposed network

긴 시퀀스를 적당한 길이 단위로 잘라낸 후에, 잘려진 시퀀스에서 역전파를 수행하는 Truncated-BPTT를 적용하였다.

2.2 데이터

순환 신경망의 학습 및 검증에 필요한 데이터를 수집하기 위하여 6축 IMU와 3축 지자기센서를 포함하는 센서 모듈인 MTw (Xsens Technologies B.V, Netherlands)와 광학모션캡처 시스템인 OptiTrack Flex 13 (Natural Point, USA)을 사용하였다. 이때 기계 관절과 신체 관절에 대한 학습/검증을 위하여, 구면 관절로 연결된 2링크 시스템과 팔꿈치 관절로 연결된 윗팔-아랫팔을 대상으로 진행된 실험 데이터가 사용되었다. Figs. 2(a)와 2(b)는 각각 기계 관절과 신체 관절에 대한 실험 설정을 보여준다. 기계 관절의 경우, 볼-소켓 관절로 연결된 두 개의 모노포드 (Horusbennu, Korea)가 사용되었으며, 각 링크마다 한 개의 MTw와 세 개의 광학 마커가 고정된 삼각자를 부착하였다(Fig. 2(a) 참조). 팔꿈치 관절의 경우, 세 개의 광학 마커가 고정된 마커 클러스터 위에 MTw를 고정시킨 상태로, 벨크로 밴드를 이용하여 윗팔과 아랫팔에 부착하였다(Fig. 2(b) 참조). Fig. 2는 기계 및 팔꿈치 관절에 대한 실험 환경을 보여준다. 두 시스템의 데이터는 모두 100 Hz로 샘플링 되었으며, 두 시스템 간의 각속도 크기 비교를 통하여 시간 동기화를 진행하였다.

기계 관절 데이터로는 본 연구실에서 이전에 수행되었던 실험 데이터를 사용하였다[9,12,26]. 데이터의 총 개수는 78개이며, 이는 총 6개 날짜에 대한 실험 데이터에 해당한다. 모든 실험은 180초 동안 각 링크의 말단부를 양쪽에서 손으로 잡고 임의의 다양한 방향으로 회전시키면서 진행되었으며, 실험 중에 주기적인 자기교란이 주어졌다. 각 날짜의 실험마다 센서의 부착 위치가 조금씩 달라졌으며, 이에 따라서 S2J 벡터 또한 다르게 결정되었다. 이 중 4개 날짜에 대한 데이터(60개)를 학습 데이터로 사용하였다.

팔꿈치 관절 실험에서는 제안 방법의 개념 검증 단계로써 3명(나이: 27.6±0.6세, 키: 1.76±0.04 m, 무게: 84.3±13.6 kg)의 건강한 남성 피험자를 대상으로 실험을 진행하였다. 실험 동작으로는 팔꿈치 관절의 다양한 회전이 나타나도록 다음과 같은 6 가지 동작을 수행하였다: (Test 1) 팔꿈치 굽히기, (Test 2) 팔꿈치 굽히면서 손목 회전, (Test 3) 정면에 도형 그리기, (Test 4) 수평면 상에 도형 그리기, (Test 5) 배드민턴 동작, (Test 6) 주먹 휘두르기. 이 중 Test 1부터 4는 메트로놈을 이용하여 동작을 일정 주기(1.5초)로 반복하도록 하였으며, 자기교란을 가하지 않는 경우(Test 1부터 4-1)와 가하는 경우 (Test 1부터 4-2)로 나누어 실험을 진행하였다. 자기교란 조건에서는 실험 중

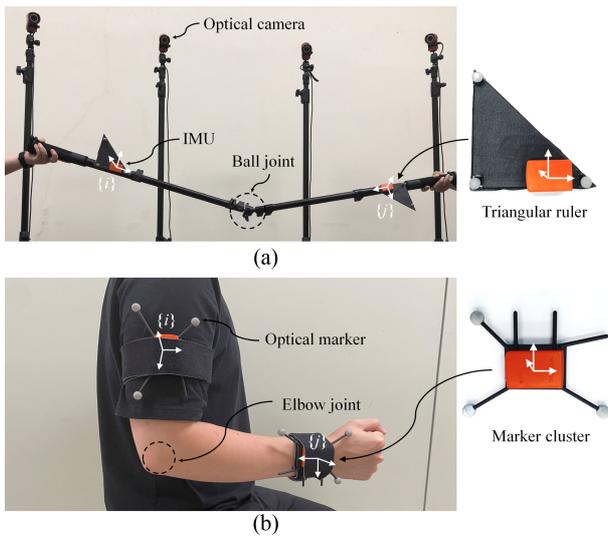


Fig. 2 Experimental setup for (a) mechanical and (b) elbow joint

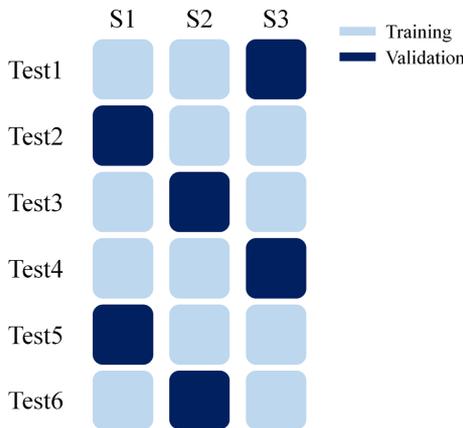


Fig. 3 Training and validation data for human elbow joint tests

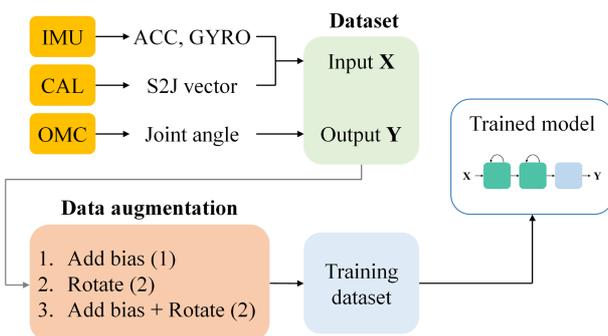


Fig. 4 Training procedure (CAL: calibration, OMC: optical motion capture)

30-60초 구간에 강자성체의 드라이버를 이용하여 윗팔에 부착된 센서에 자기교란을 가하였다. Test 5와 6은 보통의 속도(Test 5, 6-1)와 빠른 속도(Test 5, 6-2)로 나누어 진행하였으며, 피험자가 원하는 자세와 속도로 동작을 수행하도록 하였다. 각 동작의 실험들은 90초 동안 진행되었다.

신경망의 학습 데이터는 Fig. 3에서 표현된 것과 같이 선정되었으며, 추가적으로 신경망 모델의 성능을 보다 더 향상시키기 위하여 다음과 같은 데이터 증강을 수행하였다: (1) 자이로스코프 신호에 임의의 바이어스 추가, (2) 센서 좌표계를 임의의 방향으로 회전, (3) 바이어스가 추가된 데이터에서 센서 좌표계를 임의의 방향으로 회전. 여기서 첫번째는 1번씩, 그리고 두번째와 세번째는 2번씩 적용되어, 원 데이터를 포함한 학습 데이터의 양이 총 6배로 증가되었다. Fig. 4는 순환 신경망의 전체적인 학습 과정을 보여준다.

2.3 검증방법

제한하는 신경망의 성능 검증을 위하여 두 가지의 관절각 추정법과 제안방법의 추정 성능을 함께 비교 분석하였다. 첫번째 방법(Method 1)은 가속도 보상 메커니즘이 삽입된 칼만필터를 통해 각 분절의 기울기 자세를 추정한 후에, 자이로스코프 신호의 스트랩다운 적분을 통하여 두 분절의 헤딩을 추정하는 방법이다. 두번째 방법(Method 2)은 6축 IMU와 3축 지자기센서 신호를 사용하여 각 분절의 3차원 자세를 추정하는 칼만필터[18]로, Method 1에 헤딩의 보정 단계를 추가한 것에 해당한다. 이때 두가지 방법 모두 자이로스코프 신호에서 바이어스 오차를 제거한 상태로 사용되었다.

이에 더하여 신경망에서 지자기센서 신호를 사용할 때 관절각의 추정 성능에 어떠한 영향을 끼치는지 확인하기 위해, 6축 IMU 신호만을 사용하는 제안된 신경망 모델(Model 1)과 3축 지자기센서를 포함한 9축 IMU 신호를 사용하는 두 가지 모델 (Models 2, 3)을 구현하고 비교 분석하였다. 이때 Model 2는 9축 IMU 신호를, 그리고 Model 3은 9축 IMU 신호와 S2J 벡터를 입력으로 사용한다.

검증 데이터로 기계 관절과 팔꿈치 관절에 대해 각각 8개와 12개 시행의 데이터를 사용하였다. 기계 관절의 경우에는 평균 가속도가 약 1.03 m/s²인 보통 속도의 실험 데이터(Normal) 4개와 평균 가속도가 약 2.28 m/s²인 빠른 속도의 실험 데이터(Fast) 4개가 사용되었다. 이때 검증 데이터는 학습에 사용된 데이터와 다른 날짜의 실험 데이터에 해당한다. 팔꿈치 관절의 경우, 6가지의 동작에 대한 데이터 중 학습에 사용되지 않은 피험자의 데이터를 검증에 사용하였다. 관절각의 추정 성능은 오차 쿼터니언의 회전 각도 α_{err} 의 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, RMSE)를 이용하여 평가되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 검증 결과

Tables 1과 2는 각각 기계 관절과 팔꿈치 관절에 대한 세 가지 비교방법의 추정 RMSE 결과를 보여준다. Table 3에서는 기계/팔꿈치 관절에 대한 3개의 신경망 모델의 평균 RMSE와 표준편차를 보여준다. Figs. 5와 6은 각각 기계 관절과 팔꿈치

Table 1 Averaged RMSE of joint angle estimation for mechanical joint data (unit: deg)

Test (Trial)	Method 1	Method 2	Proposed
Normal (1)	10.31	9.30	2.97
Normal (2)	4.46	7.55	3.50
Normal (3)	11.75	7.51	3.24
Normal (4)	4.60	9.55	4.80
Fast (1)	15.02	9.66	3.47
Fast (2)	14.02	10.06	3.45
Fast (3)	7.57	9.69	3.37
Fast (4)	12.38	11.30	3.05
Average	10.01	9.32	3.48

Table 2 Averaged RMSE of joint angle estimation for elbow joint data (unit: deg)

Test	Method 1	Method 2	Proposed
Test 1-1	10.98	20.61	8.93
Test 1-2	32.38	24.94	11.08
Test 2-1	46.25	8.42	3.72
Test 2-2	41.49	15.13	3.98
Test 3-1	3.04	15.97	8.17
Test 3-2	3.82	21.46	6.61
Test 4-1	2.61	3.77	6.05
Test 4-2	2.38	34.46	6.72
Test 5-1	6.34	10.34	8.87
Test 5-2	22.12	37.21	9.29
Test 6-1	44.43	9.22	4.87
Test 6-2	39.40	16.84	10.41
Average	21.27	18.20	7.39

Table 3 Comparison of averaged RMSE and standard deviation according to the model

	Model 1 (Proposed)	Model 2	Model 3
Mechanical	3.48 (0.57)	8.86 (6.60)	9.13 (7.24)
Elbow	7.39 (2.45)	9.26 (7.41)	7.93 (5.88)

관절 데이터 중 하나에 대한 추정 결과 그래프로, 자기교란의 크기와 함께 추정 방법별 성능 비교, 그리고 모델별 성능 비교를 나타낸다.

기계 관절 데이터의 경우, 대부분의 결과에서 제안된 신경망의 성능이 다른 두 방법에 비해서 우수하였다. 특히 고속조건의 실험 데이터에서도 추정 RMSE가 4° 이내로 나타났다. 반면에 Method 1과 2는 평균 RMSE가 각각 12.73°와 9.11°로 높은 수준의 오차가 발생한 것을 확인하였다. 이 중 Fast의 Trial 1에 대한 결과에서 Method 1은 시간의 진행에 따라서 오차가 약 20°까지 지속적으로 증가하는 모습을 보였으며, Method 2는

자기교란이 주어지는 구간에서 오차가 증가하는 경향을 보였다. 제안방법 또한 일정 수준의 추정 오차를 보였지만, 시간 진행에 따른 표류오차 발생이나 자기교란의 영향과는 무관한 모습을 보였다.

팔꿈치 관절의 결과에서는 제안방법이 기계 관절의 결과에 비해서 큰 수준의 오차를 보였다. 예로, 기계 관절 데이터에서는, 제안방법의 평균 RMSE가 3.48°인 반면, 팔꿈치 관절에서는 7.39°로 약 4° 가량 높은 오차를 보였다. 그럼에도 기존 방법인 Method 1과 2에 비해서 비교적 우수한 성능을 보였다. 이 중 Test 1-2의 경우, Fig. 5의 결과와 유사하게 Method 1과 2는 각각 표류오차와 자기교란으로 인한 오차가 발생하는 반면에 제안방법은 높은 성능으로 추정되는 모습이 확인되었다.

3.2 고찰

Method 1의 경우, 각 분절의 헤딩이 각속도 신호의 적분만을 통해 추정되기 때문에 자이로스코프 신호 내의 센서 잡음과 같은 오차 성분에 매우 취약하다. 그로 인하여, 사전에 자이로스코프 신호에서 바이어스 오차를 제거하였음에도 큰 수준의 표류 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 일부 결과에서는 Method 1이 우수한 성능을 보였는데, 예로 Test 3과 4의 결과에서 Method 1의 RMSE가 평균 2.96°로 작은 수준의 오차를 보였다. 이는 센서 신호 내 오차 성분의 영향을 거의 받지 않았음을 나타낸다. 기계식/신체 관절에 대한 실험 시간이 각각 180초와 90초라는 점을 고려하였을 때, 센서 신호 내 오차 성분이 작은 경우에는 충분히 높은 성능을 나타낼 수 있을 것으로 추측된다. 그럼에도 Method 1은 헤딩 정보를 보정할 수 있는 수단이 없기 때문에, 표류오차가 발생하게 되면 오차를 제거하지 못한다는 한계점을 갖는다.

Method 2는 헤딩을 추정함에 있어서 지자기센서 신호를 사용하지 않으므로 헤딩 정보를 보정할 수 있지만, 자기교란으로 인한 영향의 발생이 불가피하다. 이러한 영향을 보상하기 위해 자기교란 보상 메커니즘이 칼만필터에 삽입되어 사용되지만, 이는 적절한 공분산과 파라미터 설정이 요구된다. 즉, 두 가지 비교방법의 추정 성능은 정교한 바이어스 오차 제거와 파라미터의 조정에 의존한다. 반면에 제안된 신경망은 바이어스 오차의 제거 없이 사용 가능하며, 모델이 구현되고 나면 추가적인 파라미터의 선정이 필요하지 않다는 이점을 지닌다.

6축 IMU 신호를 사용하는 제안된 신경망 모델과 지자기센서까지 포함된 9축 IMU 신호를 사용하는 두 가지 모델을 함께 비교하였을 때, 제안된 모델이 비교적 우수하였으나, 팔꿈치 관절 데이터에서는 우세폭이 작은 것을 확인하였다. 기계 관절의 경우에는 Model 2와 3 대비 제안방법의 우세폭이 5° 이상인 반면, 팔꿈치 관절에서는 2° 이내로 나타났다. Figs. 5와 6에서는 Model 2와 3의 오차가 자기교란이 발생하는 구간에서 크게 증가하는 모습을 보였다. 특히, Fig. 5의 결과에서는 오차가 50° 이상 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 지자기센서 신호를 입력 신호로 사용할 때, 매우 큰 수준의 부정확성이 발생할 수

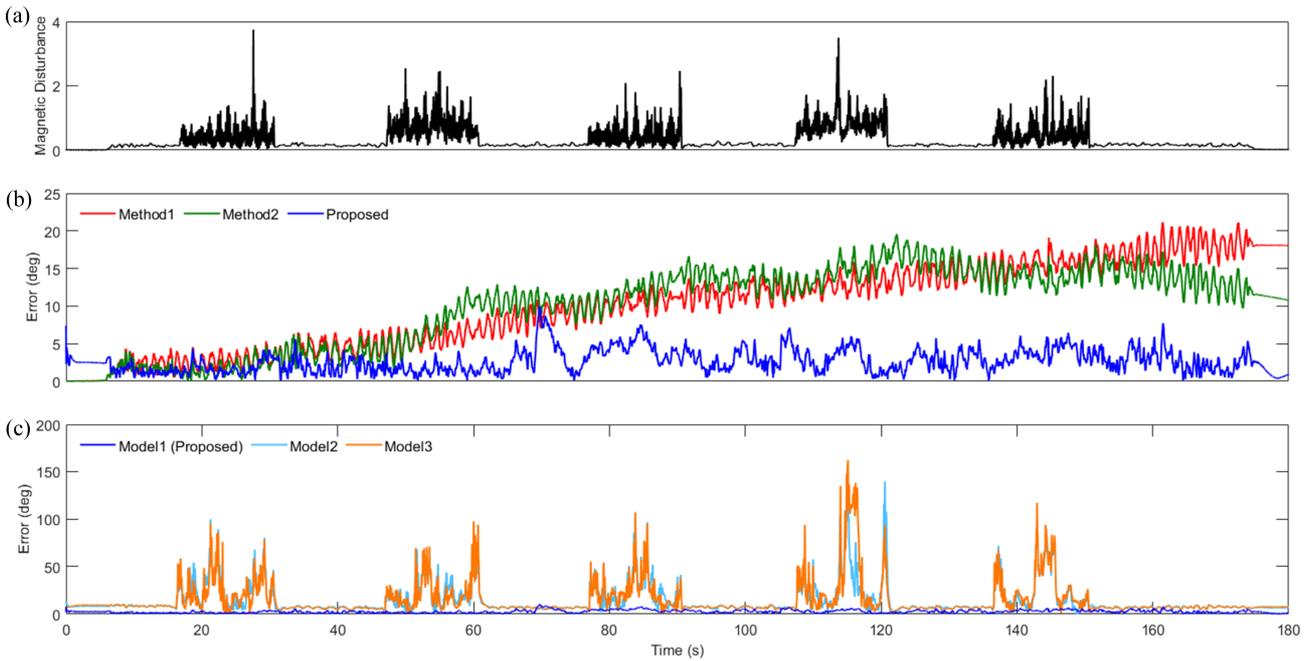


Fig. 5 Result of Fast (4) in mechanical joint tests: (a) Magnitude of magnetic disturbance, (b) Estimation errors from Method 1 (Red), Method 2 (Green), and Proposed (Blue), (c) Estimation errors from Model 1 (Blue), Model 2 (Sky blue), and Model 3 (Orange)

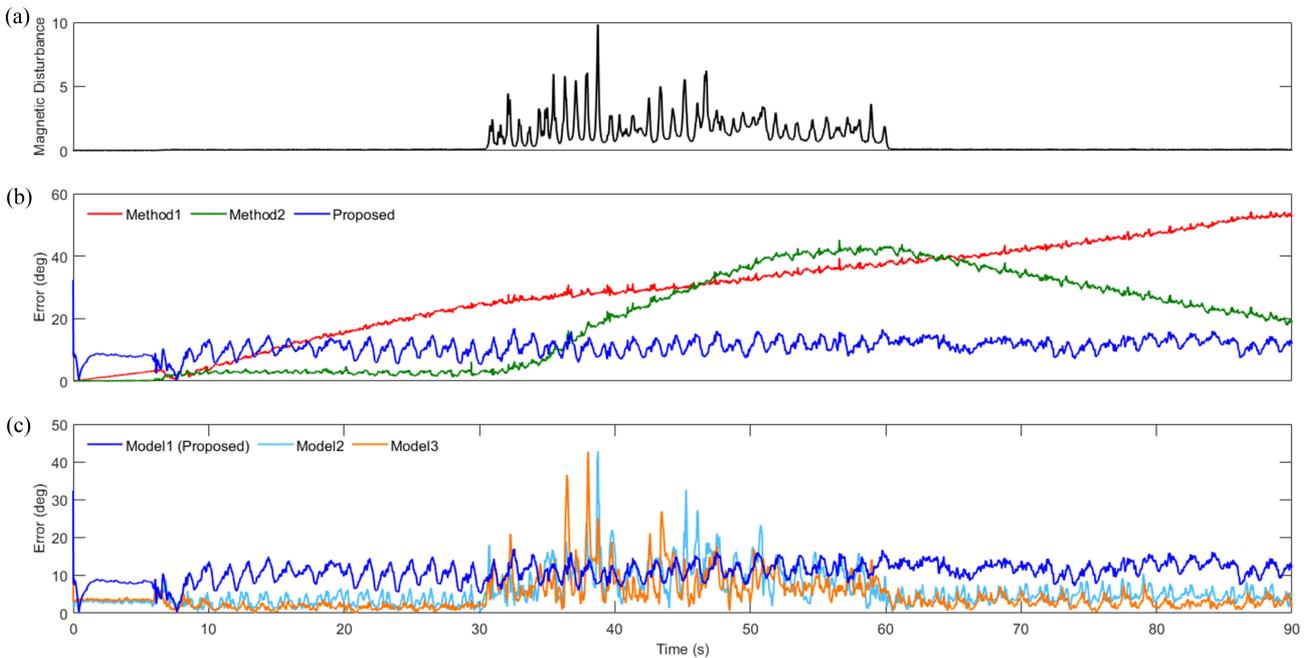


Fig. 6 Result of Test 1-2 in elbow joint test: (a) Magnitude of magnetic disturbance, (b) Estimation errors from Method 1 (Red), Method 2 (Green), and Proposed (Blue), (c) Estimation errors from Model 1 (Blue), Model 2 (Sky blue), and Model 3 (Orange)

있음을 나타낸다. 다만 팔꿈치 관절의 데이터에서는 자기교란이 주어지지 않는 구간에서 오히려 Model 2와 3이 제안된 모델에 비해서 높은 성능을 나타나는 것을 확인하였다. 그럼에도 두 모델은 자기교란이라는 오차 발생의 요소를 갖는 반면에, 제안된 모델은 지자기센서 신호를 사용하지 않고도 3차원 관절각 추정이 가능하다는 점에서 의미가 있다고 볼 수 있다.

제안방법에서는 6축 IMU 신호와 S2J 벡터를 입력 변수로 사용함으로써 관절의 기구학적 구속조건을 간접적으로 사용하였다. 다만, 식(3)의 구속조건 식은 분절이 강체이며 관절이 구면 관절이라는 가정에 기반하기 때문에, 신체 관절에서는 유효하게 적용되기 어렵다. 신체 관절은 볼-소켓 관절과 같은 기계식 구면 관절과 다르게, 근육이나 연골과 같은 연조직으로 구성되어 있기

때문에, 관절중심점이 뚜렷하게 존재하지 않는다. 이러한 요인으로 두 분절로부터 관절중심으로 전파된 가속도는 일치하지 않아, 구속조건이 명확하게 성립되지 않게 된다[10,11]. 이러한 불확실성의 요소로 인하여, 제안된 신경망 모델이 기계 관절 대비 신체 관절의 결과에서 저하된 수준의 성능을 보였을 것으로 추측된다. 또한 구속조건 식은 두 분절로부터 관절 중심점으로 전파된 가속도에 대한 식이기 때문에, 관절중심점의 가속도가 발생하는 동적 조건에서만 유효하다. 즉, 정적인 상태에서는 구속조건이 작동되지 않기 때문에 추정 성능이 저하될 수 있다는 한계점을 지닌다. 단, 본 연구의 목적은 지자기센서 없이 6축 IMU 신호만을 사용하여 3차원 관절각을 추정하는 모델의 구현 가능성을 확인하기 위한 것으로, 연구 결과를 통해 제안된 모델이 동적조건에서 효과를 보였다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 순환 신경망을 활용하여 6축 IMU를 기반으로 3차원 관절각을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안하는 신경망 모델은 각 분절의 3차원 자세 추정에 필요한 3축 지자기센서를 사용하는 대신 관절의 기구학적인 구속조건을 간접적으로 활용하였다. 제안방법의 성능 검증은 기계 관절과 팔꿈치 관절을 대상으로 이뤄졌다. 본 연구의 결과는 제안방법이 기계 관절과 신체 관절 모두에서 기존 방법 대비 우수한 성능을 보였으며, 무엇보다 지자기센서 없이 6축 IMU 신호만으로 3차원 관절각을 도출하는 순환 신경망의 구성이 가능하다는 점을 보여준다. 제안방법의 오차가 기계 관절의 결과(평균 3.48°)에 비해 팔꿈치 관절의 결과(평균 7.39°)에서 크게 발생한 것은 연조직 변형 등에 기인한 구속조건 불확실성에 따른 결과라 할 수 있다. 단, 본 연구에서는 제안방법의 개념검증 단계로써 3명의 피험자에 대해서만 검증이 이뤄졌다. 이에 따라서 추후 연구에서는 보다 더 다양한 피험자를 대상으로 한 실험을 통하여 신경망 모델의 성능 향상을 구현하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(No. 2018R1D1A1B07042791)의 지원을 받아 수행됨.

REFERENCES

1. El-Gohary, M., Pearson, S., McNames, J., Mancini, M., Horak, F., Mellone, S., Chiari, L., (2014), Continuous monitoring of turning in patients with movement disability, *Sensors*, 14(1), 356-

369.
 2. Díaz, S., Stephenson, J. B., Labrador, M. A., (2019), Use of wearable sensor technology in gait, balance, and range of motion analysis, *Applied Sciences*, 10(1), 234.
 3. Lee, M., Park, S., (2020), Estimation of three-dimensional lower limb kinetics data during walking using machine learning from a single IMU attached to the sacrum, *Sensors*, 20(21), 6277.
 4. Lee, T., Kim, I., Lee, S.-H., (2021), Estimation of the continuous walking angle of knee and ankle (Talocrural joint, subtalar joint) of a lower-limb exoskeleton robot using a neural network, *Sensors*, 21(8), 2807.
 5. Lee, B. J., Kim, G. T., Kim, H. C., Shin, Y. J., (2019), Static and dynamic friction characteristics analysis of actuation module for friction compensation of exoskeleton robot, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 36(10), 929-935.
 6. Seel, T., Raisch, J., Schauer, T., (2014), IMU-based joint angle measurement for gait analysis, *Sensors*, 14(4), 6891-6909.
 7. Müller, P., Bégin, M.-A., Schauer, T., Seel, T., (2016), Alignment-free, self-calibrating elbow angles measurement using inertial sensors, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 21(2), 312-319.
 8. Laidig, D., Lehmann, D., Bégin, M.-A., Seel, T., (2019), Magnetometer-free realtime inertial motion tracking by exploitation of kinematic constraints in 2-dof joints, *Proceedings of the 2019 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 1233-1238.
 9. Lee, J. K., Jeon, T. H., (2019), Magnetic condition-independent 3D joint angle estimation using inertial sensors and kinematic constraints, *Sensors*, 19(24), 5522.
 10. Weygers, I., Kok, M., De Vroey, H., Verbeest, T., Versteyhe, M., Hallez, H., Claeys, K., (2020), Drift-free inertial sensor-based joint kinematics for long-term arbitrary movements, *IEEE Sensors Journal*, 20(14), 7969-7979.
 11. Fasel, B., Spörri, J., Schütz, P., Lorenzetti, S., Aminian, K., (2017), Validation of functional calibration and strap-down joint drift correction for computing 3D joint angles of knee, hip, and trunk in alpine skiing, *PLoS One*, 12(7), e0181446.
 12. Lee, C. J. and Lee, J. K., (2020), Drift reduction in IMU-based joint angle estimation for dynamic motion-involved sports applications, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(7), 539-546.
 13. Kuang, J., Niu, X., Chen, X., (2018), Robust pedestrian dead reckoning based on MEMS-IMU for smartphones, *Sensors*, 18(5), 1391.
 14. McGrath, T., Stirling, L., (2020), Body-worn IMU human skeletal pose estimation using a factor graph-based optimization framework, *Sensors*, 20(23), 6887.
 15. Lee, C. J., Lee, J. K., (2022), Wearable IMMU-based relative

position estimation between body segments via time-varying segment-to-joint vectors, *Sensors*, 22(6), 2149.

16. Sabatini, A. M., (2005), Quaternion-based strap-down integration method for applications of inertial sensing to gait analysis, *Medical and Biological Engineering and Computing*, 43, 94-101.
17. Lee, J., Lim, J., Lee, J., (2017), Compensated heading angles for outdoor mobile robots in magnetically disturbed environment, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(2), 1408-1419.
18. Ligorio, G., Sabatini, A. M., (2015), A linear Kalman Filtering-based approach for 3D orientation estimation from Magnetic/ Inertial sensors, *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, 77-82.
19. Lee, J. K., (2019), A parallel attitude-heading Kalman filter without state-augmentation of model-based disturbance components, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(7), 2668-2670.
20. Farahan, S. B., Machado, J. J., de Almeida, F. G., Tavares, J. M. R., (2022), 9-DOF IMU-based attitude and heading estimation using an extended kalman filter with bias consideration, *Sensors*, 22(9), 3416.
21. Weber, D., Gühmann, C., Seel, T., (2021), RIANN-A robust neural network outperforms attitude estimation filters, *Ai*, 2(3), 444-463.
22. Hernandez, V., Dadkhah, D., Babakeshizadeh, V., Kulić, D., (2021), Lower body kinematics estimation from wearable sensors for walking and running: A deep learning approach, *Gait & Posture*, 83, 185-193.
23. Hossain, M. S. B., Dranetz, J., Choi, H., Guo, Z., (2022), Deepbbwae-net: A cnn-rnn based deep superlearner for estimating lower extremity sagittal plane joint kinematics using shoe-mounted imu sensors in daily living, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 26(8), 3906-3917.
24. Sharifi Renani, M., Eustace, A. M., Myers, C. A., Clary, C. W., (2021), The use of synthetic imu signals in the training of deep learning models significantly improves the accuracy of joint kinematic predictions, *Sensors*, 21(17), 5876.
25. Seel, T., Schauer, T., Raisch, J., (2012), Joint axis and position estimation from inertial measurement data by exploiting kinematic constraints, *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Control Applications*, 45-49.
26. Lee, J. K., Jeon, T. H., Jung, W. C., (2020), Constraint-augmented Kalman filter for magnetometer-free 3D joint angle determination, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18(11), 2929-2942.



Chang June Lee

Ph.D. candidate in the Department of Integrated Systems Engineering, Hankyong National University. His research interests include IMU-based human motion tracking and joint torque estimation as well as wearable robotics.

E-mail: cjlee@hknu.ac.kr



Woo Jae Kim

B.Sc. in the Department of Mechanical Engineering, Hankyong National University. His research interests include IMU-based human motion tracking.

E-mail: kwj2241@hknu.ac.kr



Jung Keun Lee

Professor in the School of ICT, Robotics and Mechanical Engineering, Hankyong National University. His research interests include inertial sensing-based human motion tracking, biomechanics, wearable sensor applications, and data-driven estimation.

E-mail: jklee@hknu.ac.kr

밀폐형 공압회로 내 정밀압력제어를 위한 기계 구동식 가스 압력제어기의 제어특성 평가

Control Characteristics of a Mechanically Driven Gas Pressure Controller for a Closed Pneumatic Circuit

박청용¹, 정옥철^{1,2,#}
Cheongyong Park¹ and Wukchul Joung^{1,2,#}

¹ 부경대학교 대학원 지능로봇공학과 (Department of Intelligent Robot Engineering, Graduate School, Pukyong National University)

² 부경대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pukyong National University)

Corresponding Author / E-mail: wukchuljoung@pknu.ac.kr, TEL: +82-51-629-6132

ORCID: 0000-0001-8014-2647

KEYWORDS: Closed pneumatic circuit (밀폐형 공압회로), Gas pressure controller (가스 압력제어기), Proportional control (비례 제어), Proportional integral control (비례 적분 제어), Mechanically driven gas pressure controller (기계 구동식 가스 압력제어기)

In this work, precise gas pressure control based on a closed pneumatic circuit was achieved with a mechanically driven gas pressure controller (MDGPC), consisting of a variable-volume bellows chamber and linear actuator. The linear actuator was employed to change an axial dimension of the bellows chamber with the proportional (P) and proportional-integral (PI) controls for fast, stable, and precise pressure control of the gas inside the bellows chamber. The pressure control stability and resolution of the MDGPC were approximately 1.5 Pa and 10 Pa for the P control and 1 Pa and 5 Pa for the PI control, respectively. Despite the more stable and precise control characteristics of the PI control method, overshoots and undershoots observed during the set-point pressure changes and recoveries from pressure disturbances rendered it unsuitable for the MDGPC control method. In contrast, the MDGPC operated under the P control did not show any significant overshoots or undershoots when the set-point pressure abruptly changed or when the MDGPC was exposed to pressure disturbances. Therefore, it was concluded that a fast, precise, and stable gas pressure control in a closed manner was attainable with the MDGPC under the P control.

