

# 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 2

FEBRUARY 2023

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

## Editor-in-Chief

**Bo Hyun Kim**  
Soongsil University  
bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

<b>Jihwan An</b> Seoul National University of Science & Technology	<b>Baeksuk Chu</b> Kumoh National Institute of Technology	<b>Won-Shik Chu</b> Gyeongsang National University	<b>Doo-Man Chun</b> University of Ulsan
<b>Koo Hyun Chung</b> University of Ulsan	<b>Duhwan Mun</b> Korea University	<b>Jihong Hwang</b> Seoul National University of Science & Technology	<b>Young Hun Jeong</b> Kyungpook National University
<b>Jonghan Jin</b> Korea Research Institute of Standards & Science	<b>Dong Sung Kim</b> POSTECH	<b>Ho-Chan Kim</b> Andong National University	<b>Yang Jin Kim</b> Pusan National University
<b>Seung Hwan Ko</b> Seoul National University	<b>Moonkyu Kwak</b> Kyungpook National University	<b>Sung-Mook Kang</b> Daegu Catholic University	<b>Changwoo Lee</b> Konkuk University
<b>Chang-Whan Lee</b> Seoul National University of Science & Technology	<b>Hyunseop Lee</b> Dong-A University	<b>In Hwan Lee</b> Chungbuk National University	<b>Hyung Wook Park</b> UNIST
<b>Min Soo Park</b> Seoul National University of Science & Technology	<b>Sang-Hu Park</b> Pusan National University	<b>Jung Woo Sohn</b> Kumoh National Institute of Technology	

## Members of Editorial Board

<b>Jangho Bae</b> Kyungsung University	<b>Younghak Cho</b> Seoul National University of Science & Technology	<b>Dongwhi Choi</b> Kyung Hee University	<b>Jin-Seung Choi</b> Konkuk University
<b>Jungwook Choi</b> Chung-Ang University	<b>Young-Man Choi</b> Ajou University	<b>Young-Kug Hwang</b> Chosun College of Science & Technology	<b>Jinah Jang</b> POSTECH
<b>Yongho Jeon</b> Ajou University	<b>Jayil Jeong</b> Kookmin University	<b>Maolin Jin</b> Korea Institute of Robot & Convergence	<b>Beomjoon Kim</b> University of Tokyo
<b>Chang-Ju Kim</b> Korea Institute of Machinery & Materials	<b>Gap-Yong Kim</b> Iowa State University	<b>Jae-Yeol Kim</b> Chosun University	<b>Kee Joo Kim</b> Tongmyong University
<b>Woo Kyun Kim</b> University of Cincinnati	<b>Patrick Kwon</b> Michigan State University	<b>Bong-Kee Lee</b> Chonnam National University	<b>Jongkil Lee</b> Andong National University
<b>Kwang-Il Lee</b> Kyungil University	<b>Sangkee Min</b> University of Wisconsin-Madison	<b>June Park</b> Korea Photonics Technology Institute	<b>Jungjae Park</b> Korea Research Institute of Standards & Science
<b>Jung Whan Park</b> Yeungnam University	<b>Simon Park</b> University of Calgary	<b>Yong Son</b> Korea Institute of Industrial Technology	<b>Chul Ki Song</b> Gyeongsang National University
<b>Ki-Sik Tae</b> Konyang University	<b>Duck Hyun Wang</b> Kyungnam University	<b>Hae-Sung Yoon</b> Korea Aerospace University	<b>Sung Ho Yoon</b> Kumoh National Institute of Technology

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

**VOLUME 40, NUMBER 2 / February 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 February 1, 2023 (Monthly)

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

**Publisher** Seok-Woo Lee (President, KSPE)

**Managing Editor** Bo Hyun Kim

**Manuscript Editor** Su-Hyun Kang

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

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

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

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

## 목차

### 일 반

- 99 Laser EDM Hybrid Micro Machining of CFRP  
정도관, 한찬호, 최유진, 박준서
- 105 슬롯 다이 코팅 균일도 평가를 위한 실용적인 중량계측 기반 유량 측정 방법  
윤경택, 배정현, 최영만
- 113 기계학습을 이용한 지능형 타이어의 마모도 추정  
한준영, 권지훈, 김형준, 이석
- 123 유리섬유 강화 플라스틱 성형에서 섬유의 단면형상과 사출성형조건이 제품의 휨변형과 광택도에 미치는 영향  
한일용, 박성현, 정민수, 김태균, 박동삼
- 131 회전자력 작용에 의한 이온 수송에 관한 실험적 연구  
김현중, 정관용, 귀하오, 김상영
- 141 딥러닝 기반의 열화상 카메라를 이용한 화점 추적 팬-틸트 시스템 구현  
정현재, 박현빈, 김무림, 주백석
- 149 역압을 이용한 공압 튜브 캐리어 도착 속도 조절 연구  
홍성호, 이재열, 백종환, 김상호, 함제훈, 서진호
- 157 레이저 유도 전사를 이용한 유연기판의 액체금속 미세 패터닝  
조민제, 지석영, 조정호, 장원석
- 163 Scheduling for Assembly Line with Human-Robot Collaboration  
**Kosuke Inoue, and Hideki Aoyama**
- 175 기판에 사전변형률이 인가된 박막의 구조 해석  
김정엽, 장성환, 박아영, 황보윤, 송준엽

# JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 2 / February 2023

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

## CONTENTS

### REGULAR

- 99 Laser EDM Hybrid Micro Machining of CFRP  
**Do Kwan Chung, Chan Ho Han, Yu Jin Choi, and Jun Seo Park**
- 105 Practical Gravimetric Flow Rate Measurement Method for Slot-Die Coating Uniformity Evaluation  
**Kyung-Taek Yoon, Jeong-Hyun Bae, and Young-Man Choi**
- 113 Wear Estimation of an Intelligent Tire Using Machine Learning  
**Jun Young Han, Ji Hoon Kwon, Hyeong Jun Kim, and Suk Lee**
- 123 Effect of Cross Section of Glass Fiber and Injection Conditions on the Warpage and Gloss in GFRP Injection Molding  
**Il Yong Han, Sung Hyun Park, Min Soo Cheong, Tae Kyun Kim, and Dong Sam Park**
- 131 The Experimental Study of Ion Transportation by Rotating Magnetic Force  
**Hyeon-Jung Kim, Kwan-Yong Jeong, Hao Guo, and Sang-Young Kim**
- 141 Deep Learning Based Fire Point Chasing Pan-Tilt System Using Thermal Camera  
**Hyeonjae Jeong, Hyunbin Park, Maolin Jin, and Baeksuk Chu**
- 149 A Study on Controlling Arrival Velocity of Pneumatic Tube Carriers Using Counterpressure  
**Sung-Ho Hong, Jae Youl Lee, Jonghwan Baek, Sang Ho Kim, Jehun Hahm, and Jin-Ho Suh**
- 157 Micro-Patterning of Liquid Metal on Flexible Substrate Using Laser Induced-Forward Transfer  
**Minje Jo, Seok Young Ji, Jungho Cho, and Won Seok Chang**
- 163 Scheduling for Assembly Line with Human-Robot Collaboration  
**Kosuke Inoue, and Hideki Aoyama**
- 175 Structural Analysis of Thin Film with Applied Pre-Strain in Substrate  
**Jung Yup Kim, Sunghwan Chang, Ah-Young Park, Yun Hwangbo, and Jun Yeob Song**

# Laser EDM Hybrid Micro Machining of CFRP

정도관<sup>1,#</sup>, 한찬호<sup>1</sup>, 최유진<sup>1</sup>, 박준서<sup>1</sup>

Do Kwan Chung<sup>1,#</sup>, Chan Ho Han<sup>1</sup>, Yu Jin Choi<sup>1</sup>, and Jun Seo Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 동양미래대학교 로봇자동화공학부 (School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University)  
# Corresponding Author / E-mail: dkchung@dongyang.ac.kr, TEL: +82-2-2610-5186

ORCID: 0000-0002-7332-5741

KEYWORDS: CFRP (탄소섬유강화플라스틱), Laser machining (레이저가공), EDM (방전가공), Hybrid machining (복합가공), Multi-processing (멀티가공), Multi-tool (멀티전극)

*CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) is a composite material formed using carbon fibers and epoxy resin matrices. It has low productivity and suffers from machining defects during precision machining. Laser machining of CFRP is associated with the problem of heat damage to the epoxy resin. EDM of CFRP can process various shapes with a shaped tool, however it has a lower material removal rate compared to laser, and the non-conductive epoxy resin layer on the surface must be removed before EDM processing. In this study, we have proposed a laser EDM hybrid machining in which CFRP was pre-processed with a laser and then post-processed by EDM. The laser pre-processing conditions were selected by adjusting the laser power and the number of repetitions to minimize thermal damage. According to EDM conditions, the size of the thermal damage area occurring in the epoxy resin, the change in the side gap, and the change in the processing time were investigated. Using the hybrid processing, micro-holes with a diameter of 150  $\mu\text{m}$  were machined, and square-shaped micro-holes were also machined. To improve productivity, a multi-tool capable of processing four square shapes was manufactured, and multi-processing was performed.*

Manuscript received: September 30, 2022 / Revised: November 7, 2022 / Accepted: December 2, 2022

## 1. Introduction

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) is a composite material using carbon fibers and epoxy resin matrices. It is widely used in various industries such as aviation, automobiles, ships, sports, medical, electronics, robotics, and defense. It has been in the spotlight for its excellent properties such as light weight, high strength, high elasticity, abrasion resistance, and fatigue characteristics [1]. However, precision machining of CFRP is difficult due to the heterogeneous properties of carbon fiber and epoxy resin. Defects such as delamination, fiber pull out, burrs, uncut fiber and thermal damage are easy to occur during cutting such as drilling and milling, and high tool wear is also a problem [1-3]. Various non-conventional machining methods are also being used in CFRP processing. Among them, laser machining is capable of processing CFRP from a large area to a small area without considering tool

wear and cutting force [4]. For precise micro-shapes, picosecond pulses are used [5], and good shape processing is also possible even with nanosecond pulses [6]. The author also studied micro machining of CFRP using nanosecond pulses [7]. However, there is a problem in that extensive thermal damage occurs to the heat-sensitive epoxy resin during laser processing of CFRP [3].

CFRP machining using EDM can process various shapes depending on the shape of the tool electrode. Since EDM is a non-contact machining resulting in almost no cutting force, so precise shape machining without delamination or burr is possible [8]. For micro machining, it is possible to make micro holes in CFRP using EDM [9]. However, EDM is generally slower than laser machining. There is a problem that the non-conductive epoxy resin layer on the surface of the CFRP must be removed before EDM processing [10]. To make up for the shortcomings of EDM of CFRP and increase productivity, a hybrid machining of drilling and EDM deburring

was researched [11]. However, this process was not applied to make various shapes other than the circular hole shape.

In this study, the hybrid machining of CFRP using laser and EDM was proposed. After pre-processing with a laser to minimize thermal damage, post-processing with EDM was performed to machine the micro-shape. By using EDM tools with various shapes, not only circular but also square shaped micro-holes were machined. In addition, multi-processing using multi-tool was attempted to improve productivity.

## 2. Experimental Set Up

In this experiment, Ytterbium Pulsed Fiber Laser (K2 Fiber 20, K2 Laser System, Korea) with a wavelength of 1,064 nm was used. It is adjustable from 10-95% based on the maximum power of 20 W, the maximum frequency is 200 kHz, and the maximum scan speed is 3,000 mm/s. EDM machine was manufactured in the laboratory. It has XYZ axis with the tool rotation, and uses an RC type EDM power. The EDM tool was made of tungsten carbide with a diameter of 0.5 mm, and was manufactured to various shaped microelectrodes through WEDG. As the dielectric fluid, EDM oil (EDM OIL 100, Universal Oils, Korea) was used. For a multi-processing, SS304 with a diameter of 1.0 mm was used as a multi-tool electrode, and deionized water was used as the dielectric fluid. The CFRP specimen is plain woven type and has a thickness of 0.5 mm (Muhan Carbon, Korea).

## 3. Feasibility Test of Laser EDM Hybrid Machining

In Fig. 1 shows the machined rectangular shape by hybrid process with pre-processing by laser and post-processing by EDM. Laser processing conditions were 95% power, 20 kHz frequency, 600 mm/s scan speed, and 800 repetitions. For EDM, a square tool with a side of 310  $\mu\text{m}$  was used, and 120 V and 94 nF were used. After laser pre-processing, the size of the square shape was 265  $\mu\text{m}$  on the front side and 132  $\mu\text{m}$  on the back side. After EDM post-processing, the size of the square shape was 353  $\mu\text{m}$  on the front side and 343  $\mu\text{m}$  on the back side. After EDM, the overall size increased due to the size of the square tool (310  $\mu\text{m}$ ), but the taper was decreased from 14.9 degrees after laser to 1.1 degrees after EDM. So a square shape with almost no taper could be processed. However, after laser machining, thermal damage occurred widely around the machined area, which could not be removed even after EDM. Therefore, it is necessary to reduce the laser thermal damage area in order to produce a precise shape after EDM.

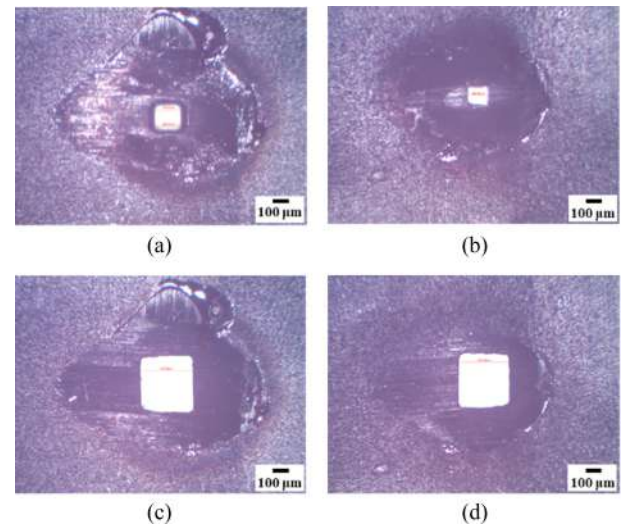


Fig. 1 Square shape machining on CFRP using hybrid machining for feasibility test: after laser pre-processing (a) Front view, (b) Backside view; after EDM post-processing (c) Front view, and (d) Backside view

## 4. Results and Discussion

### 4.1 Laser Pre-Processing

In order to reduce the wide thermal damage in the laser pre-processing step, the laser power and the number of repetitions were reduced. Fig. 2(a) shows a case of 50% laser power and 10 repetitions. Although the wide and deeply damaged areas were reduced, a large area was still thermally damaged. Fig. 2(b) shows a case of 30% laser power and 5 repetitions, and it shows that there is very little thermal damage around the machined area. A very small thermally damaged area is not a problem since it is included in the machining area of EDM post processing. Although the amount of laser processing in the depth direction was relatively small, 30% power and 5 repetitions were selected as laser conditions because wide and deep thermal damage could not be removed even after EDM. Fig. 2(c) shows the result of processing a rectangular shape under the conditions of 30% power and 5 repetitions.

### 4.2 EDM Post-Processing

Fig. 3 shows the result of EDM post-processing of a circular shape after laser pre-processing. In the laser pre-processing, a circular shape was machined with 30% power and 5 repetitions. The EDM tool size is 233  $\mu\text{m}$ . As shown in Fig. 3(a), under the EDM conditions of 120 V and 10 nF, thermal damage occurred in which the epoxy resin melted widely in the carbon fiber direction due to the heat generated during EDM. In Fig. 3(b), slight thermal damage occurred around the hole on the back side. As shown in

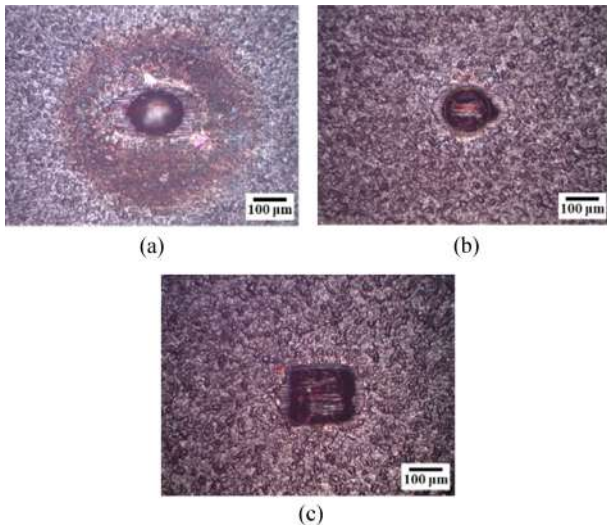


Fig. 2 Laser machining results with different conditions: (a) 50% power and 10 repetitions, (b) 30% power and 5 repetitions, (c) 30% power and 5 repetitions (square shape)

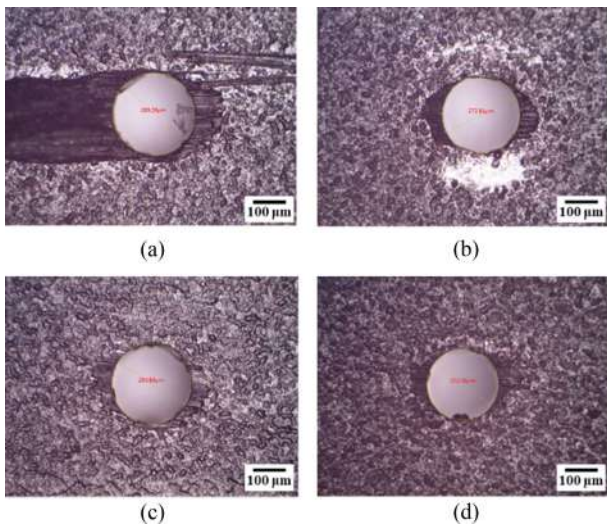


Fig. 3 Machined holes by laser EDM hybrid process with different EDM conditions: 120 V, 10 nF (a) Front view, (b) Backside view; 90 V, 10 nF (c) Front view, (d) Backside view

Figs. 3(c) and 3(d), under the EDM conditions of 90 V and 10 nF, the discharge energy was relatively small, so it was possible to machine a shape with a very small thermal damage area around the machined hole after EDM post-processing.

To analyze the size of thermal damage after EDM post-processing, the thermal damage area ratio was calculated as follows.

$$\text{Thermal damage area ratio} = \frac{\text{Thermal damage area}}{\text{Machined area}} \times 100(\%)$$

In the case of 120 V and 10 nF in Fig. 3(a), the thermal damage area ratio is larger than in the case of 90 V and 10 nF in Fig. 3(c).

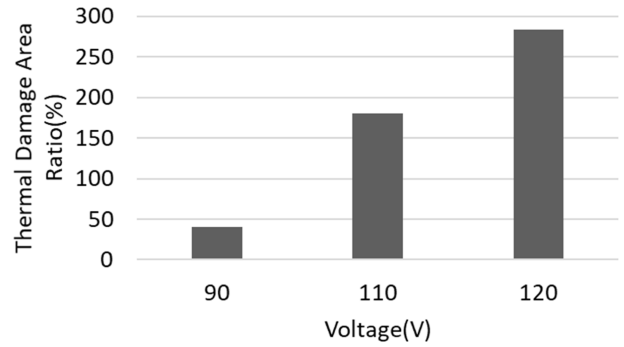


Fig. 4 Thermal damage area ratio according to voltage in EDM post-processing (capacitor: 10 nF, tool size: 233 μm)

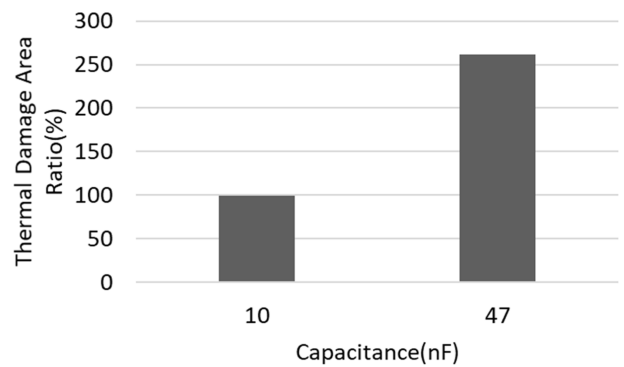


Fig. 5 Thermal damage area ratio according to capacitance in EDM post-processing (voltage: 100 V, tool size: 215 μm)

Fig. 4 shows the thermal damage area ratio according to voltage in EDM post-processing. In this case, the capacitor is 10 nF, and the tool size is 233 μm. As the voltage increases, the thermal damage area ratio increases. Fig. 5 shows the thermal damage area ratio according to the capacitor in EDM post-processing. In this case, the voltage is 100 V and the tool size is 215 μm. As the capacitor increases, the thermal damage area ratio also increases. That is, if the discharge energy increases, more heat is generated during EDM, so the thermal damage area increases.

Fig. 6 shows the machining time and the side gap according to the voltage in EDM post-processing. In this case, the capacitor is 10 nF and the tool size is 233 μm. When the voltage was 90 V, the side gap was the smallest at 25 μm. In the case of 90 V and 110 V, the machining time was almost the same, and in the case of 120 V, the shortest machining time was 13 minutes.

Fig. 7 shows the micro holes with a diameter of 150 μm by using hybrid machining. In the laser pre-processing step, it was processed to a size of 100 μm. In the EDM post-processing step, conditions of 100 V and 5 nF were used, and the tool size was 125 μm. The EDM machining time was 9 minutes, and it was observed that the epoxy resin was slightly melted around the machined holes after EDM.

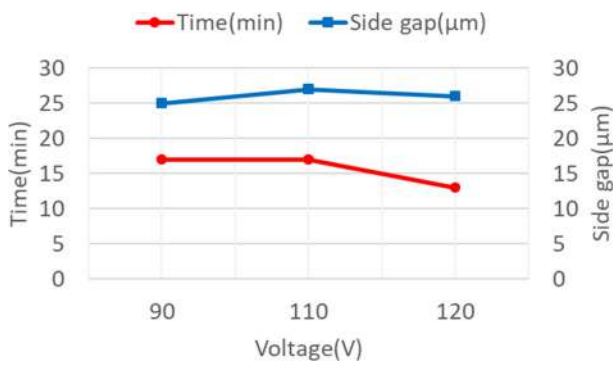


Fig. 6 Machining time and side gap according to voltage in EDM post-processing (capacitance: 10 nF, tool size: 233 μm)

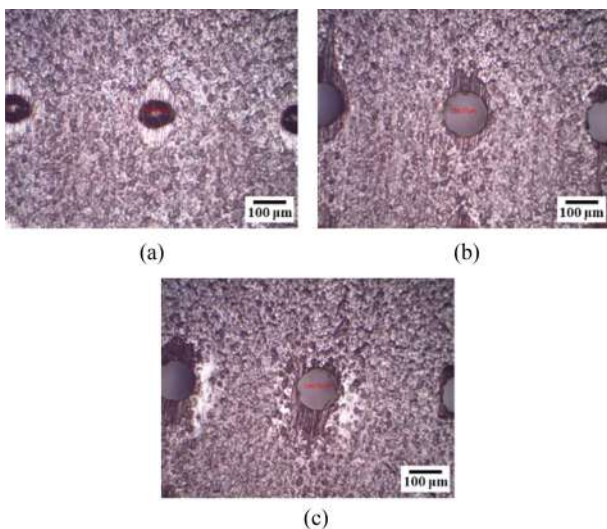


Fig. 7 Micro holes with a diameter of 150 μm by using hybrid machining: (a) After laser pre-processing (30% power, 5 repetitions); after EDM post-processing (100 V, 5 nF, tool size 125 μm) (b) Front view, (c) Backside view

**4.3 Square Shape Machining**

In this experiment, a rectangular shape was machined as shown in Fig. 8. In the laser pre-processing, a square shape was processed. Then, EDM post-processing was performed using a square tool with a side of 210 μm. In this case, EDM conditions were 100 V and 10 nF. The tool can be rotated when machining a circular shape, but it is impossible to rotate the tool when machining a square shape. Therefore, the removal of debris and the supply of dielectric fluid in the machining area were relatively difficult, so the machining time was increased to 41 minutes. The size of the machined rectangle is 247 μm on one side. After EDM post-processing, the epoxy resin melted in the direction of carbon fiber on the front side. This is because the thermal damage is increased due to the prolonged machining time and unstable machining environment caused by non-rotation of the tool.

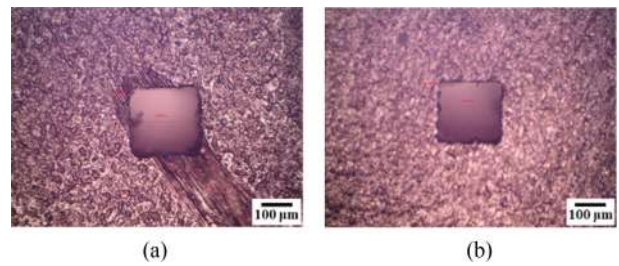


Fig. 8 A square shape by hybrid machining with laser pre-processing (30% power and 5 repetitions) and EDM post-processing (100 V and 10 nF): (a) Front view, (b) Backside view

**4.4 Multi-Processing Using Multi-Tool**

In order to improve productivity, a multi-tool capable of processing four square shapes was manufactured, and multi-processing was performed using this multi-tool in EDM post-processing. A SS304 shaft with 1mm diameter was used to fabricate four rectangular multi-tools using wire electrodes. As shown in Fig. 9, the outer four sides were machined to make a rectangle (steps 1 to 4). Then, by machining in to a cross shape (steps 5 to 6), four square multi-tools are completed. In this case, EDM conditions were 125 V and 97 nF, and the total processing time was 97 minutes. The length of one side of the rectangle is 140 μm. Fig. 10 shows the multi-tool after being used for CFRP multi-processing, and it can be seen that the tool tip is worn out.