Manuscript received: October 21, 2022 / Accepted: December 21, 2022
This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2022

NOMENCLATURE

t	=	Time
m	=	Manipulated Variable
K_P	=	Coefficient for the Proportional Term (P gain)
K_I	=	Coefficient for the Integral Term (I gain)
K_D	=	Coefficient for the Derivative Term (D gain)
e	=	Steady-State Error
l_0	=	Initial Axial Dimension of the Bellows Chamber
σ_p	=	Stability of the Controlled Gas Pressure

Δt_{ext}	=	External Temperature Change
Δp_{cont}	=	Magnitude of the Pressure Change
Δp_{dist}	=	Magnitude of the Pressure Disturbance

1. 서론

정밀 가스 압력제어는 첨단 산업분야의 필수 공정제어 기술이며, 공정 자동화로부터 항공기 내부 환경조절시스템 제어에

이르기까지 다양한 산업 분야에서 수요가 증가하고 있다[1]. 특히, 정밀 가스 압력제어를 달성할 수 있는 가스압력제어기(Gas Pressure Controller, GPC)는 위 산업분야에서의 응용에 더해 압력 및 관련 물리량 측정기의 정밀 교정 및 시험 수행을 위한 필수 장비로 사용되고 있으며[2,3], 이에 따라 GPC의 구성 및 최적 제어에 대한 관련 산업의 관심이 고조되고 있다. 이러한 GPC의 가스 압력제어 방식은 제어회로의 개폐여부에 따라 외부의 압력소스 또는 싱크를 이용하는 개방형 공압회로 압력제어(Open Pneumatic Circuit Control)와 별도의 압력소스와 싱크가 존재하지 않는 밀폐형 공압회로 압력제어(Closed Pneumatic Circuit Control)로 분류된다[4].

개방형 공압회로 압력제어 관련 연구는 제어기 특성에 따라 다양한 방향으로 진행되었으며, 접속부의 전달특성 변화를 보상하는 강건 압력제어가 가능한 제어기 설계 관련 연구들이 주요하게 수행된 바 있으며[5-7], 이와 관련하여 구동 밸브의 에너지 손실과 열적 민감성을 보완하기 위한 압전 구동기 기반 압력 조절기[8] 및 응답특성 보안을 위한 PID-PWM (Proportional Integral Derivative-Pulse Width Modulation) 제어기와 관련된 연구가 진행된 바 있다[9,10]. 또한, 기화된 액화천연가스의 압력제어 중 외란에 대해 압력제어 안정도를 향상시킬 수 있는 압력변화 보상 제어기 설계와 관련된 연구들 역시 진행된 바 있다[11,12]. 다만, 개방형 공압회로 압력제어는 제어의 편리성에도 불구하고 별도의 압력소스와 싱크 구성이 어려운 환경에서 적용에 제약을 받는다는 한계를 가져, 이를 극복할 수 있는 밀폐형 공압회로 압력제어에 대한 필요성 역시 다양한 분야에서 제기되었다.

밀폐형 공압회로 압력제어 관련 연구로는 체내 일정유량 혈액 순환을 위한 밀폐형 공압회로 기반 공압 펌프[4,13]와 병원균 유출에 따른 감염을 방지한 코로나 감염자용 산소공급기[14] 개발 관련 연구가 진행된 바 있으나, 이들 연구는 유체의 유량 제어가 주 목적이며 밀폐형 공압회로 내 가스 압력제어와 관련된 연구는 수행된 예가 많지 않다. 특히, 압력제어를 통해 정밀 온도제어를 구현하는 압력제어식 온도제어(Pneumatic Temperature Control) [15,16]나 잉크젯 프린팅 기반 디스플레이 생산 공정 [17,18]과 같이 수십Pa 수준의 압력 안정도를 요하는 응용분야에 대해 밀폐형 공압회로를 적용한 정밀 가스 압력제어 관련 연구는 현재까지 보고된 바가 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 밀폐형 공압회로 압력제어 방식을 적용하여 수십Pa 수준의 압력제어 안정도를 달성할 수 있는 가스 압력제어기술을 확립하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 축방향 길이변화가 가능한 용접 주름관(Welded-Bellows) 형태의 가변체적형 챔버와 선형 구동기(Linear Actuator)로 구성된 기계 구동식 가스 압력제어기(Mechanically Driven Gas Pressure Controller, MDGPC)를 개발하였으며, 가변체적형 챔버의 축길이와 연동된 선형 구동기 구동축의 변위제어는 압력 외란에 대한 강건성 확보를 위해 미분 제어(Derivative Control)를 제외한 비례 제어(Proportional Control, P제어) 및 비례-적분 제어(Proportional-Integral Control, PI제어)를 적용하여 밀폐형 공압회로

내 고속-정밀 압력제어를 구현하고자 하였다. 이와 같이 개발된 MDGPC의 압력제어 특성은 압력제어 안정도, 분해능, 순간 압력제어 특성, 압력외란에 대한 회복 능력 측면에서 평가하였으며, MDGPC 기반 정밀 가스압력제어를 달성하기 위한 최적 제어방식을 도출하고자 하였다.

본 논문에서는 MDGPC의 제어방식에 대한 이론적 배경을 2장에서 소개하고, 3장에서 MDGPC의 제작 및 최적 제어이득 선정 결과 및 압력제어특성 평가를 위한 시험방법을 소개한다. 4장에서는 MDGPC의 압력제어특성 시험결과를 제시하고, 마지막으로 5장에서 본 연구의 결론을 요약하여 제시한다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 압력 피드백을 갖는 선형 구동기 구동축 변위 제어를 통해 구동축과 연결된 가변체적형 챔버의 축방향 길이 변화에 따른 체적변화를 유도하고, 이를 통해 챔버 내부 가스압력을 제어하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 단순하면서도 효과적인 제어특성으로 인해 다양한 산업 및 공학 시스템에서 널리 사용되는 PID 제어[19,20]의 각 제어성분을 적용하여 선형 구동기 구동축 변위제어를 수행함으로써 밀폐형 공압회로 방식의 정밀-고속 가스 압력제어를 달성하고자 하였다.

PID 제어는 비례(Proportional) 성분, 적분(Integral) 성분, 미분(Derivative) 성분의 제어성분을 조합하여 목표값(Set-Point Value)과 측정값(Process Value)의 차인 제어오차(Error, $e(t)$)에 대해 조작변수(Manipulated Variable, $m(t)$) 값을 결정하는 제어이다[21]. 이러한 PID제어는 각 제어 성분의 조합을 통해 제어 방식이 결정되며, 대표적으로 P제어, PI제어, PID제어가 사용된다. P제어는 제어대상의 제어오차에 비례하는 값을 제어기에 조작 변수로 입력하는 제어이며, P제어를 통해 결정된 조작변수는 아래의 식(1)과 같이 비례 성분에 대한 제어이득(K_p)을 이용하여 표현된다.

$$m(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

이러한 P제어는 일반적인 단순 온-오프 제어 대비 부드럽고 빠른 제어가 가능하나, 제어오차에 비례하는 값을 조작변수로 지속 입력하므로 측정값이 목표값에 근접할 시 미세한 정상상태 오차(Steady-State Error)가 유지되는 특성을 가진다[21]. 이러한 P제어의 한계를 극복하기 위해 제안된 제어방식이 PI제어이다. PI제어는 제어오차의 비례 성분과 시계열 적분 성분을 조작변수 결정에 사용하며, PI제어를 통해 결정된 조작변수는 아래의 식(2)와 같이 비례 성분에 대한 제어이득(K_p) 및 적분 성분에 대한 제어이득(K_I)을 이용하여 표현된다.

$$m(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

이러한 PI제어는 제어오차의 적분값을 조작변수에 지속적으로

더해주므로 정상상태 오차를 줄이는 장점을 가지나, 외란이 발생할 경우 회복에 일정 시간이 요구되어 P제어 대비 느린 제어가 이루어질 수 있다[21]. 이와 같은 PI제어의 단점을 해결하기 위해 제시된 PID제어는 제어오차의 비례 성분과 적분 성분에 미분 성분을 더해 조작변수를 결정한다. PID제어를 이용하여 결정된 조작변수는 식(3)과 같이 비례, 적분, 및 미분 성분에 대한 제어이득(K_p, K_I, K_D)을 이용하여 표현된다.

$$m(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (3)$$

PID제어의 미분 성분은 제어오차의 현재 기울기를 외삽하여 계산하므로 시스템의 응답속도를 빠르게 하고 안정성에 기여할 수 있으나, 고주파 외란이 시스템 제어에 직접적 영향을 미칠 경우 외란을 증폭시켜 시스템의 불안정을 악화시킬 수 있다 [20]. 이러한 미분 성분의 특성으로 인해 본 연구에서 제작된 가스 압력제어기와 같이 가스 압력변화 등의 외란이 시스템에 직접적인 영향을 미치는 분야에서는 일반적으로 미분 제어를 사용하지 않는다[21].

이에 따라 본 연구에서는 가변체적형 챔버의 축방향 길이 제어를 위해 D제어를 제외한 P제어 및 PI제어를 적용하여 챔버 내부가스의 압력제어를 수행하고자 하였다. P제어 및 PI제어는 각 성분의 제어이득 선정에 따라 압력제어 특성이 크게 변할 수 있으므로, 전체 공압회로의 동특성을 기반으로 그에 맞는 최적 제어이득 선정이 요구된다. 이에 본 연구에서는 개발된 MDGPC의 고속·정밀 가스압력제어 달성을 위해 P제어 및 PI제어에 대한 최적 제어이득을 선정 한 후, 이를 적용한 MDGPC의 압력제어특성을 평가하고자 하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구에서는 밀폐형 공압회로 기반 정밀 가스압력제어를 달성하기 위해 가변체적형 챔버 및 선형 구동기로 이루어진 MDGPC를 제작하였다. MDGPC에 사용된 가변체적형 챔버는 0.02 mm 두께의 스테인리스 스틸 용접 주름관으로 제작하였으며, 축방향 길이 변화에 의한 체적변화를 통해 내부 압력변화가 유도되도록 설계하였다. 선형 구동기 구동축 변위 제어를 통해 제어되는 가변체적형 챔버의 축방향 길이는 외력이 가해지지 않을 때의 축 길이 130 mm를 기준으로 ± 50 mm의 변위범위를 갖도록 제작되었다.

Fig. 1은 이와 같이 제작된 MDGPC 내 가변체적형 챔버의 압축 및 팽창과정에서의 외형변화를 보여준다. 가변체적형 챔버의 체적은 챔버와 연결된 선형 구동기 구동축(rod)의 위치제어를 이용하여 제어하였다. 이를 위해 0.01 mm/s부터 2 mm/s의 속도범위에서 250 mm의 이동범위와 0.01 mm의 변위제어 분해능을 갖는 상용 선형 구동기를 사용하였다.

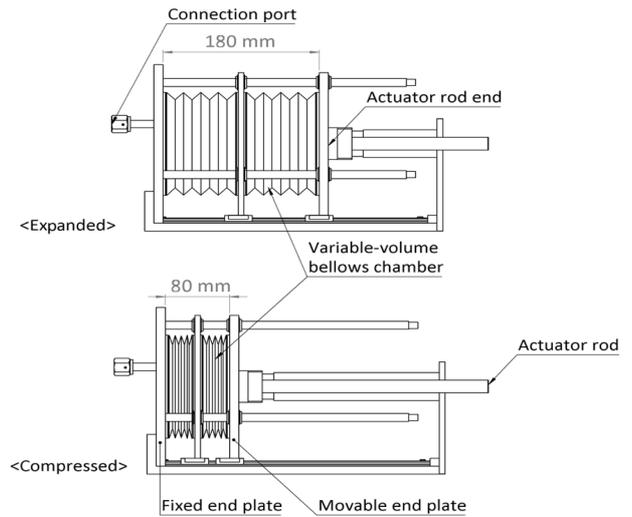


Fig. 1 Volume change of the variable-volume bellows chamber during expansion and compression processes

선형 구동기의 구동축 위치변화는 가변체적형 챔버 축방향 길이변화와 역비례관계를 가지므로, 본 연구에서는 가변체적형 챔버의 축방향 길이를 제어변수로 사용하였다. MDGPC의 압력 제어 매질인 제어가스는 불활성 기체인 헬륨(He)을 사용하였으며, 가변체적형 챔버 내부 제어가스의 압력측정은 상대 교정불확도($U(p)_{pFS}$) 0.005(약 95% 신뢰의 수준)의 정밀 압력측정기를 이용하여 실시간 측정하였다. 이와 같이 측정된 가변체적형 챔버 내부 제어가스 압력은 선형 구동기 변위제어를 위한 제어변수로 사용하였다.

3.2 P제어 최적 제어이득 결정

본 연구에서 개발한 MDGPC는 제어변수와 조작변수로 각각 가변체적형 챔버 내 제어가스 압력과 챔버의 축방향 길이를 사용하였으며, 설정압력과 측정압력의 차를 제어오차로 하여 가스 압력제어를 수행하였다. 먼저 P제어 적용 MDGPC의 가스 압력 제어의 조작변수는 식(4)와 같이 선형 변위로 변환된 제어오차 ($\Delta p(dI/dp)$)에 비례제어이득(K_p)을 곱하고 초기 선형 변위에 더하여 결정한다. 본 연구에서는 압력변화에 대한 길이변화율 (dI/dp)을 불안정성을 야기하지 않는 가장 큰 압력에 대한 변위 변화율인 1 mm/kPa로 설정하였다. 아울러 설정압력과 측정압력 간 차가 1 kPa 이상에 해당하는 큰 제어오차의 발생 시 MDGPC의 안정도 유지를 위해 1 mm 이상의 변위가 가해지지 않도록 조작변수의 상하한을 각각 1 mm와 -1 mm로 설정하였다.

$$m = l_0 + K_p \times \Delta p(dI/dp) \quad (4)$$

본 연구에서는 P제어의 최적 비례제어이득을 도출하기 위해 1.0에서 2.0의 범위에서 비례제어이득을 0.1의 단위로 상승시키며 ± 1 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대한 응답을 확인하였다. 본 연구에서는 제어압력 안정도에 주안점을 두고 평가하였으나 오버 슈트 및 언더 슈트 특성 역시 비교하여 불안정한 거동 발현이

Table 1 Control characteristics of the MDGPC to ± 1 kPa step changes in set-point values at various proportional gains (K_p)

K_p	Control stability [Pa]	Peak-to-peak amplitude [Pa]	Overshoot [Pa]	Undershoot [Pa]
1.0	2.00	9.25	1.81	0
1.1	1.48	7.14	3.98	0.32
1.2	1.94	7.68	1.00	0
1.3	1.47	6.42	1.36	1.06
1.4	1.15	5.68	1.37	2.69
1.5	0.54	3.57	1.07	1.58
1.6	0.72	3.20	1.65	1.93
1.7	0.81	4.87	1.46	2.54
1.8	1.26	4.76	1.13	2.48
1.9	0.89	4.91	3.15	1.43
2.0	0.71	4.10	260.92	4.92

제한되는 제어이득을 최적 제어이득으로 선정하고자 하였다.

Table 1은 이와 같은 비례제어이득 변화에 따른 응답특성 시험 결과를 보여주며, 각 비례제어이득에서 설정압력 유지 구간 내 30분간 측정된 측정압력 변화의 표준편차로 정의된 제어 안정도(Control Stability), 설정압력 유지 구간 내 최대값과 최소값의 차로 정의된 침두치 간 진폭(Peak-to-peak Amplitude), 설정압력 변화 시 발생한 침두치와 정상상태 측정압력의 차로 정의된 한 오버 슈트(Overshoot) 및 설정압력 변화 시 발생한 최저치와 정상상태 측정압력의 차로 정의된 언더 슈트(Undershoot)의 값을 확인할 수 있다. 표를 통해 확인할 수 있듯이 비례제어이득 1.5에서 가장 안정적인 압력제어가 이루어짐을 확인할 수 있으며, 침두치 간 진폭 역시 최소수준을 보임을 알 수 있다. 또한, 오버 슈트 및 언더 슈트의 경우 상대적으로 낮은 수준인 약 1 Pa의 값을 가짐을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서는 P제어를 위한 최적 비례제어이득으로 가장 안정적인 압력제어특성과 더불어 상대적으로 작은 오버 슈트 및 언더 슈트 특성을 보인 1.5를 최적 비례제어이득으로 선정하였다.

3.3 P제어 최적 제어이득 결정

전술한 바와 같이 P제어를 통한 제어는 측정압력이 설정압력에 근접하는 경우 설정압력에 완전히 도달하지 못하거나 설정압력에서 일정 범위 내 진동하는 정상상태 오차를 가질 수 있다. 본 연구에서는 MDGPC를 이용한 가스 압력제어 시 발생할 수 있는 정상상태 오차를 없애기 위해 PI제어 역시 적용하고자 하였으며, PI제어 구동을 위한 최적 제어이득을 결정하고 이를 이용한 가스 압력제어 수행결과를 P제어 적용 결과와 비교하고자 하였다. 본 연구에서 사용한 PI제어 기반 조작변수는 식(5)와 같이 표현되며, 앞 절의 P제어와 동일하게 압력변화에 대한 길이 변화율(dl/dp)을 1 mm/kPa로 설정하고 조작변수의 상하한을 각각 1 mm, -1 mm로 설정하였다.

$$m = l_0 + K_p \times \Delta p \left(\frac{dl}{dp} \right) + K_I \int_0^t \Delta p \left(\frac{dl}{dp} \right) dt \quad (5)$$

본 연구에서는 PI제어를 위한 최적 비례제어이득(K_p)과 적분제어이득(K_I) 조합 결정을 위해 1.0부터 2.0까지의 비례제어이득 범위에 대해 적분제어이득을 0.005부터 0.05까지 변경시켜 가며 ± 1 kPa의 계단형 설정압력변화에 대한 MDGPC의 응답특성을 시험하였다. 본 연구에서는 PI제어를 위한 최적 제어이득 조합의 선정 시, P제어를 위한 최적 비례제어이득의 선정과 동일한 기준을 적용하여 최적 제어이득 조합을 선정하였다.

Figs. 2(a)와 2(b)는 비례 및 적분제어이득 별 ± 1 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대해 각 설정압력 유지 구간 내 제어압력 안정도와 침두치 진폭 변화를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 비례제어이득이 증가함에 따라 제어압력 안정도가 향상되었으며, 제어이득이 $K_p = 2.0$ 과 $K_I = 0.01$ 의 조합을 가질 때 가장 안정적인 압력제어 달성이 가능하였다. 또한, Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 침두치 진폭의 경우 적분제어이득 변화에 따른 큰 차이를 보이지 않았으나, $K_p = 2.0$ 과 $K_I = 0.01$ 의 조합을 가질 때 약 8 Pa로 상대적으로 낮은 값을 가져 위 제어이득 조합을 사용할 경우 상대적으로 안정적인 제어가 가능함을 확인하였다. Figs. 2(c)와 2(d)는 각각 비례 및 적분제어이득 별 계단형 설정압력 변화에서 측정된 오버 슈트 및 언더 슈트 변화 경향을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 $K_p = 2.0$ 과 $K_I = 0.01$ 의 조합을 가질 때 상대적으로 낮은 수준의 오버 슈트 및 최저 언더 슈트가 발생하였다. 이와 같은 거동에 따라 본 연구에서는 $K_p = 2.0$ 과 $K_I = 0.01$ 를 PI제어의 최적 제어이득 조합으로 선정하였다.

본 연구에서 제작된 MDGPC는 이와 같이 결정된 최적 비례 및 적분제어이득을 적용하여 가변 체적형 챔버의 선형 변위제어를 수행하였으며, 압력제어 과정을 블록 선도로 표현하면 Fig. 3과 같다. 그림과 같이 MDGPC에 설정압력이 입력되면 측정압력과 설정압력의 차(Δp) 및 dp/dl 과 최적 제어이득에 의해 조작변수가 결정되어 선형 구동기로 입력된다. 조작변수 입력에 의한 가변체적형 챔버의 축방향 길이변화(체적변화)는 내부 압력변화를 유도하며, 변화된 압력 측정값을 바탕으로 연속 피드백 제어함으로써 MDGPC의 가변체적형 챔버 내부 가스압력을 설정압력으로 정밀 제어하고자 하였다.

3.4 MDGPC 압력제어특성 시험 방법

본 연구에서는 위와 같이 결정된 최적 P제어 및 PI제어이득을 적용하여 MDGPC를 구동하였으며, 압력제어 안정도 및 분해능, 계단형 설정압력 변화를 통한 순간 압력제어능력, 외부 압력 외란에 대한 회복능력 등의 측면에서 MDGPC의 압력제어 특성을 시험하였다. 본 연구에서 제작된 MDGPC는 가변 체적형 챔버가 단열처리 없이 외부에 노출되어 있으므로 외기 온도 변화에 따라 내부 압력변화가 유발될 수 있다. MDGPC를 이용한 정밀 가스 압력제어 달성을 위해서는 이와 같은 실온변화에

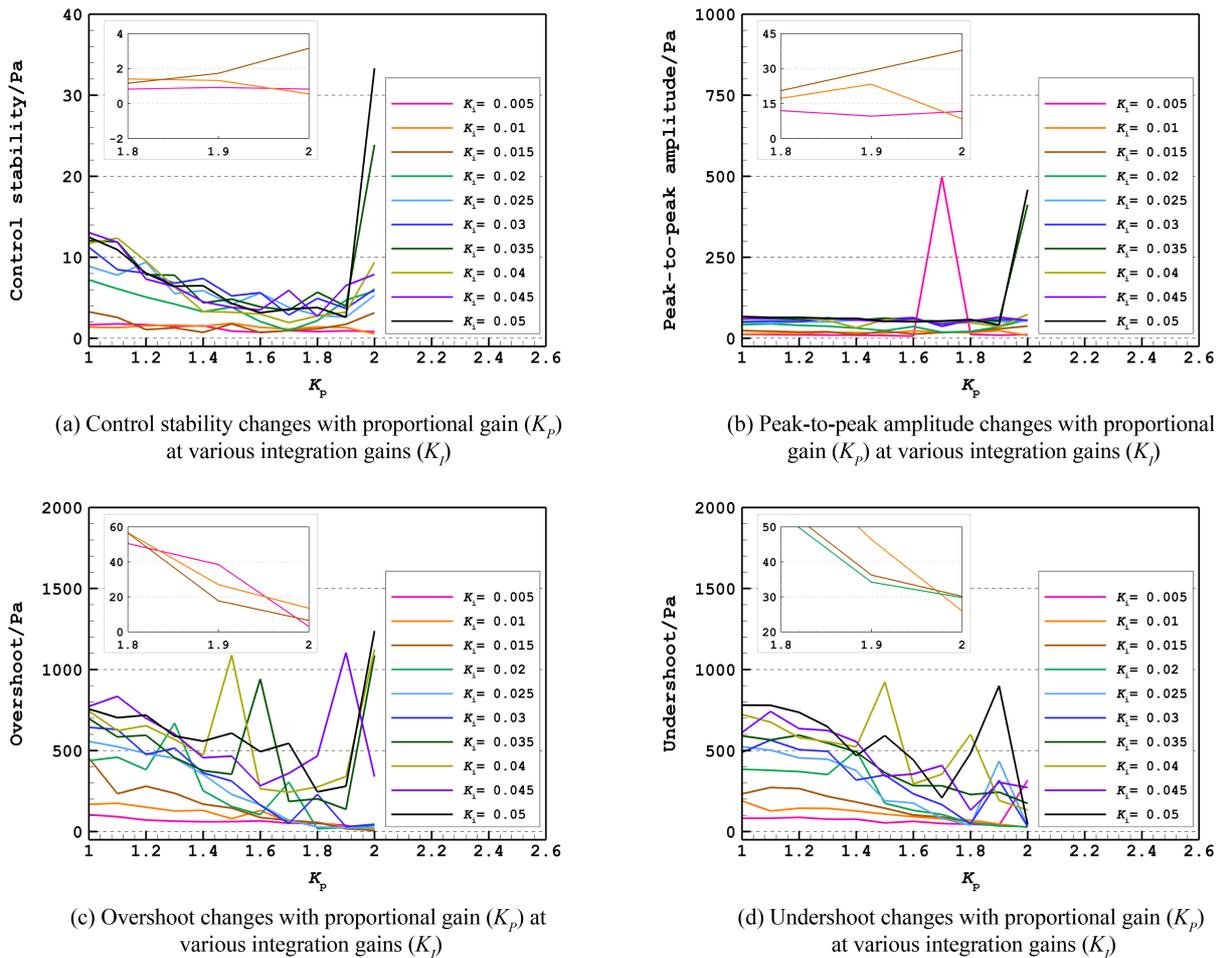


Fig. 2 Control responses of the MDGPC to ± 1 kPa step changes in the set-point value at various proportional gains (K_p) and integral gains (K_i). Insets show the magnified view of the responses

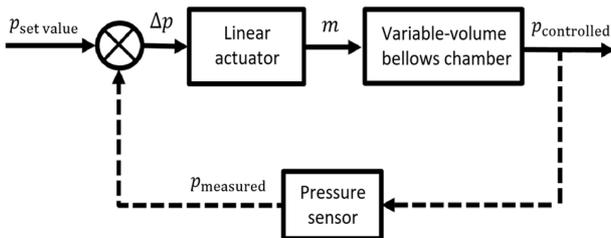


Fig. 3 Block diagram of the gas pressure control process of the MDGPC

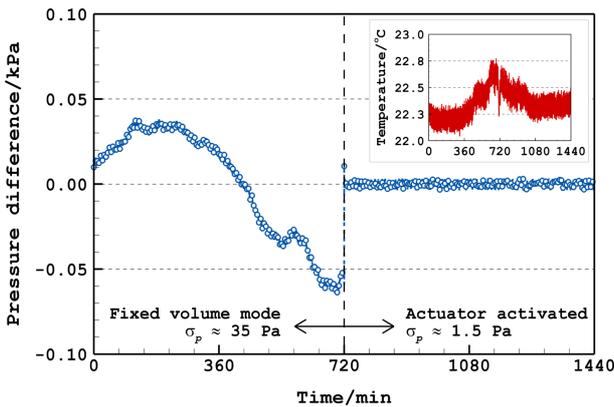
대한 압력변화를 보상할 수 있는 안정적 압력제어능력 검증이 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서 수행한 압력제어 안정도 시험은 가변체적형 챔버 주변 외기 온도변화에 의한 챔버 내부 가스압력 변화 보상 및 설정압력 유지능력에 초점을 맞추어 진행하였다. 해당 시험은 불규칙적으로 변화하는 외기 온도에 대해 압력제어 전후 가변체적형 챔버 내부 압력 안정도 변화를 비교함으로써 수행하였으며, 정량적 비교를 위한 압력제어 안정도는 12 h 기준 압력변화의 표준편차로 정의하였다.

이와 더불어 본 연구에서는 개발된 MDGPC 기반 가스 압력

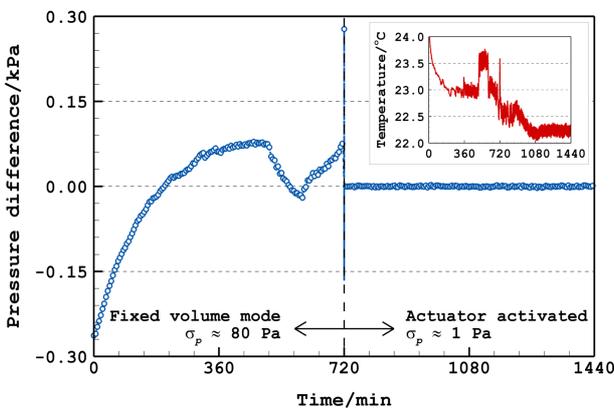
제어의 정밀도를 결정할 수 있는 압력제어 분해능 역시 평가하였다. MDGPC의 압력제어 분해능은 안정도를 벗어나는 명시적 제어압력 변화가 관측되는 설정압력 변화로 정의하여 평가하고자 하였으며, 상기와 같이 결정된 압력제어 안정도를 바탕으로 압력제어 안정도 내의 설정압력 변화로부터 시작하여 일정한 비율로 설정압력 변화를 증가시켜 가며 분해능 평가를 수행하였다.

본 연구에서 제작된 MDGPC는 안정적이고 정밀한 압력제어 특성 외에도 수kPa 수준의 설정압력 변화에 대해 오버 슈트나 언더 슈트와 같은 불안정성 없이 빠른 설정압력에 도달하는 것이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 MDGPC의 순간 압력제어특성을 평가하기 위해 70 kPa에서 90 kPa의 범위에서 ± 5 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대한 압력제어 응답특성을 시험하였다. 이와 같은 시험에 있어, 각 설정압력 유지 구간에서의 압력제어 안정도 및 설정압력 변화 시 오버 슈트 및 언더 슈트 발생 여부를 중요한 지표로 설정하여 평가하였다.

본 연구의 제작한 MDGPC는 밀폐형 공압회로 내 가스 압력제어를 목적으로 하므로 공압회로 내·외부의 직·간접적 외란에 노출될 수 있으며, 이에 따라 제어 중 노출되는 압력 외란에



(a) Under the P control



(b) Under the PI control

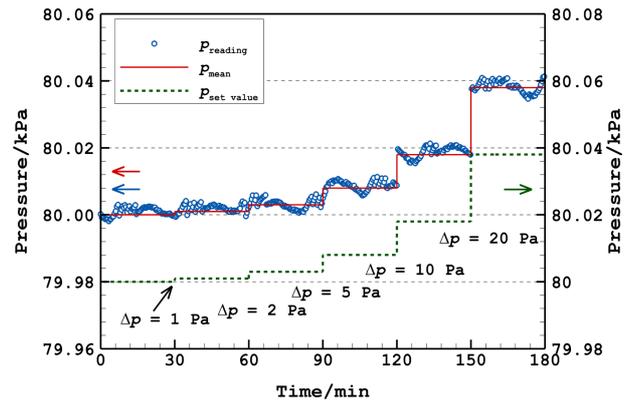
Fig. 4 Stability changes in the gas pressure inside the variable-volume chamber when the MDGPC was in operation with the P or PI control method. The insets show the variation in the room temperature

대한 설정압력 회복능력은 역시 평가되어야 할 중요 특성 중 하나이다. 이에 본 연구에서는 80 kPa의 설정압력으로 제어 중인 MDGPC에 외부에서 ± 5 kPa의 압력 외란을 일정시간 동안 인가했을 때 MDGPC의 설정압력 회복 시간 및 회복 후 제어압력 안정도를 주요지표로 하여 MDGPC의 외란에 대한 회복능력을 평가하고자 하였다. 해당 시험에서 외부 압력 외란은 별도의 상용 가스 압력제어기를 이용하여 75 kPa 및 85 kPa의 압력을 발생시킨 후 약 5 s의 시간 동안 MDGPC의 가변체적형 챔버를 해당 압력에 노출시키는 방식으로 인가하였으며, 설정압력 회복 시간은 압력 외란 인가 후 설정압력의 99.99%에 해당하는 압력에서의 회복까지 소요된 시간으로 정의하였다.

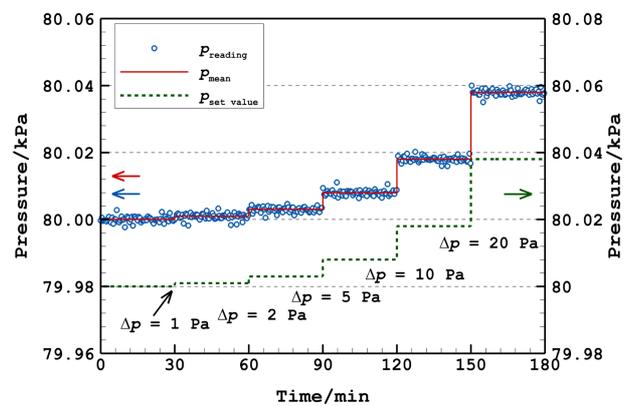
4. 시험결과

4.1 압력제어 안정도 평가

Figs. 4(a)와 4(b)는 약 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 외기 온도변화 환경에서 각각 P 및 PI제어를 적용한 MDGPC의 압력제어 전후 가변체적형



(a) Under the P control



(b) Under the PI control

Fig. 5 Response of the MDGPC to increasing pressure steps

챔버 내부 압력변화를 보여준다. 해당 시험에 있어 압력제어 전의 가변체적형 챔버는 축방향 길이를 고정하여 고정체적 모드 (Fixed-Volume Mode)로 운용하였다. 그림에서 보이듯이 가변체적형 챔버 내부 압력은 고정체적 운용 시 외기 온도변화에 따라 크게 변하는 특성을 보였다. 반면, 선형 구동기 제어를 통한 압력제어를 실시할 경우 외기 온도변화와 무관하게 가변체적형 챔버 내부 가스압력이 설정압력으로 제어되었으며, 이에 따라 압력제어 안정도가 크게 향상되었다.