In EDM post-processing using multi-tool, since the discharge gap is not controlled for each hole during discharge, machining stability and efficiency may be reduced. Increased machining area and no tool rotation also reduce machining stability. Using the multi-tool, there were many electrical shorts between tool and workpiece, and the machining did not proceed well in the depth direction. Therefore, the amount of machining in laser pre-processing was increased in order to reduce the amount of machining in EDM post-processing. As laser conditions, 80% power and 200 repetitions were used, and the size of the processed shape was reduced by repeatedly irradiating one point. A total of 4 holes were pre-machined with a laser according to the size of the multi-tool. As shown in Fig. 11(a), after laser pre-processing, thermal damage occurred around the machined area. In EDM post-processing, 125 V and 47 nF was used because of the large machining area of multi-processing. Deionized water was used as a dielectric fluid. The EDM machining time was 14 minutes. Figs. 11(b) and 11(c) shows the front and back sides after EDM post-processing. In conclusion, multi-processing is possible, but the machining shape accuracy is not high. Further research is needed to improve machining shape accuracy in multi-processing.



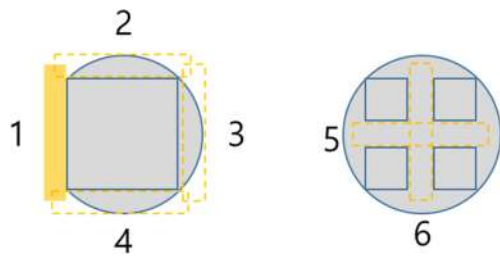


Fig. 9 Fabrication procedure of multi-tool (outer four sides machining: steps 1 to 4, cross shape machining: steps 5 to 6)

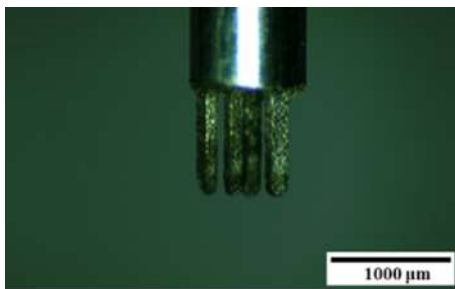


Fig. 10 Multi-tool (after being used for CFRP multi-processing)

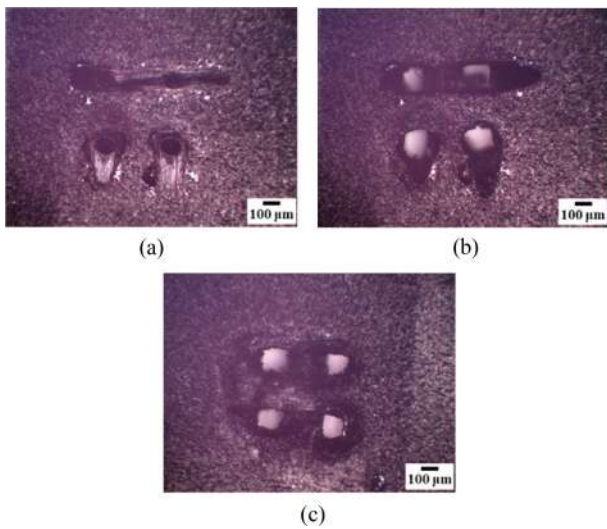


Fig. 11 Multi-processing of 4 square shapes with multi-tool by hybrid machining: (a) After laser-pre-processing (80% power, 200 repetitions); after EDM post-processing (125 V, 47 nF) (b) Front view, (c) Backside view

**5. Conclusion**

In this paper, micro machining of CFRP using laser and EDM was studied. In the laser pre-processing step, thermal damage was minimized by controlling the laser power and the number of repetitions. As a result of the experiment, the conditions of 30% power and 5 repetitions were selected. In the EDM post-processing, the size of the thermal damage occurring in the epoxy

resin, the change in the side gap, and the change in the machining time were investigated according to the EDM conditions. The thermal damage size was analyzed through the thermal damage area ratio. In the case of high discharge energy, thermal damage occurred widely around the machined area after EDM post-processing. When the discharge energy is reduced, it is possible to machine the shape with little to no thermal damage after EDM post-processing (ex. 90 V and 10 nF). By using the hybrid machining, micro-holes with a diameter of 150 μm were machined, and a square-shaped hole with a side length of 247 μm was also machined. To improve productivity, multi-processing that can process 4 square shapes was tested. In order to increase the machining stability and efficiency of EDM in multi-processing, the amount of laser pre-machining was increased and the amount of EDM post-machining was reduced. As a result, four square holes were machined by multi-processing. But, the machining shape accuracy was not high, so further research on improving machining shape accuracy is needed.

**ACKNOWLEDGEMENT**

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2017R1D1A1B03032887).

**REFERENCES**

1. Che, D., Saxena, I., Han, P., Guo, P., Ehmann, K. F., (2014), Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: A literature review, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(3), 034001.
2. Gang, M. G., Kim, G., Shin, K., Jeong, A., Kim, H. Y., Kim, C. H., Lee, S. W., Kim, T. G., (2018), Mechanical cutting process trends for difficult-to-cut materials-A review, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(3), 253-267.
3. Kim, K. B., Seo, J. H., Kim, T. G., Jun, M. B. G., Jeong, Y. H., (2020), Comparative analysis and monitoring of tool wear in carbon fiber reinforced plastics drilling, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(11), 813-818.
4. Goeke, A., Emmelmann, C., (2010), Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality, *Physics Procedia*, 5, 253-258.
5. Wolynski, A., Herrmann, T., Mucha, P., Haloui, H., L’huillier, J., (2011), Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR, *Physics Procedia*, 12, 292-301.

6. Jaeschke, P., Stolberg, K., Bastick, S., Ziolkowski, E., Roehner, M., Suttman, O., Overmeyer, L., (2014), Cutting and drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by 70W short pulse nanosecond laser, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications III, 159, 89630S.
7. Chung, D. K., Park, J. S., Kim, K. H., (2019), Micro machining of CFRP using nanosecond pulsed fiber laser, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 36(9), 783-791.
8. Lau, W., Wang, M., Lee, W. B., (1990), Electrical discharge machining of carbon fibre composite materials, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 30(2), 297-308.
9. Kumar, R., Agrawal, P. K., Singh, I., (2018), Fabrication of micro holes in CFRP laminates using EDM, Journal of Manufacturing Processes, 31, 859-866.
10. Teicher, U., Müller, S., Münzner, J., Nestler, A., (2013), Micro-EDM of carbon fibre-reinforced plastics, Procedia Cirp, 6, 320-325.
11. Islam, M. M., Li, C. P., Won, S. J., Ko, T. J., (2017), A deburring strategy in drilled hole of CFRP composites using EDM process, Journal of Alloys and Compounds, 703, 477-485.



**Do Kwan Chung**

Associate Professor in School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University. His research interests are micro machining and non-conventional machining.

E-mail: dkchung@dongyang.ac.kr



**Chan Ho Han**

B.Sc. in School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University. His research interest is micro machining.

E-mail: gkscksgh93@naver.com



**Yu Jin Choi**

B.Sc. in School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University. His research interest is micro machining.

E-mail: cj45jin@naver.com



**Jun Seo Park**

B.Sc. in School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University. His research interest is micro machining.

E-mail: wnstj5067@naver.com

# 슬롯 다이 코팅 균일도 평가를 위한 실용적인 중량계측 기반 유량 측정 방법

## Practical Gravimetric Flow Rate Measurement Method for Slot-Die Coating Uniformity Evaluation

윤경택<sup>1</sup>, 배정현<sup>1</sup>, 최영만<sup>1,#</sup>  
Kyung-Taek Yoon<sup>1</sup>, Jeong-Hyun Bae<sup>1</sup>, and Young-Man Choi<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 아주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou University)  
# Corresponding Author / E-mail: ymanchoi@ajou.ac.kr, TEL: +82-31-219-2342  
ORCID: 0000-0002-9754-0307

KEYWORDS: Slot-die coating (슬롯 다이 코팅), Gravimetric method (중량계측법), Flow meter (유량계), Coating uniformity (코팅 균일도)

Slot-die coating is a method of coating a wide layer of thin film on a substrate. It has the advantages of large-area coating with high reproducibility and uniform thickness. For this reason, it has been widely applied in various industrial manufacturing fields. To secure higher coating uniformity under various coating conditions, estimating and controlling the flow rate of the coating solution discharged to the substrate is crucial. In this study, a practical gravimetric flow rate measurement method for slot-die coating uniformity evaluation has been introduced. The gravimetric method is a technique for accurately and quickly estimating the flow rate through the mass change over time using a precision weighing balance. We analyzed the measurement principle and errors caused by fluid mechanics such as hydrodynamic force or capillary force. The dynamic properties based on fluid viscosity were also evaluated for flow rates from 5 to 50  $\mu\text{L/s}$ . The repeatability of the fabricated measurement system was  $\sim 1.5 \mu\text{L/s}$ . Finally, it was confirmed that the settling time for high-viscosity fluid could be advanced by 56.4% through multi-step feedforward control.

Manuscript received: October 3, 2022 / Accepted: October 20, 2022

### NOMENCLATURE

$D$  = Outer Diameter of the Nozzle  
 $D_i$  = Inner Diameter of the Nozzle  
 $F_g$  = Gravitational Force of the Weighing Object  
 $g$  = Gravitational Acceleration  
 $h_i$  = Impact Height  
 $I$  = Current Applied to Voice Coil Motor  
 $K_f$  = Force Constant of the Voice Coil Motor  
 $L$  = Insertion Depth of the Nozzle  
 $m_l$  = Fluid Mass  
 $m_b$  = Mass from the Buoyancy Effect  
 $m_{bL}$  = Liquid Mass inside the Nozzle below the Atmospheric Pressure Level

$m_c$  = Mass from the Capillary Force Effect  
 $m_d$  = Mass from the Hydrodynamic Force Effect  
 $\dot{m}_l$  = Mass Flow Rate  
 $Q_l$  = Volume Flow Rate  
 $t$  = Measured Time  
 $V_l$  = Volume of the Fluid  
 $\gamma$  = Surface Tension  
 $\theta$  = Contact Angle between the Fluid and the Nozzle  
 $\rho$  = Density of the Fluid  
 $u_i$  = Normal Impact Velocity of the Fluid  
 $u_n$  = Initial Velocity of the Falling Fluid  
 $\Delta m_l$  = Measurement Error of the Fluid Mass

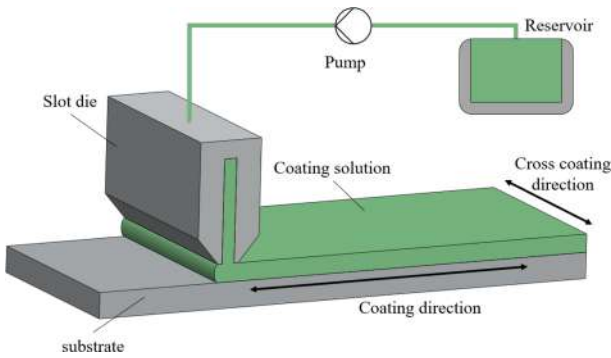


Fig. 1 Schematics of slot-die coating system

## 1. 서론

슬롯 다이 코팅(Slot-Die Coating)은 높은 중형비를 가진 슬롯 다이에 코팅액을 토출하여 기판위에 넓은 층의 박막을 코팅 할 수 있는 방법이다[1]. 넓이 제한 없는 대면적 코팅 특성, 균일한 두께 코팅을 통한 높은 재현성으로 인해 슬롯 다이 코팅은 태양 광 전지, 리튬 이온 배터리, 유기 발광 다이오드 장치 등 다양한 제조 공정에 활용되고 있다[2-4]. 최근 슬롯 다이 코팅은 롤투롤(Roll-to-Roll) 공정과 같이 연속적인 코팅뿐만 아니라 대형 디스크 플레이 제조 공정 등에서 토출이 불연속적인 코팅에도 사용되고 있다[5-6].

Fig. 1과 같이 슬롯 다이 코팅에서 코팅의 균일도는 코팅의 진행 방향(Coating Direction)과 그 방향과 수직인 슬롯 다이에 나란한 방향(Cross Coating Direction) 두 방향의 균일도 모두 중요하다. 따라서 시편의 길이가 유한한 불연속적인 코팅에서 슬롯 다이 코팅을 이용하여 균일한 코팅을 수행하기 위해서는 펌프의 유량 제어, 다이와 시편 사이의 갭 그리고 슬롯 다이의 이동 속도를 각각 제어할 필요가 있다.

그 중 유량 제어 시스템의 경우, 슬롯 다이 코팅은 전계량(Pre-Metered) 방식이지만 코팅 액의 점도와 이동 유로의 탄성 및 다이 내부 유로의 특성에 따라 노즐로부터 토출되는 유량은 펌프의 명령과 동적 특성이 달라진다[7]. 또한 유량 제어 시스템이 복잡하고 코팅을 설명하기 위한 모델이 난해하기 때문에, 코팅액의 점도, 시편의 크기와 표면 상태를 고려하여 현장에서 작업자의 Trial and Error 방법으로 각 파라미터를 설정하는 실정이다.