가변체적형 챔버 내부 가스압력은 압력제어 전 약 80 Pa의 안정도로 변화했으나, P제어 및 PI제어를 적용한 MDGPC 구동하였을 시 각각의 제어 방식에 따라 약 1.5 Pa 및 약 1 Pa의 안정도로 매우 안정적인 가스 압력제어가 이루어졌음을 확인할 수 있다. MDGPC의 제어압력 안정도는 위와 같이 PI제어가 P제어 대비 다소 우수한 특성을 보였으나, 침투치 진폭은 P제어와 PI제어에 따라 각각 약 7 Pa 및 약 20 Pa로 확인되어 P제어 시 보다 좁은 폭의 압력제어가 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 압력제어 안정도 시험에 이어 MDGPC의 압력제어 정밀도를 정량화하기 위한 분해능 평가를 수행하였다. 본 연구에서 압력제어 분해능은 1 Pa부터 20 Pa까지 설정압력을 약 두 배씩 증가시키며 측정압력 변화가 안정도를 벗어나 명확히 구분되는 설정압력 변화로 결정하였다. Figs. 5(a)와 5(b)는

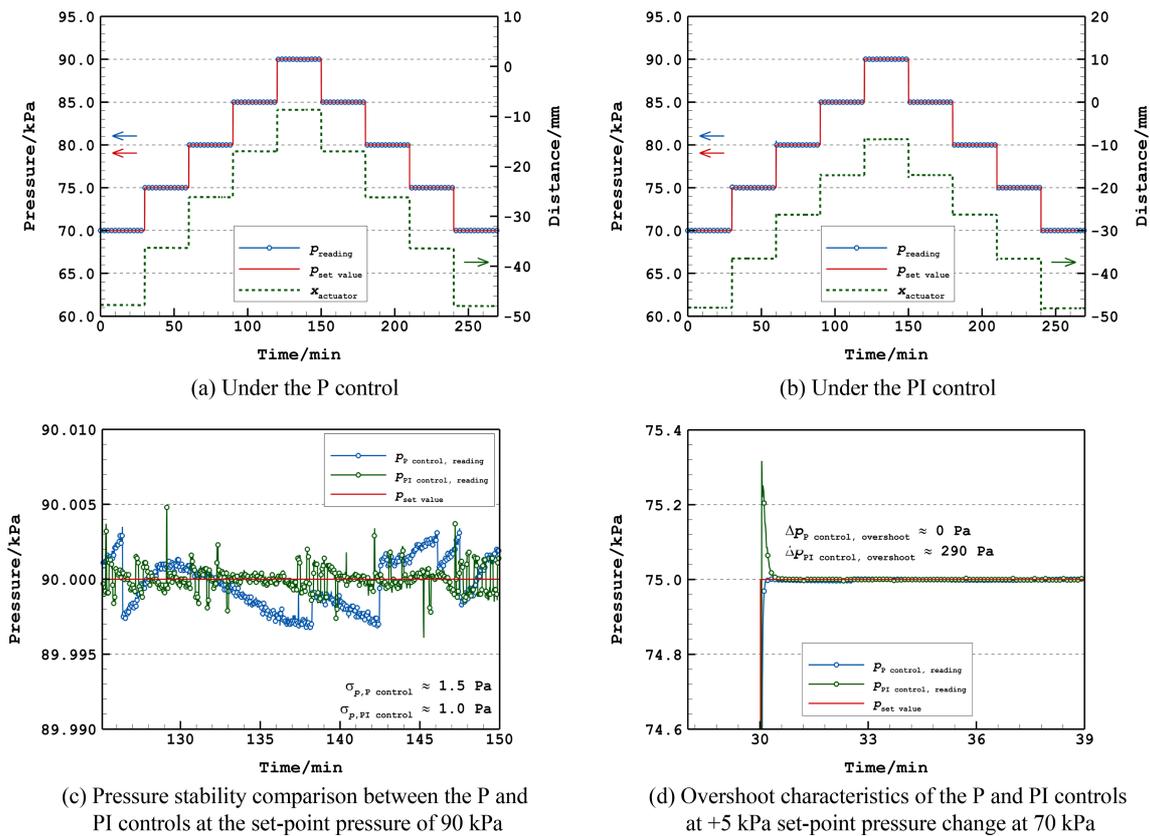


Fig. 6 Response of the control gas pressure to stepwise set-point value changes with enlarged figures at specific pressure

각각 P제어 및 PI제어를 적용하였을 때 얻어진 가변체적형 챔버 내부 측정압력(청색 표식)의 설정압력(녹색 점선) 변화에 대한 응답특성을 보여주며, 각 설정압력 유지 구간에서의 측정압력 평균(적색 실선) 역시 도시되어 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 P제어 및 PI제어 시, 각각 설정압력 10 Pa 및 5 Pa 증가 시 측정압력의 명확한 변화가 관측되어 MDGPC의 압력제어 분해능이 P제어 및 PI제어에 따라 각각 약 10 Pa 및 약 5 Pa임을 확인하였다.

위 시험결과를 바탕으로 본 연구에서 제작된 MDGPC의 압력제어 안정도는 P제어와 PI제어에 대해 각각 약 1.5 Pa과 약 1 Pa로 확인되었으며, 제어 정밀도를 지시하는 압력제어 분해능은 P제어와 PI제어에서 각각 약 10 Pa과 약 5 Pa로 평가되었다. 이를 통해 압력제어 안정도는 PI제어 시 P제어 대비 다소 우수한 특성을 가짐을 확인하였으나, 침두치 진폭의 경우 PI제어 대비 P제어 적용 시 더 좁은 폭의 압력제어가 가능함 역시 확인하였다.

4.2 순간 압력제어특성 평가

본 연구에서는 MDGPC의 순간 압력제어특성 평가를 위해 ±5 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대한 압력제어 응답특성을 시험하였다. Figs. 6(a)와 6(b)는 각각 P 및 PI제어를 적용하였을 경우 얻어진 계단형 설정압력 변화에 대한 MDGPC의 압력제어 응답특성을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 설정압력 변화

(적색 점선) 시 선형 구동기 구동축 위치(녹색 점선)변화에 따라 측정압력(청색 표식)이 P 및 PI 제어 방식에 대해 각각 최대 약 1.9 kPa/s 및 2.4 kPa/s의 압력변화율로 계단형 변화를 근사하여 제어됨을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)는 90 kPa에서 P제어 및 PI제어를 통한 압력제어 중 제어압력의 변화를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이, P제어를 적용한 MDGPC의 경우 측정압력(청색 표식)이 설정압력(적색 실선) 기준 약 3 Pa의 폭 내에서 제어되며 약 1.5 Pa의 제어압력 안정도를 가진 반면, PI제어 적용 시 측정압력(녹색 표식)이 설정압력(적색 실선) 기준 약 2 Pa의 폭 내에서 약 1 Pa의 제어압력 안정도로 제어됨을 확인할 수 있다. 다만, PI제어 시 외부 온도 변화에 따른 외란에 의해 간헐적으로 크게 압력이 변하는 특성을 보였다. Fig. 6(d)는 P제어 및 PI제어 중 설정압력(적색 실선)이 70 kPa에서 75 kPa로 변경될 때의 오버 슈트 특성을 보여준다. 그림에서 보이는 것과 같이 P제어를 적용할 경우 측정압력(청색 표식)에서 오버 슈트의 발생은 확인되지 않았으나, PI제어를 적용할 경우 측정압력(녹색 표식)에서 약 290 Pa의 오버 슈트가 발생하였음을 확인하였다.

위 시험결과들을 종합하여 볼 때, 설정압력 유지 구간의 제어압력 안정도는 PI제어의 경우 약 1 Pa로 약 1.5 Pa의 제어 안정도를 보인 P제어 대비 근소하게 우수하나, 설정압력 변화 시 PI제어에서 오버 슈트가 발생하여 제어 안정성을 악화시킬 수 있다는 점에서 설정압력 유지 및 변화를 아우르는 전반적인 압력제어를 위한 제어방식으로 P제어가 더욱 적절할 수 있음

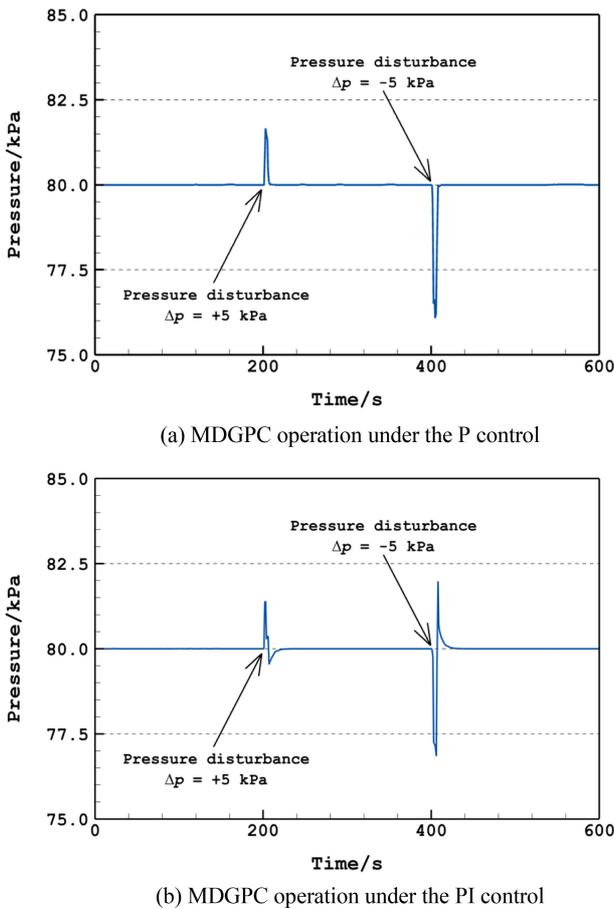


Fig. 7 Transient responses of the controlled pressure under different control methods

확인하였다.

4.3 외란에 대한 회복능력 평가

MDGPC의 압력 외란에 대한 설정압력 회복능력은 80 kPa의 설정압력으로 제어 중인 MDGPC에 ±5 kPa 압력 외란을 약 5초간 인가하였을 때 얻어진 설정압력으로의 회복 거동을 통해 평가하였다. Figs. 7(a)와 7(b)는 각각 P제어 및 PI제어를 통한 설정압력제어 중 ±5 kPa의 압력 외란에 노출된 후 얻어진 압력 회복과정을 보여준다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이, 가변체적형 챔버 내부 압력은 압력 외란에 의해 잠시 영향을 받았으나 P제어 및 PI제어 시 각각 약 5초 및 약 20초 이내에 설정압력으로 회복하였으며, 회복 후 압력 안정도는 P제어와 PI제어 시 각각 1.5 Pa와 1 Pa로 평가되었다. 이에 따라, 본 연구에서 시험한 MDGPC는 압력 외란에 대해 제어 안정도 이내의 설정압력 회복능력을 가지고 있음을 확인하였다. 다만, 그림에서 확인할 수 있듯이, P제어의 경우 설정압력 회복 시 오버 슈트 또는 언더 슈트 없이 즉각적인 회복을 보인 반면, PI제어 시 제어압력에서 오버 슈트 및 언더 슈트가 발생하여, 압력 외란에 노출가능성이 존재하는 MDGPC의 운용에 있어 PI제어보다 P제어의 적용이 더욱 적합한 것으로 평가되었다. 또한, 그림에서 보이는 바와

같이 MDGPC는 설정압력보다 높은 값의 압력외란에 노출될 경우 낮은 값의 압력외란에 노출되는 경우 대비 더욱 강건한 특징을 보였는데, 이는 MDGPC의 가변체적형 챔버의 팽창과정 시 부피증가에 의한 압력 변화율이 감소하는 특징에 기인한다.

5. 결론

본 연구에서는 밀폐형 공압회로 내 고속·정밀 가스 압력제어를 실현하기 위해 가변체적형 챔버와 선형 구동기로 이루어진 밀폐형 기계 구동식 가스 압력제어기(MDGPC)를 제작하였다. MDGPC의 구동에 적합한 제어방식을 특정하기 위해 본 연구에서는 P제어 및 PI제어를 적용한 MDGPC의 가스 압력제어 특성을 시험하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 MDGPC의 구동에 적합한 P제어 및 PI제어의 최적 제어이득을 결정하였으며, 이와 같이 결정된 최적 P제어 및 PI제어 방식을 적용한 MDGPC의 압력제어특성을 시험하였다.

MDGPC의 압력제어 안정도 시험 결과, P제어와 PI제어를 적용할 시 모두 MDGPC 구동을 통해 가변체적형 챔버 내부 압력 안정도가 크게 향상됨을 확인하였으며, P제어 및 PI제어 시 각각 약 1.5 Pa와 1 Pa의 제어압력 안정도를 가짐을 확인하였다. 이어 수행된 ±5 kPa의 순간 설정압력 변화 및 압력 외란에 대한 MDGPC의 압력제어 및 압력회복 시험에서, MDGPC는 설정압력 변화를 따르는 계단형 압력변화 구현 및 압력 외란에 대해 제어 안정도 이내의 설정압력 회복 능력을 갖추고 있음을 확인하였다. 다만, PI제어를 통한 설정압력 변화 또는 압력 외란에 대한 설정압력 회복 시, P제어에서는 발생되지 않은 오버 슈트 및 언더 슈트가 발생하였다는 점에서 압력변화가 수반되는 제어에 있어 PI제어보다는 P제어가 더욱 적합함을 확인하였다. 이를 통해, 최적 P제어를 적용한 MDGPC를 사용할 경우 밀폐형 공압회로 기반 고속·정밀·고안정 가스 압력제어를 달성할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Yun, S., Han, S., Kim, M., (2009), The world-wide market and technique trends of process & hydraulic-pneumatic valve, Journal of Drive and Control, 6(3), 2-9.
2. Korea Association of Standards & Testing Organizations, (2017), Altermeters, (Report No. KASTO 17-20401-427).

3. Korea Association of Standards & Testing Organizations, (2019), Absolute pressure gauges, (Report No. KASTO 19-20406-391).
4. Kim, B.-S., Lee, J.-J., Nam, K.-W., Jeong, G.-S., Ahn, C.-B., Sun, K., (2007), Pressure regulation system for optimal operation of the pneumatic vad with bellows-type closed pneumatic circuit, *Journal of Biomedical Engineering Research*, 28(4), 569-576.
5. Jang, J., (2001), A study on the pressure control of a pneumatic pressure vessel considering dynamic characteristics of pneumatic transmission line, *Journal of Power System Engineering*, 5(4), 90-96.
6. Jang, J. S., Lee, K. K., (2001), A study on the pressure control of a pneumatic pressure vessel, *Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering 2001 Autumn Conference*, 296-301. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01039826>
7. Jang, J. S., Koh, D. K., Kim, Y. B., (2006), Pressure control in a pneumatic pressure chamber, *Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering 2006 Spring Conference*, 333-338. <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE01028097>
8. Yun, S., Kim, C., Seo, S., Park, J., Ham, Y., (2006), Pressure regulator for piezoelectric valve, *Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society*, 3(2), 1-6.
9. Yun, S., Kim, C., Ham, Y., Park, J., Youn, D., (2007), Digital control for PZT type electro-pneumatic regulator, *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, 93-94.
10. Yun, S., Lee, K., (2008), Digital control of electro-pneumatic regulator with two piezoelectric microvalves, *Journal of Drive and Control*, 5(2), 17-23.
11. Kim, B.-W., (2011), A study on the characteristics of high pressure regulator for vehicle CNG, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 12(12), 5997-6003.
12. Jung, J.-H., Nam, C.-W., Kim, M.-K., (2021), A study on the pressure control process of gas regulators through numerical analysis, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 25(5), 37-51.
13. Yoo, C. Y., Kang, S. M., Choi, S. W., (2020), Method for determination of pump ejection quantity through in vitro experiment of ECMO using pneumatic pulsatile pump, *Proceedings of the Korean Society Mechanical Engineers 2020 conference*, 1996-1998.
14. Cavaglia, M., Olivieri, C., Morbiducci, U., Raparelli, T., Jacazio, G., Ivanov, A., Chiesa, A., Savino, D., Chiarenza, S. M., Romiti, A., (2021), Noninvasive mechanical ventilation in the COVID-19 era: Proposal for a continuous positive airway pressure closed-loop circuit minimizing air contamination, oxygen consumption, and noise, *Artificial Organs*, 45(7), 754-761.
15. Joung, W., Gam, K. S., Kim, Y.-G., Yang, I., (2015), Hydraulic operating temperature control of a loop heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 796-808.
16. Joung, W. C., (2015), Loop heat pipe-based hydraulic temperature control technique and its application to the precision thermometry, *Proceedings of the Korean Society Mechanical Engineers 2015 conference*, 1517-1519. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06575881>
17. Kim, J.-W., Choi, K.-H., Kim, D.-S., (2008), A study for micro-patterning using an electrostatic inkjet, *Proceedings of the Korean Society Mechanical Engineers Conference*, 1103-1106.
18. Yang, Y.-J., Ko, J.-B., Dang, H.-W., Kim, H.-C., Choi, K.-H., Cho, K.-H., (2012), Development of pneumatic ink supply system for electrostatic head on meniscus control, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 29(4), 455-460.
19. Desborough, L., Miller, R., (2002), Increasing customer value of industrial control performance monitoring-Honeywell's experience, *Proceedings of the AIChE Symposium Series*, 169-189. https://www.researchgate.net/profile/Lane-Desborough/publication/228814712_Increasing_Customer_Value_of_Industrial_Control_Performance_Monitoring_-_Honeywell's_Experience/links/573cb75b08aea45ee8419a26/Increasing-Customer-Value-of-Industrial-Control-Performance-Monitoring-Honeywells-Experience.pdf
20. Lei, G., (2020), Feedback and uncertainty: Some basic problems and results, *Annual Reviews in Control*, 49, 27-36.
21. Smith, C. A., (2003), *Automated continuous process control*, John Wiley & Sons.



Cheongyong Park

M.Sc. candidate in the Department of Intelligent Robot Engineering, Pukyong National University. His research interest is on precision thermal control.

E-mail: cypark9015@gmail.com



Wukchul Joung

Assistant Professor in the School of Mechanical Engineering, Pukyong National University. His main research interest is on precision thermal control and thermometry.

E-mail: wukchuljoung@pknu.ac.kr

Realization and Scheduling of Free Spot Assembly Method for Machine Tools Using Cooperative Industrial Robots

Kosuke Inoue^{1,2,#} and Hideki Aoyama³

¹ School of Integrated Design Engineering, Keio University

² Makino Milling Machine Co., Ltd.

³ Department of Science and Technology, Keio University

Corresponding Author / E-mail: inoueko@makino.co.jp, TEL: +81-46-401-2373

ORCID: 0000-0003-1757-2841

KEYWORDS: Assembly scheduling, Collaboration assembly, Cooperation assembly, Mobile robot, AGV

The manufacturing industry is increasingly demanding flexible manufacturing and existing manufacturing methods with fixed equipment do not meet this requirement. The free spot assembly system is an ultra-flexible method that responds to this demand, enabling spatiotemporal free assembly by conveying all necessary resources with automated guided vehicles (AGVs). Although some studies have proposed free spot assembly, free spot assembly feasibility for assembling heavy objects, such as machine tools, by aligning them at high precision has not been verified. Work hour shifts, differences in worker skill levels, and cooperative work with robots have also not been considered in free spot assembly scheduling. This paper presents elemental technologies for realizing a free spot assembly system, with a scheduling method where a genetic algorithm is supported by dispatching rules with six genes. The computational results reveal the effectiveness of the proposed algorithm.

Manuscript received: October 31, 2022 / Revised: December 6, 2022 / Accepted: December 26, 2022

1. Introduction

In the manufacturing industry, the demand for mass customization is increasing [1,2]. Reconfigurable manufacturing systems (RMS) have been studied for flexible production to meet this demand [3,4]. However, the flexibility of conventional fixed facilities is limited. As a new production system to solve this problem, free spot assembly systems, in which automated guided vehicles (AGVs) are used to set up assembly parts and equipment at an arbitrary location and then used as the base for assembly, have been considered. The entire process of the free spot assembly is shown in Fig. 1. Although some studies have proposed free spot assembly [5,6,7], free spot assembly feasibility for assembling heavy objects, such as machine tools, by aligning them at high precision has not been verified.

In free spot assembly, although the locations can be set

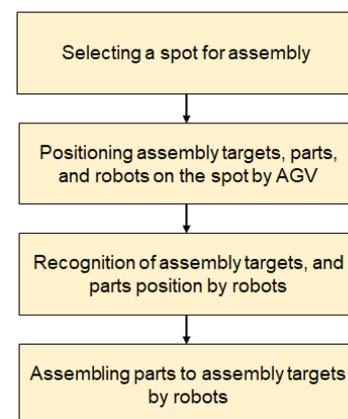


Fig. 1 The entire process of free spot assembly

arbitrarily, the scheduling becomes complicated, necessitating a scheduling system. There are examples of free spot assembly

scheduling [8-10], but they do not consider worker work hour shifts, differences in worker skill levels, and cooperative work with robots. As assembly processes can be executed at different times of the day due to differences in worker shifts and skill levels, the work to set up and place the spots must be optimized dynamically. In addition, the optimal placement of robots with AGVs enables cooperative work among robots and between robots and workers, further increasing the flexibility of free spot assembly.

In this paper, we show elemental technologies for realizing a free spot assembly method in which cooperative industrial robots are introduced for assembling machine tools by verifying an actual machine. In addition, for optimal scheduling of free spot assembly, we propose a genetic algorithm with gene expression suitable for solving the features of this problem and confirm its usefulness by numerical experiments.

2. Examination of Elemental Technologies required for Free Spot Assembly of Machine Tools

In this section, elemental technologies required for free spot assembly of machine tools is shown. The first stage of fig. 1 is decided by the scheduling mentioned below in Chapter 3, and the spot setting is shown in Section 2.1. The required technologies in the second stage of fig. 1 is shown in section 2.2, the third in section 2.3, and the fourth in section 2.4, section 2.5.

2.1 Spot Setting

Figure 2 shows an overview of the free spot assembly of the machine tools under study. As shown in the figure, spots A-1 to A-10 and spot B-1 were set as spots. Spots A-1 to A-10 were spaces where a mobile robot and a worker could work cooperatively. Spot B-1 was the space where the fixed robot was installed, and mobile robots and workers could not work.

The main assembly targets of the machine tools were the bed and column, which were placed on AGVs and delivered to the desired spots. At the same time, the parts to be assembled on the bed and column were simultaneously delivered by AGVs to the required spots. Although, ideally, the space (position, size) of a spot could be freely and arbitrarily set, the position and size of a spot were treated as fixed in this study.

2.2 Position Recognition during Movement Control of AGVs

Figure 3 shows an AGV with a bed mounted. The tires of the AGVs were mecanum wheels, which enabled flexible movement in all directions. When moving an AGV, the position of the AGV must be recognized. In this study, two light detection and ranging

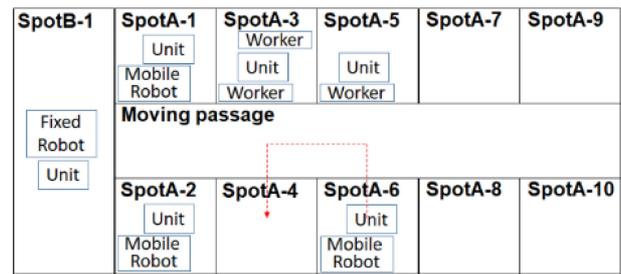


Fig. 2 Free spot assembly overview



Fig. 3 An AGV with a bed

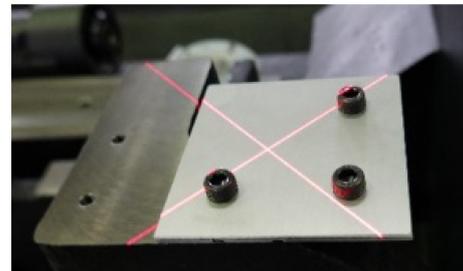
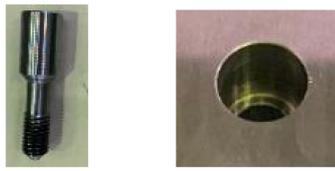


Fig. 4 Laser irradiation for detecting position and inclination angle

(Lidar) devices were mounted on a single AGV, and the position of the AGV was recognized by the simultaneous localization and mapping (SLAM) method. In this case, the position recognition accuracy of the AGVs was ± 10 mm, sufficient for moving and controlling the AGVs without interfering with other objects.

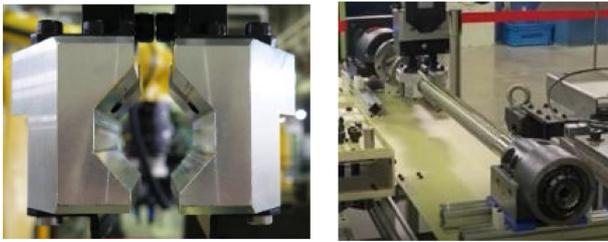
2.3 Position Recognition during Assembly

The position recognition accuracy of the AGVs was ± 10 mm, which was not accurate enough to realize the assembly of parts. Therefore, a relative distance measurement camera was installed in the end-effector section of the robot mounted on the AGV. Furthermore, as shown in Fig. 4, a cross-shaped slit light was projected onto the position to be assembled after AGV movement to measure the position and inclination of the plane. The position recognition accuracy was ± 0.1 mm, which was not sufficient for



(a) Tapered screw (b) Tapered hole

Fig. 5 Tapered screw and hole



(a) Robot hand (b) Ball screw

Fig. 6 Robot hand for ball screw

assembly. However, assembly with a position recognition accuracy of ± 0.1 mm was made possible by the innovations described in Section 2.4.

2.4 Assembly Part Shape and Gripping Tool Shape

The position recognition accuracy by the camera was ± 0.1 mm, while the error associated with the arm when the robot grasped the heavy object and the actual position recognition accuracy of the end-effector part of the robot was about ± 0.5 mm. To realize assembly even with this accuracy, we devised a method to perform positioning according to the shape of the part to be assembled. As an example, Fig. 5 shows a screw of an assembled part. As shown in the figure, tapers are provided at the tip and center of the screw so that the axes of the bolt screw and nut screw are aligned. In addition, as shown in Fig. 6(a), when gripping a ball screw, the shape of the gripper attached to the end-effector was made hexagonal when gripped so that even if the position recognition accuracy of the end-effector part was ± 0.5 mm, the ball screw could be gripped stably as shown in Fig. 6(b) of the same figure. After the ball screw was installed by the robot, the final position adjustment was performed by the worker.

2.5 Cooperative Work at the Same Spot

By moving the robot installed on the AVG and the worker to the same spot, the robot and worker, or multiple robots, simultaneously worked on the same part at the same spot. This is called cooperative work. Using an actual machine, we verified that cooperative work was possible in the assembly of machine tools. Figure 7 shows two robots performing cooperative work



Fig. 7 Cooperation assembly of two robots

assembling a bed. As the size of the bed varied depending on the model, the placement of the two robots on the bed also differed. However, we confirmed that the robots were placed at the optimal position by the AGVs and that cooperative work was conducted without interference.

3. Scheduling Method

To effectively operate the free spot assembly method, it was necessary to efficiently schedule the assembly. In the following sub-section, we describe our proposed scheduling method.

3.1 Scheduling Model

The detailed conditions of the scheduling model in this study were set as follows:

- There were 10 spots that could be worked by a worker and a mobile robot
- The worker’s day shift was 4 hours of continuous work starting at 8:00 a.m., followed by a break, then 4 hours of continuous work starting at 12:45 p.m.
- The night shift was 4 hours of continuous work starting at 4:45 p.m., followed by a break and 3.5 hours of continuous work starting at 9:30 p.m.
- There were three workers on the day shift and three on the night shift
- The number of AGVs capable of carrying bed columns was 16
- There was one mobile cooperative industrial robot
- There were two mobile non-cooperative industrial robots (Robots that cannot cooperate with operators)
- Bed and column assembly was performed by two fixed robots at a spot (the two fixed robots performed the operation synchronously, so they were treated as one fixed robot for

scheduling purposes).

The following scheduling model was applied to the detailed scheduling conditions above:

The bed and column were assembled separately and then joined together. A job was defined as the assembly of one machine tool, and a job consisted of several operations, where each operation was performed by one worker or one robot.

An operation was performed at any one spot. The worker and the mobile robot performed the operation at any spot A in Fig. 2. The operation of joining the bed and the column was performed by the stationary robot at spot B.

Assembly operations for different beds and different columns could be performed simultaneously. In addition, in any given spot, in the assembly operation for one bed or one column, some operations could be performed by two workers, one worker and one mobile cooperative industrial robot, and two robots in cooperation. Non-cooperative industrial robots were not allowed to cooperate with workers due to functional limitations.

The practicable skill levels of the workers were defined, and the execution time of an operation varied depending on the skill. Furthermore, workers were assigned shifts and not allowed to execute operations outside their shifts. The robots could work 24 hours a day. Each robot had a payload function that determined which operations it could and could not perform.

When a robot moved to another spot after executing an operation, a travel time was calculated. For example, when a robot moved from SpotA-6 to SpotA-4 as shown by the red line in Fig. 2, the travel time was calculated as if the robot had moved at the specified movement speed from the center of SpotA-6 to the center of SpotA-4 via the center of the aisle. A travel time was likewise calculated for the operator. The bed or column was transported between the spots with the bed or column mounted on an AGV, while assembly operations were executed with the bed or column mounted on an AGV. The travel time was also calculated if a bed or column operation was completed at one spot and another operation was executed at another spot. Collisions along the way during AGV travel were not considered.

The AGVs carrying the column when the bed and column were joined, or the AGVs when assembly was completed and the assembled goods placed in storage, were released from the assembly operations. The number of AGVs transporting beds and columns was limited. If a bed or column being assembled needed to wait for an operation, it was placed in a spot where no work was taking place (standby). In standby, multiple AGVs were allowed to be placed in one spot. There were 16 AGVs, 3 mobile robots (1 mobile cooperative industrial robot and 2 mobile non-cooperative industrial robots), 3 workers each for the day and night shifts, and

10 spots, and we considered that the number of spots was sufficient for the elements to be placed in the spots. The scheduling of placement spots for the beds and columns awaiting processing did not need to be considered.

3.2 Scheduling Policy

When the bed and the column were joined, the shorter the time difference between the completion of each assembly operation, the shorter the time was that the bed waited for the column or that the column waited for the bed, and thus the more efficient the spot utilization and AGV utilization became. In this study, where the work of the workers and the robots were intermingled, it was important to use the AGVs efficiently to keep the robots running during the night when the operators were not available. In addition, considering the assembly efficiency at all spots, the mobile robots moved to other spots as necessary during the assembly operation at each spot and performed the assembly operations.

3.3 Scheduling Genes

In this study, we developed a scheduling system using a genetic algorithm with multiple classes of genes to efficiently search for the optimal schedule for the scheduling model described above. A description of the multiple classes of genes that realize the aforementioned scheduling policy is given below.

Jobs were represented by genes that were assigned to six classes. The six classes were composed of “(1) processing sequence for each job,” “(2) processing sequence for each operation,” “(3) cooperative process for each operation,” “(4) assigned worker number for each operation,” “(5) assigned robot number for each operation,” and “(6) assigned spot number for each operation”, which were real numbers or integers depending on the class [11,12]. Genes of each class were assigned as follows:

① Processing sequence for each job

Following the scheduling policy described above, we wanted to shorten the difference between the times when the bed and column assembly processes were completed. However, if the processing times of the bed and the column were identical, the free spot assembly flexibility might have been lost unless it was possible to switch the processing sequence with an operation belonging to another job when the processing sequences of the bed and column processes were too close. Therefore, to maintain the flexibility of the processing sequence of the processes and to suppress the increase in scheduling time, we limited the range in which the processing sequence of the processes belonging to different jobs could be swapped. The details are described in “(2) Processing sequence for each operation”.

② Processing sequence for each operation

When scheduling, the processing sequence of an operation could be represented by a processing sequence gene assigned to the process. However, in this study, to limit the range of interchangeability of the processing sequences of processes belonging to different jobs, we assigned processing sequence genes to the jobs and combined these with processing sequence genes assigned to the operations, which were thereby expressed as the processing sequences of the operations. Table 1 shows examples of the processing sequences of operations and the six classes of genes in three job examples. It can be seen that the processing sequence of an operation was the sum of the values of the “(1) Processing sequence for each job” gene and the “(2) Processing sequence for each operation” gene, thus becoming more prone to triggering swapping of process orders for processes belonging to different jobs; thus, the larger the range of possible values of the processing sequence gene assigned to an operation, the larger the likelihood of switching the processing sequence of operations belonging to different jobs. By setting the range of values of the processing sequence gene assigned to an operation and the gene assigned to a job in advance, it was possible to determine the likelihood of switching the processing sequence of operations belonging to different jobs. Here, using the processing sequence adjustment values a , b , and g , the processing sequence genes assigned to the operation were in a range from $-a$ to a , and the processing sequence genes assigned to the job were from b to $g - b$. The processing sequences thereby had a range of $b - a$ to $g - b + a$. In this study, assuming $g = 1$ and $b = a$, the processing sequence of the operation was set to be in the range 0 to 1, and a was assumed to have a range of 0 to 0.5.

If a was close to zero, the processing sequences belonging to different jobs were not swapped, and only the processing sequences belonging to the same job were swapped. In contrast, if a was 0.5, the processing sequence genes assigned to jobs did not function, with only the processing sequence genes assigned to operations used. By setting a a suitable value that falls between 0 and 0.5, it was thought that a solution could be efficiently found.

The genes for “(2) Processing sequence for each operation” were arranged in the order of the bed operation, the column operation, and the operation after the bed and column were integrated. (The same applied to the genes of each class described below.)