따라서 불연속적인 코팅에서 코팅의 진행 방향 균일도를 향상시키기 위해 유량을 정확하게 예측 또는 계측할 필요가 있다. 유량을 측정하는 방법은 유량계를 이용하는 방법이 일반적이지만 슬롯 다이 내부에 유량계를 설치하기는 거의 불가능하다. 이를 해결하기 위해 코팅액에 입자를 넣고 이를 추적하여 유량을 측정하는 입자 영상 유속계 방법과 코팅된 기판을 건조시킨 후 코팅 두께를 직접 측정하는 방법이 제안되었다[8-9]. 그러나 기존의 방법들은 많은 시간과 비용이 들며, 측정 과정 중 코팅 두께에 영향을 줄 수 있는 요인들이 존재한다.

본 논문에서는 슬롯 다이 코팅에 적용하기 위한 코팅 노즐의

출구의 유량을 측정하는 중량계측법(Gravimetric Method) 기반 유량 측정 시스템에 대해서 소개한다. 중량계측법은 정밀한 저울을 이용하여 시간에 따른 중량 변화를 통해 정확하면서도 빠르게 유량을 추정하는 기법이다[10-13]. 개발된 유량 측정 시스템은 정밀 저울을 이용하여 최소 수  $\mu\text{L}/\text{sec}$ 에서 수천  $\mu\text{L}/\text{sec}$ 의 유량 측정이 가능하며, 점도에 따른 유량의 동적 특성을 평가할 수 있다.

## 2. Gravimetric Flow Meter

### 2.1 유량 측정 시스템

유량의 측정은 토출된 유체의 무게를 측정하는 것으로부터 시작된다. 무게 측정은 전자기력 보상 방식의 정밀 저울을 이용하는데, 이 방식은 측정하고자 하는 대상의 무게  $F_g$ 로 인해 기울어짐이 발생할 때 저울을 평형상태로 위치시키는 영위법(Null Method)을 통해 무게를 도출한다[14-15]. Fig. 2는 간략화된 저울의 형태와 유량 측정 시스템을 보여준다. 유연기구 메커니즘으로 제작된 레버의 끝에 위치한 위치 센서는 레버가 원점에서부터 얼마나 기울어졌는지를 측정하고, 기울어진 변위만큼 전자기 구동기가 피드백 제어를 통해 평형 상태로 보상한다. 이때 보상되는 전자기력으로 물체의 질량  $m_l$ 을 도출한다.

$$m_l = \frac{F_g}{g} = K_f \cdot I / g \quad (1)$$

여기에서  $g$ 는 중력가속도,  $K_f$ 는 전자기 구동기의 힘 상수이며, 전자기 구동기에 인가되는 전류  $I$ 를 통해 보상되는 힘을 구할 수 있다.

유량 측정 시스템에서는 물체가 놓이는 곳에 유체가 담기는 저수통(Reservoir) 형태의 Weighing Pan을 설치하고 그 상부에 유체가 토출되는 노즐을 위치시킨다. 만약 유체가 비압축성이라면 토출되는 유체의 부피  $V_l$ 는 유체의 질량과 해당 유체의 밀도  $\rho$ 로 도출되며 유체의 부피를 수치 미분을 통해 유체의 유량  $Q_l$ 을 최종적으로 도출할 수 있다.

$$V_l = m_l / \rho \quad (2)$$

$$Q_l(t) = (V_l(t) - V_l(t - \Delta t)) / \Delta t \quad (3)$$

Fig. 3은 제작된 유량 측정 시스템이다. 유연기구 메커니즘은 변위 증폭비 3.64 : 1을 가진 레버 메커니즘이며, 기계적 민감도 증가를 위해 Flexure Pivot의 두께는 0.1 mm로 제작하였다. 위치 센서의 경우 Photodiode (PD)에 수광 되는 빛의 세기를 통해 변위를 측정하도록 자체 설계한 센서이며, 분해능은 약 2 nm이다[16]. 또한 보조 변위 센서로서 선형 엔코더(Ti20KD, Renishaw)를 사용하였다. 무게 보상을 위해 사용된 선형 보이시 코일 모터(Voice Coil Motor, VCM)는 힘 상수 3.9 N/A를 지닌 모터를 사용하였다(AVM24-10, Akribis).

유체를 토출하는 펌프는 지름 22.5 mm 크기의 30 mL의

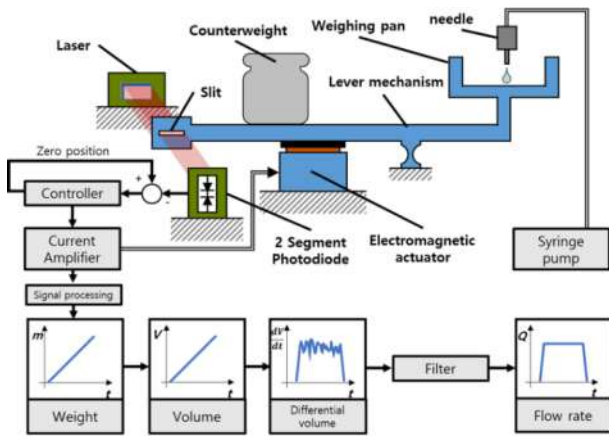


Fig. 2 Schematics of a gravimetric flowmeter for coating nozzles

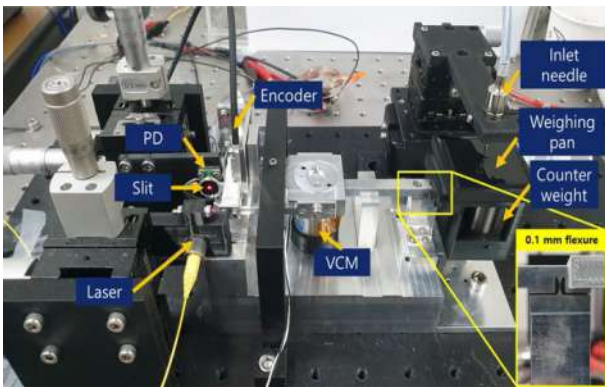


Fig. 3 A photograph of the fabricated gravimetric flowmeter

시린지(Syringe)와 시린지 펌프(Legato 110, KD Scientific)를 사용하였다. 효용성 검증을 위해 외경 1.47 mm, 내경 1.069 mm의 Needle 노즐(17 Gauge, Hamilton)을 사용하였다. 샘플링 주기는 0.1 msec이며 유량 데이터는 노이즈 저감을 위해 버퍼사이즈 5,000, 표준 편차 0.1의 가우시안(Gaussian) 필터를 적용하였다. 최종적으로 설계한 유량 측정 시스템은 약 1 mg의 분해능과 0.28초의 안정화 시간을 가진다.

2.2 유체 거동에 의한 오차 분석 및 저감

본 논문에서 웨이팬에 일정량의 미리 유체를 담아두고 노즐 끝단을 유체 내부에 위치시킨 다음 토출을 하는 방식을 적용하였다. 이러한 증량계측 기반 유량 측정에서는 유체의 특성에 의해 발생하는 힘들에 의해 측정 오차가 발생할 수 있다. 그 중 주요인은 Fig. 4와 같이 크게 부력(Buoyancy Force), 모세관 힘(Capillary Force), 그리고 동유체력(Hydrodynamic Force)을 들 수 있다[11,17]. 노즐이 유체에 잠긴 부분만큼 발생하는 부력에 의해 발생하는 질량  $m_b$ 은 식(4)와 같다.

$$m_b = \frac{\pi}{4} \rho (D_o^2 - D_i^2) L(t) \tag{4}$$

이 때  $L$ 은 노즐의 잠긴 깊이이며,  $D_o$ 와  $D_i$ 는 노즐의 외경과

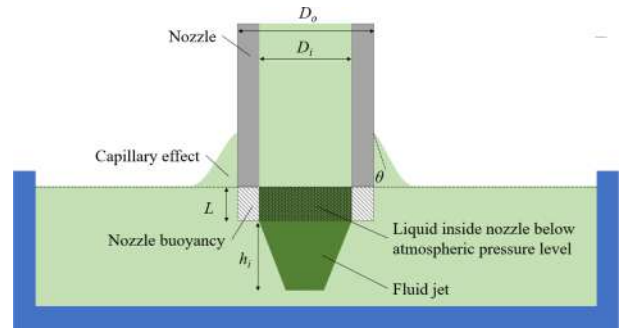


Fig. 4 Schematic of nozzle immersed in the fluid

내경이다. 잠긴 노즐 내부의 유체의 경우 대기압 수준 이하의 압력이기 때문에 이때의 질량  $m_{bL}$  또한 식(5)와 같이 영향을 미친다.

$$m_{bL} = \frac{\pi}{4} \rho D_i^2 L(t) \tag{5}$$

모세관 힘에 의해 발생하는 질량  $m_c$ 은 노즐의 외경, 유체의 표면장력  $\gamma$  (N/m), 그리고 노즐과 유체사이의 접촉각  $\theta$  (°)과 관계가 있으며, 이는 식(6)과 같다.

$$m_c = \frac{\pi}{g} D_o \gamma \cos \theta \tag{6}$$

마지막으로 동유체력에 의해 발생하는 질량  $m_d$ 은 유체의 질량유량  $\dot{m}_i(t)$ 과 충격속도  $u_i$ 의 곱과 같으며 식(7)과 같다.

$$m_d = \dot{m}_i(t) \cdot u_i(t) \tag{7}$$

충격속도  $u_i$ 는 베르누이의 법칙에 따라서 식(8)과 같이 표현된다.

$$u_i(t) = \sqrt{u_n^2(t) + 2gh_i(t)} \tag{8}$$

$u_n$ 은 초기 속도이며,  $h_i$ 는 충격 높이이다. 앞서 설명한 세 가지 요인들에 의해 발생하는 오차  $\Delta m_l$ 은 다음과 같다.

$$\Delta m_l = m_b + m_{bL} - m_c + m_d \tag{9}$$

부력에 의한 질량과 동유체력에 의한 질량은 측정 질량 값을 증가시키고, 모세관 현상에 의한 질량은 반대로 이를 감소시키며, 이 오차는 식(1)에서 측정되는 질량에 반영된다.

그러나 유량은 시간에 따른 질량 변화이다. 유량에 비해 큰 저수통으로 인하여 높이의 변화도 크지 않고 균일한 노즐 표면 및 형상으로 인하여 유체의 표면 장력과 접촉각은 크게 변동되지 않을 거라 판단된다. 따라서 모세관 힘에 의한 질량은 유량에 큰 영향을 미치지 않을 것이다. 또한 부력에 의한 질량의 경우 높이  $L$ 의 변화에 따라서 유량 값에 영향을 줄 수 있지만 수  $\mu\text{L}/\text{sec}$ 의 유량 수준에서는 유의미한 변화가 없다. 하지만 유체의 속도에 의한 동유체력은 수식에 의해 보정되거나 이를 줄일 수 있는 방법이 필요하다.

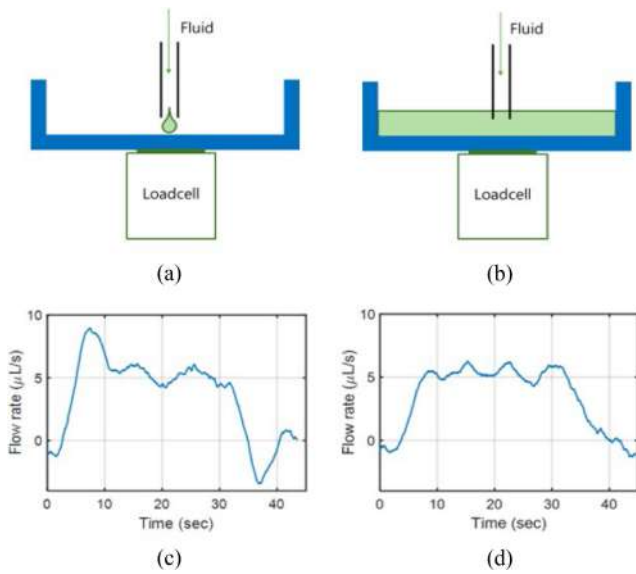


Fig. 5 Nozzle setup for (a) Fluid drop (b) Immersed discharge, the measured flow rate in case of (c) Fluid drop, and (d) Immersed discharge

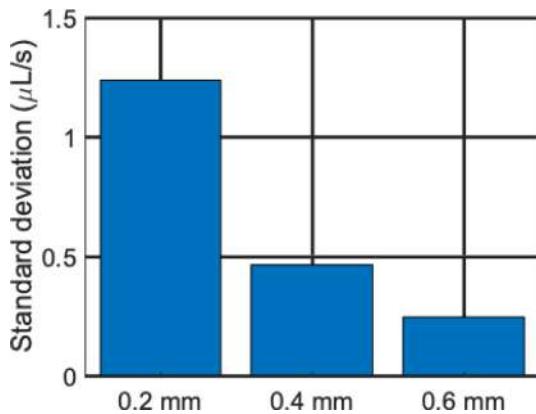


Fig. 6 Nozzle gap effects on the uncertainty of the flow rate

Fig. 5에 도시한 것처럼 유체를 빈 웨이팬에 Drop하는 방법은 동유체력에 의해 초기 유량이 과도하게 측정되는 경향이 있다. 반면에 유체 내부로 토출하는 방식은 이러한 과도한 응답이 제거되었으며 이는 토출되는 유체가 담긴 유체 내부로 확산되면서 충격 속도  $u_i$ 가 느려지기 때문으로 생각된다.

다음으로 충분한 글리세롤 유체를 웨이팬에 담아둔 상태에서 노즐과 웨이팬 바닥 사이의 간격을 0.2, 0.4, 0.6 mm로 변경하면서 유량을 측정하였다. 측정은 10회 반복 측정을 하였으며, 유량이 안정화되고 10초 데이터의 각각 평균의 표준편차를 이용하여 비교하였다. 그 결과 Fig. 6과 같이 노즐과 웨이팬의 거리가 멀수록 표준편차는 감소하였다. 이는 앞의 Fig. 5의 설명과 마찬가지로 유체가 토출될 때 노즐의 끝과 웨이팬의 거리가 멀어질수록 중력 방향으로의 유속이 느려지기 때문에 좀 더 안정적인 측정이 가능한 것으로 보인다. 최종적으로 노즐과 웨이팬의 바닥과의 간격은 0.6 mm 이상으로 설정하였다.

Table 1 Test fluid properties

	Water	Glycerol	Silicone resin
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	1	1.28	0.98
Dynamic viscosity [cPs]	1	1,069	5,100

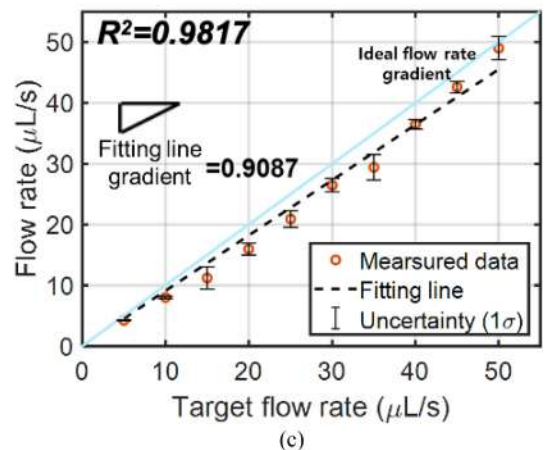
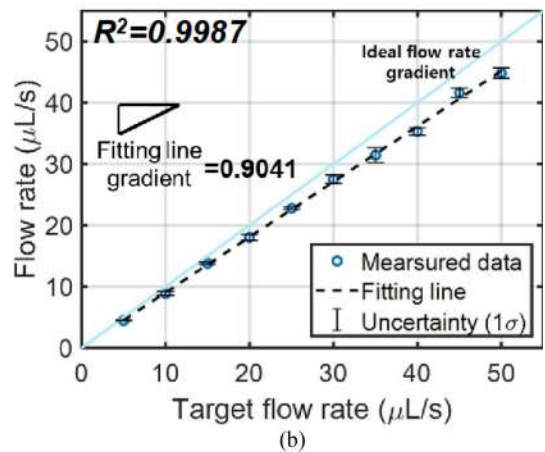
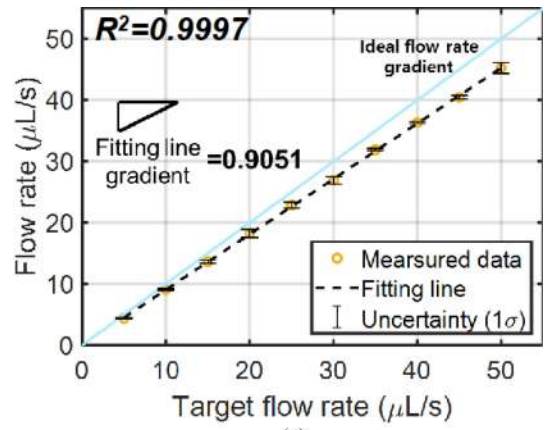


Fig. 7 Flow rate linearity evaluation for (a) Water, (b) Glycerol, (c) Silicone resin

2.3 선형성 평가

우선 점도에 따라 시스템의 선형성에 대한 실험을 진행하였다. 5에서 50 μL/s까지 유체의 유량을 5 μL/s 간격으로 측정하였으며

물과 저점도 유체인 글리세롤과 고점도 유체인 실리콘 레진을 각 유량마다 5회씩 실험하였다. 세 유체의 특성은 Table 1과 같다. 측정 데이터는 안정화된 후 10초의 데이터를 평균하고 1차 선형 피팅을 통해 기울기 값을 산출하였다. Fig. 7에 도시된 바와 같이 물을 통해 유량계의 선형성 평가한 결과 측정 기울기는 0.9051이며 결정계수  $R^2$ 는 0.9997로 매우 선형적인 결과가 나타났다. 글리세롤과 실리콘 레진도 비슷하게 높은 선형성을 보였다. 다만 점도가 높아질수록 유량의 불확도로 인해 결정계수가 낮아진다. 펌프 지시 유량과는 약 10%의 오차를 보이는데, 시린지의 단면 크기에 대한 오차와 시린지 펌프의 불확도로 인해 발생한 오차로 볼 수 있다.

### 3. 유체 및 펌프 특성 평가 및 유량 제어

#### 3.1 점도에 따른 유량의 동적 특성

Fig. 8은 펌프 유량 50  $\mu\text{L/s}$ 로 총 5회 토출하여 유량을 시간에 따라 도시한 그래프이다. 각 유체의 평균 유량, 유량 반복도 (Repeatability) 및 안정화 시간은 Table 2에 나타내었다. 5초부터 35초까지 30초간 펌프를 동작하였을 때, 각 유체의 평균 유량은 앞서 2.3절에서 살펴본 바와 같이 비슷한 수준으로 측정되었다. 다만 점도가 증가할수록 각 측정 간 유량의 반복도는 증가하였으며, 물과 실리콘 레진의 유량 반복도는 약 8배 이상 차이가 났다. 그 이유는 유체 토출 시 유체 점도가 커질수록 시린지 모터에 가해지는 부하가 증가하여 모터의 운동 성능에 미약한 변동이 생기기 때문으로 생각된다. 또한 점도가 증가하면 유연한 튜브의 내벽에 가해지는 압력도 증가하므로, 이에 따라 튜브의 팽창으로 인한 유량 변동도 원인이 될 수 있다. 마지막으로 점도가 증가할수록 유동의 저항이 커져 유량이 안정화되기까지의 시간이 증가함을 알 수 있다.

#### 3.2 펌프 유량 변동에 따른 토출 유량

코팅 시 펌프로부터 반복적인 유량의 변동이 발생할 경우를 모사하기 위하여 글리세롤에 대해 평균 유량 50  $\mu\text{L/s}$ 를 기준으로 최대 70, 최소 30  $\mu\text{L/s}$ 로 주파수 0.25 Hz의 유량 변동을 주었다. Fig. 9에 측정결과를 도시하였다. 글리세롤의 경우, 앞 절에서 살펴본 바와 같이 유체 점도에 의해 수 초의 응답시간을 가지지만 펌프 유량의 변동과 일치하여 측정됨을 관측할 수 있었다.

#### 3.3 균일 토출을 위한 유량의 앞먹임 제어

앞선 실험 결과처럼 점도가 높은 액체를 토출할 때 긴 안정화 시간으로 인하여 코팅 초반부의 코팅 균일도 확보가 어렵게 된다. 따라서 이 절에서는 유량 측정 시스템을 이용하여 고점도 유체 토출 시 과도응답 구간을 줄이고 안정화 시간을 앞당기는 것을 목적으로 유량 명령을 제어하는 방법을 검토한다. 실험에 앞서 시린지 펌프 및 실리콘 레진 유체 토출을 간단히 1차 시스템으로 모델링 하였다. Fig. 8(c)에서 실리콘 레진의

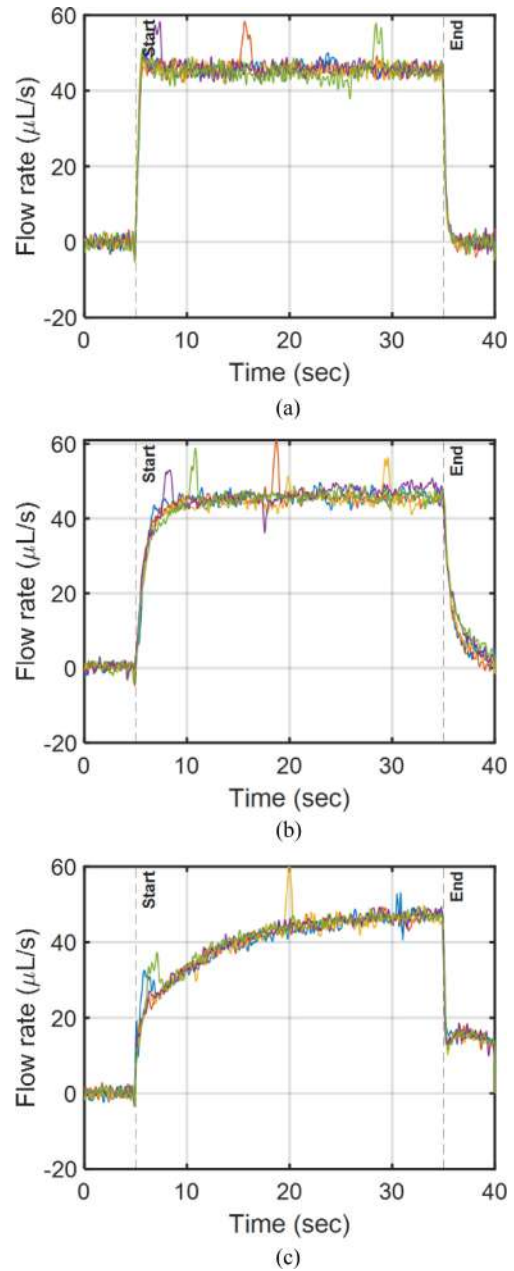


Fig. 8 Measured flow rates of (a) Water, (b) Glycerol, and (c) Silicone resin in case of 50  $\mu\text{L/s}$  pump command

Table 2 Measured flow rate, repeatability and settling time

Fluid (Viscosity)	Mean flow rate [ $\mu\text{L/s}$ ]	Repeatability ( $1\sigma$ ) [ $\mu\text{L/s}$ ]	Settling time (5%) [s]
Water (1 cPs)	45.7	0.18	2.25
Glycerol (1,069 cPs)	46.1	1.08	7.57
Silicone elastomer (5,100 cPs)	46.5	1.48	20.46

응답은 시정수 약 3.3초를 가진다. Fig. 10(a)에서와 같이 모델은 실제 응답과 비슷한 안정화 시간을 가짐을 알 수 있다. 이를

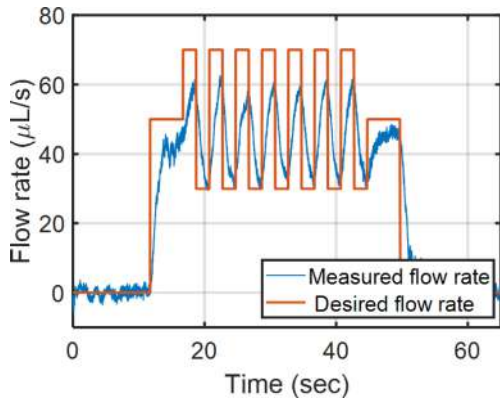
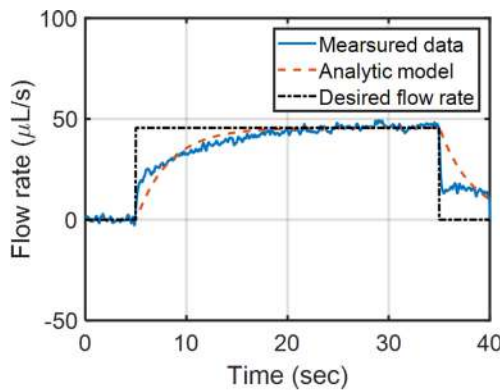
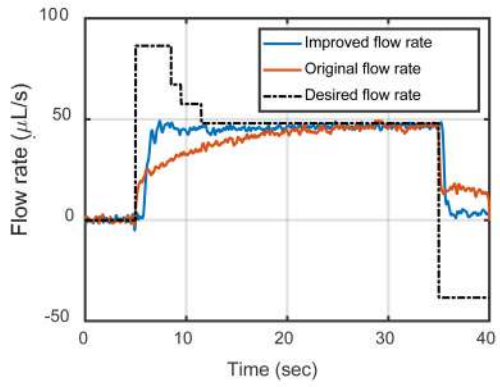


Fig. 9 Measured flow rate for a perturbed pump command



(a)



(b)

Fig. 10 Flow rate control with (a) Single-step pump command, (b) Stepwise feedforward command

바탕으로 시정수의 2배인 7초간의 펌프 명령을 단계적으로 변화시키면서 안정화 시간이 최소화되는 앞먹임 명령값을 Trial and Error로 찾았으며 그 결과는 Fig. 10(b)에 도시하였다.

최종적으로 앞먹임 제어를 하지 않았을 때 안정화 시간보다 앞먹임 제어 시 안정화 시간은 7.8초로 기존 스텝 명령 대비 56.4% 개선할 수 있었으며, 점도가 약 5배 낮은 글리세롤과 비슷한 안정화 시간을 가졌다.