③ Cooperative process for each operation

Operations where cooperative work by operators and robots was possible were flagged. A gene of 1 for an operation indicated that the operation was cooperative, and a gene of 0 indicated that the

Table 1 Genetic representation and processing sequence

Class	Job number		
	1	2	3
Gene of processing sequence for each job	0.3	0.4	0.7
Gene of processing sequence for each operation	0.2, -0.1, 0.1 ..., ..., 0.1	-0.1, 0.1 ..., 0	0.1, -0.2 ..., -0.2
Gene of cooperative process for each operation	1, 0, ..., 1	1, 1, ..., 1	0, 1, ..., 0
Gene of assigned worker number for each operation	1, 2, ..., 3	2, 1, ..., 3	1, 1, ..., 1
Gene of assigned robot number for each operation	1, 1, ..., 3	3, 3, ..., 1	2, 1, ..., 3
Gene of assigned spot number for each operation	6, 1, ..., 8	7, 2, ..., 4	3, 2, ..., 5
Processing sequence for scheduling	0.5, 0.2 ..., 0.4	0.3, 0.5 ..., 0.4	0.8, 0.5 ..., 0.5

operation was not cooperative. The operations were scheduled as cooperative only when both the genes of two cooperative processes were 1.

④ Assigned worker number for each operation

This is a gene that was assigned to an operation to be performed by a worker. When assigning an operation, it indicated the number of the worker to be assigned. The number of the worker is determined by the rank of skill value among the workers available for work in the time period.

⑤ Assigned robot number for each operation

This is a gene that was assigned to an operation to be performed by a robot. It indicated the number of the robot to be assigned.

⑥ Assigned spot number for each operation

This gene was assigned to an operation with multiple candidate spots to assign the process. It shows which number spot was assigned.

3.4 Gene Manipulation Process

The steps followed to manipulate the genes of the GA in this study are given below.

- Step 1: Create N_p chromosomes at random, where N_p is the number of individuals in each generation; this step is treated as the initial generation.
- Step 2: Transfer the best individuals to the next generation. The chromosomes for transfer to the next generation are then selected until the number of individuals in the next generation reaches $N_p/2$. The tournament method is used to select the best

chromosome among two randomly selected chromosomes. The next generation is then designated as the current generation.

- Step 3: Select two chromosomes from the current generation and mate them as parent chromosomes to generate two offspring chromosomes. This procedure is repeated until $N_p \times 0.4$ individuals are generated in Step 3. Uniform mating is applied as the mating method. For each gene of each of the six classes of chromosomes, the gene value is inherited from each of the two parental chromosomes with a probability of 50%.

- Step 4: Randomly select one of the chromosomes from the current generation and mutate it. This procedure is repeated until $N_p \times 0.1$ individuals are generated in Step 4. For each of the six classes of chromosomes, the mutation method randomly changes the value of the gene to the range of possible values for the chromosome with a probability of 5%.

- Step 5: If the number of generations reaches a preset value, the program terminates; otherwise, it returns to Step 2.

The time from scheduling to the end of all jobs, i.e., the “makespan” was used to evaluate the adaptability of each gene.

3.5 Dispatching Policy

The processes were dispatched based on the following rules 1 to 5.

- Rule 1: For each process, the processing sequence is determined and allocated based on the sum of the values of the genes “(1) Processing sequence for each job” and “(2) Processing sequence for each operation”. The worker, robot, and site to be allocated were determined by the values of the gene classes of “(3) Cooperative process for each operation,” “(4) Assigned worker number for each operation,” “(5) Assigned robot number for each operation,” and “(6) Assigned spot number for each operation”.

- Rule 2: If two operations can be processed at the same site without a time interval, the operations are processed at the same site regardless of the gene value of “(6) Assigned spot number for each operation”.

- Rule 3: Each operation is allocated to the earliest possible time.

- Rule 4: The first time a bed/column operation in a job is assigned, decide which AGV to assign to the bed/column operation. One AGV is released when the bed/column is integrated and the job is finished, with no processes from either the bed or column or from other jobs assigned to that AGV until the AGV is released.

- Rule 5: When assigning an operation to a job to which no operation has been assigned, assign the operation only when two or more AGVs are available. Simultaneously, reserve an AGV for either the bed or the column and do not assign another job to that AGV until then.

In the scheduling target of this study, two beds/columns before integration were assembled by sharing the same type of AGVs. Furthermore, the AGVs were not released until the steps were completed in one process. Due to its nature, if only one of the beds/columns of each job is allocated to an AGV and all the AGVs are occupied, the AGV cannot be released owing to the integration of the bed/column, resulting in a non-executable solution. Rule 5 prevents the creation of infeasible solutions.

4. Evaluation Experiments

Numerical experiments were conducted to confirm the effectiveness of the proposed scheduling method.

4.1 Experimental Conditions

In the experiment, we performed scheduling using the assembly of five machine tools as a case study. Figure 8 shows the assembly process of machine tools A, B, and C used as the case studies; the operations performed by the robot and the operator in the assembly of the bed and column are separately represented. A box indicated with a black frame in the figure represents one operation. The operations were processed in order from left to right. The arrows indicate a change in the work site. The orange boxes indicate worker operations. The yellow boxes indicate operations for non-cooperative industrial robots. The green boxes indicate operations that can be performed by either cooperative or non-cooperative industrial robots. The blue boxes indicate the processes for fixed robots. The two process groups surrounded by dotted lines arranged vertically indicate that the operations in the upper process group can cooperate with the operations in the lower process group. However, cooperative work was not possible with processes assigned to non-cooperative industrial robots and operations for workers. Machine tool D and machine tool E had the same assembly process as machine tool A, but the overall process times were 0.8 times and 1.4 times longer, respectively.

The worker’s working time was defined as the standard working time of the operation divided by the worker’s skill value. The skill values of the workers were 1.3, 1.0, and 0.6 for the three day-shift workers and 1.2, 0.9, and 0.7 for the night-shift workers, respectively.

The genetic algorithm proposed in this study was used for scheduling with three different values for the processing sequence adjustment value a : 0.0001, 0.0333, and 0.5. For the case where $a = 0.0001$ and therefore close to 0, swapping of processing sequences between different jobs was almost eliminated. In contrast, when a was 0.5, the class of “(1) Processing sequence for

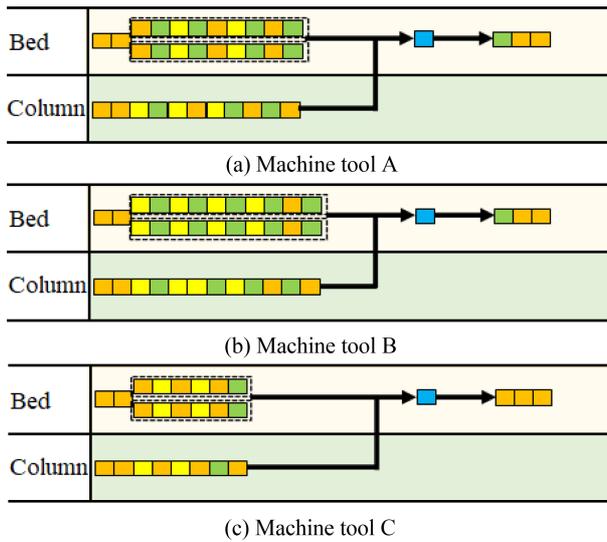


Fig. 8 The assembly processes of machine tools are shown. The orange boxes indicate worker operations, yellow indicate non-cooperative industrial robots' operations, green indicate robot's operations, and blue indicate the fixed robots' operations. The two process groups surrounded by dotted lines indicate cooperative work.

each job” did not function at all. The above two patterns can be expressed practically without bringing up a ; $a = 0.0333$ was set as the reciprocal of the number of jobs, assuming the number of jobs was 30, as it was an appropriate intermediate value.

The scheduling result is evaluated by makespan, and the time unit is one second. For comparison, we also performed scheduling using the shortest processing time (SPT) rule, in which dispatching was performed in the order of shortest process times without using the genetic algorithm.

4.2 Scheduling Results

Figure 9 shows the transition of the evaluation values for each number of generations of the genetic algorithm with a solid line when the number of jobs was 30, and the number of machine tools A to E assembled was 7, 6, 6, 6, and 5, respectively. For comparison, the evaluation values of SPT are also shown with dotted lines. Five test runs were conducted, and the average values are shown. The number of individuals in each generation of the genetic algorithm was $N_p = 3000$, and the number of generations of the genetic algorithm was 600, according to the preliminary experiments. The computation time of the genetic algorithm was 50 hours per trial on a PC with an Intel Xeon E-2640 CPU v3@2.60 GHz and 32 GB memory.

The pattern achieved with $a = 0.0001$ had the worst evaluation value, confirming that a should not be too small. The patterns achieved with $a = 0.0333$ and $a = 0.5$ yielded better results than

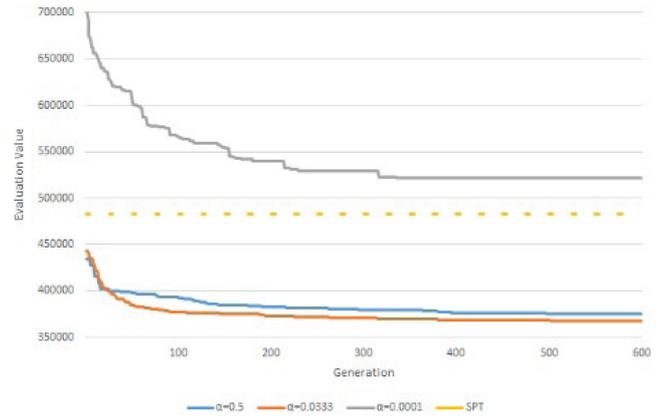


Fig. 9 Changes in evaluation value

SPT for the initial generation. The pattern for $a = 0.0333$ was equivalent to that for the $a = 0.5$ up to 20 generations but was significantly better than that achieved with $a = 0.5$ at 100 generations. Furthermore, it yielded better results than those achieved with $a = 0.5$ at 600 generations when the search was advanced.

The left four bars in fig. 10 shows the means and standard deviations of the patterns for $a = 0.0333$ and $a = 0.5$ at 100 and 600 generations, respectively. $a = 0.0333$ was still better on average at 600 generations, but $a = 0.0333$ was much better at 100 generations, including its standard deviation.

As examples of the different combinations of jobs, we created five job combinations in which the number of jobs was 30 and the assignment of machine tools A to E to each job was randomly determined; we performed scheduling for these job combinations. The right four bars in fig. 10 show the mean values and standard deviations of the patterns achieved with $a = 0.0333$ and $a = 0.5$ for 100 and 600 generations, respectively. The standard deviations were naturally larger because the job combinations were different, but we could confirm that $a = 0.0333$ was better on average, especially at 100 generations.

From these results, there is room for research on the optimal a value, but we confirmed that using a is better because $a = 0.0333$ is better than $a = 0.5$, which can be expressed without a by just disusing the class of “(1) Processing sequence for each job”. The reciprocal of the number of jobs will be better try of a value. It is assumed that using a is effective because it shortens the time difference between the completion of bed and column operation, and contribute to using a limited number of AGVs efficiently to keep the robots running during the night when the operators were not available.

Figure 11 shows a Gantt chart of some of the scheduling results obtained. The horizontal axis represents time, while the bars in the

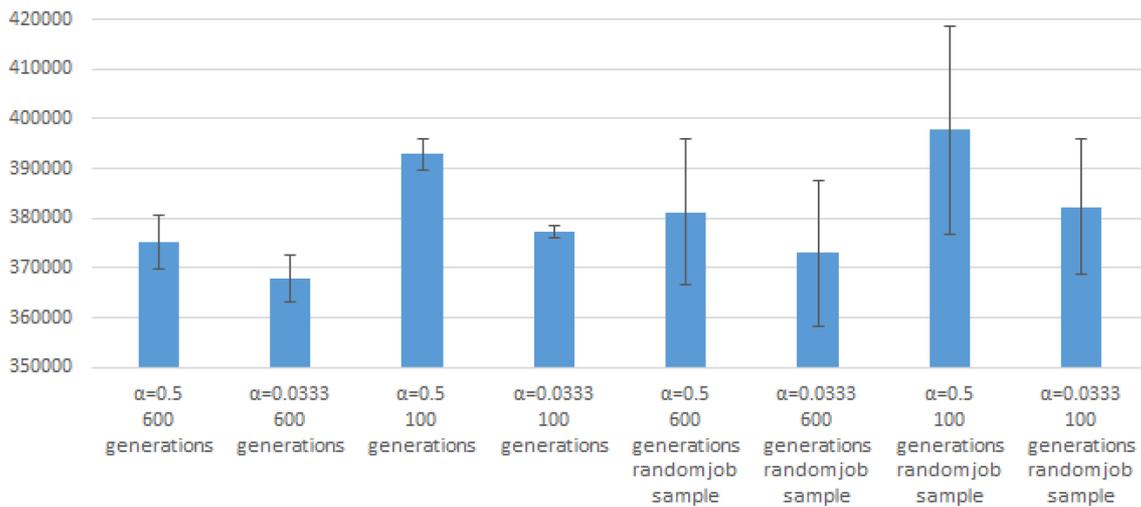


Fig. 10 Evaluation values under different a value, generations, and job samples

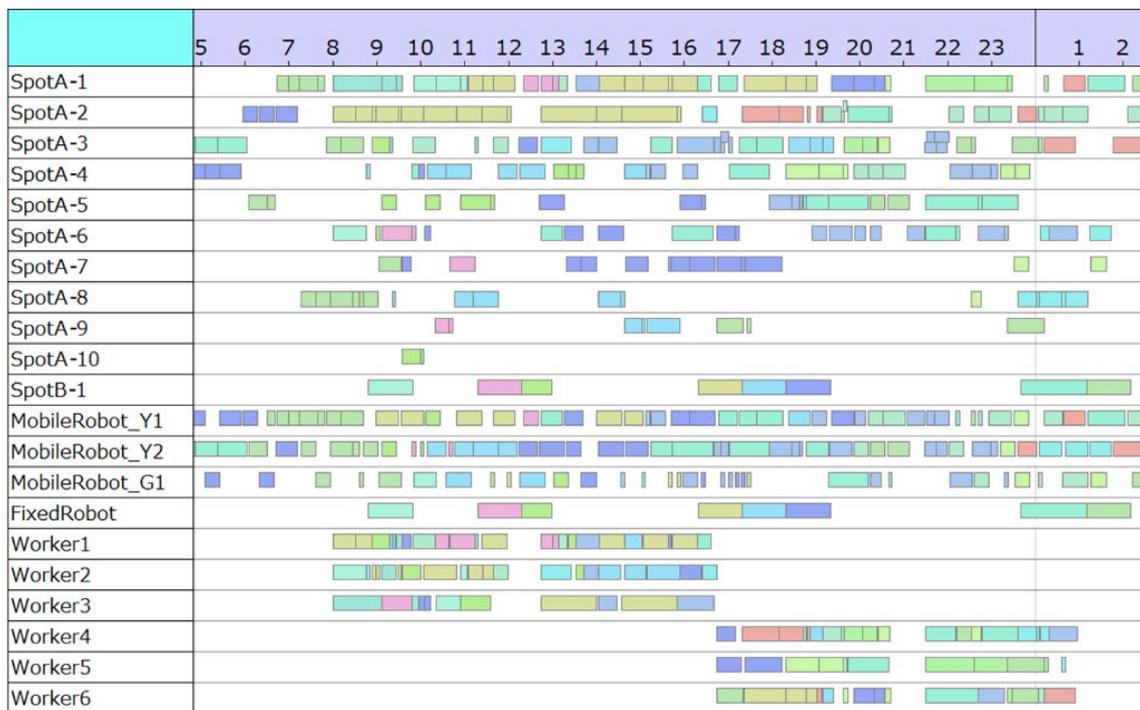


Fig. 11 Schedule Gantt chart

Gantt chart represent the state in which a bed or a column is placed at each spot and the state in which a robot or a worker is working. The color of the bar indicates the differences between the jobs.

5. Conclusions

In this paper, we proposed free spot assembly in which multiple workers and robots work cooperatively and collaboratively. The elemental technologies for realizing free spot assembly in machine

tools were verified on actual machines, and the feasibility of the free spot assembly was demonstrated.

Furthermore, we proposed a scheduling method for efficient free spot assembly and confirmed its effectiveness through numerical calculations. In the proposed method, the machine tool assembly process was represented by the following genes: “(1) Processing sequence for each job,” “(2) processing sequence for each operation,” “(3) cooperative process for each operation,” “(4) assigned worker number for each operation,” “(5) assigned robot number for each operation,” and “(6) assigned spot number for

each operation. The process processing sequence adjustment value a was used as a parameter. We realized a schedule based on the adaptability evaluation value of the schedule.

We constructed a scheduling system based on the proposed method and conducted evaluation experiments. By setting the processing sequence adjustment value a to an appropriate value, we obtained a better evaluation, especially when the search time was relatively short.

REFERENCES

1. Tien, J. M., (2011), Manufacturing and services: From mass production to mass customization, *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 20, 129-154.
2. Kokuryo, D., Kaihara, T., Kuik, S. S., Suginochi, S., Hirai, K., (2017), Value co-creative manufacturing with IoT-based smart factory for mass customization, *International Journal of Automation Technology*, 11(3), 509-518.
3. Koren, Y., Shpitalni, M., (2010), Design of reconfigurable manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 29(4), 130-141.
4. Li, X., Bayrak, A. E., Epureanu, B. I., Koren, Y., (2018), Real-time teaming of multiple reconfigurable manufacturing systems, *CIRP Annals*, 67(1), 437-440.
5. Huettemann, G., Buckhorst, A. F., Schmitt, R. H., (2019), Modelling and assessing line-less mobile assembly systems, *Procedia CIRP*, 81, 724-729.
6. Michalos, G., Sipsas, P., Makris, S., Chryssolouris, G., (2016), Decision making logic for flexible assembly lines reconfiguration, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 233-250.
7. Michalos, G., Kousi, N., Makris, S., Chryssolouris, G., (2016), Performance assessment of production systems with mobile robots, *Procedia CIRP*, 41, 195-200.
8. Buckhorst, A. F., Huettemann, G., Grahn, L., Schmitt, R. H., (2019), Assignment, sequencing and location planning in line-less mobile assembly systems, *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*, 227-238.
9. Buckhorst, A. F., Schmitt, R. H., (2020), Multi-staged, multi-objective optimization for operation management in line-less mobile assembly systems (LMAS), *Procedia CIRP*, 93, 1121-1126.
10. Buckhorst, A., do Canto, M., Schmitt, R., (2022), The line-less mobile assembly system simultaneous scheduling and location problem, *Procedia CIRP*, 106, 203-208.
11. Bean, J. C., (1994), Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization, *ORSA Journal on Computing*, 6(2), 154-160.
12. Kaweegitbundit, P., Eguchi, T., (2016), Flexible job shop scheduling using genetic algorithm and heuristic rules, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 10(1), JAMDSM0010. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2016jamdsm0010>



Kosuke Inoue

Ph.D. candidate, Department of System Design Engineering, Keio University.
E-mail: inoueko@makino.co.jp



Hideki Aoyama

Professor, Department of System Design Engineering, Keio University.
E-mail: haoyama@sd.keio.ac.jp

외란관측기를 이용한 비선형 자기부상 시스템의 제어 성능 향상

Control Performance Improvement of a Nonlinear Magnetic Levitation System with a Disturbance Observer

정우봉¹, 안형준^{2,#}
Yupeng Zheng¹ and Hyeong-Joon Ahn^{2,#}

¹ 숭실대학교 일반대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate school, Soongsil University)
² 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)
Corresponding Author / E-mail: ahj123@ssu.ac.kr, TEL: +82-2-820-0654
ORCID: 0000-0002-4947-2311

KEYWORDS: Magnetic levitation system (자기부상 시스템), Disturbance observer (외란 관측기), Disturbance rejection (외란 제거), Command following (명령추종)

Magnetic levitation system (MLS) is a typical nonlinear system that controls the position of a steel ball with the magnetic force of the electromagnetic actuator. Since disturbances, due to various external forces and modeling errors, may cause excessive vibration or poor command following, disturbance suppression is necessary to improve the control performance of the MLS. This paper presents a control performance improvement approach of an MLS with a disturbance observer (DOB). First, a mathematical model of the MLS was introduced and validated with the measured frequency response. The MLS steel ball was levitated with a proportional–integral–derivative (PID) controller and a DOB was designed based on the physical model of the MLS. Both disturbance rejection and command tracking performances of the MLS with the DOB were investigated with several design parameters such as PID gains and Q filter. The disturbance rejection and command tracking performances were improved by 76.1% and 64.7%, respectively by using DOB. Finally, the disturbance rejection and command-following performances of the MLS with the DOB were verified experimentally. The effectiveness and limitations of DOB were explained with measured closed-loop frequency responses.

Manuscript received: November 11, 2022 / Revised: December 17, 2022 / Accepted: December 27, 2022
This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2022

NOMENCLATURE

A = State Matrix
 $a_{2,1}, a_{2,3}, a_{3,3}$ = The Element of Matrix A
 B = Input Matrix
 b_3 = The Element of Matrix B
 C = Output Matrix
 c_i = Leakage Current of the Electromagnet
 d = Disturbance
 F_{em} = Electromagnetic Force
 $F_{em P1}$ = Coil Inductance
 $F_{em P2}$ = Coefficients of Electromagnetic Force

f_i = Time Constant of the Electromagnet
 g = Gravity Acceleration
 k_i = Voltage-Current Static Gain
 kk = Voltage-Force gain of the Electromagnet
(= $x \times a_{2,3} \times k_i$)
 m = Mass of the Steel Ball
MLS = Magnetic Levitation System
 r = Reference Command
 s = Laplace Complex Variable
 τ = Time Constant of Q Filter
 u = Control Effort (Voltage)

x_1, x_2, x_3	= State Space (The Position of the Iron Ball, Velocity of the Iron Ball, and Current)
x_{10}, x_{20}, x_{30}	= Equilibrium State (The Position of the Iron Ball, Velocity of the Iron Ball, and Current)
y	= Output

1. 서론

자기부상 기술은 비접촉, 조용한 운전, 고효율 등의 장점을 가지고 있어 다양한 적용처에 사용되고 있다. 대표적으로 자기 부상열차가 있고 자기 베어링도 분자 펌프와 칠러 등에 사용되고 있다[1,2].

자기부상 시스템(Magnetic Levitation System, MLS)은 전압을 통해 코일의 전류를 조절하고 자기력을 발생시켜 대상체의 위치를 제어하는 비선형 시스템이다[3]. 실제 MLS에 대상체 질량 등 시스템의 변화나 외란으로 인해 진동이 발생하거나 명령 추종 성능이 저하될 수 있어 제어 성능을 향상시키는 기술이 필요하다.

외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 간단한 구조로 외란을 효과적으로 제거해줄 수 있다[4-6]. 하지만, MLS을 이용한 외란 제거와 명령 추종 성능 향상에 실험적 연구는 아직 많지 않고 대부분 상태공간 모델을 기반으로 연구하였다[7,8].

이 논문은 DOB를 이용한 MLS의 제어 성능 향상을 연구하였다. 먼저 MLS의 수학적 모델을 소개하고 주파수 응답 측정을 통하여 검증하였다. 물리 모델 기반으로 DOB를 설계하고 설계 변수에 따른 제어 성능 변화를 확인하였다. 또한, PID 제어로 부상된 MLS에 DOB를 적용하여 대상체 질량 및 외란 주파수 변화에 따른 외란 제거와 명령 추종 성능을 확인하였다. 마지막으로 페루프 주파수 응답 측정을 통해서 DOB의 외란 제거 및 명령 추종 성능 향상 이유와 그 한계를 설명하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 MLS

MLS는 대상체 (쇠공) 위치를 측정하고 전자석 코일 전압을 조절하여 부상시키는 비선형 시스템이다. MATLAB/Simulink와 연동하여 200 Hz 샘플링(Sampling) 주파수로 실시간 제어와 모니터링이 가능하다. Fig. 1에 사용한 MLS와 개략 모델을 나타냈다.

2.2 모델링

Eqs. (1)부터 (4)에 MLS의 비선형 수학적 모델을 나타냈다. u 는 전자석 코일 전압, m 은 쇠공 질량, g 는 중력 가속도, x_1 은 쇠공 위치, x_2 는 쇠공 속도, x_3 은 전류, F_{em} 은 전자기력, F_{emP1} 은 코일

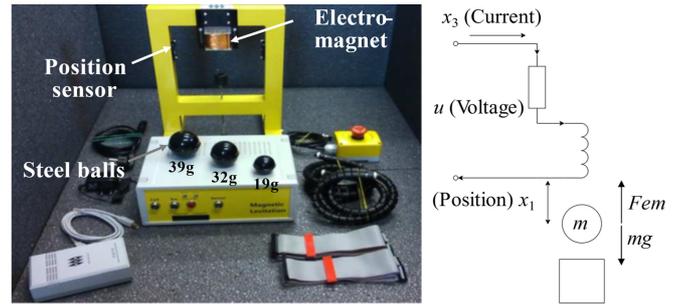


Fig. 1 MLS [9] (Adapted from Ref. 9 on the basis of webpage)

Table 1 Parameters of MLS

Symbol	Description	Value
c_i	Leakage current	0.0243 [A]
f_i	Time constant of coil	0.0321 [s]
$F_{em P1}$	Coil inductance	1.7521×10^{-2} [H]
$F_{em P2}$	Coefficients of electromagnetic force	5.8231×10^{-3} [m]
k_i	Voltage-current static gain	2.6903 [A/V]
m	Nominal mass of the steel ball	0.032 [kg]
x_{10}	Equilibrium position of the steel ball	0.01 [m]
x_{30}	Equilibrium current	0.6322 [A]

인덕턴스, F_{emP2} 는 전자기력 관련 계수, k_i 는 전류-전압의 정적 이득, f_i 는 전자석 코일의 시상수이다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{1}$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{F_{em}}{m} + g \tag{2}$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{f_i}(k_i u + c_i - x_3) \tag{3}$$

$$F_{em} = x_{30}^2 \frac{F_{em P1}}{F_{em P2}} \exp\left(-\frac{x_1}{F_{em P2}}\right) \tag{4}$$

위의 비선형 모델을 평형점 $x_1 = 0.01$ m에서 선형화하여 Eq. (5)에 나타냈다. A 는 상태 행렬, B 는 입력 행렬, C 는 출력 행렬이다. MLS의 파라미터는 Table 1에 나타냈다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx \tag{5}$$

Here, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{2,1} & 0 & a_{2,3} \\ 0 & 0 & a_{3,3} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0 \ 0],$

$$a_{2,1} = \frac{x_{30}^2 F_{em P1}}{m F_{em P2}^2} \exp\left(-\frac{x_{10}}{F_{em P2}}\right),$$

$$a_{2,3} = \frac{2x_{30} F_{em P1}}{m F_{em P2}} \exp\left(-\frac{x_{10}}{F_{em P2}}\right),$$

$$a_{3,3} = -f_i^{-1}, \text{ and } b_3 = k_i f_i^{-1}.$$

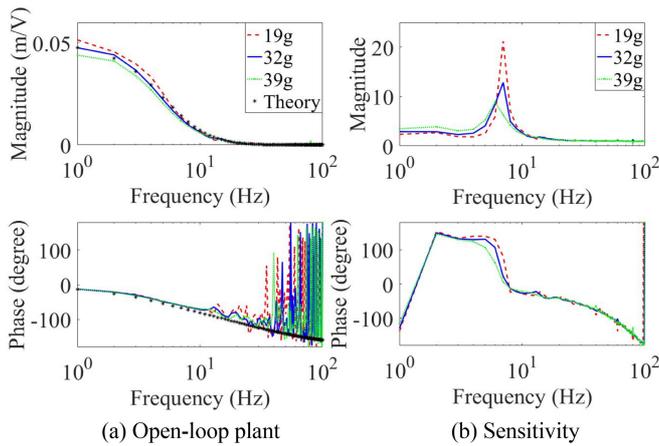


Fig. 2 Open-loop frequency responses and closed-loop sensitivity functions of the MLS of different mass

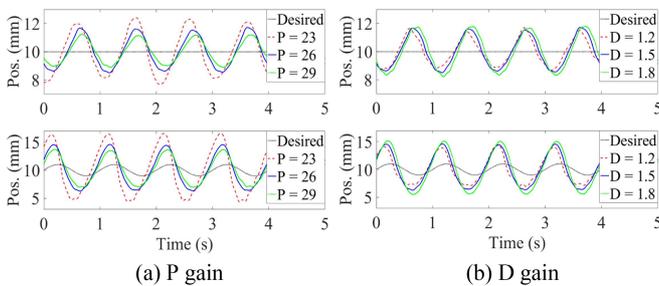


Fig. 3 Control performances of the MLS W/O DOB in cases of different PID gains (upper: disturbance rejection and lower: command following)

2.3 모델 검증

PID 위치 제어를 수행하면서 다중정현파(Multisine) 신호를 MLS에 부가하여 개루프와 폐루프 주파수 응답 측정을 하고 결과는 Fig. 2에 나타났다. 우선 대상체 질량 변동에도 안정한 부상이 가능하도록 시행 착오를 통해 PID 제어 이득을 조절하였다. 질량을 19, 32, 39 g으로 변화시키면서 측정된 주파수 응답과 선형 이론 모델의 주파수 응답을 Fig. 2(a)에 나타났다. 동작점에서 모델링의 정확도가 높고 대상체 질량 변화에 따라 1 Hz에서 주파수 응답 크기는 0.0476에서 0.0515 m/V로 약 8.19% 변화하였다. PID 제어로 부상시킨 대상체 질량 변화에 따른 민감도 함수를 측정하여 Fig. 2(b)에 나타났다. 대상체 질량이 감소함에 따라 민감도함수의 최대값이 커져서 안정성이 줄어든다. 일반적으로 샘플링 주파수가 낮으면 자기부상 제어 성능이 떨어진다. 이 연구의 샘플링 주파수가 200 Hz로 낮아 대상체의 질량이 가벼움에도 변위 제어 절점 주파수가 7 Hz 정도로 낮고 제거 가능한 외란 주파수도 절점 주파수를 넘지 못한다.

0.001 V 진폭의 정현파 외란과 0.01 m 진폭의 정현파 입력을 사용해 PID 제어로 부상된 MLS의 외란 제거와 명령 추종 성능을 실험하여 Fig. 3에 나타났다. Fig. 3(a)와 같이 비례 이득(P)이 증가할수록 외란 제거 성능과 명령 추종 성능이 향상된다.

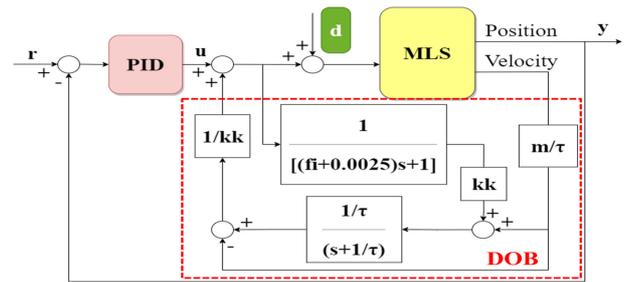


Fig. 4 Schematic of the Simulink realtime block diagram of the MLS with DOB

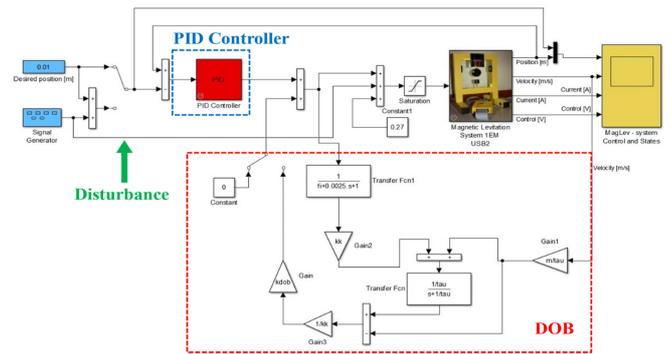


Fig. 5 Simulink realtime block diagram of the MLS with DOB

Fig. 3(b)를 보면 미분 이득(D)이 감소할수록 외란 제거 성능과 명령 추종 성능이 향상된다. 비례 이득이 증가시키고 미분 이득을 감소시키면 명령 추종 성능이 향상되나 MLS의 안정성이 나빠져 제어 이득 조절에 한계가 있다[10].

3. DOB

3.1 DOB 설계

DOB는 기본적으로 동적 시스템의 외란을 추정하여 제거하며 DOB가 적용된 제어 시스템의 개략도를 Fig. 4에 나타났다. 사용한 제어 시스템은 제어기(PID), 필터, 실제 플랜트(MLS)로 구성된다. 그리고 r, u, y 는 각각 기준입력, 제어입력, 출력이며 d 는 외란이다. kk 는 전자석 구동기의 전압-힘 이득으로 Eq. (6)과 같다[11].

$$kk = m \times a_{2,3} \times k_i \tag{6}$$

Fig. 5는 속도 피드백을 받는 DOB가 적용된 실제 제어 시스템의 블록 선도이다.

최종 질량 32 g, 외란 주파수 1 Hz일 때, 필터 시정수인 τ 변화에 따른 외란 제거 성능을 Fig. 6과 Table 2에 나타났다. τ 가 작아질수록 외란 제거 성능이 향상된다.