더불어 Fig. 10(a)를 보면 토출 종료 시 유체의 관성으로 인해 펌프 명령 종료 후에 잔여 토출 유량이 발생하게 된다. 이를

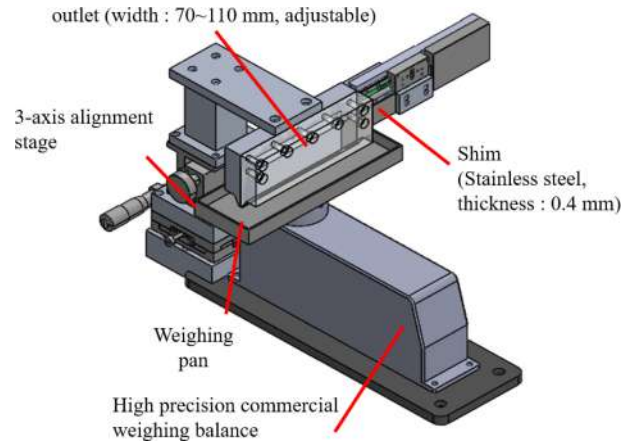


Fig. 11 Flow rate measurement system with slot-die nozzle

개선하기 위해 토출 종료 시 시린지 펌프의 흡입을 통해 잔여 토출 유량을 최소화하도록 하였으며 Fig. 10(b)와 같이 0에 가까운 유량을 가지도록 할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 코팅 노즐의 출구에서 유량을 측정하기 위해 중량계측법을 이용하였다. 실험실에서 제작된 유량 측정 시스템을 통해 점도와 상관없이 5-50 μL/s까지 측정 구간에서도 매우 선형적인 측정이 가능하였다. 최종적으로 유량을 앞먹임 제어함으로써 고점도 유체와 시린지 펌프에서 안정화 시간을 약 56% 감소시켰으며 종료 시 잔여 토출 유량을 최소화시켰다. 이는 코팅 시 코팅 초기 과도 응답 부분과 코팅 종료 시 원하는 유량 토출을 통해 품질 향상을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 수 μL/s 수준의 유량일 경우 부력과 모세관 힘에 의한 영향이 무시할 만한 수준이라 가정하였지만, 실제로는 수위 상승에 따라 유량에 영향을 줄 수 있으므로 이는 추후 정량적으로 분석되어야 할 필요가 있다. 또한 본 유량 측정시스템은 펌프와 노즐 자체가 코팅 방향으로 균일도에 영향을 어떻게 주는 지만 평가할 수 있으며 실제 코팅 시 기관과 유체의 상호작용에 의한 영향은 예측 또는 평가하기 어렵다.

추후 연구에서는 Fig. 11과 같이 상용 정밀 저울과 토출부가 높은 중형비를 가진 슬롯 다이 노즐이 장착된 유량 측정 시스템을 개발하고 이를 평가할 계획이다. 또한 보다 정밀한 펌프를 사용하여 모터 운동 성능 변동에 의한 영향을 최소화하고자 한다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Technology Innovation Program (No. 20014812), funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Republic of Korea).



## REFERENCES

1. Beguin, A. E., (1951), Method of coating strip material, US2681294A.
2. Larsen-Olsen, T. T., Andreasen, B., Andersen, T. R., Böttiger, A. P., Bundgaard, E., Norrman, K., Andreasen, J. W., Jørgensen, M., Krebs, F. C., (2012), Simultaneous multilayer formation of the polymer solar cell stack using roll-to-roll double slot-die coating from water, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 97, 22-27.
3. Schmitt, M., Scharfer, P., Schabel, W., (2014), Slot die coating of lithium-ion battery electrodes: Investigations on edge effect issues for stripe and pattern coatings, *Journal of Coatings Technology and Research*, 11(1), 57-63.
4. Sandström, A., Dam, H. F., Krebs, F. C., Edman, L., (2012), Ambient fabrication of flexible and large-area organic light-emitting devices using slot-die coating, *Nature Communications*, 3(1), 1-5.
5. Schmitt, M., Diehm, R., Scharfer, P., Schabel, W., (2015), An experimental and analytical study on intermittent slot die coating of viscoelastic battery slurries, *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(5), 927-938.
6. Tan, P., Diao, S., Huang, T., Yang, Z., Zhou, H., Zhang, Y., (2020), Mechanism and control of the trailing edge in intermittent slot die coating, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(35), 15758-15767.
7. Ding, X., Liu, J., Harris, T. A., (2016), A review of the operating limits in slot die coating processes, *AIChE Journal*, 62(7), 2508-2524.
8. Meng, K., Wang, X., Chen, Q., (2011), Fluid flow in coat-hanger die of melt blowing process: Comparison of numerical simulations and experimental measurements, *Textile Research Journal*, 81(16), 1686-1693.
9. Park, J., Shin, K., Lee, C., (2015), Improvement of cross-machine directional thickness deviation for uniform pressure-sensitive adhesive layer in roll-to-roll slot-die coating process, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(5), 937-943.
10. Bissig, H., Petter, H. T., Lucas, P., Batista, E., Filipe, E., Almeida, N., Ribeiro, L. F., Gala, J., Martins, R., Savanier, B., (2015), Primary standards for measuring flow rates from 100 nl/min to 1 ml/min—gravimetric principle, *Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik*, 60(4), 301-316.
11. Doihara, R., Shimada, T., Cheong, K.-H., Terao, Y., (2016), Liquid low-flow calibration rig using syringe pump and weighing tank system, *Flow Measurement and Instrumentation*, 50, 90-101.
12. Doihara, R., Shimada, T., Cheong, K.-H., Furuichi, N., (2021), Weighing system with low evaporation error for liquid microflow down to 1 mg/min, *Flow Measurement and Instrumentation*, 81, 102030.
13. Lee, S. H., Kang, W., Chun, S., (2018), Dynamic behavior analysis of drug delivery devices using a dynamic gravimetric method, *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, 105-112.
14. Gläser, M., Borys, M., (2009), Precision mass measurements, *Reports on Progress in Physics*, 72(12), 126101.
15. Marangoni, R. R., Rahneberg, I., Hilbrunner, F., Theska, R., Fröhlich, T., (2017), Analysis of weighing cells based on the principle of electromagnetic force compensation, *Measurement Science and Technology*, 28(7), 075101.
16. Bae, J. H., Yoon, K. T., Lim, H. H., Choi, Y. M., (2021), Development of an optical position sensor for high-precision electromagnetic force compensation balance, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(8), 567-574.
17. Aguilera, J., (2011), Dynamic weighing calibration method for liquid flowmeters-A new approach, *Universitätsbibliothek Ilmenau*.

**Kyung-Taek Yoon**

Ph.D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is novel instrumentation systems, actuator design, and biomechanical wearable devices.

E-mail: majesty17@ajou.ac.kr

**Jeong-Hyun Bae**

M.S. in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is high-precision machines and optical sensors.

E-mail: dmcj421@ajou.ac.kr

**Young-Man Choi**

Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is high-precision machines, mass metrology and wearable mechatronics.

E-mail: ymanchoi@ajou.ac.kr



# 기계학습을 이용한 지능형 타이어의 마모도 추정

## Wear Estimation of an Intelligent Tire Using Machine Learning

한준영<sup>1</sup>, 권지훈<sup>1</sup>, 김형준<sup>2</sup>, 이석<sup>1,#</sup>  
Jun Young Han<sup>1</sup>, Ji Hoon Kwon<sup>1</sup>, Hyeong Jun Kim<sup>2</sup>, and Suk Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)  
<sup>2</sup> 부경대학교 스마트로봇융합응용교육연구단 (Smart Robot Convergence and Applications Research Center, Pukyong National University)  
# Corresponding Author / E-mail: slee@pnu.edu, TEL: +82-51-510-2320  
ORCID: 0000-0003-0519-0512

KEYWORDS: Tire tread depth (타이어 홈 깊이), Intelligent tire (지능형 타이어), Acceleration sensor (가속도 센서), Fast fourier transform (고속 푸리에 변환), Machine learning (기계학습), K-nearest neighbor (K-최근접 이웃)

*Tire-related crashes account for a large proportion of all types of car accidents. The causes of tire-related accidents are inappropriate tire temperature, pressure, and wear. Although temperature and pressure can be monitored easily with TPMS, there exists no system to monitor tire wear regularly. This paper proposes a system that can estimate tire wear using a 3-axis accelerometer attached to the tread inside the tire. This system utilizes axial acceleration, extracts feature from data acquired with the accelerometer and estimates tire wear by feature classification using machine learning. In particular, the proposed tire wear estimation method is designed to estimate tread depth in four types (7, 5.6, 4.2, and 1.4 mm) at speeds of 40, 50, and 60 kmph. Based on the data obtained during several runs on a test track, it has been found that this system can estimate the tread depth with reasonable accuracy.*

Manuscript received: September 2, 2022 / Revised: November 25, 2022 / Accepted: November 28, 2022

### 1. 서론

자율주행 기술의 발전에 따라 차량 시스템의 안전에 대한 책임이 점차 커지고 있다. 이는 차량의 고장에 대한 높은 신뢰성 뿐만 아니라 다양한 사고를 방지하기 위한 기술을 요구한다 [1,2]. 특히, 차량 사고는 인명사고로 이어질 높은 가능성을 가지고 있다. 그렇기 때문에 차량 주행 중 사고에 영향을 주는 요소를 인지하고 이를 처리하기 위한 기능이 필요하다[3-13].

특히, 사고를 유발하는 요소 중 타이어에 의한 차량 사고는 전체 교통사고에서 큰 부분을 차지하고 있다. 미국의 National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)에서는 타이어 관련 사고가 매년 약 11,000건 발생한다고 한다[14]. 그리고 NHTSA에서 차량 사고 전 단계에 인지할 수 있는 타이어 관련 요인을 압력, 온도, 트레드 깊이 등으로 정의한다. 타이어의 압력, 온도, 트레드 깊이는 타이어의 성능에 직접적인 연관이 있는

요인으로 철저한 관리가 요구된다[15,16].

타이어 온도와 압력이 적정 범위로 유지되지 못하는 경우 타이어의 손상을 유발할 가능성이 높아진다. 타이어 손상은 과도한 타이어 마모뿐만 아니라 타이어의 마찰력 감소 및 타이어 평크를 유발하여 사고를 유발할 수 있다[17,18]. 그리고 타이어 트레드 깊이는 주행 안정성과 제동력에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 우천 시 타이어와 노면 사이의 물을 배출하는 역할을 한다 [19-21]. 일반적으로 타이어 트레드 깊이가 1.6 mm일 때 타이어 교체가 권장되며, 그 이하인 경우 타이어 관련 사고 확률이 약 12배 이상으로 증가한다[22].

압력과 온도 그리고 타이어 트레드 깊이에 관련된 사고를 방지하기 위해서는 주기적인 모니터링이 필요하다. 타이어의 온도와 압력은 Tire Pressure Monitoring System (TPMS)을 사용하여 주기적으로 모니터링이 가능하다[23-26]. 그러나 타이어 트레드 깊이는 운전자가 주기적으로 육안 검사로 진행하는

것이 일반적이며, 자동적으로 모니터링 하기 위한 시스템이 존재하지 않는다. 현실적으로 센서를 통해 타이어 트레드 깊이를 직접적으로 측정하기는 어렵기 때문에 이를 추정하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 대표적으로 모델 기반의 접근법과 Finite Element Method (FEM), 그리고 데이터 기반 접근법이 있다[27-30].

모델 기반 접근법은 수학적으로 정의된 타이어 또는 차량 모델을 사용하여 타이어, 도로, 그리고 차량 간 물리적 특성을 이용한다[27]. 그리고 FEM 기법은 타이어의 구조, 소재의 특성 등 많은 요소를 이용하여 타이어의 마모 정도를 추정한다[28]. 그러나 이러한 방법들은 복잡한 모델을 요구하며 정확하게 모델하기 어려운 편이다. 또한 주행 습관, 도로 상태와 같은 타이어 마모에 영향을 주는 외부 환경 요소를 반영하기 어려워 정확한 추정이 어렵다.

이 논문에서는 타이어 트레드의 가속도를 이용한 Tire Conditions Monitoring System (TCMS)을 제안한다. 이를 위해서 타이어 내부 바닥면에 가속도 센서가 부착된 지능형 타이어를 사용하였다. 마모도가 다른 지능형 타이어를 장착하고 시험용 트랙을 주행하면서 가속도를 측정하였고 이를 주파수 영역으로 변환하여 대역별 파워를 특징으로 추출하였다. 이를 이용하여 세 가지의 기계학습 모델을 훈련하였고 정확도를 평가하였다.

이 논문은 총 5장으로 구성되어 있다. 2장에서는 제안하는 TCMS의 구조를 설명한다. 그리고 3장에서는 가속도 센서 신호 특성에 대해 분석하고 타이어 트레드 깊이를 속도별로 추정하기 위한 알고리즘에 대해 설명한다. 그리고 4장에서는 3종의 기계학습을 사용한 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘의 성능을 평가하였다. 마지막으로 5장에서는 결론과 향후 연구에 대해 서술한다.