필터의 시정수 τ 를 변화(0.5, 0.1, 0.05 sec)시키면서 실제 MLS의 페루프 민감도 함수를 측정하여 Fig. 7에 나타났다. τ 가 감소하면 저주파 대역의 외란 제거 성능이 향상되지만 민감도

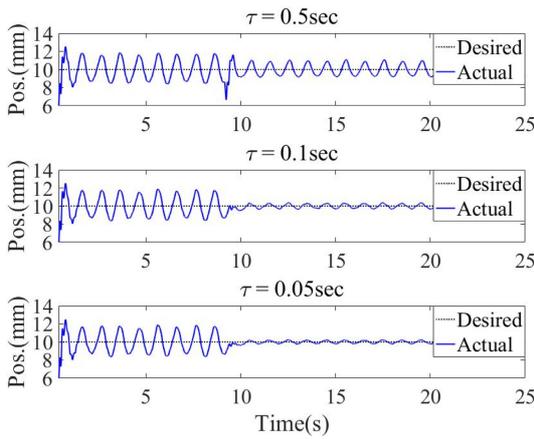


Fig. 6 Disturbance rejection of the MLS with DOB of different τ

Table 2 Disturbance rejection of the MLS with DOB of different τ

τ [sec]	W/O DOB [mm]	W/T DOB [mm]	Rejection ratio [%]
0.5	3.41	1.73	49.3
0.1	3.19	0.74	76.8
0.05	3.43	0.48	86.0

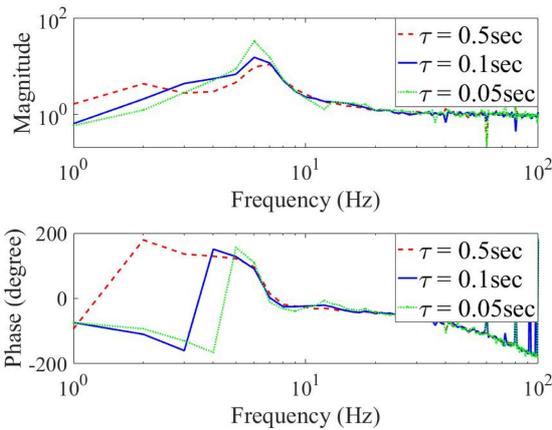


Fig. 7 Sensitivity function of the MLS with DOB of different τ

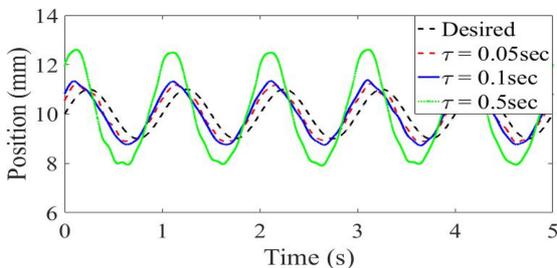


Fig. 8 Command following of MLS with DOB of different τ

함수 최대값이 증가하여 안정성이 나빠진다.

Q 필터의 시정수인 τ 를 변화시키며 명령 추종 실험을 수행한 결과를 Fig. 8에 나타냈다. Q 필터의 시정수인 τ 가 작을수록 명령 입력을 잘 추종한다.

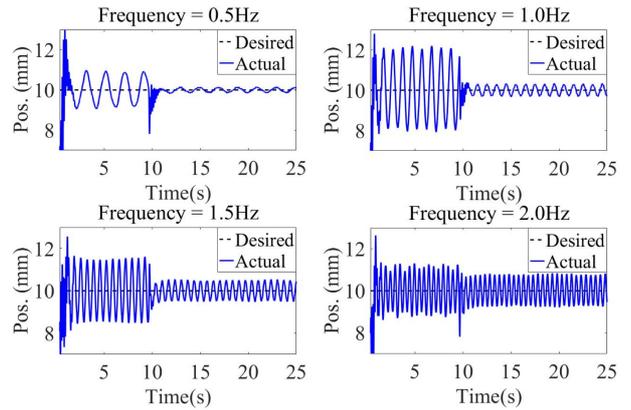


Fig. 9 Disturbance rejection of the MLS with DOB against different disturbance frequencies

Table 3 Disturbance rejection of the MLS against different frequencies

Freq. [Hz]	W/O DOB [mm]	W/T DOB [mm]	Rejection ratio [%]
0.5	1.89	0.31	83.6
1.0	4.07	0.63	84.5
1.5	2.91	1.01	65.3
2.0	2.35	1.54	34.5

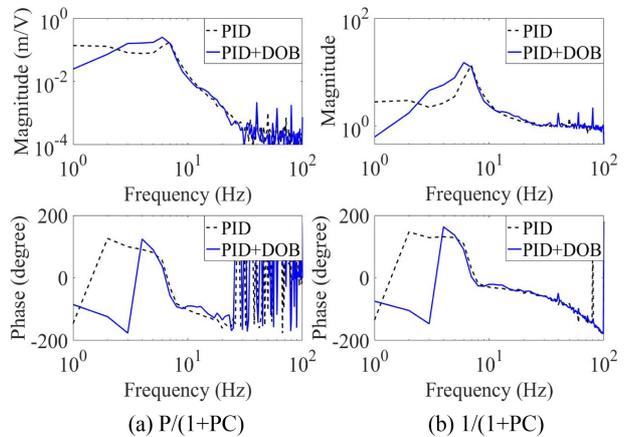


Fig. 10 Close-loop frequency responses of the MLS W/O and W/T DOB

4. 실험

4.1 외란 제거 실험

최공의 공칭 질량이 32 g이고 정현파 외란이 0.01 V(약 0.0184 N)일 때 외란 주파수 변화에 따른 외란 제거 응답을 Fig. 9와 Table 3에 나타냈다. 저주파 외란이 DOB로 잘 제거되지만 외란 주파수가 높아질수록 외란 제거 성능이 저하되었다. Table 3 과 같이 외란 주파수가 0.5 Hz일 때 약 83.6%, 주파수가 1 Hz 일 때 약 84.5%, 주파수가 1.5 Hz일 때 약 65.3%, 주파수가

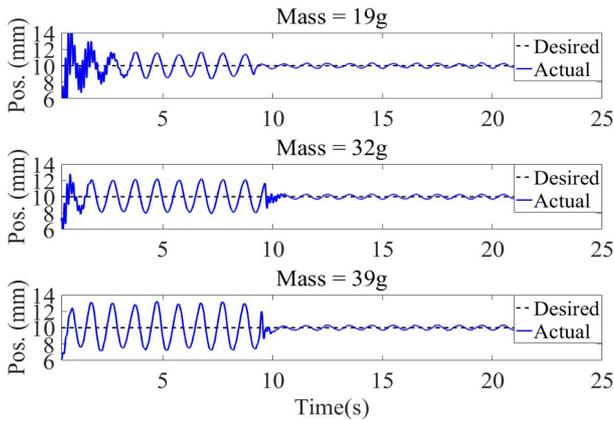


Fig. 11 Disturbance rejection of the MLS of different masses W/T DOB

Table 4 Disturbance rejection of the MLS of different masses W/T DOB

Mass [g]	W/O DOB [mm]	W/T DOB [mm]	Rejection ratio [%]
19	3.08	0.62	79.9
32	4.12	0.62	85.0
39	5.75	0.56	90.3

2 Hz일 때 약 34.5%, 평균 67.0%로 제거되었다.

PID만 사용할 때와 PID 및 DOB를 같이 사용할 때의 MLS 페루프 주파수 응답 측정된 결과는 Fig. 10(a)에 나타났다. PID만 사용할 때보다 DOB를 같이 사용할 때 1-2.4 Hz 범위에서 외란 제거 성능이 향상되지만 2.4 Hz 이상의 주파수에서는 외란 제거 성능이 저하된다.

Fig. 11과 Table 4에 주파수가 1.0 Hz일 때 쇠공의 질량을 바꾸며 외란 제거 성능을 실험했다. 질량이 증가할수록 시스템 응답이 느려져 외란 제거 성능이 향상되었다. Table 4와 같이 외란 주파수가 1.0 Hz일 경우 쇠공 질량이 19 g일 때 약 79.9%, 질량이 32 g일 때 약 85.0%, 질량이 39 g일 때 약 90.3%, 평균 85.1%로 제거되었다.

4.2 명령 추종 실험

주파수 진폭이 0.001 m인 정현파 입력에 대한 명령 추종 실험을 수행했다. 쇠공의 질량이 32 g일 때 주파수 증가에 따른 명령추종 성능을 Fig. 12와 Table 5에 나타났다. Table 5와 같이 DOB를 사용할 때 명령추종 성능이 평균 60.7% 향상되었다. 여기서 증폭비(Amp. Ratio)는 명령 응답과 명령의 비율이다.

주파수를 고정하고 쇠공의 질량 변화에 따른 명령 추종 실험을 수행하여 Fig. 13과 Table 6에 나타났다. DOB를 사용하면 명령 추종 성능이 평균 68.6% 향상되며 질량이 증가할수록 응답이 느려져 더욱 향상되었다.

PID 제어기만 사용한 경우 PID 및 DOB를 함께 사용한 경우에

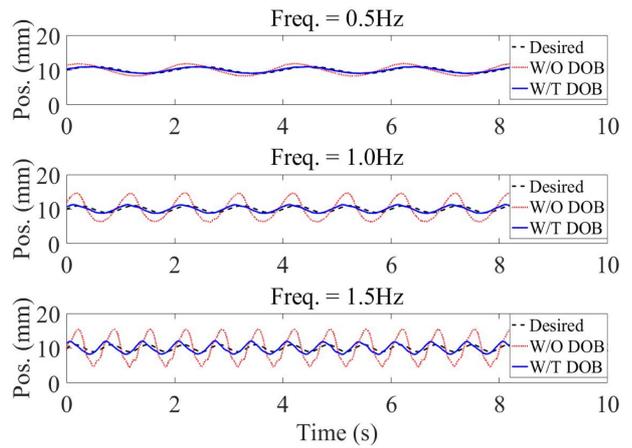


Fig. 12 Command following of the MLS with DOB for different command frequencies (mass = 32 g)

Table 5 Command following of the MLS with DOB for different command frequencies (mass = 32 g)

Freq. [Hz]	Amp. ratio W/O DOB	Amp. ratio W/T DOB
0.5	1.740	0.905
1.0	4.075	1.243
1.5	5.405	1.920

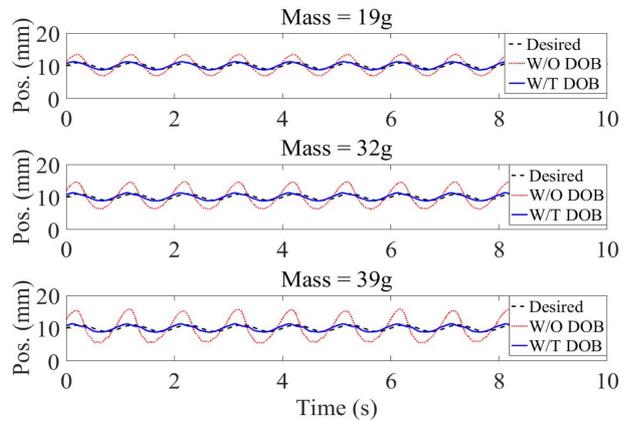


Fig. 13 Command following of the MLS of different masses W/T DOB (@1 Hz)

Table 6 Command following of the MLS of different masses W/T DOB (@1 Hz)

Mass [g]	Amp. ratio W/O DOB	Amp. ratio W/T DOB
19	3.250	1.285
32	4.075	1.243
39	5.025	1.210

대해 상보 민감도 함수($PC/(1+PC)$)의 측정 결과를 Fig. 14에 나타났다. 주파수가 2.2 Hz 이하에서 PID만 사용할 때보다 PID 및 DOB 같이 사용할 때 명령 추종 성능이 향상된다.

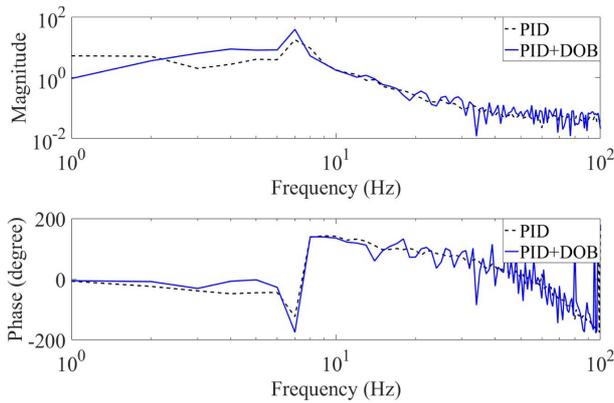


Fig. 14 Complementary sensitivity functions of the MLS W/O and W/T DOB

5. 결론

이 논문은 DOB를 이용한 MLS의 제어 성능 향상을 연구하였다. 물리 모델 기반으로 DOB를 설계하고 설계 변수 조절에 따른 제어 성능 변화를 확인하였다. DOB를 통해서 주파수가 2 Hz 이하에서 외란 제거 및 명령 추종 성능이 향상되었다. 외란 제거 성능은 평균 76.1%, 명령 추종 성능이 평균 64.7%로 향상되었다. 페루프 주파수 응답 측정을 통하여 DOB의 성능 향상과 그 한계를 확인하였다. 향후 제어 시스템의 샘플링 주파수를 높이고 전류 제어를 포함한 MLS에 DOB를 적용하는 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 한국 에너지 기술평가원의 “수열 냉·난방 및 재생 열 하이브리드 시스템 기술개발 및 실증”의 지원을 받아 연구되었음(No. 20208901010010, 2020).

REFERENCES

1. Yang, Z.-J., Miyazaki, K., Kanae, S., Wada, K., (2004), Robust position control of a magnetic levitation system via dynamic surface control technique, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(1), 26-34.
2. Yoo, S. J., Kim, S., Cho, K.-H., Ahn, H.-J., (2021), Data-driven self-sensing technique for active magnetic bearing, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22(6), 1031-1038.
3. Balko, P., Rosinová, D., (2017), Modeling of magnetic levitation system, *Proceedings of the 2017 International Conference on Process Control (PC)*, 252-257.

4. Radke, A., Gao, Z., (2006), A survey of state and disturbance observers for practitioners, *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, 6.
5. Shim, H., Park, G., Joo, Y., Back, J., Jo, N. H., (2016), Yet another tutorial of disturbance observer: Robust stabilization and recovery of nominal performance, *Control Theory and Technology*, 14(3), 237-249.
6. Yamato, S., Nakanishi, K., Suzuki, N., Kakinuma, Y., (2021), Development of automatic chatter suppression system in parallel milling by real-time spindle speed control with observer-based chatter monitoring, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22, 227-240.
7. Kang, N.-S., Jo, N.-H., (2013), A study on the controller design for EMS system using disturbance observer, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 62(9), 1264-1269.
8. Jo, N.-H., (2022), A study on a reduced-order disturbance observer controller for nonlinear electro-magnetic suspension systems, *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 71(1), 196-202.
9. INTECO, Magnetic Levitation Systems. <https://www.inteco.com.pl/products/magnetic-levitation-systems/>
10. White, M. T., Tomizuka, M., Smith, C., (2000), Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 5(1), 3-11.
11. Kobayashi, H., Katsura, S., Ohnishi, K., (2007), An analysis of parameter variations of disturbance observer for motion control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(6), 3413-3421.



Yu-Peng Zheng

Master student in the Department of Mechanical Engineering, Graduate school, Soongsil University. He received his B.Sc from Nanchang Hangkong University. His research interest is magnetic levitation system.
E-mail: 811463358@qq.com



Hyeong-Joon Ahn

Professor in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is mechatronics including sensors, actuators and control.
E-mail: ahj123@ssu.ac.kr

회전경사증착 기법을 이용한 Ni-GDC 연료극이 적용된 AAO 기반의 저온작동 박막 고체산화물 연료전지의 저항 특성 연구

Resistant Characteristics of AAO-Based Thin Film Solid Oxide Fuel Cells Using Ni-GDC Anode by GLAD Method

유재원¹, 이명석¹, 김양재¹, 차석원^{1,#}

Jaewon Yoo¹, Myung Seok Lee¹, Yang Jae Kim¹, and Suk Won Cha^{1,#}

¹ 서울대학교 대학원 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Graduate School, Seoul National University)
Corresponding Author / E-mail: swcha@snu.ac.kr, TEL: +82-2-880-8050
ORCID: 0000-0002-4044-2079

KEYWORDS: Thin film solid oxide fuel cell (박막 고체산화물 연료전지), Glancing angle deposition (회전경사증착), Ni-GDC anode (Ni-GDC 연료극), Low-temperature solid oxide fuel cell (저온작동 고체산화물 연료전지), Thickness effect (두께 효과), Nanoporous substrate (나노다공성 기판)

In this study, we fabricated thin film solid oxide fuel cells on nanoporous anodic aluminum oxide (AAO) substrate for low-temperature operation using the all-through sputtering method. To deposit up to a three-micrometer thick anode with both porosity and electrical conductivity, we used the glancing angle deposition and co-sputtering methods. For the anode materials, we used nickel gadolinium-doped-ceria (Ni-GDC) mixed ionic and electronic conductor (MIEC), which improved hydrogen oxidation reaction reactivity at the anode side. TF-SOFCs were successfully operated at 500°C, and 223.6 mW/cm² was their highest measured maximum power density. We conducted structural and electrochemical analyses to figure out cells' unique resistant characteristics; ohmic resistance through the anode thin film and polarization resistance of reaction area near the narrowed anode pores. We found how the anode thin film thickness affects the current collecting performance and the anode reactivity, and their effects were qualitatively and quantitatively compared.

Manuscript received: November 18, 2022 / Revised: December 30, 2022 / Accepted: January 16, 2023
This paper was presented at KSPE Spring Conference 2022

1. 서론

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 이트리아 안정화 지르코니아(Yttria Stabilized Zirconia, YSZ) 등의 고체산화물을 전해질로 사용하는 연료전지로, 고온 작동에 따른 사용 가능한 연료의 다양성, 폐열의 사용 가능성으로 인한 높은 연료 효율, 단순한 구조 등의 다양한 장점으로 인해 차세대 전력원으로 거론되고 있다[1,2]. 하지만, 고체 산화물 전해질의 이온 전도 메커니즘 상 약 700-1,000°C의 고온 영역에서 작동되어 왔으며, 그로 인한 연료전지 및 주변 설비의 열적 내구성(Thermal Durability) 이슈가 꾸준히 제기되어 왔다[1,3-5]. 이에 대한 해결방안으로, 전해질을 수 마이크로미터 이하의 박막의 형태로 제작하고, 비교적

저온 영역인 500-600°C 수준에서 작동시키는 박막 SOFC의 개념이 주목받고 있다[6-9]. SOFC의 저온구동은 전극에서의 활성화 손실(Activation Loss)의 증가 및 전해질에서의 이온전도도 감소에 따른 저항손실(Ohmic Loss)의 증가를 야기한다. 이때 박막 전해질을 SOFC에 적용하면 전해질에서의 이온 전도 경로 감소에 따라 이온 전도 저항이 감소함으로써 저온 구동 시의 저항 손실을 상쇄시키고 상대적인 저온에서도 합리적인 성능을 제공할 수 있다[6-9].

특히 박막 전해질뿐만 아니라 SOFC 구성요소를 모두 박막으로 제작하는 연구로써 비전도성 다공성 기판인 양극 산화 알루미늄(Anodic Aluminum Oxide, AAO)를 사용한 연구가 활발히 진행되어 왔다[10-14]. 이는 AAO의 고온에서의 안정성, 기공 크기 조절의 용이성, 대량생산 가능성에 기인한다. 최근 연구에 따르면,

AAO 기판 상에 스퍼터링 기법을 사용하여 제작된 SOFC는 연료극 두께 증가에 따라 분극저항(Polarization Resistance)이 증가하고, 전극 면내(In-Plane) 방향으로의 옴저항(Ohmic Resistance)이 감소하는 교환관계를 가진다[13,14]. 이는 연료극 두께 증가에 따라 연료의 확산을 통한 전달이 이루어지는 기공이 닫히면서 연료 전지의 반쪽반응 중 연료극 산화반응(HOR)이 일어나는 삼상계면(Triple Phase Boundary, TPB)이 감소하는 반면, 이때 발생하는 전자가 전도되는 전극의 단면적은 증가하기 때문이다. 이러한 기존 연구에 기반하여, 연료극의 기공도는 유지한 채 그 두께만 증가시킬 수 있다면, 분극저항은 그 수준을 유지하되 옴저항만 감소시킴으로써 셀의 추가적 성능 향상을 기대할 수 있다[13].

이를 바탕으로, 본 연구는 상용 기판 중 가장 큰 기공 크기(250 nm)를 가지는 AAO 기판 상에, 두꺼운 전극 물질을 증착 시에도 높은 다공성을 유지할 수 있다고 알려진 GLAD (Glancing Angle Deposition) 스퍼터링 기법을 사용하여 서로 다른 연료극 두께를 갖는 박막 SOFC를 제작하였다[15,16]. 연료극 두께의 영향만을 비교하기 위하여 전해질 및 공기극은 양 셀에서 동일한 물질 및 두께로 스퍼터링하여 증착되었다. 제작된 박막 연료전지의 구조 분석을 위해 전체 연료전지의 단면과 연료극 및 전해질 증착면에 대해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 사진을 촬영하였다. 또한, 정량적인 성능 비교 및 분석을 위해 선형주사전위법(Linear Sweep Voltammetry, LSV) 및 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)을 사용하여 전류-전압-전력(I-V-P) 및 나이퀴스트(Nyquist) 선도를 도출하였다. 각각의 측정결과들의 상호 연관관계를 심도 있게 분석하였으며, 이를 통해 다공성 박막 연료극의 두께 변화에 따른 박막 SOFC 성능 변화 양상에 대한 해석을 논의하였다.

2. 실험 방법(Experimental Methods)

2.1 셀 제작

박막 SOFC의 제작을 위한 기판으로 평균 지름 250 nm의 기공을 가지는 상용 AAO 기판(1 cm × 1 cm × 100 μm) (Inredox, USA)을 사용하였다. AAO 기판 상에 Ni 와 GDC를 입사각 45°로 GLAD 동시 스퍼터링하여 Ni-GDC 연료극을 증착하였다. 스퍼터링은 초기진공 6.67 e⁻⁴ Pa (5 e⁻³ mTorr) 및 Ar 가스 8.00 Pa (60 mTorr)의 환경에서 Ni 금속 타겟(RND Korea, South Korea)과 GDC 세라믹 타겟(20 : 80 mol %) (RND Korea, South Korea)에 각각 DC 200 W, RF 50 W의 파워를 사용하여 진행하였다.

샘플 간 증착되는 연료극 두께 조절을 위하여 각 샘플의 연료극 스퍼터링 시간을 조절하였고, 각각 800, 3,000 nm의 두께로 증착하였다. 연료극 두께로 800, 3,000 nm를 선정 한 이유는 다음과 같다. 기존의 작은 기공크기(80 nm)를 가지는 AAO 기판에서의 연료극 두께에 따른 저항의 교환관계를 관찰한 기존 연구의 경우 300-1,000 nm의 연료극 두께를 사용하였으며, 최적성능은 800 nm에서 관찰되었다[14]. 본 연구는 기존 연구 대비 약 3배 더 큰 기공 크기(250 nm)를 가지는 AAO 기판을 사용함으로써 더 두꺼운

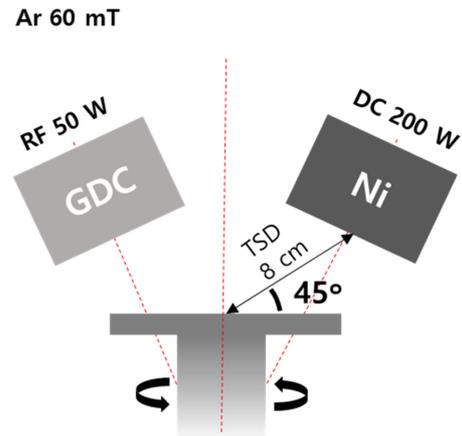


Fig. 1 Schematic of GLAD co-sputter of Ni and GDC on AAO substrate

연료극에서의 분극저항 유지 및 옴저항 감소를 기대하였기 때문에 기존 연료극 두께 범위의 약 3배에 해당하는 800, 3,000 nm의 연료극 두께를 사용하였다. 해당 스퍼터링 과정의 개략도는 아래 Fig. 1과 같다.

전체 셀에 대해 전해질 및 공기극은 동일한 조건 및 두께로 증착하였다. 먼저, 전해질은 지름 2인치 Y/Zr 합금 타겟(16 mol % Y) (RND Korea, South Korea)을 이용하여 초기진공 6.67 e⁻⁴ Pa (5 e⁻³ mTorr), Ar/O₂ 혼합가스(80 : 20 vol %) 0.667 Pa (5 mTorr)의 환경에서 RF 200 W로 스퍼터링하여 800 nm 두께로 증착하였다. 이어서, 공기극은 지름 2인치 Pt 타겟(RND Korea, South Korea)을 이용하여 초기진공 6.67 e⁻⁴ Pa (5 e⁻³ mTorr), Ar 가스 12.0 Pa (90 mTorr)의 환경에서 DC 100 W로 스퍼터링하여 150 nm 두께로 증착하였다.

최종적으로, AAO - Ni-GDC (800 nm) - YSZ - Pt의 구조를 가지는 셀과, AAO - Ni-GDC (3,000 nm) - YSZ - Pt의 구조를 가지는 셀을 제작하였으며, 각각을 ‘Ni-GDC 8’, ‘Ni-GDC 30’으로 명명하였다.

2.2 셀 구조 확인

완성된 셀의 구조적 결함 여부 및 각 층의 증착 두께 확인을 위해 셀의 단면의 집속 이온빔 주사전자현미경(Focused Ion Beam Scanning Electron Microscope, FIB-SEM) (Quanta 3D FEG, FEI Company, USA) 사진을 촬영하였다. 또한, 연료극 두께의 연료극-전해질 계면에서의 영향 및 전해질에서의 영향을 확인하기 위하여 AAO 기판 상에 증착된 연료극 표면과, 연료극 위에 증착된 전해질 표면의 전계방출형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) (SUPRA 55VP, Carl Zeiss, Germany) 사진을 촬영하였다.

2.3 전기화학적 분석

완성된 셀의 성능 측정을 위하여 선형주사전위법과 전기화학 임피던스 분광법을 사용하였다. 측정에는 상용 전기화학 분석기기(Reference 600, Gamry Instruments, USA)을 사용하였다. 선형주

사전위법은 개회로전압(OCV) - 0.3 V 사이의 전압 범위에 대해 0.01 V 단위, 0.025 V/s의 속도로 진행하였으며, 전기화학 임피던스 분광법은 0.6 V에서 진폭 30 mV 사인파로 2-1 MHz의 주파수 범위에서 측정하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 구조 분석

아래 Fig. 2의 좌, 우측 열은 각각 Ni-GDC 8, Ni-GDC 30의 단면, 연료극 표면, 그리고 전해질 표면에서의 SEM 사진을 보여준다. 먼저, Figs. 2(a), 2(b)의 셀 단면 SEM 사진에서 각 셀의 모든 층이 박리 등의 특별한 결함없이 균일하게 증착되었음을 확인할 수 있다. 각 셀의 연료극 두께는 각각 800, 3,000 nm로 확인하였으며, 전해질과 공기극의 두께는 모두 동일하게 각각 800, 150 nm로 확인하였다.

연료극의 경우 Figs. 2(a), 2(b)의 SEM 단면 사진에서 결정립 (Grain) 사이사이로 연료 확산이 가능한 기공들이 다수 확인 가능하다. 이들이 기존 연구에서 보고된 바와 같이 주상조직의 형태로 성장하며, 연료극의 두께가 두꺼워질수록 기공의 지름이 커지는 것으로 관찰되었다. AAO로부터 이어지는 기공은 연료극의 두께가 두꺼워질수록 닫혀가는 것 또한 확인이 가능하다[17-19]. 이러한 현상의 영향은 Figs. 2(c), 2(d)의 연료극 표면 SEM 사진에서도 간접적으로 확인할 수 있는데, Fig. 2(c)의 Ni-GDC 8의 연료극 표면의 경우 아직 연료극의 두께가 비교적 얇아 두께가 연결되어 있는 메인 채널(붉은 화살표 표시) 이외에도 결정립 사이사이로 미처 닫히지 못한 미세 기공(노란 화살표 표시)이 다수 보이는 반면, Fig. 2(d)의 Ni-GDC 30의 경우 메인 채널은 존재하나, 이외의 미세 기공은 대부분 닫혀 있는 모습을 확인할 수 있다.

전해질 표면의 경우 Figs. 2(a), 2(b)의 SEM 단면 사진에서 연료극의 일부 기공이 이어지는 하나, 두께 증가에 따라 기공이 닫혀 기밀성이 이루어지는 것으로 보인다. 하지만, Figs. 2(e), 2(f)의 전해질 표면 확인 결과, 2(e)의 Ni-GDC 8의 경우 노란 화살표로 표시한 것과 같이 전해질 평면상에 미처 닫히지 못한 매우 미세한 기공이 일부 존재하는 것을 확인할 수 있다. 반면, Fig. 2(f)의 Ni-GDC 30의 경우 그러한 기공이 확인되지 않는다. 이는 전해질의 증착 두께가 800 nm로 비교적 얇아 Ni-GDC 8과 Ni-GDC 30의 연료극 표면 구조의 영향이 전해질 표면까지 이어졌기 때문으로 추정된다.

3.2 전기화학적 분석

3.2.1 선형주사전위법

양 셀의 전반적인 성능 분석 및 비교를 위해 선형주사전위법을 사용하여 얻은 데이터를 바탕으로 Fig. 3의 i-V-P 곡선을 확보하였다. 구분을 위해 Ni-GDC 8의 경우 주황색, Ni-GDC 30의 경우 검정색으로 표현하였다. Ni-GDC 8, Ni-GDC 30은 각각 1.081, 1.049 V의 OCV를 기록하여 Ni-GDC 8이 미세하게 더 높은 OCV를 기록하였다. 이러한 OCV의 차이는 Figs. 2(e), 2(f)의 전해질 표면 SEM 사진을 통해 원인을 유추해 낼 수 있다. Ni-GDC 30의

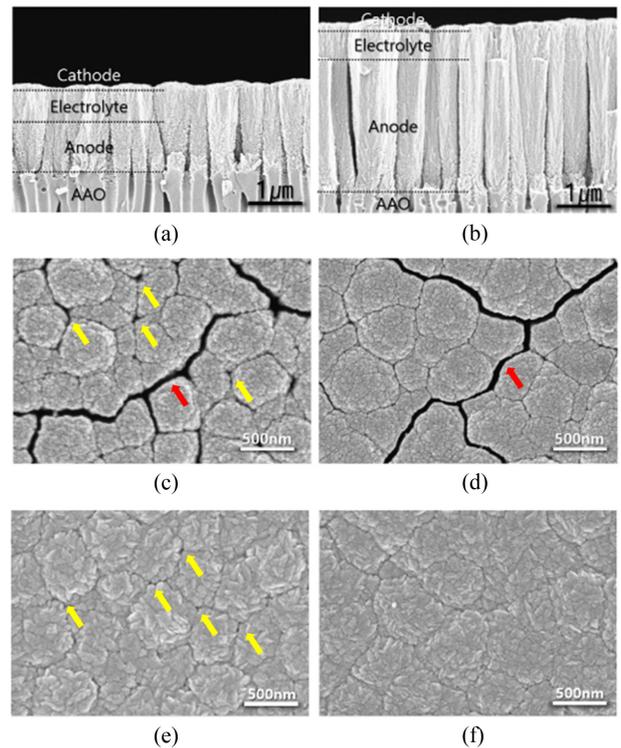


Fig. 2 SEM picture of (a) cross section of Ni-GDC 8, (b) cross section of Ni-GDC 30, (c) anode plane of Ni-GDC 8, (d) anode plane of Ni-GDC 30, (e) electrolyte plane of Ni-GDC 8, and (f) electrolyte plane of Ni-GDC 30

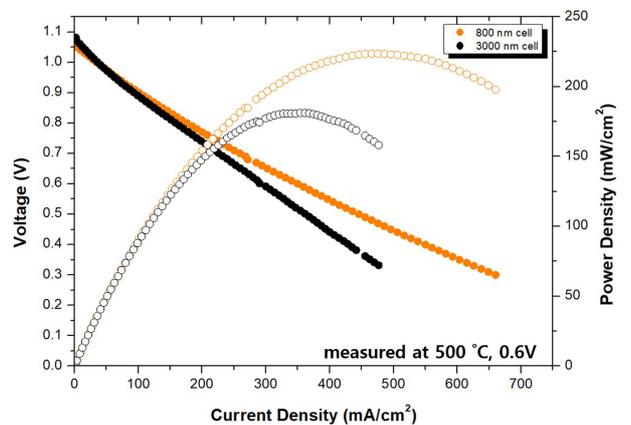


Fig. 3 i-V-P curves of two cells measured at 500°C

경우 전해질 층에서 보다 안정적인 기체 차단이 이루어진 반면, Ni-GDC 8의 경우 연료극 표면에서 보이던 기공이 전해질 표면까지 이어져 미세한 연료 크로스오버가 발생하고 이로 인해 OCV가 낮게 측정된 것으로 추정된다.