## 2. TCMS 개요

### 2.1 지능형 타이어

지능형 타이어는 타이어 내부에 센서가 설치되어 있다. 지능형 타이어는 센서 신호를 통해 타이어의 상태와 특성을 추정하여 타이어 관리와 이를 통한 안전한 차량 제어를 목표로 한다. 지능형 타이어는 Strain-Based, Deflection-Based, 그리고 Acceleration-Based 3가지 종류로 분류할 수 있다. Strain-Based는 Strain 센서로 타이어의 변형 정도를 측정하고 이를 이용해 타이어에 가해지는 힘의 방향과 크기를 추정할 수 있다[30]. Deflection-Based는 광학 센서를 사용하여 타이어 회전 시 LED 위치에 따른 광전류의 변화를 이용해 타이어에 가해지는 힘을 추정한다[31]. 그리고 Acceleration-Based는 가속도 센서로 타이어가 회전할 때 발생하는 가속도를 측정하고 이를 이용하여 타이어의 상태를 추정하는 방법이다[32-34].

Strain-Based는 Acceleration-Based에 비해 노이즈가 적은

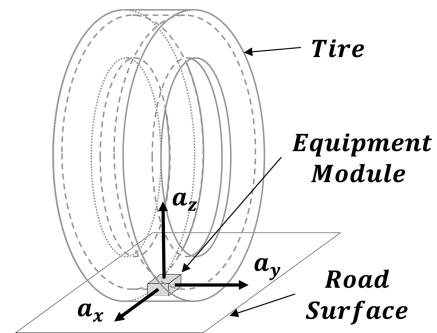


Fig. 1 Acceleration-based intelligent tire

장점이 있지만 낮은 에너지 효율과 높은 비용을 가진다. 그리고 Deflection-Based의 경우 타이어의 마찰을 측정하기 위한 방법으로 마모도 추정에 적용하기 어려운 구조를 가지고 있다. 그에 반해 Acceleration-Based는 비교적 노이즈가 많은 단점이 있지만 높은 에너지 비용과 낮은 비용 등의 장점을 가진다. 따라서, 고급 신호처리 기술을 사용해 노이즈의 영향을 최소화한다면 실제 차량에 적용하기 가장 적합할 수 있다. 이전 연구에서 Acceleration-Based의 마모도 추정 가능성을 확인하였다[34]. 이 논문에서는 가속도의 특성을 사용해 타이어 트레드 깊이를 추정하기 위해 Acceleration-Based 지능형 타이어를 사용한다.

Fig. 1은 Acceleration-Based 지능형 타이어에 설치된 가속도 센서와 가속도의 벡터 방향을 보여준다. 그림과 같이 Longitudinal Acceleration ( $\vec{a}_x$ ), Lateral Acceleration ( $\vec{a}_y$ ), 그리고 Radial Acceleration ( $\vec{a}_z$ ), 총 3방향의 가속도를 측정한다.  $\vec{a}_x$ 는 타이어 회전의 접선 가속도로 타이어 회전가속도에 따라 변화한다.  $\vec{a}_y$ 는 타이어 회전의 회전축 방향의 가속도로 차량 선회 시 변화한다. 그리고  $\vec{a}_z$ 는 타이어 회전의 구심가속도로 타이어 회전속도 변화에 따라 변화한다. 또한, 노면과 타이어가 접촉할 때 노면의 수직방향에 해당되는 진동에 따라 변화한다. 따라서, 이 논문에서는 타이어 트레드 깊이에 따라 변화되는 타이어 진동을 분석하기 위해  $\vec{a}_z$  가속도 성분을 사용한다.

### 2.2 TCMS 구조

Fig. 2는 TCMS의 시스템 구조로 Equipment Module과 Processing System으로 구성된다. 타이어의 정보를 수집하기 위한 Equipment Module은 가속도 센서와 압력 센서, 온도 센서, 블루투스 모듈과 전원장치로 구성된다. Fig. 3은 타이어 내부 바닥면에 설치된 Equipment Module과 전원공급을 위한 배터리를 보여준다. 휠의 센터 캡에 배터리 지그를 설치하여 배터리를 장착한다. 배터리는 지그를 통해 타이어 내부의 Equipment Module과 연결된 전선을 사용하여 전원을 공급한다. 가속도 센서는 1 kHz의 Sampling Rate와  $\pm 500$  g의 측정 범위를 가지는 3축 가속도 센서를 사용한다. Equipment Module은 타이어 온도, 압력, 3축 가속도 데이터를 블루투스 통신을 통해 Processing System으로 전달한다.

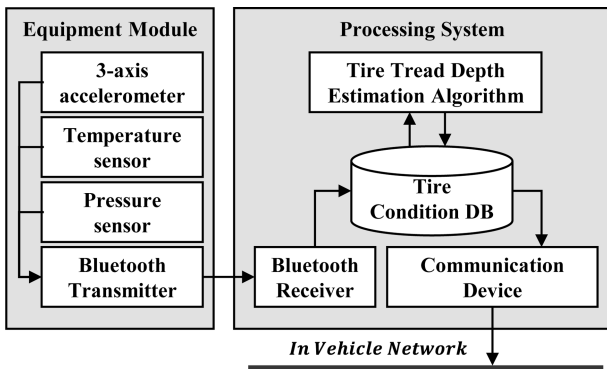


Fig. 2 Structure of tire conditions monitoring system



Fig. 3 Equipment module installed in tire: (a) Equipment module, (b) Battery

Processing System은 블루투스를 통해 수신한 타이어 정보 데이터 중 z축 가속도를 사용해 타이어 트레드 깊이를 추정한다. 특히, 이 논문에서는 가속도의 주파수 영역에서 특징을 추출하고 이를 기계학습 모델로 타이어 트레드 깊이를 네 그룹으로 분류하여 추정한다. 그리고 타이어 압력과 온도, 추정된 타이어 트레드 깊이를 통신 디바이스를 사용해 이 정보를 필요로 하는 ECU에게 전달 가능하다. 이러한 TCMS는 차량 모니터링 Unit 또는 차량 제어기에 타이어 정보를 제공하여 타이어 상태를 고려한 차량 제어를 가능하게 도울 수 있다.

### 3. 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘

#### 3.1 시간 영역 데이터 분석

Fig. 4는 타이어 트레드 깊이가 7, 5.6, 4.2, 그리고 1.4 mm인 타이어를 장착하고 시속 60 kmph로 마른 아스팔트 도로를 주행했을 때 얻어진 축방향 가속도( $\ddot{a}_z$ ) 신호를 보여주고 있다. 여기서 타이어 트레드 깊이가 7 mm인 타이어는 새 타이어이며, 1.4 mm는 트레드가 과도하게 마모된 교체 시기의 타이어이다.

Fig. 4(a)에서 Contact Patch는 가속도 센서가 설치된 타이어 바닥면이 노면과 접촉했다가 떨어지는 단계이다. 노면과 접촉하기 시작하는 단계인 Contact Patch의 Fig. 4(a)에서는 타이어가 하중에 의해 눌리면서 센서가 회전축에 가까워져 구심가속도가 증가한다. 그리고 Fig. 4(b)에서는 TCMS가 설치된 타이어 바닥면이 노면과 완전 접촉을 한 상태로 평행해진 타이어의

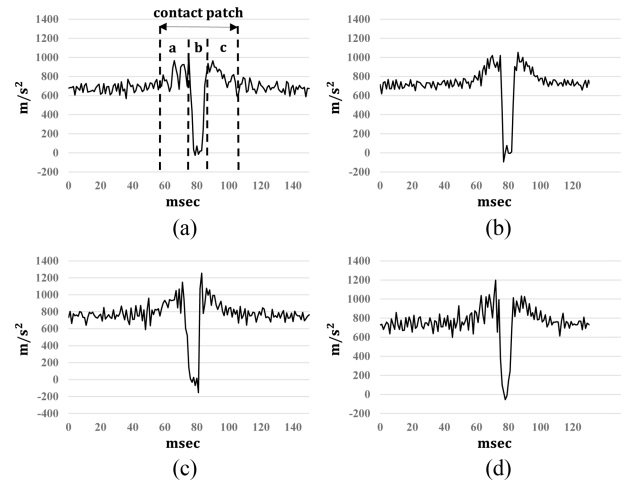


Fig. 4 Analysis of acceleration signal in time domain; (a) 7 mm tread depth, (b) 5.6 mm tread depth, (c) 4.2 mm tread depth, (d) 1.4 mm tread depth

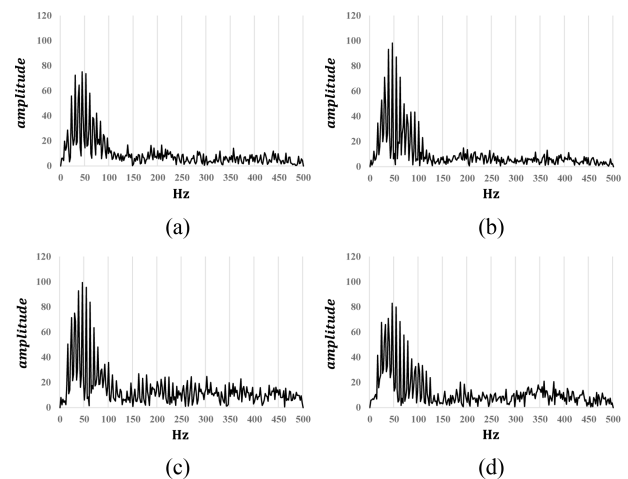


Fig. 5 Analysis of acceleration signal in frequency domain; (a) 7 mm tread depth, (b) 5.6 mm tread depth, (c) 4.2 mm tread depth, (d) 1.4 mm tread depth

접촉면을 따라 센서가 이동하기 때문에 구심력이 사라져서 축방향 가속도가 0에 수렴하게 된다. 그리고 Fig. 4(c)는 센서가 타이어 바닥면이 노면에서 떨어지는 단계로 Fig. 4(a) 단계와 반대로 가속도가 변화한다.

하지만 같은 속도, 같은 트레드 깊이에서도 Contact Patch의 가속도 변화는 매번 다른 형상을 보여주고 이 때문에 시간 영역의 가속도 변화로 트레드 깊이를 추정하는 것이 매우 어렵다. 따라서, 3.2장에서 시계열 데이터를 주파수 영역으로 변환하여 분석하는 것이 필요하다.

#### 3.2 주파수 영역 데이터 분석과 특징추출 방법

시간 영역의  $\ddot{a}_z$  가속도 데이터를 주파수 영역으로 변환하여 분석하기 위해서 Fast Fourier Transform (FFT)을 사용하였다.

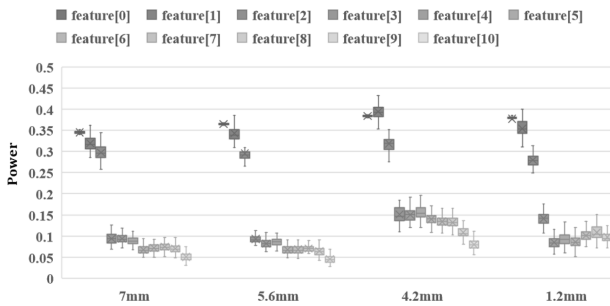


Fig. 6 Distribution of features by tire wears

Fig. 5는 서로 다른 트레드 깊이를 가진 타이어 4개로 각각 주행했을 때 수집한 가속도 데이터를 주파수 영역으로 변환한 결과의 예시이다. 그림에서 타이어가 많이 마모된 4.2, 1.4 mm에서 고주파 성분이 차지하는 비중이 나머지에 비해 큰 경향을 볼 수 있다. 또한 5.6과 4.2 mm일 때 50 Hz 부근에 나타나는 피크 값이 다른 두 경우에 비해 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 차이점을 활용하면 트레드 깊이를 추정하는 것이 가능함을 시사한다.

이러한 타이어 트레드 깊이에 따른 주파수 분포를 정량적으로 표현하기 위하여 0-500 Hz를 10개의 구간으로 나누어 식(1)과 같이 그 구간의 평균 파워를 산출하였다. 또한 0 Hz는 차량의 속도를 나타내기 때문에 별도로 계산하였다. Fig. 6은 60 kmph 속도로 주행하여 수집한 전체 데이터에서 식(1)로 추출한 특징의 분포를 보여준다. 그림의 타이어 트레드 깊이 별 특징은 Fig. 5보다 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 마모가 커지면 고주파 성분이 늘어난 것을 쉽게 파악할 수 있다. 따라서, 이렇게 정량화된 값을 이용한 기계학습방법을 통해 분류가 가능할 것으로 보인다.

$$feature[n] = \begin{cases} amplitude[0], n = 0 \\ \sum_{f=1}^{50} amplitude[f]/50, n = 1 \\ \sum_{f=50n-49}^{50} amplitude[f]/50, n > 1 \end{cases} \quad (1)$$

3.3 기계학습 기반의 트레드 깊이 추정 알고리즘

3.2절에서 60 kmph의 속도로 주행 시 획득한 데이터를 사용하여 타이어 트레드 깊이 변화에 따른 타이어 진동을 확인하였다. 특히, 식(1)로 주파수 영역에서 특징을 추출하는 경우 육안으로도 트레드 깊이 별로 분류 가능한 강력한 특징이 추출되는 것을 확인하였다. 이를 기반으로 40, 50, 60 kmph의 속도로 주행 시 타이어 트레드 깊이를 추정하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 기계학습 모델을 사용하여 특징을 분류하여 타이어 트레드 깊이를 추정한다.