하지만, 최대전력밀도의 경우 Ni-GDC 8, Ni-GDC 30이 각각 223.6, 181.2 mW/cm²로 Ni-GDC 8에서 약 23% 더 좋은 성능이 기록되었다. 이는 앞선 OCV의 경향성과, 서론에서 언급한 실험 설계를 고려할 때 직관적이지 않은 결과로, 이에 대한 상세 원인 분석을 위하여 전기화학 임피던스 분광법을 실시하였다.

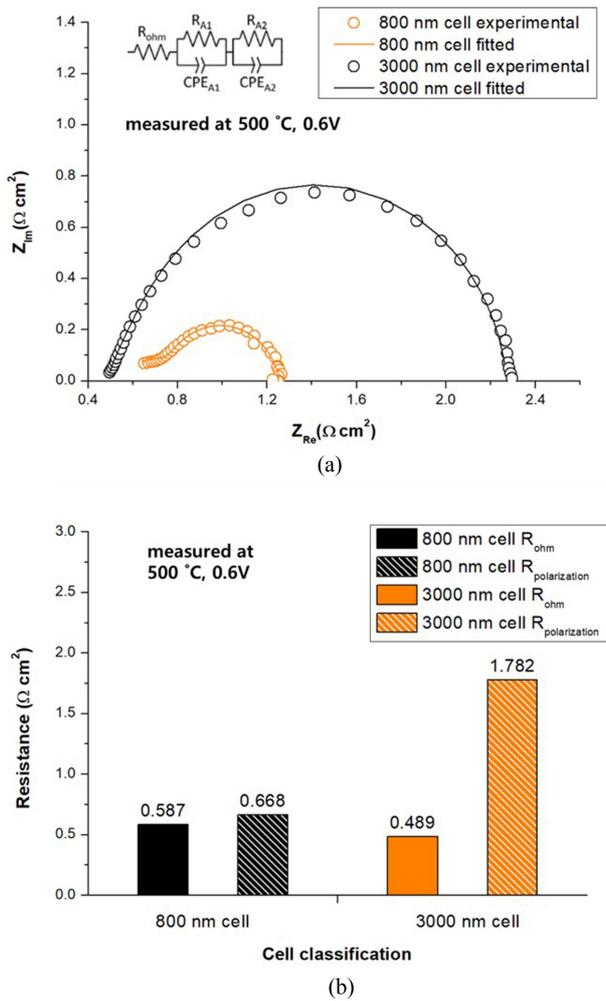


Fig. 4 (a) EIS results of two TF-SOFCs plotted with line graphs fitted by ECM. (b) Impedance values are divided into ohmic resistance and faradaic resistance, respectively

3.2.2 전기화학 임피던스 분광법(EIS)

양 셀에 대해 취득된 전기화학 임피던스 분광법 결과는 Fig. 4(a)와 같다. 측정결과를 Fig. 4(a) 좌측 상단의 등가회로모델 (Equivalent Circuit Model, ECM)을 가정하고 피팅하였다. 해당 등가회로는 하나의 저항 성분과, Constant Phase Element (CPE)와 저항이 병렬로 연결된 RQ 성분 두개가 직렬로 연결된 형태이다. 각각의 RQ 성분은 연료극과 공기극을 나타내며, 저항성분은 전체 전지에서서의 음저항을 나타낸다. 그 결과로써 Ni-GDC 8, Ni-GDC 30에 대해 각각 0.587, 0.489 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 음 저항과 0.668, 1.78 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 분극저항 값을 얻을 수 있었다. 이는 Fig. 4(b)의 막대그래프에서 확인할 수 있다.

먼저, 서론에서 예상한 바와 같이 연료극 두께 증가에 따라 음저항이 0.598 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 0.457 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 23.4% 감소하였다. 연료극 두께가 275% 증가하였지만, 음저항은 23.4%밖에 감소하지 않은 것은 음저항에 기여하는 다른 성분인 전해질에서의 이온전도 저항 및 공기극에서의 저항은 그대로 유지되었기 때문으로

추정된다. 반면, 분극저항의 경우 큰 변화 없이 유지될 것이라는 예상과 달리 66.7% 증가하였다. 이는 비교적 큰 기공 크기의 AAO(250 nm)와 GLAD 스퍼터링을 사용했음에도 불구하고 연료극의 두께가 증가함에 따라 연료극 표면에서의 미세 기공이 결국 닫히고, 이것이 연료극과 전해질 사이의 계면의 TPB 감소로 이어졌기 때문으로 추정된다. 이는 Figs. 2(c), 2(d)에서도 확인할 수 있는데, Fig. 2(c)의 Ni-GDC 8의 연료극 표면의 경우 빨간 화살표로 표시된 메인 채널 이외에도 노란 화살표로 표시된 작은 채널들이 곳곳에 존재하며 이들이 모두 TPB 형성에 기여하나, Fig. 2(d)의 Ni-GDC 30의 연료극 표면의 경우 빨간 화살표로 표시된 메인 채널 주변에서만 TPB가 생성될 것으로 예상된다. 추가적으로, 이온-전자 혼합전도체(Mixed Ionic-Electronic Conductor, MIEC) 물질인 Ni-GDC를 사용함에 따라 연료극 두께에 따른 TPB 증가의 효과도 존재하였겠지만, Ni-GDC 내 Ni의 비율이 높아 연료극 두께에 따라 미미한 TPB 향상만을 야기하였고, 결과적인 분극저항에의 영향이 기공 닫힘에 의한 TPB 감소 대비하여서는 훨씬 적었던 것으로 예상된다. 또한, 앞서 언급한 것과 같이 Ni-GDC 8의 경우 전해질에 미세한 기공이 형성되고, 이것이 연료 크로스오버를 야기하여 Ni-GDC 8에서 일부 성능저하를 야기할 것이다. 하지만, 전해질의 경우 연료극 위에 증착되므로 연료극 대비 생성되는 기공의 크기가 매우 미세하며, 이는 Fig. 2(e)에서 확인할 수 있다. 따라서, Ni-GDC 8의 전해질 상 미세한 기공에 의한 성능 감소는 Ni-GDC 30에서의 기공닫힘에 따른 TPB 감소 및 그에 따른 성능 감소 대비 그 크기가 작았던 것으로 추정된다. 결과적으로, 연료극 두께 증가에 따라 셀의 음저항은 감소하였지만, 그 두께 증가 폭이 지나쳐 GLAD 기법 등을 사용했음에도 불구하고 기공 감소에 따른 TPB 감소 및 분극저항의 증가가 발생하였다. 이는 초기 예상과는 다르게 최대전력밀도 기준 오히려 18.9%의 성능감소를 야기하였다. 이처럼, 비전도성, 다공성 기판인 AAO 기반의 박막 SOFC의 경우 연료극 두께 증가에 따라 음저항과, 분극저항의 경향성이 각기 다르게 나타나는 것을 다시 확인할 수 있었다. 두께 3,000 nm의 연료극을 갖는 Ni-GDC 30의 경우 감소된 전기전도 저항보다 증가된 분극 저항의 비율이 압도적으로 높았고, 이는 결과적으로 Ni-GDC 8 셀에 비해 Ni-GDC 30 셀에서의 성능이 23% 이상 열세하게 되는 원인이 되었다. 하지만, 이전 진행된 연구 참조 시, 연료극 두께 증가에 따른 분극저항 변화는 초기 감소 이후 다시 급격하게 증가되므로[14], 만약 해당 실험에서 연료극 두께 증가가 조금 더 세밀하게 조절되어 증가되었다면 최적의 성능을 나타내는 연료극 두께를 확인할 수 있었을 것으로 판단된다.

4. 결론

이번 연구는 AAO 기판 상에 스퍼터링을 이용하여 제작된 SOFC 셀의 연료극 두께에 따른 음저항과 분극저항 간의 교환관계를 다른 선행연구에서 출발하여 더 큰 기공 크기를 가지는 AAO와 GLAD 스퍼터링을 사용할 시의 성능변화를 확인하였다. 본래 분극저항은 유지되며, 음저항은 감소하여 셀의 성능은 전반적으로

상승할 것이라는 예상과 달리, 옴저항은 $0.587 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 $0.489 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 23.4% 감소하였지만, 분극저항은 $0.668 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 $1.78 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 오히려 66.7% 증가하여 전체 성능은 최대전력밀도 기준 223.6 mW/cm^2 에서 181.2 mW/cm^2 로 18.9% 감소하였다. 여기서, 옴저항의 경우 연료극 두께 증가에 따라 전자의 전도 면적이 증가함에 따라 감소하였으며, 분극저항의 경우 연료극 두께 증가에 따라 기공 닫힘 및 그에 따른 TPB 감소에 따라 증가하였다. OCV의 경우 연료극 두께 증가에 따라 오히려 미세하게 증가하였는데, 이는 연료극의 기공 닫힘이 더 많이 이루어진 상태에서 스퍼터된 전해질이 더 치밀하게 증착되었고, 그에 따라 기체 차단성능이 더 좋았기 때문인 것으로 추정된다. 이처럼 비전도성 기판 위에 제작된 박막 SOFC가 갖는 두 저항 특성에 대한 이해를 바탕으로 두 연료 전지의 성능 차이의 인과관계를 파악하였다. 연료극 두께의 증가가 지나쳐 분극저항이 크게 증가하고, 전체 성능은 감소하였음을 고려할 때, 향후 추가 연구를 통해 최적 연료극 두께의 도출하고 추가적인 성능 향상이 가능할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 수소에너지혁신기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M3E6A1064695).

REFERENCES

- O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F. B., (2016), Fuel cell fundamentals, John Wiley & Sons.
- Spiegel, C., (2007), Designing and building fuel cells, Mcgraw-hill New York.
- Golkhatmi, S. Z., Asghar, M. I., Lund, P. D., (2022), A review on solid oxide fuel cell durability: Latest progress, mechanisms, and study tools, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112339.
- Hanasaki, M., Uryu, C., Daio, T., Kawabata, T., Tachikawa, Y., Lyth, S., Shiratori, Y., Taniguchi, S., Sasaki, K., (2014), SOFC durability against standby and shutdown cycling, Journal of The Electrochemical Society, 161(9), F850.
- Ju, Y.-W., Eto, H., Inagaki, T., Ida, S., Ishihara, T., (2010), Improvement in thermal cycling durability of SOFCs using LaGaO₃-based electrolyte by inserting convex Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO₃ interlayer, Electrochemical and Solid-State Letters, 13(12), B139.
- Lee, Y. H., Chang, I., Cho, G. Y., Park, J., Yu, W., Tanveer, W. H., Cha, S. W., (2018), Thin film solid oxide fuel cells operating below 600 C: A review, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 5(3), 441-453.
- Chasta, G., Dhaka, M. S., (2022), A review on materials, advantages, and challenges in thin film based solid oxide fuel cells, International Journal of Energy Research, 46(11), 14627-14658.
- Zhang, J., Ricote, S., Hendriksen, P. V., Chen, Y., (2022), Advanced materials for thin-film solid oxide fuel cells: Recent progress and challenges in boosting the device performance at low temperatures, Advanced Functional Materials, 32(22), 2111205.
- Liang, F., Yang, J., Zhao, Y., Zhou, Y., Yan, Z., He, J., Yuan, Q., Wu, J., Liu, P., Zhong, Z., (2022), A review of thin film electrolytes fabricated by physical vapor deposition for solid oxide fuel cells, International Journal of Hydrogen Energy, 47(87), 36926-36952.
- Lim, Y., Hong, S., Bae, J., Yang, H., Kim, Y.-B., (2017), Influence of deposition temperature on the microstructure of thin-film electrolyte for SOFCs with a nanoporous AAO support structure, International Journal of Hydrogen Energy, 42(15), 10199-10207.
- Hong, S., Bae, J., Koo, B., Kim, Y.-B., (2014), High-performance ultra-thin film solid oxide fuel cell using anodized-aluminum-oxide supporting structure, Electrochemistry Communications, 47, 1-4.
- Kwon, C. W., Son, J. W., Lee, J. H., Kim, H. M., Lee, H. W., Kim, K. B., (2011), High-performance micro-solid oxide fuel cells fabricated on nanoporous anodic aluminum oxide templates, Advanced Functional Materials, 21(6), 1154-1159.
- Lee, M. S., Lee, S., Jeong, W., Ryu, S., Yu, W., Lee, Y. H., Cho, G. Y., Cha, S. W., (2021), Nanoporous nickel thin film anode optimization for low-temperature solid oxide fuel cells, International Journal of Hydrogen Energy, 46(73), 36445-36453.
- Choi, I. W., Yu, W., Lee, M. S., Ryu, S., Lee, Y. H., Cha, S. W., Cho, G. Y., (2022), Tailoring 3D structured nanofibrous nickel/gadolinium-doped ceria anodes for high-performance thin-film solid oxide fuel cells, Journal of Power Sources, 531, 231320.
- Sit, J., Vick, D., Robbie, K., Brett, M., (1999), Thin film microstructure control using glancing angle deposition by sputtering, Journal of Materials Research, 14(4), 1197-1199.
- Hawkeye, M. M., Brett, M. J., (2007), Glancing angle deposition: Fabrication, properties, and applications of micro- and nanostructured thin films, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 25(5), 1317-1335.
- Hong, S., Lee, D., Lim, Y., Bae, J., Kim, Y.-B., (2016), Yttria-stabilized zirconia thin films with restrained columnar grains for oxygen ion conducting electrolytes, Ceramics International, 42(15), 16703-16709.
- Minh, N. Q., Lee, Y. H., Tran, Q. T., Ren, H., Fullerton, E. E., Wu, E. A., Meng, Y. S., (2021), Sputtered thin-film solid oxide fuel cells, ECS Transactions, 103(1), 67. 10.1149/10301.0067ecst
- Lee, Y. H., Ren, H., Wu, E. A., Fullerton, E. E., Meng, Y. S.,

Minh, N. Q., (2020), All-sputtered, superior power density thin-film solid oxide fuel cells with a novel nanofibrous ceramic cathode, Nano Letters, 20(5), 2943-2949.



Jaewon Yoo

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Seoul National University. His research interest is low-temperature solid oxide fuel cell and metal-supported fuel cell.
E-mail: jw0325@snu.ac.kr



Myung Seok Lee

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Seoul National University. His research interest is thin film solid oxide fuel cell and electrochemical analysis.
E-mail: mtothes2@snu.ac.kr



Yang Jae Kim

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Seoul National University. His research interest is thin film solid oxide fuel cell and proton exchange membrane water electrolysis.
E-mail: kyjtree@snu.ac.kr



Suk Won Cha

Professor in the School of Mechanical Engineering, Seoul National University. His research interest is fuel cells and energy system simulation.
E-mail: swcha@snu.ac.kr

창간

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

목적 및 연구 범위

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

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

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

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

한국정밀공학회지 논문투고 및 심사: https://article.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다)의 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 논문의 투고 및 게재에 대한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제2조 (투고자)

투고논문의 교신저자 및 제1저자는 학회 회원이어야 한다. 단, 편집장이 특별히 인정하는 자는 예외로 할 수 있다.

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

- ① 투고논문의 책임은 저자(들)에게 있다.
- ② 투고논문에 대하여 모든 저자들은 '(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정'을 준수하여야 한다. 학술활동 윤리규정을 위반할 경우 편집장은 논문의 게재를 불허 또는 취소할 수 있으며, 규정에 따라 징계할 수 있다.

제4조 (연구범위)

논문의 연구범위는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적응제조시스템, 녹색생산기술 등 정밀공학 관련분야로 하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

제5조 (투고 구분)

학회지에 투고되는 논문은 아래와 같이 구분하며, 기본면수는 8면 이내로 하되 내용에 따라 초과할 수 있다.

- ① 일반논문: 학술성 또는 실용성이나 응용성이 우수한 논문
- ② 특집논문: 별도로 규정된 특집논문 규정에 따라 작성된 논문
- ③ 기타투고: 전망, 해설, 강좌, 기타 원고 등

제6조 (접수)

- ① 논문은 수시로 접수하며 접수일은 학회에 접수절차가 완료된 일자로 한다.
- ② 논문은 학회에서 규정한 원고작성양식(Template)에 따라 작성한 후 등록 제출한다.
- ③ 이 규정과 '논문집필요령'에 위배되는 원고는 접수하지 않을 수 있다.
- ④ 접수된 원고는 반환하지 않는다.

제7조 (심사 및 게재 결정)

- ① 논문의 게재여부는 학회지 편집장이 결정한다.
- ② 논문의 심사는 학회지 편집장, 편집인, 또는 편집위원이 추천한 2인의 심사위원회에 의해 진행되며 심사 및 게재여부 판정 절차는 논문심사규정에 따른다.

제8조 (저작권)

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

제9조 (자료공개)

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

제10조 (원고작성요령)

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

제11조(게재료)

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

논문집필요령

1. 논문원고를 투고할 때는 한국정밀공학회지 양식에 맞춰 <https://article.kspe.or.kr/>로 온라인 투고한다.
2. 논문의 구성은 다음 순서로 함을 원칙으로 한다.
 - (1) 제목, (2) 영문제목, (3) 저자명, (4) 영문저자명, (5) 소속(국·영문 병기) 및 교신저자 정보, (6) Keywords, (7) 초록, (8) 투고일자, (9) 서론, (10) 본론(이론해석, 실험방법, 결과, 토론, 고찰), (11) 결론, (12) 후기, (13) 참고문헌, (14) 부록 기타, (15) 모든 저자의 소속·직위 등의 정보
3. 논문 원고는 한글 또는 영문 전용 및 한글과 영문 혼용, 한글과 한자 혼용으로 작성하고 용어의 의미가 난해할 경우는 () 안에 원어를 병기하도록 한다.
4. 논문의 제목은 10 단어 이내로 간결하게 표시해야 하고 Keywords는 영문(괄호 안에 국문)으로 6 단어 이내로 작성한다.
5. 논문이 한글 혹은 한자 혼용일 때는 한글로 제목을 표시한 다음 영문으로 제목을 작성한다. 이어서 저자명을 국·영문 병기로 작성한다. 다음에 초록과 Keywords를 삽입하여야 하며 초록은 영문 200 단어 이내로 작성한다. 초록에는 도표, 참고문헌 표시가 있어서는 안되며 한문단(Paragraph)으로 서술한다.
6. 표 및 그림은 영문(Table 1, Fig. 1...)으로 하고 번호순에 따라 본문중에 그 위치를 표시하고 설명을 병기해야 한다.
7. 숫자는 아라비아 숫자를 사용하며 수량단위는 SI 단위 사용을 원칙으로 한다.
8. 인용 및 참고문헌의 색인번호를 본문의 인용처에 반드시 기입하고, 인용순서대로 다음과 같이 표시 한다.
 - (1) 본문 중 인용 시: 대표저자의 성씨 뒤에 대괄호를 사용하여 일련번호를 쓴다.
예) Hong [1]은, Chandran [3]에 의하여
 - (2) 참고문헌 표기 시 영문으로 작성한다.
단행본일 경우: 저자, (년도), 제목, 출판사.
정기간행물인 경우: 저자, (년도), 제목, 저널명, 권(호수), 페이지.
예) Hong, K. D., (2022), A method to investigate mechanical properties, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(1), 1-18.
9. 부록은 본문 전체 서식과 동일

한국정밀공학회지 논문심사규정

제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다) 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 투고된 논문의 심사와 관련된 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제2조 (투고 및 접수)

- ① 학회지에 투고하고자 하는 자는 별도로 규정된 학회의 투고 규정에 따라 작성된 논문을 학회의 논문제출시스템을 이용하여 투고하며 학회는 이를 접수한다.
- ② ①항의 규정에도 불구하고, 학회지 편집장이 인정하는 경우에 한하여 기타의 방법으로 논문 투고 및 접수를 진행할 수 있다.
- ③ 학회의 연구 분야와 관련된 주제의 논문 접수를 원칙으로 한다. 투고된 논문이 학회의 연구 분야와 관련이 없거나 논문의 기본 요건이 갖추어져 있지 않은 경우 편집장은 논문의 접수를 거절할 수 있다. 연구 분야는 별도로 규정된 '논문투고 및 게재규정'과 '논문집필요령'에 따른다.

제3조 (심사위원 선정)

- ① 학회지 편집장은 접수된 논문의 분야를 고려하여 해당분야 학회지 편집인에게 심사 배정하며, 학회지 편집인은 부문별로 선정된 학회지 편집위원 중 1인을 심사주관 편집위원으로 위촉한다.
- ② 심사주관 편집위원은 접수된 논문의 심사에 적절하다고 판단되는 심사위원을 선정하여 편집장에게 추천한다.
- ③ 심사위원의 수는 논문 1편당 2인으로 하되 제3심사위원이 위촉될 수 있고, 이 경우를 포함하여 논문 1편당 최대 3인으로 한다. 심사위원으로는 논문저자와 소속이 다른 위원을 위촉함을 원칙으로 한다.
- ④ 편집장은 추천 받은 위원에게 논문심사 수락여부를 확인하기 위한 이메일을 송부한다. 추천 받은 위원 중 심사거부 의사를 표시한 위원이 있는 경우 편집위원에게 심사위원 재추천을 요청한다.

제4조 (심사 방법)

- ① 심사위원은 논문의 종합평가 후 객관적인 근거를 들어 심사결과를 기술해야 하며, 필요 시 수정요구를 명확하게 해야 한다.
- ② 심사결과는 '채택가(Accept)', '수정 후 채택(Accept Subject to Minor Revisions)', '수정 후 재심(Re-Review after Major Revisions)', '채택불가(Reject)' 중 선택한다.

제5조 (심사 기간)

- ① 학회지의 편집위원은 편집위원 위촉일로부터 7일 이내에 심사위원을 선정하고, 논문심사를 의뢰 받은 심사위원은 제1차 심사의 경우 심사수락일로부터 14일 이내, 제2차 심사인 경우 7일 이내에 심사를 완료하여야 한다.
- ② 편집인 및 편집위원의 판정은 심사결과 접수일로부터 7일 이내에 완료하여야 한다.
- ③ 심사위촉 후 14일이 지나도록 심사수락을 하지 않는 경우에는 다른 심사위원으로 변경할 수 있다.
- ④ 심사위원의 심사수락 후 1개월이 지나도록 심사가 완료되지 않은 경우에는 편집인 또는 편집위원이 심사위촉을 철회할 수 있다.
- ⑤ 상기의 규정에도 불구하고 논문접수일로부터 3개월이 소요된 시점까지 심사결과가 접수되지 않은 경우 다음과 같이 시행할 수 있다.
 1. 심사위원 중 1인의 심사결과가 접수되지 않은 경우: 해당논문의 편집위원이 3개월 소요 시점으로부터 7일 이내에 심사한다.
 2. 심사위원 2인의 심사결과가 모두 접수되지 않은 경우: 해당논문의 편집인 및 편집위원이 3개월 소요 시점으로부터 7일 이내에 심사한다. 단, 편집인이 편집위원을 겸한 경우 편집인 1인의 심사만으로 심사절차를 진행한다.

제6조 (저자수정기한)

- ① 저자는 학회지 편집장의 심사결과 판정에 따른 논문수정요구를 반영한 수정 논문을 접수일로부터 수정 후 재심일 경우 30일 이내, 수정 후 채택일 경우 14일 이내에 재제출하여야 한다.
- ② 수정논문 접수가 제출 마감일로부터 60일 이상 지체될 경우 편집위원회는 논문을 철회할 수 있으며, 저자가 그 이후 계속 심사를 받기 원할 경우 다시 투고 하여야 한다.

제7조 (게재 판정)

- ① 논문게재여부는 심사위원 2인의 심사결과를 검토하여 해당논문의 학회지 편집인 및 편집위원의 종합평가를 받아 학회지 편집장이 최종 결정한다.
- ② 심사위원 2인 이상이 '채택불가' 판정 한 논문은 학회지에 게재 할 수 없다.

제8조 (특집논문심사)

- ① 학회지 편집장은 특집논문을 주관할 책임편집인을 학회 임원의 추천을 받아 위촉한다.
- ② 책임편집인이 학회 이사 또는 부문화장인 경우, 책임편집인의 주관으로 접수된 논문에 대해 2인의 심사위원을 선정하여 심사하며 게재의 판정은 이 규정 제7조에 따른다. 책임편집인이 학회 이사 또는 부문화장이 아닌 경우, 편집위원회에서 논문심사를 담당할 편집인을 선정하여 논문 심사를 주관하도록 한다.

한국정밀공학회지 논문심사규정

제9조 (비밀유지)

- ① 심사위원은 누구에게도 밝히지 아니한다.
- ② 저자의 이름은 심사위원에게 밝힐 수 있다.
- ③ 심사내용은 저자 이외에는 밝히지 아니한다.

제10조 (이의제기)

- ① 저자가 심사 결과에 대하여 이의를 제기할 경우, 심사위원과 저자 간의 의견 교환은 편집인을 통해서 한다. 심사위원과 저자가 의견교환을 하고자 할 때, 편집인의 중개로 서로 의견을 교환할 수 있다.
- ② 저자의 재심요구는 원칙적으로 받아들이지 않는다.

제11조 (심사료)

필요 시 편집인, 편집위원에게는 소정의 편집비를, 심사위원에게는 소정의 심사료를 지급할 수 있다.

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: http://jkspe.kspe.or.kr/_common/do.php?a=html&b=16
- 규정에서 정의되지 않은 사안은 한국학술단체총연합회의 연구윤리지침을 따르되, 구체적인 판정은 (사)한국정밀공학회 편집위원회의 결정에 따른다.

제 1 장 총칙

제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다)와 관련된 학술활동이 인간의 존엄성과 가치를 침해하거나 사회 공동의 이익을 손상하지 않는 높은 윤리적 수준을 유지하기 위하여, 우리 학회 구성원들이 지켜야 할 윤리적 기준을 제시, 학문 및 사회 발전에 건강하게 기여함에 그 목적이 있다.

제2조 (윤리규정 적용범위)

- ① 본 규정은 학회가 발간하는 모든 학술지 및 학술대회, 심포지엄, 워크샵, 포럼 등 학술활동 전반에 적용한다.
- ② 본 규정은 위 학술활동과 관련된 저자, 심사위원, 편집위원, 사무국 실무자에게 모두 적용한다.
- ③ 기타 위에 정하여 지지 않은 범위는 교육부 및 산하기관의 각급 규정을 준용할 수 있다.

제3조 (부정행위의 범위)

당 규정에서 제시하는 부정행위는 우리 학회와 관련된 학술활동과 논문 및 발표 등에서 행하여진 위조·변조·표절·부당한 논문저자 표시 행위·이중게재 등을 말하며 다음 각 호와 같다.

- ① '위조'는 존재하지 않는 데이터 또는 연구결과 등을 허위로 만들어 내는 행위를 말한다.
- ② '변조'는 연구 재료·장비·과정 등을 인위적으로 조작하거나 데이터를 임의로 변형·삭제함으로써 연구 내용 또는 결과를 왜곡하는 행위를 말한다.
- ③ '표절'이라 함은 타인의 아이디어, 연구내용·결과 등을 정당한 승인 또는 인용 없이 도용하는 행위를 말한다.
- ④ '부당한 논문저자 표시'는 연구내용 또는 결과에 대하여 과학적·기술적 공헌 또는 기여를 한 사람에게 정당한 이유 없이 논문저자 자격을 부여하지 않거나, 과학적·기술적 공헌 또는 기여를 하지 않은 자에게 감사의 표시 또는 예우 등을 이유로 논문저자 자격을 부여하는 행위를 말한다.
- ⑤ '이중게재란 2개 이상의 학술지에 동일한 내용을 게재하는 행위를 말한다.
- ⑥ 본인 또는 타인의 부정행위의 의혹에 대한 조사를 고의로 방해하거나 제보자에게 위해를 가하는 행위
- ⑦ 과학기술계에서 통상적으로 용인되는 범위를 심각하게 벗어난 행위 등
- ⑧ 기타 위 규정된 부정행위 외에도 우리 학회 자체적으로 조사 또는 예방이 필요하다고 판단되는 행위

제 2 장 저자

제4조 (저자의 정직성)

- ① 저자는 각자가 수행하는 연구에 있어서 정직하여야 한다. 여기서 정직은 아이디어의 도출, 실험에 대한 설계, 실험과 결과의 분석, 연구비 지원, 연구결과와 출판, 연구 참여자들에 대한 공정한 보상 등 연구과정의 전반에 관한 정직을 말한다.
- ② 연구자는 연구에 있어서의 표절, 사기, 조작, 위조 및 변조 등을 심각한 범죄행위로 간주하고, 이러한 부정이 발생하지 않도록 최선을 다하여야 한다.
- ③ 저자는 자신의 이익과 타인 또는 타 기관의 이익이 상충하거나, 상충할 가능성이 있을 경우 이를 공표하고 적절히 대응하여야 한다.

제5조 (저자의 기준)

논문의 저자가 되기 위해서는 아래 4개의 기준을 모두 충족하여야 한다. 이 기준은 제1저자, 교신저자를 포함한 모든 저자를 대상으로 한다.

- ① 연구 논문의 구상, 설계, 데이터의 획득과 분석, 해석에 실제로 기여한 자
- ② 논문의 초안을 작성하거나 논문의 주요 내용을 학술적으로 개선한 자
- ③ 최종 원고의 출판에 동의한 자
- ④ 논문 내용의 정확성과 진실성에 대한 의문이 있을 경우 대응 책임에 동의한 자

제6조 (저자의 준수사항)

- ① 투고한 논문의 연구 수행과정에서 저자는 인권존중, 생명윤리 준수 및 환경보호 등의 보편성을 확보하여야 한다.
- ② 저자는 투고한 논문에서 연구내용과 그 중요성에 대하여 정확하게 기술하여야 하고, 연구결과를 왜곡하지 말아야 한다.
- ③ 투고논문은 학술적으로 충분한 가치가 있는 결과와 그것을 뒷받침할 수 있는 논거를 포괄적으로 포함하고 있어야 한다. 이미 발표한 논문과 유사한 결론을 주장하는 논문의 경우에는 새로운 논거에 충분한 학술적인 가치가 있어야만 한다.
- ④ 공개된 학술자료를 인용할 경우에는 그 출처를 명백하게 밝혀야 한다. 공개되지 않은 논문이나 연구계획서, 또는 개인적인 접촉을 통해서 얻은 자료의 경우에는 그 정보를 제공한 연구자의 동의를 받은 후에 인용하여야 한다.
- ⑤ 다른 연구자의 연구결과를 참고문헌의 인용 없이 논문의 전부 혹은 일부로 사용하는 것은 표절에 해당하므로 허용되지 않는다.
- ⑥ 저자가 다른 학술지에 투고 혹은 게재하였거나 투고할 예정인 논문을 본 학회지에 이중으로 투고하는 행위는 부정한 행위로서 허용되지 않는다. 학술대회나 세미나 등에서 이미 발표한 내용을 학술지 규정에 맞추어 논문으로 작성하여 투고하는 것은 일반적으로 허용되지만, 해당 발표내용에 중요한 연구결과가 추가되어야함을 원칙으로 한다.

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- 연구 수행과정에서 중요한 기여를 한 모든 연구자는 공저자가 되어야 하며, 논문의 대표저자는 저자명단에 대해 모든 공저자에게 동의를 얻어야 한다. 행정적, 재정적 지원과 같은 학술외적인 지원이나 연구자료 제공 혹은 단순한 학술적 조언 등에 대해서는 “후기”를 통해서 그 내용을 표기한다.
- 연구에 학술적으로 기여하지 않았거나 기여도가 현저히 떨어지는 자를 학문 외적인 이유로 공저자로 기재하는 것은 학문의 권위를 실추시키는 부도덕한 행위이다.
- 저작권 등과 관련하여 관계자의 승인이 필요한 경우 저자는 논문을 투고하기 이전에 승인을 얻어야 하며, 논문의 출판으로 말미암아 영향을 받을 수 있는 계약 및 소유권의 분쟁이 발생하지 않을 것임을 확인하여야 한다.

제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

제7조 (편집위원 준수사항)

- 편집위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문에 대한 판정업무를 정해진 규정에 따라 공정하고 객관적으로 수행하여야 한다.
- 편집위원은 투고된 논문에 대한 심사위원의 심사결과를 바탕으로 일관된 기준으로 논문의 재심 여부나 게재 여부를 결정하여야 한다.
- 투고논문의 연구분야에 대한 편집위원의 지식이 부족하여 심사결과를 판정하는데 곤란함이 있다고 판단될 경우에는 해당 분야에 전문적인 지식을 가진 자로부터 자문을 받을 수 있다.
- 편집위원은 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 학술지가 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당 논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
- 편집위원은 저자와 심사위원의 비윤리적인 행위를 감시할 의무를 가지며, 윤리적으로 부적절한 행위가 발견될 경우 이를 지체 없이 편집장에게 보고하여 조사와 함께 필요에 따라 적절한 징계가 이루어질 수 있도록 하여야 한다.
- 편집위원은 투고된 논문이 자신과 직접적인 이해관계가 있는 논문일 경우, 편집인에게 보고하여 다른 편집위원이 해당 논문을 담당하게 하여야 한다.
- 편집위원이 담당 업무를 신속하게 처리하지 못할 사유가 발생할 경우 학회 사무국 혹은 해당 편집인에게 보고하는 것이 바람직하다.
- 투고논문이나 심사과정에서 비윤리적인 행위가 적발되거나 비윤리적 행위에 대한 탄원이 있을 경우 편집인은 그 사안의 비중을 판단하여 필요할 경우 관련분야 편집위원들로 조사위원회를 구성하여야 하며, 편집위원회는 조사위원회에서 작성된 보고서를 바탕으로 해당 행위자에 대한 징계를 결정하고, 기 게재된 논문이 관련되었을 경우 해당 논문의 게재를 소급하여 취소할 수 있다.

제8조 (심사위원 준수사항)

- 심사위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문을 일관된 기준으로 공정하고 객관적으로 심사하여야 한다. 완벽하게 검증되지 않은 개인의 학술적 신념이나 가정에 근거한 심사는 배제하여야 한다.
- 심사위원은 심사논문에 대한 비밀을 보장하기 위해 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 논문집이 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
- 심사위원은 전문 지식인으로서의 저자의 인격을 존중하여야 한다. 개인적이고 주관적인 평가나 불쾌한 표현을 자제하고 학문적으로 겸손한 자세에서 객관적인 심사의견서를 작성하도록 노력하여야 한다. 심사논문에 대한 자신의 판단과 보완이 필요하다고 생각되는 내용을 그 이유와 함께 상세하게 명시하여야 한다.
- 심사위원의 개인적인 목적을 위하여 저자에게 추가 자료나 해명을 요구하는 것을 금지한다.
- 이미 다른 학술지에 공개된 논문의 내용과 유사한 내용이 심사논문에 인용 없이 포함되었을 경우에는 편집위원에게 그 사실을 상세하게 알려주어야 한다.
- 심사 의뢰된 논문과 직접적인 이해관계가 있거나 자신의 전공분야가 투고된 논문을 심사하기에 적합하지 않다고 판단되면 담당 편집위원에게 지체 없이 그 사실을 통보하여 다른 심사위원을 선정할 수 있도록 하여야 한다. 아울러, 기한 내에 심사를 마치지 못할 사유가 있을 경우 편집위원에게 이를 통보한다.

제 4 장 검증 절차와 기준

제9조 (윤리위원회)

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

제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

제14조 (피조사자 권리 보호)

- ① 피조사자는 제보 또는 학회 및 관련기관의 인지에 의하여 부정행위의 조사 대상이 된 자 또는 조사 수행 과정에서 부정행위에 가담 한 것으로 추정되어 조사의 대상이 된 자를 말하며, 조사과정에서의 참고인이나 증인은 이에 포함되지 아니한다.
- ② 학회는 검증과정에서 피조사자의 명예나 권리가 부당하게 침해되지 않도록 주의하여야 한다. 또한 결과가 확정되기 이전까지는 이의 제기 및 변론의 기회가 동등하게 주어져야 하며, 관련절차를 사전에 알려주어야 한다.
- ③ 부정행위에 대한 의혹은 판정 결과가 확정되기 전까지 외부에 공개되어서는 아니 된다. 다만, 공공의 복리 등 사회 통념에 중대한 위험사항이 발생할 경우는 해당되지 아니한다.
- ④ 피조사자는 부정행위 조사·처리절차 및 처리일정 등에 대해 학회에 알려줄 것을 요구할 수 있으며, 학회는 이에 성실히 응하여야 한다.

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

- ① 위원회는 조사 과정의 모든 기록을 음성, 영상, 또는 문서의 형태로 작성한 조사결과 보고서를 반드시 5년 이상 보관하여야 한다.
- ② 조사결과 보고서 및 조사위원 명단은 판정이 끝난 이후에 공개할 수 있다.
- ③ 조사위원·증인·참고인·자문에 참여한 자의 명단 등에 대해서는 당사자에게 불이익을 줄 가능성이 있을 경우 공개하지 않을 수 있다.

제16조 (조사결과의 보고)

- ① 위원회는 조사의 결과와 내용을 조사의 종료 및 판정 후, 접수일 기준 6개월 경과 이전에 심의 내용을 확정하여 이사회에 보고한다.
- ② 결과보고서에는 다음 각 호의 사항이 반드시 포함되어야 한다.
 1. 제보의 내용
 2. 조사의 대상이 된 부정행위
 3. 조사위원회의 조사위원 명단
 4. 해당 연구에서의 피조사자의 역할과 부정행위의 사실 여부
 5. 관련 증거 및 증인
 6. 제보자와 피조사자의 이익제기 또는 변론 내용과 그에 대한 처리결과
- ③ 연구 부정행위에 대한 최종결정이 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안 된다.

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

1. 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
2. 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 받았습니다.
3. 저자(들)는 위 논문의 작성과 연구에 실질적인 기여를 하였으며, 위 논문의 작성과 내용에 대한 책임이 있습니다.
4. 저자(들)는 위 논문에 대한 인쇄 및 전자 출판물의 일부를 저자(들)의 연구결과 보고 및 논문게재/발표에 수정 후 재사용/출간하고자 할 때에는 무료로 사용할 수 있습니다. 이 경우 이 같은 사실과 타당한 이유를 한국정밀공학회에 알려야 하고, 위 논문을 해당 연구결과 보고 및 논문/발표자료에 정확히 인용하며 적절한 저작권을 명시하여야 합니다.
5. 저자(들)는 위 논문이 과거에 어떠한 학술지에도 출판된 적이 없으며, 현재 다른 학술지에 게재를 목적으로 제출되었거나 제출할 계획이 없습니다.
6. 저자(들)는 한국정밀공학회의 윤리규정에 있는 학술활동 윤리규정을 준수합니다.
또한, 중복 출판이나 표절 예방을 위해 CrossCheck 확인에 동의합니다.
(*)(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_학술활동_윤리규정.pdf)
7. 책임저자는 위 논문의 공동저자들이 1항-6항의 사실들을 인식하고 있으며, 위 6가지 사항들에 대하여 동의합니다.
8. 한국정밀공학회는 저자(들)가 위 7가지 사항에 동의하지 않았을 경우, 위 논문의 출판을 지연시키거나 중지시킬 수 있는 권리를 가집니다.
9. 전체 저자들은 위 논문의 저작권과 일체 권리 양도에 관한 권한을 책임저자에게 일임하며, 책임저자는 전체 저자들을 대표하여 저작권을 양도합니다.

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

논문심사과정에서 교신저자의 역할을 수행함과 아울러 논문의 학술지 게재 시 저자들을 대표하여 저작권에 대한 일체의 책임을 담당하는 저자

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

이 법인은 사회일반의 이익에 기여하기 위하여 공익법인의 설립운영에 관한 법률의 규정에 따라 정밀공학에 관한 학문 및 기술의 체계화를 도모하여 국가 산업 발전에 기여함을 목적으로 한다.

회원(사) 구성

1. 특별회원: 정밀공학 분야와 관련 있는 단체로서 본회의 목적에 찬조하는 자
2. 찬조회원: 개인 또는 단체로서 본회의 목적에 찬조하는 자
3. 정 회 원: 정밀공학에 관하여 학식과 경험이 있는자

관련정부기관과의 관계

1. 교육과학기술부 산하: 사단법인 설립 허가
2. 한국과학기술단체총연합회: 정회원
3. 특허청: 학술단체 지정 받음
4. 한국연구재단, 한국과학기술단체총연합회: 연구 활동 지원

주요활동현황

1. 논문 발표회(학술대회): 연 2회(춘·추계) - 1,600여 편 발표
2. 기술세미나(부문별) 개최: 생산현장과 학술적인 교류 촉진, 미래 산업의 방향 제시
3. 산학연 협동 체계 구축: 기술세미나 개최 및 학술대회
4. JSPE(일본정밀공학회) & TSPE(대만정밀공학회)와 협정
5. ASPE(미국정밀공학회)교류: 학술사업 공동 개최
6. PRESM, ASPEN, ISMTII, ICPT 등 국제학술대회 유치 및 개최
7. 싱가포르, 베트남 과학기술 교류

발간자료

1. 한국정밀공학회지(논문집 발간): JKSPe 연 12회
2. 국제학회지(논문집 발간): IJPEM 연 12회 / IJPEM-GT 연 6회
3. 기술세미나(부문별) Proceeding 발간: 연 5-7회
4. 국제학술대회 Proceeding 발간
5. 춘·추계 학술대회 논문집 발간: 연 2회
6. 국제표준도서번호(ISBN) 또는 국제표준연속간행물번호(ISSN) 부여

발행규정

1. 한국정밀공학회지(JKSPe)는 월간으로, 매월 1일 발행: SCOPUS, KCI 등재지
2. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing은 월간으로, 매월 1일 발행: SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
3. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology는 격월간으로, 1월, 3월, 5월 (특집호), 7월호, 9월호, 11월 1일 발행: SCIE, KCI 등재지
4. 발행목적: 정밀공학에 관한 학술논문 및 학회 소식 등의 제공, 정밀공학 기술의 체계화를 도모하여 국가 산업 발전에 기여

부문위원회 활동

부문은 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술의 10개 부문이 있으며, 부문별 기술 세미나를 개최

특별회원사 가입

구 분	회비(연)	비고
다이아몬드	300만원 이상	
플래티늄	200만원	학회 발간물 증정
골드	100만원	국내 학술행사 무료등록 등
패밀리	100만원 이하	

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

- 정밀공학 분야에서 창의성을 발휘하여 연구를 계속한 자로서 탁월한 업적을 이룩한 자 중에서 선정

생산기술상, 정밀기술상

- 정밀공학에 관련된 산업분야에서 독창적인 의의를 가지는 제품을 제작한 자 또는 기업체, 연구단체

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

- 학회 학술지의 발전에 공헌한 편집인(Editor), 편집위원(Member of Editorial Board)

JKSPE, IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST Contribution Award

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

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

- JKSP, IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology에 발표된 논문 중 가장 탁월한 가치의 논문 저자

KSPE Young Researcher Award

- 각 부문 젊은 연구자의 활동을 격려의 목적으로 해당 분야의 연구 업적이 탁월하고 유망한 젊은 연구자

특별상

가헌학술상

- 가헌신도재단의 지원으로 가헌학술상을 설정
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 정밀공학 분야의 탁월한 논문저자 또는 정밀공학 분야 발전에 기여가 현저한 자

현승공학상

- 현승교육문화재단의 지원으로 현승공학상을 설정
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 정밀기계공학 분야의 탁월한 논문저자 또는 정밀기계공학 분야 발전에 기여가 현저한 자

유정백합학술상

- 학회 초대 2대 회장인 유정 이봉진 회원이 기증한 기금을 바탕으로 유정백합학술상을 제정 및 시행
- FA, CNC, 제어 등을 비롯한 정밀공학 분야에서 탁월한 업적으로 학문발전에 기여한 자

백암논문상

- 백암 함인영 회원이 기증한 기금을 바탕으로 백암논문상을 제정 및 시행
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 생산공학 분야의 논문저자 중 최우수 논문저자로 하며 해당 논문발표 시 만 40세 이하인 자

Year of Launching

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

Aims and Scope

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE) is devoted to publishing original research articles with high ethical standard on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on articles related to improving the precision of machines and manufacturing processes through implementation of creative solutions that stem from advanced research using novel experimental methods, predictive modeling techniques, and rigorous analyses based on mechanical engineering or multidisciplinary approach. The expected outcomes of the knowledge disseminated from JKSPe are enhanced reliability, better motion precision, higher measurement accuracy, and sufficient reliability of precision systems. The various topics covered by JKSPe include: Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology.

Fee

Subscription Fee:

This print copy of the journal is provided free of charge to the members of KSPE.

Publication Fee:

1. Basic fee (up to eight pages): 200,000 won; additional pages: 30,000 won per page.
2. Manuscripts contributed as a result of funded research will be charged an extra 50%.
3. Publication fee is charged only for the papers contain 'Acknowledgement' that represent supports of academic research project by th fund of government, institutes or university, etc.
4. Publication fee should be paid within 15 days of the receipt of the publication fee invoice.

Contact Us

[04508] 12F, SKY1004 Bldg., 50-1 Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul, Republic of Korea
TEL +82-2-518-2928 / FAX +82-2-518-2937 / paper@kspe.or.kr / <https://www.kspe.or.kr>
Submission to Journal of Korean Society for Precision Engineering: <https://article.kspe.or.kr>
Search for Journal of Korean Society for Precision Engineering: <http://jkspe.kspe.or.kr>

Rules for Submitting and Publishing Papers

Article 1 Purpose

The rules are designed to specify matters related to the submission and publication of papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Journal") of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society").

Article 2 Submitter

The corresponding author and the first author of the submitted paper must be members of the Society. With special permission by the Editor-in-Chief, however, the person can be treated as the exceptional case.

Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

- A. The Authors are responsible for the submitted paper.
- B. With regard to their submitted paper, all its authors must comply with 'Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering'. When any of the authors violates Code of Ethics for Academic Activities, the Editor-in-Chief may disallow or cancel the publication of the paper and impose disciplinary actions as specified.

Article 4 Scope of Research

The scope of research for the paper shall cover areas of precision engineering such as Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology, and the paper must not have been published in any other publication.

Article 5 Categorization of Submissions

The paper submitted to the Journal falls into one of the categories below, and should be within eight pages, which may be exceeded if need be.

- A. Ordinary paper: The paper that shows excellent scholarship, practicality, and applicability.
- B. Special paper: The paper that is written in accordance with a special provision for special papers.
- C. Other submissions: Forecast, explications, lectures, and other writings.

Article 6 Submission

- A. The Paper is accepted anytime and submission date is the day submission is completed at the Society.
- B. The paper must be written in compliance of the template specified by the Society to be registered and submitted.
- C. The paper that is found not to comply with 'Rules for Submitting and Publishing Papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering' and 'Guidelines for Manuscript Writing' may not be accepted.
- D. The submitted paper shall not be returned.

Article 7 Review and Decision to Publish Paper

- A. The Editor-in-Chief shall decide whether to publish the paper or not.
- B. The review of the paper is conducted by two reviewers recommended by the Editor-in-Chief, and the review and the decision over its publication shall comply with 'Rules for Reviewing Papers for Journal of the Korean Society for Precision Engineering Paper Review Rules'.

Article 8 Copyright

- A. The authors shall be responsible for the content of the paper.
- B. The author(s) must transfer the copyright for the submitted paper to the Society, and for this purpose, the corresponding author(s) must submit 'Research Ethics and Copyright Transfer Agreement'.
- C. The copyright for the submitted paper or other submissions shall lie with the Society and may not be reproduced without authorization from the Society.
- D. The author(s) may use part of their paper or other submissions published in the Journal in their other research, provided the published paper is referenced as its source.

Article 9 Disclosure of Materials

The Society may disclose a paper or other submissions in print or as online publications.

Article 10 Manual of Style

- A. Writing and editing the paper to be submitted to the Society must comply with 'Guidelines for Manuscript Writing' provided separately.
- B. Editorial Board may edit the selected paper so that terms, characters, and orthography may comply with 'Guidelines for Manuscript Writing'.

Article 11 Publication Fees

The author must pay the specified fee for the paper published in the Journal. For the paper that exceeds the specified number of pages, the author must pay the fee for those extra pages. The fee for extra pages shall be decided by the board of directors.

Guidelines for Manuscript Writing

1. Manuscripts should be written according to the format of the Journal (<https://www.kspe.or.kr>) and should be submitted online (<https://article.kspe.or.kr>).
2. The manuscript should be organized in the following order: (1) The title in Korean, (2) The title in English, (3) Author names in Korean, (4) Author names in English, (5) Affiliations in Korean and English, and information of corresponding author, (6) Keywords, (7) Abstract, (8) Date of submission, (9) Introduction, (10) Main body (Theory, Experimental, Results, Discussion) (11) Conclusion, (12) Acknowledgements, (13) References, (14) Appendices, (15) Position format
3. A manuscript may be written in Korean or English. If necessary, the original terminology may be provided in parentheses to avoid confusion.
4. The manuscript title must be expressed concisely, preferably in ten words or less, and Keywords must be written in English, with Korean translations in parentheses, and numbering six words or less.
5. The abstract must be written in English and not exceed 200 words. Figures and tables shall not be included in the abstract.
6. Figures and tables shall be numbered in order in the main text, and captions should be written in English. Captions shall be labeled beginning "Fig. 1" for figures and "Table 1" for tables.
7. Arabic numbers and SI units shall be used in principle.
8. References shall be numbered in order of quotation.
 - (1) Citation in the main text: First author's last name with reference number in square brackets. e.g.) Hong [1]
 - (2) References shall be written in English at the end of the main body with the following formats.
 - Books: Author names, (Year of publication), Book title, Publisher.
 - Periodic Articles: Author names, (Year of publication), Paper title, Journal name, Vol.(No.), Cited pages.
e.g.) Hong, K. D., Kim, C. S., (2022), A method to investigate mechanical properties, John Wiley & Sons.
Hong, K. D., (2022), A method to investigate mechanical properties, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(1), 1-18.
9. Appendices shall be formatted in the same way as main body text.

Author's Check List

1. Are the affiliations of all authors indicated with the correct symbols?
2. Does the manuscript adhere to the style set forth in the template?
3. Are Korean and English titles written in ten words or less?
4. Are keywords written in English with Korean in parentheses, in six words or less?
5. Are all symbols listed with correct nomenclature and proper description?
6. Are all figures containing abscissas and ordinates labeled with the correct symbols and units?
7. Does the manuscript use Arabic numbers and SI units?
8. Is the English abstract within 200 words?
9. Are the captions of tables and figures in English, corresponding to the format?
10. Are appendices formatted in the same way as main body text?
11. Is the manuscript written according to the guidelines of the journal?

Rules for Reviewing Papers

Article 1 Purpose

The Rules are designed to specify matters related to the review of papers submitted to Journal of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Journal") of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society").

Article 2 Submission and Reception

- A. The person who wants to submit the paper to the Journal shall use the Society's paper submission system to submit the paper that has been written in compliance with the Society's rules for submitting papers, which the Society shall receive.
- B. Notwithstanding the provision of A., the paper may be submitted and received in other ways so long as the Editor-in-Chief approves it.
- C. The Society shall basically receive papers that are related to the Society's areas of research. The Editor-in-Chief may refuse to receive the submitted paper, if it is not related to the Society's areas of research or has not fulfilled the requirements. Areas of research are specified in 'Rules for Submitting and Publishing Papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering' and 'Guidelines for Manuscript Writing'.

Article 3 Selection of Reviewers

- A. The Editor-in-Chief shall consider the areas for the submitted paper and assign its review to the Editor in the relevant area, and the Editor shall assign the Editorial Board Member in the given area as the review supervising Editorial Board Member.
- B. The review supervising the Editorial Board Member shall select and recommend to the Editor-in-Chief who he or she deems fit for the review of the submitted paper.
- C. The paper shall have two reviewers while the third reviewer may be appointed, in which case, the paper shall have the maximum of three reviewers. Reviewers shall basically belong to the different institution than the authors of the paper belong to.
- D. The Editor-in-Chief shall send the email to the recommended reviewer to confirm the acceptance of the reviewing duty. In case any of the recommended reviewers refuses to serve as the reviewer, the Editor-in-Chief shall ask the relevant The Editorial Board Member to recommend some other candidate.

Article 4 Review Procedure

- A. Following the comprehensive review of the paper, the reviewer shall record results of the review supported with objective grounds and make the clear request for revision, if necessary.
- B. For the review, the reviewer must choose 'Accept', 'Accept Subject to Minor Revisions', 'Re-Review after Major Revisions', or 'Reject'.

Article 5 Review Period

- A. The Editorial Board Member for the Journal must select reviewers within seven days from the appointment of the Editorial Board Member, and the reviewers who are asked to review a paper must complete the review within 14 days from their acceptance of the reviewer's duty for the primary review and within seven days for the secondary review.
- B. The ruling by the Editor and the Editorial Board Member must be completed within seven days from the reception of review results.
- C. In case the reviewer candidate fails to accept the reviewer's duty for more than fourteen days from the request, the candidate may be replaced with another reviewer.
- D. If review results fail to arrive for more than three months from the reception of the paper in contravention of the above provision, the following may be put into action.
 - ① If one of the reviewers has failed to deliver review results: The Editorial Board Member for the specific paper shall review it within seven days from the expiry of the three months.
 - ② If all of the reviewers have failed to deliver review results: The Editor and the Editorial Board Member for the specific paper shall review it within seven days from the expiry of the three months. If the Editor is the same person as the Editorial Board Member, the Editor alone may perform the review procedures.

Article 6 Deadline for Author's Revision

- A. The author must resubmit the revised paper that reflects requests for revisions in accordance with the Editor-in-Chief decision based on review results within thirty days for 'Re-Review after Major Revisions' or within fourteen days for 'Accept Subject to Minor Revisions'.
- B. In case a revised paper fails to be submitted for more than thirty days from the submission deadline, the Editorial Board may cancel its publication, and if the author wants a review to continue, he or she must resubmit the paper.

Rules for Reviewing Papers

Article 7 Decision over Publication

- A. The Editor-in-Chief shall make a final decision on whether to publish a paper or not by reviewing the results of the review by two reviewers and considering the comprehensive evaluation by the editing director and the Editor for the paper.
- B. A paper that has been ruled as 'Reject' by two or more reviewers cannot be published in the Journal.

Article 8 Review of Special Papers

- A. The Editor-in-Chief shall appoint a Special Editor for supervising the special paper, with recommendations from the officers of the Society.
- B. In case a Special Editor is the Director or the Division Chairman of the Society, the Special Editor shall supervise the selection of two reviewers for the review of the submitted paper and decide whether to publish it solely based on the review results. In case the Special Editor is not the Director or the Division Chairman of the Society, the Board of Editing Directors shall select the Editor for supervising the review of paper.

Article 9 Confidentiality

- A. The reviewer shall not disclose his or her assumed status to anyone else.
- B. The name of the author may be disclosed to the reviewer.
- C. Review results shall not be disclosed to anyone but the author.

Article 10 Objection

- A. If the author raises an objection to the review results, the exchange of views between the reviewer and the author shall proceed through the Editor. When the reviewer and the author want to exchange their views, they can do so through the mediation of the Editor.
- B. The author's request for the re-review shall not basically be accepted.

Article 11 Review Fee

If necessary, the specified editing fee may be paid to the Editor and the Editorial Board Member, while the specified review fee may be paid to the reviewer.

Code of Ethics for Academic Activities

- Full Text of Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering: http://jkspe.kspe.or.kr/_common/do.php?a=html&b=16
- For the policies on the research and publication ethics not stated in this instructions, International standards for editors and authors (<http://publicationethics.org/international-standards-editors-and-authors>) can be applied.

Chapter 1 Overall Rules

Article 1 Purpose

This regulation aims to establish the ethical standard for the members of this institute to comply with and to contribute to the healthy development of academics and society in order for our academic activities related with the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the “Society”) to not infringe the dignity and value of human beings and maintain a high ethical standard that does not damage the benefits of public society.

Article 2 Application Area of Code of Ethics

- A. The code applies to the overall academic activities including all academic journals, academic conferences, symposiums, workshops, forums, etc. published and held by the Society.
- B. The code applies to all authors, reviewers, Editorial Board Members (hereinafter referred to as “EBM”, and hands-on-workers in the service bureau related with the above academic activities.
- C. Other items not set forth above may comply with this article, each level of regulations of Ministry of Education and its annex institutions.

Article 3 Scope of Misconduct

Misconduct suggested in this code include forging, falsification, plagiarism, and false indication of the author of the paper in academic activities, papers and presentations related with the society, and are as follows:

- A. ‘Forging’ is the act of creating false data or non-existent research results.
- B. ‘Falsification’ is the act of perverting research content or results by artificially modifying research ingredients, equipment or processes, or arbitrarily modifying and deleting data.
- C. ‘Plagiarism’ is the act of appropriating others’ ideas, research contents or results without proper approval or quotation.
- D. ‘False indication of the author of the paper’ is the act of not granting the qualification as an author of the paper without a reasonable cause to a person who contributed scientifically or technically on a research content or result, or granting qualification of an author of the paper to a person who did not contribute scientifically or technically to express gratitude or show respect.
- E. ‘Duplicate publication’ is the act of publishing the same content to two or more academic journals.
- F. Activity of intentionally interfering investigation on the doubts of one’s own or other’s misconduct, or disturbing the informant.
- G. Activity that seriously deviates from the scope commonly accepted in the science and technology sector.
- H. Activity other than the misconduct set forth above that needs to be independently investigated or prevented by the Society.

Chapter 2 Author

Article 4 Honesty of Author

- A. The author shall be honest in research carried out by an individual. Here, honesty refers to honesty in overall research processes including derivation of ideas, designing experiments, analyses of experiments and results, research funds, publishing research results, and fair compensation to research participants.
- B. The researcher shall consider plagiarism, fraud, manipulation and falsification during research as serious criminal activities, and endeavor to prevent these misconducts.
- C. The author shall announce and properly respond in case of contradiction or the possibility of contradiction of benefits of one’s own and others or other institutions.

Article 5 Authorship

It is recommended for every author including the first and corresponding author that authorship be based on the following 4 criteria:

- A. Substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; AND
- B. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content; AND
- C. Final approval of the version to be published; AND
- D. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Code of Ethics for Academic Activities

Article 6 Compliance of Authors

- A. During the research implementation process of the submitted paper, the author shall respect human rights, comply with life ethics, and obtain universality such as environment protection.
- B. In the submitted paper, the author shall accurately illustrate the research content and its importance without perverting the research result.
- C. The submitted paper shall comprehensively include an academically valuable result and its basis of argument. If the paper asserts for a conclusion similar to an already announced paper, it should be academically valuable for a new basis of argument.
- D. If citing a public academic data, its source must be clearly stated. For data obtained from an undisclosed paper, research plan or personal contact, it should be cited after consent from the researcher who provided the information.
- E. Using the whole or part of another researcher's research result without citing the reference corresponds to plagiarism and is not allowed.
- F. The activity of duplicate publication by an author in the journal issued by the society where the paper is already published or planning to publish in other academic journal is considered misconduct and not allowed. Submitting content already presented in academic conferences or seminars by rewriting in a paper according to the academic journal standard is generally accepted, but it must additionally have an important research result for the relevant presentation.
- G. All researchers who made important contributions to research implementation shall become co-authors, and the representative author of the paper must have consents from all co-authors. For outside academic support such as administrative and financial support, provision of research data or simple academic advice shall be indicated in the 'Acknowledgement' for its content.
- H. Indicating a person who did not make academic contribution to research or falls short of contribution based on causes outside academics is unethical conduct that defames the dignity of academics.
- I. In relation to copyrights, if approval of a person in charge is needed, the author must be granted approval before submission of the paper, and confirm that there will be no dispute of contract or ownership that may be affected by the publication of said paper.

Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

- A. The EBM shall fairly and objectively execute the revision process of the paper according to the set regulation without prejudice on the author's gender, age, race, affiliated institution or personal acquaintanceship with the author.
- B. The EBM shall determine whether to reconsider or publish the paper based on the consistent standard of the review results for the submitted paper.
- C. If it is determined that due to the lack of EBM's knowledge in the research area of the submitted paper, there may be difficulty in judging the result, the EBM may be advised by a person with professional knowledge in the relevant area.
- D. The EBM shall not disclose or make use of the information acquired in the review process to others. Before the publication in the journal, it is not even allowed to cite the content of the relevant paper without the consent of the author.
- E. The EBM has the responsibility to monitor any unethical activity of the author and reviewers, and when ethically inadequate behavior is discovered; the EBM shall investigate and give proper sanction as required by immediately reporting to the Editor-in-Chief.
- F. If the submitted paper has direct interest with the EBM, it should be reported to the Editor so that the relevant paper can be examined by another EBM.
- G. In case of reasons that prevent the EBM to promptly process the duty, it is advised to report to the editorial office of the society or the Editor.
- H. In case of discovering any unethical activity from a submitted paper or reviewing process, or in case of deprecation on unethical activities, the Editor shall determine the importance of the case, and organize an Investigation Committee with EBM in the relevant area if needed. The Editorial Board determines the level of sanction to the relevant person based on the report by the Investigation Committee, and if the already published paper is related, the publication of the relevant paper may be retracted and cancelled.

Article 8 Compliance of Reviewers

- A. The reviewer shall fairly and objectively perform reviewing duty for examining the paper according to the set regulation without the prejudice on the author's gender, age, race, affiliated institution or personal acquaintanceship with the author. Personal academic beliefs that have not been completed, verified or under judgment based on assumption must be eliminated.
- B. The reviewer, in order to assure the secrecy of reviewing the paper, must not disclose or make use of information acquired in the process of reviewing to others. Before the publication of the paper, it is not allowed to even cite the content of the relevant paper without the consent of the author.

Code of Ethics for Academic Activities

- C. The reviewer must respect the personality of the author as a professional. The reviewer shall endeavor to write the objective reviewer's opinion in an academically modest way by eliminating personal and subjective evaluations and offensive expressions. The reviewer shall state in details the review comments and basis for the comments of the paper under review.
- D. It is prohibited to request for additional information or explanation to the author for the reviewer's personal purpose.
- E. If the similar content to the paper disclosed in other academic journal has been included in the paper without citation, the EBM should be notified in detail.
- F. If the reviewer is in direct interest with the requested paper or it is determined that the reviewer's own professional area is not suitable for examining the submitted paper, the reviewer should immediately notify the EBM in charge so that other reviewers may be appointed. Also, in case of reason for not being able to finish the review within the deadline, it needs to be notified to the EBM.

Chapter 4 Verification Process and Standard

Article 9 Ethics Committee

- A. In case of breach of ethics and suspected cases during academic activities, the society may organize an Ethics Committee (hereinafter referred to as "Committee") to investigate the truth.
- B. Organization and Duties of Committee
 - ① The Committee shall be composed of one chairman and five members.
 - ② The Vice-President in charge of academic affairs shall be the chairman, and members shall be selected from the board of directors, and appointed by the chairman.
 - ③ The chairman and members shall take office for 1 year from January 1 to December 31 and can be reelected.
 - ④ The chairman shall represent the Committee and take charge of overall duties for ethics of society.

Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

- A. Establish and promote research ethics.
- B. Prevent and discourage research misconduct.
- C. Deliberate and vote on research misconduct.
- D. Determine sanctions for wrongdoers and report the result to the board of directors.
- E. Improve and enhance other research ethics.

Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

- A. The Committee shall be convened by the chairperson as needed, held in attendance of the majority of members, and resolved by over two-thirds of registered members' agreements.
- B. The decision shall be notified to the suspected person (accused) of misconduct, and the explanatory opinion shall be received in writing within 15 days.
- C. The Committee shall review an explanatory opinion from the suspected person of misconduct, and hear an opinion if needed before making the final decision.
- D. The decision shall be reported to the board of directors for the final decision.
- E. If the chairman deems it necessary, opinions by a person other than external personnel or members can be heard.
- F. Presented content by participants and details of the Committee shall be undisclosed in principle.

Article 12 Reporting Research Misconduct

- A. Research misconduct may be reported in writing with related documents attached according to the five W's and one H. However, even if anonymously reported, if it is clear based on the five W's and one H, the Committee may review the initiation of investigation.
- B. The Society shall endeavor not to give any disadvantage, discrimination, unreasonable pressure or damage to the informant for reporting misconduct.
- C. The identity of the informant shall not be subject to disclosure, and the best measures shall be taken to prevent identity disclosure.
- D. In case the informant wishes to know the investigation schedule and procedure after reporting misconduct, the Society shall respond sincerely.
- E. The informant who made the report although it was known or it could be known that the information given is false shall not be subject to protection.

Code of Ethics for Academic Activities

Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions

- A. The author whose research misconduct has been confirmed shall be imposed with sanction by selecting from the following considering the severity of the misconduct according to the decision made by the Committee:
- ① Cancel publication of relevant research subject to the Society publication
 - ② Prohibit submission of paper to the journal issued by the Society for five years
 - ③ Prohibit presentation in the Society academic conference for five years
 - ④ If the relevant paper has already been published, notify cancellation of publication in the relevant academic journal, and notify the misconduct to the affiliated institution of the wrongdoer
 - ⑤ Cancel membership to the Society
- B. If the informant intentionally made a false report, the sanction equivalent to the research misconduct may be given according to the decision of the Committee.

Article 14 Protection of Rights of Examinee

- A. The examinee refers to a person who has become the subject of investigation for misconduct due to the report or cognition by the Society or related institution, or a person who has become the subject of investigation by suspecting of taking part in misconduct during the investigation process. The examinee shall not include testifiers or witnesses.
- B. The Society shall be careful not to violate the dignity or rights of an examinee during the verification process. Also, until the confirmation of the results, the examinee shall have an equal opportunity for objection or defense, and shall be notified in advance of the related procedure.
- C. The suspicion on misconduct shall not be disclosed to the public until the judgment has been confirmed. However, this does not include cases where serious risk may be present to public welfare or social norms.
- D. The examinee may request for investigation and processing procedure as well the processing schedule for misconduct to the Society, and said the Society shall respond sincerely.

Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation

- A. The Committee shall store the investigation report of the entire investigation process obtained in the form of voice, video or written document for at least 5 years.
- B. The report of investigation and list of investigators may be disclosed after judgment has been made.
- C. If the list of investigators, witnesses, testifiers, or consultants has the possibility to cause disadvantage to the concerned personnel, it may not be disclosed.

Article 16 Report of Investigation Result

- A. The Committee shall report the confirmation of the examined content to the board of directors within 6 months of the submission date after completion and judgment of the investigation.
- B. The report of the result must include each of the following items:
- ① Content of information
 - ② Misconduct subject to investigation
 - ③ List of investigators of Investigation Committee
 - ④ The role of the examinee in the relevant research and validity of misconduct
 - ⑤ Related evidence and witnesses
 - ⑥ Objection or defense by informant and examinee, and its processing result
- C. Until the final judgment on the research misconduct, it must not be disclosed to the public.

Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

Title	Korean
	English
Authors	

I hereby certify that I agreed to submit the manuscript entitled above to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering with the following statements.

1. The submitting/corresponding authors (hereafter referred to as “authors”) warrant that the copyright shall be transferred to the KSPE when the manuscript is accepted, and the KSPE will own the exclusive rights.
2. Authors certify that they have not impinged upon the rights or copyrights of other researchers, and have attained legal copyright to display items from the original copyright owners.
3. Authors certify that they have indeed contributed to the outcomes and writing of their manuscript and are responsible for the contents therein.
4. Authors may use or reproduce part of the published work in an annual report, magazine or another journal. In this case, they should inform the KSPE of the reproduction and cite the work with proper citation information.
5. Authors have never published the same work in any other journal and are not planning to do so.
6. Authors certify that they will abide by the ethics regulations of the KSPE related to academic activities given in [http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_Code of Ethics for Academic Activities \(English\).pdf](http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_Code%20of%20Ethics%20for%20Academic%20Activities%20(English).pdf). Authors also agree to CrossCheck verification of the manuscript for prevention of duplicate publication and plagerism.
7. The corresponding author is aware of the items 1-6 and agrees to them.
8. The KSPE will have the right to delay or cancel the publication if authors do not adhere to the above statements.
9. Corresponding author has the full authority to sign the Statement of Copyright Transfer form on behalf of all the co-authors.

**Corresponding
Author’s
Signature**

- Corresponding author (name): _____
- Position: _____
- Affiliation: _____
- Date: ____ / ____ / ____

**Corresponding
Author**

The author to whom all correspondence should be addressed from submission to publication process and who is responsible for the published contents and communications with the co-authors.

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 24 · Number 4 · April 2023

REGULAR PAPERS

Effects of Laser and Tungsten Arc Welding Processes on the Thermal Softening and Mechanical Properties of Almag6 Aluminum Alloy

Y. Kwak · T. Kang · S.H. Lee · M. Kang 531

Dynamic Modeling and Controlling of Piezoelectric Actuator Using a Modified Preisach Operator Based Hammerstein Model

M. Zhang · X. Cui · Q. Xiu · J. Zhuang · X. Yang 537

Morphologies of Cemented Tungsten Carbides Irradiated by Femtosecond Laser with High Pulse Energy for Machining Enhanced Cutting Tools

Y.-G. Shin · J. Choi · S.-H. Cho 547

Tensile Property Evaluation of Additively Manufactured Ti-6Al-4V/Yttria-Stabilized Zirconia Composite Using Absolute Nonlinear Ultrasonic Technique

S.-H. Park · J. Yoo · G. Choi · K.-Y. Jhang 555

Composite Layer Design Using Classical Laminate Theory for High Pressure Hydrogen Vessel (Type 4)

G. Park · C. Kim 571

Soft Metal Hydride Actuator as a Rescue Jack Using Accessible Heat Sources

M. Hosono · K. Sakaki · S. Shimada · Y. Nakamura · S. Ino 585

Robust Optimal Design of a Six-Bar Linkage-Based Finger Clamping Unit for High Durability

S. Kim · K. Lim · Y. Kim · T. Seo 595

The Significantly Enhanced Mechanical and Tribological Performances of the Dual Plasma Nitrided and PVD Coated Ti6Al4V Alloy

J. Yang · K. Le · H. Chen · X. Zhao · X. Xie · Y. Luo · S. Xu · W. Liu 607

Fatigue Analysis for Automotive Wheel Bearing Flanges

J.-W. Jin · K.W. Kang · S. Lee 621

Design of Polymeric Orthopedic Screws with Variable Stiffness and Multi-Objective Optimization of Injection Molding Process

S.K. Yadav · A. Sikidar · D. Kalyanasundaram 629

Fatigue and Tensile Behaviors of High Stiffness Adhesive Bonded and Hybrid Joints with Composite-Steel Dissimilar Materials

T.-Y. Kang · H.-S. Aan · H.-J. Chun · J.-C. Park 645

Dynamic Characteristics of the Multistage Planetary Gear Transmission System Based on a Stochastic Load

C. Hu · G. Geng · X. Liu · S. Yang · X. Tang 657

Improving Image Monitoring Performance for Underwater Laser Cutting Using a Deep Neural Network

S.-K. Park · K.-H. Song · S.Y. Oh · J.S. Shin · H. Park 671

REVIEW

Machine Learning for Object Recognition in Manufacturing Applications

H. Yun · E. Kim · D.M. Kim · H.W. Park · M.B.-G. Jun 683

CORRECTION

Correction: Robust Optimal Design of a Six-Bar Linkage-Based Finger Clamping Unit for High Durability

S. Kim · K. Lim · Y. Kim · T. Seo 713

Further articles can be found at link.springer.com

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

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at www.springer.com/12541

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 10 · Number 2 · March 2023

REGULAR PAPERS

On-Line Prediction of Impulse Spark and Arc Discharge Removals of Metal Bond in Dry Electrical Discharge Dressing of Diamond Grinding Wheel
Y. Lu · J. Sun · X. Wu · F. Chen 293

An Octree-Based Two-Step Method of Surface Defects Detection for Remanufacture
Y. He · W. Ma · Y. Li · C. Hao · Y. Wang · Y. Wang 311

Effect of Friction Stir Welding Parameters on Microstructure and Corrosion Behavior of 2101 Duplex Stainless Steel in Simulated Body Fluid
A.S. Hammood · M. Esmailzadeh · S.N. Hosseini · S. Karimi · I. Calliari · L. Pezzato · R. Brittain 327

AI-Aided Printed Line Smearing Analysis of the Roll-to-Roll Screen Printing Process for Printed Electronics
A.N. Gafurov · T.H. Phung · B.-H. Ryu · I. Kim · T.-M. Lee 339

Metal Micro-forming of AA5052 Using High-durable Glassy Carbon Mold for Efficient Boiling Heat Transfer
J. Kim · S. Lee · Md. Ali Asgar · M. Refatul Haq · S. Kim 353

Effects of Intermetallic Evolution by Electrically Assisted Rapid Heat Treatment on the Mechanical Performance and Formability of Aluminum Clad Steel
S. Zhang · L. Cai · T.A.N. Nguyen · M. Geng · K. Gao · S.-T. Hong · M.-J. Kim 367

Comprehensive Study on the Cutting Force Modeling and Machinability of High Frequency Electrical Discharge Assisted Milling Process Using a Novel Tool
M. Xu · R. Wei · C. Li · R. Kurniawan · J. Chen · T.J. Ko 381

Toward Optimizing Resonance for Enhanced Triboelectrification of Oscillating Triboelectric Nanogenerators
J. Yu · W. Kim · S. Oh · D. Bhatia · J.-G. Kim · D. Choi 409

Comprehensive Control Strategy and Verification for PEM Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source
H.-A. Trinh · H.V.A. Truong · M.D. Pham · T.C. Do · H.-H. Lee · K.K. Ahn 421

Biomechanical Regenerative Braking Energy Harvester: A Systematic Analysis
K.-T. Yoon · Y.-M. Choi 437

Corrosion Properties of Dissimilar AA6082/AA6060 Friction Stir Welded Butt Joints in Different NaCl Concentrations
A. Laska · M. Szkodo · Ł. Pawłowski · G. Gajowiec 457

Principle Component Analysis and Social Network Analysis for Decision Support of Ultra-Precision Machining
W.S. Yip · S. To 479

Development of Coating Removing from GFRP Surface by Abrasive Air Jet Using Amino Thermoset Plastic Abrasive
Y.S. Zhu · D. Sun · W.Z. Lu · T.J. Ko 495

Research on Scanning Induction Heating Process of Wind Turbine Gear: Dynamic Evolution of End Temperature
H. Wen · Y. Xiao · Y. Han · Y. Zhao · S. Wang 509

Improvement of Energy Saving for Hybrid Hydraulic Excavator with Novel Powertrain
Y. Yu · T.C. Do · B. Yin · K.K. Ahn 521

Lifetime Prediction of Silicone and Direct Ink Writing-Based Soft Sensors Under Cyclic Strain
K. Kim · J. Bae 535

REVIEWS

Analysis of Contribution of Full Summation Hydrodynamic Load to Dynamic Response of Floating Offshore Wind Turbine Structure Operating in Extreme Environments
T.-W. Kang · J.-H. Yun · H.-J. Noh · E. Kim · H.-I. Yang 547

Systematic Literature Review on Augmented Reality-Based Maintenance Applications in Manufacturing Centered on Operator Needs

J.M. Runji · Y.-J. Lee · C.-H. Chu 567

Producing Micro-Power with Microfluidic Enzymatic Biofuel Cells: A Comprehensive Review

H. Khan · M. Tanveer · C.W. Park · G.M. Kim 587

Design and Assessment of Phase-Shifting Algorithms in Optical Interferometer

S. Kim · J. Jeon · Y. Kim · N. Sugita · M. Mitsuishi 611

Further articles can be found at link.springer.com

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

Instructions for authors for *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.- Green Tech.* are available at www.springer.com/40684

한국정밀공학회 2023-2024 평의원 명단

이름	소속	이름	소속	이름	소속
이봉진	한국정밀공학회	김동민	한국생산기술연구원	박준식	한국전자기술연구원
송지복	부산대학교(전)	김동성	POSTECH	박형욱	UNIST
이장무	서울대학교(전)	김무림	한국로봇융합연구원	배규호	DN 솔루션즈
송삼홍	고려대학교(전)	김범준	U of Tokyo	백승엽	인덕대학교
이후상	한국기계연구원(전)	김범준	오산대학교	백주현	국방기술진흥연구소
양동열	KAIST(전)	김병희	강원대학교	부종욱	센플러스
오택열	경희대학교(전)	김보현	송실대학교	서진호	부경대학교
이상조	연세대학교(전)	김석민	중앙대학교	서태원	한양대학교
이석희	부산대학교(전)	김승중	고려대학교	소병록	한국생산기술연구원
채수원	고려대학교(전)	김양진	부산대학교	손용	한국생산기술연구원
김승우	KAIST	김영범	한양대학교	손정우	금오공과대학교
이응숙	한국기계연구원	김영진	KAIST	송용남	고려대학교
최헌종	한국생산기술연구원(전)	김재열	조선대학교	송준엽	한국기계연구원
이선규	광주과학기술원(전)	김재완	한국표준과학연구원	송지현	단국대학교
이춘만	창원대학교	김재환	인하대학교	송창규	한국기계연구원
박천홍	한국기계연구원	김정	KAIST	신광용	한국생산기술연구원
홍성욱	금오공과대학교	김정실	경북대학교	신영문	프로토텍
정해도	부산대학교	김종백	연세대학교	신현정	KAIST
김대은	연세대학교	김종혁	현대위아	심도식	한국해양대학교
홍대희	고려대학교	김진호	영남대학교	심종엽	한국기계연구원
양승한	경북대학교	김창완	건국대학교	안동규	조선대학교
이석우	한국생산기술연구원	김창주	한국기계연구원	안성훈	서울대학교
Martin Jun	Purdue U	김철	부산대학교	안지환	서울과학기술대학교
Simon Park	U of Calgary	김태곤	한국생산기술연구원	안형준	송실대학교
강경철	DN 솔루션즈	김호상	고등기술연구원	엄광문	건국대학교
강봉철	국민대학교	김호찬	안동대학교	여운홍	Georgia Tech
강상균	한창산업	남은석	한국생산기술연구원	오정석	한국기계연구원
강성목	대구카톨릭대학교	남정수	한국생산기술연구원	오제훈	한양대학교
강태준	인하대학교	노승국	한국기계연구원	옥종걸	서울과학기술대학교
강현욱	UNIST	노유정	부산대학교	윤종현	한양대학교
고승환	서울대학교	류성기	경상국립대학교	윤주성	경남대학교
고태조	영남대학교	류시형	전북대학교	윤준영	연세대학교
곽문규	경북대학교	문두환	고려대학교	윤해룡	한국로봇융합연구원
권석진	한국철도기술연구원	문승기	Nanyan TU	이강민	핵사곤
권오홍	한국생산기술연구원	민병권	연세대학교	이강재	DN 솔루션즈
권유리	건국대학교	민상기	U of Wisconsin	이경창	부경대학교
권지연	동국대학교	박경희	한국생산기술연구원	이계한	명지대학교
김갑순	경상국립대학교	박근	서울과학기술대학교	이광일	경일대학교
김건희	한밭대학교	박민수	서울과학기술대학교	이길용	금오공과대학교
김경동	한국공작기계산업협회	박상후	부산대학교	이동경	공주대학교
김경호	한국기계연구원	박영빈	UNIST	이동원	전남대학교
김규만	경북대학교	박용재	강원대학교	이동윤	한국생산기술연구원
김남근	서강대학교	박정우	조선대학교	이동진	건국대학교
김대욱	Arizona U	박정재	한국표준과학연구원	이동혁	한국산업기술시험원
김동립	한양대학교	박준	한국광기술원	이문구	아주대학교

이름	소속	이름	소속	이름	소속
이봉기	전남대학교	이현욱	한국철도기술연구원	주기남	조선대학교
이상원	성균관대학교	이호상	한국교통대학교	주백석	금오공과대학교
이상준	한국생산기술연구원	이호진	한국생산기술연구원	지성철	단국대학교
이상직	한국생산기술연구원	이희경	전남대학교	진상록	부산대학교
이석	부산대학교	임종환	제주대학교	진종한	한국표준과학연구원
이승철	POSTECH	임지석	영남대학교	차석원	서울대학교
이승한	LIG 넥스원	장원석	한국기계연구원	천두만	울산대학교
이영수	삼성전자	장진아	POSTECH	최병호	고려대학교
이원균	충남대학교	전병선	나노스코프시스템즈	최영재	한국생산기술연구원
이은택	금오공과대학교	전용호	아주대학교	최우천	고려대학교
이은호	성균관대학교	전은채	울산대학교	최재원	U of Akron
이인환	충북대학교	전의식	공주대학교	최해진	중앙대학교
이재학	한국기계연구원	정구현	울산대학교	최현진	대구기계부품연구원
이주연	서울과학기술대학교	정동현	현대로템	추원식	경상국립대학교
이주형	서울과학기술대학교	정영훈	경북대학교	하태호	한국기계연구원
이지현	U of Calgary	정용국	KTH Sweden	한국현	삼영기계
이지혜	한국기계연구원	정재일	국민대학교	한성민	한국과학기술연구원
이차범	Texas A&M U	정하승	Michigan State U	함영삼	한국철도기술연구원
이창우	건국대학교	정훈의	UNIST	현승민	한국기계연구원
이창호	DN 솔루션즈	조규진	서울대학교	홍석준	한양대학교
이창환	서울과학기술대학교	조영태	창원대학교	홍성태	울산대학교
이필호	한국기계연구원	조영환	LIG 넥스원	홍정화	고려대학교
이학	경북대학교	조정대	한국기계연구원	황운봉	POSTECH
이학준	한국생산기술연구원	조정훈	케이씨앤씨	황주호	한국기계연구원
이현섭	동아대학교	조창래	제이에스프리시전	황지홍	서울과학기술대학교

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(송실대학교) 신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원) 송용남(고려대학교) 정영훈(경북대학교)

편집이사

강현욱(UNIST) 김동립(한양대학교) 박근(서울과학기술대학교) 이광일(경일대학교) 정훈의(UNIST) 고승환(서울대학교) 김석민(중앙대학교) 박영빈(UNIST) 이창우(건국대학교) 주백석(금오공과대학교) 광문규(경북대학교) 김양진(부산대학교) 손정우(금오공과대학교) 이현섭(동아대학교) 천두만(울산대학교) 김규만(경북대학교) 김영진(KAIST) 안지환(서울과학기술대학교) 장진아(POSTECH) 추원식(경상국립대학교) 김남근(서강대학교) 문두환(고려대학교) 안형준(송실대학교) 정구현(울산대학교) 황지홍(서울과학기술대학교)

사업이사

강태준(인하대학교) 김태곤(한국생산기술연구원) 이동원(전남대학교) 전용호(아주대학교) 권지연(동국대학교) 박상후(부산대학교) 이영수(삼성전자) 주기남(조선대학교) 김무림(한국로봇융합연구원) 박용재(강원대학교) 이인환(충북대학교) 현승민(한국기계연구원) 김승중(고려대학교) 손용(한국생산기술연구원) 이지혜(한국기계연구원) 홍성태(울산대학교) 김진호(영남대학교) 이경창(부경대학교) 임지석(영남대학교)

기획홍보이사

노유정(부산대학교) 최영재(한국생산기술연구원) 류시형(전북대학교) 이주연(서울과학기술대학교) 이현욱(한국철도기술연구원) 장원석(한국기계연구원)

국제이사

Martin B. Jun(Purdue Univ.) 민상기(Univ. of Wisconsin, Madison) 정용국(KTH Royal Institute of Tech.) Simon Park(Univ. of Calgary) 여운홍(Georgia Tech.) 정하승(Michigan State Univ.) 김대욱(Univ. of Arizona) 이동진(건국대학교) 조영태(창원대학교) 김범준(The Univ. of Tokyo) 이지현(Univ. of Calgary) 차석원(서울대학교) 문승기(Nanyang Technological Univ.) 이차범(Texas A&M Univ.) 최재원(The Univ. of Akron)

대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원) 조영환(LIG넥스원(주)) 김경동(한국공작기계산업협회) 조정대(한국기계연구원) 김종혁(현대위아) 서진호(부경대학교) 이강재(DN솔루션즈)

부문회장

김건희(한밭대학교) 오정석(한국기계연구원) 진종한(한국표준과학연구원) 김중백(연세대학교) 정재일(국민대학교) 엄광문(건국대학교) 이동윤(한국생산기술연구원) 김호찬(안동대학교) 박형욱(UNIST) 김영범(한양대학교)

특별회원사

다이아몬드

DN솔루션즈 (주)키슬러코리아 LIG넥스원(주) 한국화낙(주) 신도리코(주) 현대위아(주) (주)이수페타시스 (주)화신정공 (주)케이씨텍 화천기공(주)

플래티늄

HP Korea(유) SK실트론(주)

골드

(주)마리알로 (주)에비던트코리아 (주)에이스나노켐 (주)엔도로보틱스 지앤피테크놀로지(주)

(주)프로토텍 헥사곤

패밀리

(주)웨이퍼펍 한국공작기계산업협회

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구가톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김양진
부산대학교

김호찬
안동대학교

문두환
고려대학교

손정우
금오공과대학교

박민수
서울과학기술대학교

박상후
부산대학교

박형욱
UNIST

안지환
서울과학기술대학교

이인환
충북대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

정영훈
경북대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

김기주
동명대학교

김무림
한국로봇융합연구원

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

박준
한국광기술원

배창호
경성대학교

손용
한국생산기술연구원

송철기
경상국립대학교

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이봉기
전남대학교

이종길
안동대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

정재일
국민대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

태기식
건양대학교

황영국
조선이공대학교

김갑용
Iowa State Univ.

김범준
Univ. of Tokyo

김우균
Univ. of Cincinnati

민상기
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 4/ April 2023

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

월간 · 제40권 제4호 [통권 제385호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 3월 25일

발행일 2023년 4월 1일

발행인 이석우

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

[04508] 서울 중구 종림로 50-1(만리동 1가 51-1 SKY1004빌딩) 12층 / FAX (02)518-2937 / <http://www.kspe.or.kr>

사무국장 이병권 / (02)518-0722 / kspe@kspe.or.kr

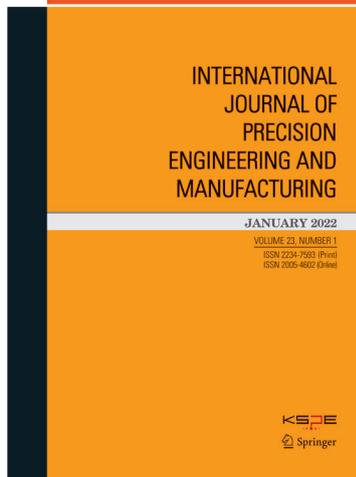
JKSPE(한국정밀공학회), IJPEM-ST 강수현 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpem.st@kspe.or.kr

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

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

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

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



IJPEM Special Issue

Special Issue on Robots for Manufacturing Processes and Systems

IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 23 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 2.041**) 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.

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

- CAD/CAM for manufacturing robots
- Robotic machining
- Robot and machine tool integration
- Mobile robots for factory floor
- Next generation collaborative robots for advanced manufacturing
- Robotic material handling and assembly automation

Guest Editors

- **Prof. Michael Zäh**
Technische Universität München, Germany
- **Prof. Martin Byung-Guk Jun**
Purdue University, USA
- **Prof. Jihyun Lee**
University of Calgary, Canada

Publication Schedule

- Deadline for Submission Date

April 30, 2023

- Publication Date

September 1, 2023

- Volume, Number

Vol. 24, No. 9

- Impact Factor

2.041

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).

Aims and Scope

Under the great wave of the 4th industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)** is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. **The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:**

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

IJPEM-ST covers various kinds of papers:

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

• Publication Date (Scheduled)

Vol. 1 No. 1 January 1, 2023
Vol. 1 No. 2 July 1, 2023

• Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

Editorial Board

Editor-in-Chief

Sang Won Lee / *Sungkyunkwan University, Korea*

Co-Editors-in-Chief

Jay Lee / *University of Maryland, USA*

Jun Ni / *University of Michigan, USA / Shanghai Jiao Tong University, China*

Editors

Hyeong-Joon Ahn / *Soongsil University, Korea*

Hae-Jin Choi / *Chung-Ang University, Korea*

Chih-Hsing Chu / *National Tsing Hua University, Taiwan*

Martin B.-G. Jun / *Purdue University, USA*

Dong Yoon Lee / *Korea Institute of Industrial Technology, Korea*

Seungchul Lee / *POSTECH, Korea*

Sangkee Min / *University of Wisconsin-Madison, USA*

Seung-Ki Moon / *Nanyang Technological University, Singapore*

Duhwan Mun / *Korea University, Korea*

Simon Park / *University of Calgary, Canada*

Editorial Board

Seung-Kyum Choi / *Georgia Institute of Technology, USA*

Haseung Chung / *Michigan State University, USA*

Youngkuk Jeong / *KTH Royal Institute of Technology, Sweden*

Yongho Jeon / *Ajou University, Korea*

Jay-I. Jeong / *Kookmin University, Korea*

Hyungjung Kim / *Seoul National University, Korea*

Yangjin Kim / *Pusan National University, Korea*

Jihyun Lee / *University of Calgary, Canada*

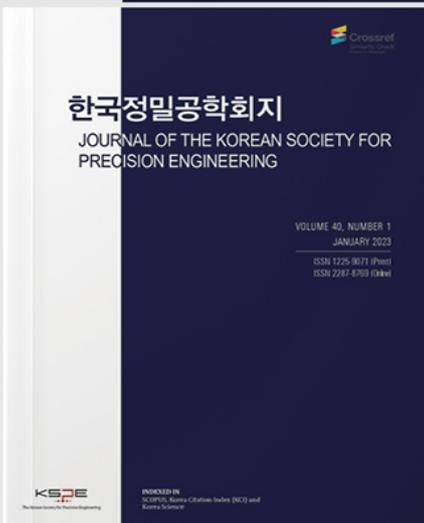
Wonkyun Lee / *Chungnam National University, Korea*

David Rosen / *Agency for Science, Technology and Research, Singapore*

Joo-Sung Yoon / *Kyungnam University, Korea*

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING



JKSPE Topical Issue

article.kspe.or.kr

jkspe.kspe.or.kr



Scopus, KCI
등재지



JKSPE
투고시스템



JKSPE
Homepage

스마트/디지털 헬스케어 기술

스마트 헬스케어(Smart Healthcare) 혹은 디지털 헬스케어(Digital Healthcare) 기술은 개인의 건강과 의료에 관한 정보, 기기, 시스템, 플랫폼을 다루는 산업 분야로서 IoT와 데이터 분석기술 및 클라우드가 융합된 정밀 의료서비스의 일종이다. 휴대형(Portable), 웨어러블(Wearable), 센서의 주변설치(Ambient-Installed) 방식 등으로 클리닉, 생활, 체육활동, 자동차 등에서 인간의 생활습관, 생체정보, 의료정보, 유전체정보 등을 실시간 수집, 모니터링하고 빅데이터 기술, 인공지능 기술, 가상현실 기술 등의 기술 등을 통해 새로운 지식과 정보를 창출해내는 기술을 포괄적으로 일컫는다. 이에 본 특집호에서는 정밀공학과 빅데이터를 기반으로 하는 스마트 헬스케어, 디지털 헬스케어 기술에 관한 논문을 모집하고자 한다.

Smart/Digital Healthcare Technology

Smart healthcare or digital healthcare technology deals with precision medical services that combine personal health and medical information, devices, systems, platforms, IoT, data analysis technology, and cloud. A term that collectively refers to technologies that create new knowledge and information by collecting and monitoring human lifestyle, biometric information, medical information, and genome information in real time through technologies such as big data technology, artificial intelligence technology, and virtual reality technology. In this special issue, we would like to recruit papers on smart healthcare and digital healthcare technology based on precision engineering and big data.

제출 기한

2023년 4월 30일

출판 날짜

2023년 7월 1일

권호수

Vol. 40, No. 7

책임편집인

김병희 (강원대학교)



SCOPUS, KCI 등재 학술지

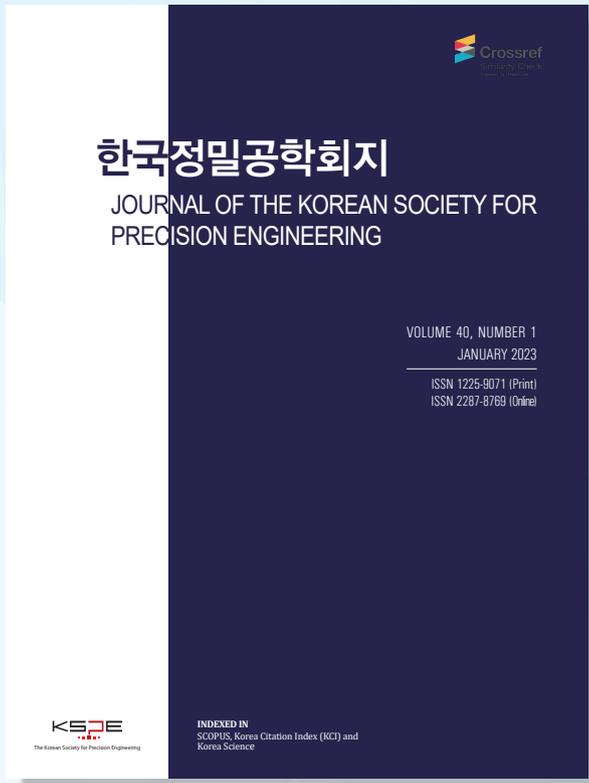
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

Scope

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

학술대회 Full Paper
논문을 투고 시 게재료가
면제됩니다.

논문 본문을 영문으로
작성하여 투고 시, 게
재료가 청구되지 않습
니다.



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

Editorial Board

• Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim (Soongsil University)

• Editors

Jihwan An (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

한국정밀공학회지 최우수논문상

– 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

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



12F, SKY1004 Bldg., 50-1

Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,

04508, Republic of Korea



The 높게
The 빠르게
The 정확하게

LIG넥스원이 대한민국을 넘어 세계로 나아갑니다

K-Precision,
Smart & Green

KSPE 2023 Spring Conference 한국정밀공학회

2023 춘계학술대회

2023. 5. 10 Wed - 5. 12 Fri

라마다프라자제주호텔

제주도 제주시

200단어 초록마감

2023. 3. 13 Mon

초록채택통지

2023. 3. 20 Mon

사전등록마감

2023. 3. 27 Mon

논문모집분야

- 정밀가공 Precision Manufacturing Processes
- 정밀측정 Precision Measurements
- 로봇제어자동화 Robotics, Control and Automation
- 스마트생산시스템 Smart Manufacturing System
- 설계및재료 Design and Materials
- 공작기계 Machine Tools
- 나노/마이크로기술 Nano/Micro Technology
- 바이오헬스 Bio Health
- 적층제조시스템 Additive Manufacturing
- 녹색생산기술 Green Manufacturing Technology

문의 | 한국정밀공학회 사무국 Tel. (02) 518-0722 E-mail. conf@kspe.or.kr
Homepage. <http://www.kspe.or.kr/event/>

주최 | KSPE 대한민국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

후원 | KOFST 한국과학기술단체총연합회 제주특별자치도 (사)제주컨벤션뷰로

International Conference on
PRrecision Engineering and **S**ustainable **M**anufacturing

PRESM 2023

July 16 Sun – **21** Fri, 2023

Bankoku Shinryokan,
Okinawa, Japan

Important Dates

Deadline for Abstract Submission
of Regular Session:

February 15 (Wed), 2023

Date for Acceptance Notification:
(Mail from the PRESM Secretariat)

March 15 (Wed), 2023

Deadline for Early Registration/
Presenter Registration:

April 15 (Sat), 2023

Full Paper Submission (Optional):

May 1 (Mon), 2023

Awards & Honors

Best Paper Awards

Young Researcher Awards

Outstanding Presentation Awards

Organizer

 Korean Society for
Precision Engineering (KSPE, Korea)

Co-Organizers



The Japan Society for
Precision Engineering (JSPE, Japan)



Taiwan Society for
Precision Engineering (TSPE, Taiwan)

Secretariat

Homepage www.presm.org | Email presm@kspe.or.kr |
Tel +82-2-393-0725 | Fax +82-2-518-2937

Participating Journals

- 1** International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing (IJPEM)
*SCIE, SCOPUS / IF 2.041 (2021)
- 2** International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing-Green
Technology (IJPEM-GT)
*SCIE, SCOPUS / IF 4.660 (2021)
- 3** Journal of the Korean Society for
Precision Engineering (JKSPE)
*SCOPUS



2023년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023
Spring
Conference

춘계학술대회

2023.
5. 10(수) - 12(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
Precision Engineering and Sustainable Manufacturing

PRESM 2023

2023. 7. 16(일) - 21(금)

Bankoku Shinryokan
Okinawa, Japan

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023
Autumn
Conference

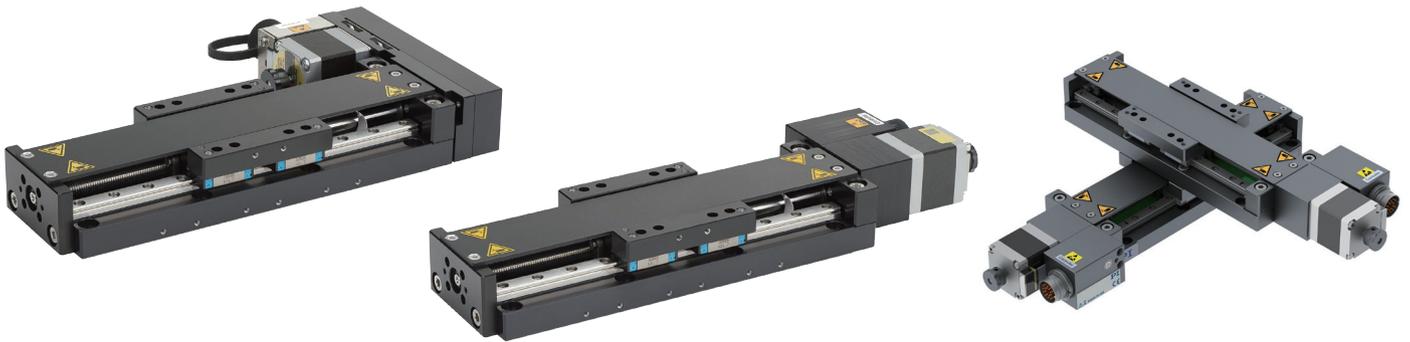
추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

썰비치삼척 리조트
(강원도 삼척시)

L-836 Linear Stage

Stackable · Compact
Cost Effective



상세 페이지 및
사양 다운로드

	L-836	Units
Active axes	X	
Travel range	25 ~ 200	mm
Design resolution	5	μm
Min. incremental motion	0.24 ~ 0.75	μm
Bidirectional repeatability	±0.4 ~ 3	μm
Straightness / flatness	±2 ~ 3	μm
Max. velocity	40 ~ 80	mm/s
Load capacity	150	N
Overall mass	0.7 ~ 1.2	kg
Recommended controllers	C-663, G-901, ACS	

- 폭 60 mm, 낮은 프로파일
- 이동 범위 25 ~ 200 mm
- 가반하중 최대 150 N
- Folded drivetrain 옵션
- 리니어 엔코더 옵션
- 수직마운팅용 홀딩 브레이크 모델

레이저 가공, 테스트&검사, 전자 제조,
광 어셈블리, 포토닉스, 적층 제조 등