Fig. 7은 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘의 구조이다. 알고리즘은 그림과 같이 시계열 데이터인 가속도 센서의  $\vec{a}_z$  데이터 500개(0.5초)를 주파수 영역으로 변환한다. 그리고 3.2절의 식(1)을 사용하여 11개의 특징을 추출한다. 그리고 나서 특징을 기계학습 모델을 사용하여 타이어 트레드 깊이를 7, 5.6, 4.2,

1.4 mm의 수치로 분류하여 추정한다. 특징을 분류하기 위한 기계학습 모델은 MLR (Multiple Linear Regression), SVM (Support Vector Machine), K-NN (K-Nearest Neighbor)을 사용해 알고리즘을 구성하고 성능을 비교 평가하여 선정하였다.

Fig. 8은 알고리즘에서 사용한 기계학습을 이용한 데이터 분류 방법을 보여준다. Figs. 8(a)는 MLR, 8(b)는 SVM, 그리고 8(c)는 K-NN을 사용한 데이터 분류를 보여 주고 있다. 각 그림은 독립 변수가 2개인 3가지 종류의 데이터를 각 기계학습방법으로 분류한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 데이터 라벨이 ‘0’인 데이터는 동그라미, 라벨이 ‘1’인 데이터는 네모, 그리고 라벨이 ‘2’인 데이터는 세모로 표시하고 있다. 각 기계학습방법의 데이터 분류는 설명과 같다.

MLR은 입력데이터의 선형 관계로 회귀식을 모델링하고 이를 사용해 입력데이터의 Class를 분류한다. Fig. 8(a)의 3개의 점선은 각 Class의 데이터를 사용해 모델링한 회귀식이다. 데이터 Class의 수와 같은 개수의 회귀식이 설정되며, 입력데이터에 가장 가까운 회귀식에 따라 Class를 분류한다. MLR은 데이터의 분포가 선형적이고 데이터 군집 간 거리가 충분히 먼 경우 사용하기 적합하다.

SVM은 Class 별 데이터 분포에 따라 초평면 또는 커널로 차원공간을 Class 별로 분할하고 이를 사용해서 입력데이터를 분류한다. Fig. 8(b)에서 점선은 Class 영역을 분할하는 경계선이다. 이 경계선은 데이터 군집 간 분포에 의해 구성되며, 입력데이터가 위치한 영역의 Class로 데이터가 분류된다. SVM은 Class 별 데이터 분포가 겹쳐지지 않는다면 복잡한 분포 형태를 가져도 우수한 성능을 보여준다.

KNN은 Class 별 데이터로 구성된 데이터 베이스에서 입력데이터와 가장 근접한 데이터 k개 중 제일 많은 Class로 입력데이터를 분류한다. Fig. 8(c)에서는 별모양은 입력데이터로 k = 3인 상황에서 가장 근접한 데이터 3개를 선택한 결과를 보여준다. 그림에서 입력데이터와 가장 근접한 3개의 데이터 중 Class가 1(네모)인 요소가 2개로 입력데이터는 Class 1로 분류된다. KNN은 복잡한 데이터 분포에서 우수한 성능을 보이며, Class 별 데이터 분포가 겹치는 상황에서도 비교적 우수한 성능을 보여준다.

기계학습 모델 중 MLR은 옵션이 불필요한 모델이며, SVM은 분류를 위해 일반적으로 많이 사용되는 Radial Basis Function 커널을 사용하였다. 그리고 K-NN은 K개의 인접한 데이터를 찾고 인접한 데이터의 라벨을 확인하고 가장 많은 라벨로 분류하는 알고리즘이다. 그렇기 때문에 K-NN은 분류에 사용할 인접한 이웃의 개수(K)를 옵션으로 설정해 주어야만 한다. 특히, K-NN은 데이터 특성에 따라 높은 분류 정확도를 얻을 수 있는 k값이 달라진다. 따라서, K-NN을 사용하여 데이터를 정확히 분류하기 위해서는 높은 분류 정확도를 가지는 k값을 찾을 필요성이 있다.

따라서, K-NN을 사용하여 타이어 트레드 깊이를 최대한 정확하게 추정하기 위해 최적의 k값을 선정하였다. 이를 위해

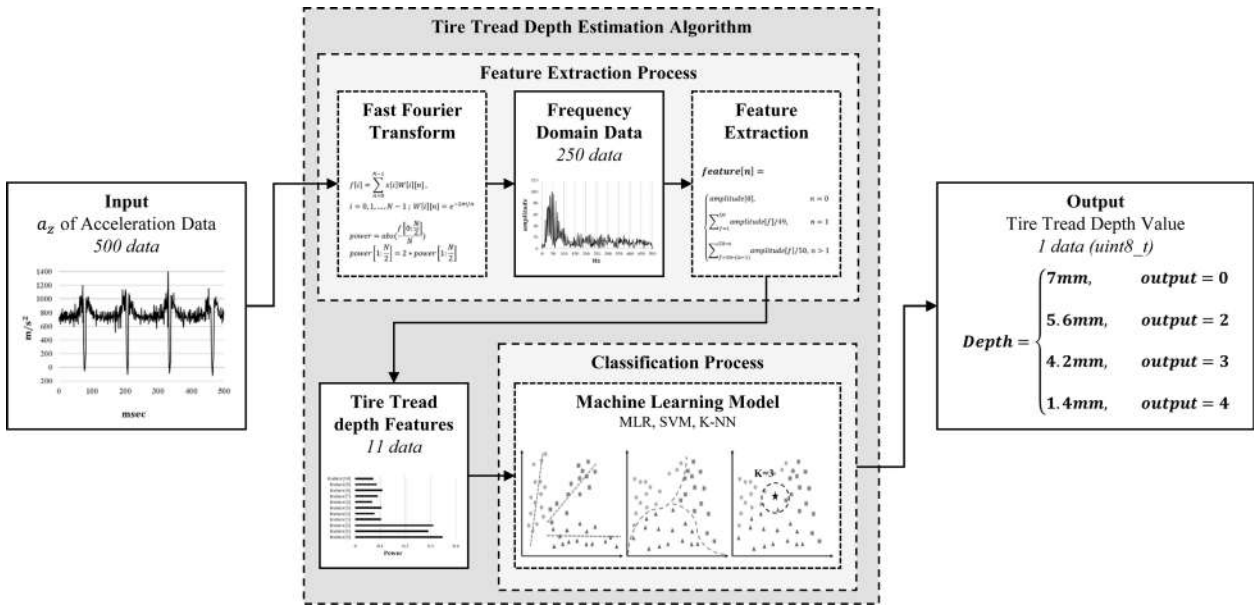


Fig. 7 Structure of tire tread depth estimation algorithm

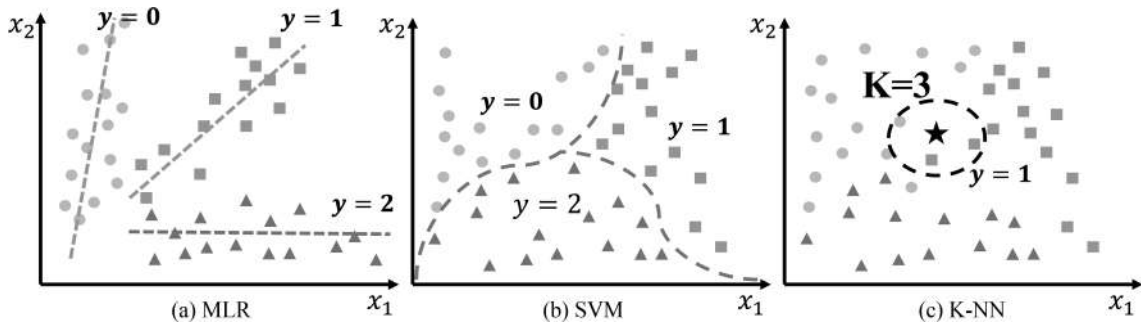


Fig. 8 Comparison of machine learning ideas

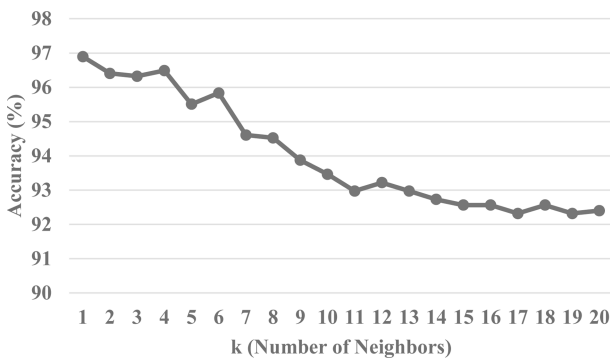


Fig. 9 Classification accuracy for different k values for K-NN

가속도 센서의  $\dot{a}_z$  데이터를 사용하여 K-NN을 학습하고 추정 정확도를 평가하여 k값에 따른 정확도를 확인하였다. Fig. 9는 k값에 따른 K-NN의 타이어 트레드 깊이 추정 정확도를 보여 준다. 그래프와 같이 k값이 1인 경우 제일 높은 정확도를 보였 으며, k값이 증가할수록 정확도가 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 제일 근접한 데이터 하나만을 사용하여 특징을 분류하는

것이 최적의 결과를 도출한다는 것을 보여준다. 시험 결과에 따 라 K-NN의 k값을 1로 선정하였다.

#### 4. TCMS의 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘 성능평가

이 장에서는 TCMS의 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘에 사용할 기계학습 알고리즘을 선택하기 위해 성능 평가를 진행 하였다. 성능 평가를 위한 데이터는 TCMS를 설치한 차량을 자 동차 전용 시험 도로에서 주행하여 수집하였다. 시험 차량의 중 량은 1,550 kg이며, 성인 두 명이 탑승하였다. 그리고 시험 차량 에는 18인치 타이어가 장착되었으며, 전방 좌측 타이어에만 TCMS Equipment Module을 설치하였다. 마른 아스팔트 도로에 서 40, 50, 60 kmph의 속도로 직선 코스를 주행하는 동안 데이 터를 수집하였다. 타이어 압력은 39 psi로 유지하였으며, 타이어 트레드 깊이가 7, 5.6, 4.2, 1.4 mm인 타이어 4종을 교체하여 데 이터를 수집하였다.

수집한 가속도 센서의  $\dot{a}_z$  이산 시계열 데이터들을 타이어

트레드 깊이와 속도에 따라 분류하였다. 그리고 분류한 데이터를 타이어 트레드 추정 알고리즘의 입력인 0.5초(500개의 데이터) 길이의 데이터 셋들로 구성하였다. 학습과 성능 평가를 위한 데이터 셋은 약 4.5 : 5.5의 비율로 나누어 구성하였다. Table 1은 기계학습 기반의 분류모델의 학습을 위한 데이터 셋의 수를 보여주는데 총 1,008개로 구성된다. 그리고 Table 2는 학습이 완료된 타이어 트레드 추정 알고리즘의 성능 평가에 사용하기 위한 데이터 셋으로 총 1,224개이다.

제안하는 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘은 TCMS의 핵심 성능으로 높은 정확도가 요구된다. 또한, 실제 차량에 적용되기 위해서는 적절한 연산속도와 학습속도가 요구된다. 따라서, 이 논문에서는 TCMS의 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘에서 사용할 기계학습 알고리즘을 정확도와 연산속도, 학습속도를 성능지표로 고려하였다.

Tables 3, 4, 5는 Table 2의 데이터 셋을 사용하여 타이어 트레드 깊이 추정 정확도를 평가한 결과를 보여준다. Table 3은 MLR의 성능으로 전체적으로 추정 정확도가 좋지 못하며, 종합적으로 약 35.2%의 정확도를 보여준다. Table 4는 SVM의 성능으로 MLR에 비해 비교적 높은 정확도를 보여주며, 종합적으로 88.0%의 정확도를 보여준다. 그리고 Table 5는 K-NN의 성능으로 전체적으로 정확도가 양호하며, 종합적으로 96.9%의 우수한 추정 정확도를 보여준다.

결과를 정리하면 K-NN, SVM, 그리고 MLR 순으로 타이어 트레드 깊이를 정확하게 추정한다. MLR을 사용한 추정 정확도가 가장 낮은 결과는 타이어 트레드 깊이에 따른 특징의 분포가 선형적이지 않기 때문이다. 그리고 SVM보다 K-NN의 추정 정확도가 높은 결과는 타이어 트레드 깊이에 따른 특징의 분포가 완전히 공간적으로 독립되어 있지 않고 겹치는 부분이 존재한다는 것을 뜻한다. 따라서, 타이어 트레드 깊이에 따른 특징의 분포는 선형적이지 않고 공간적으로 독립되어 있지 않기 때문에 K-NN이 타이어 트레드 깊이를 비교적 정확하게 측정하는 것으로 판단된다.

Table 6은 각 모델의 학습시간과 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘의 실행 시간을 보여준다. 이 실험 결과는 Windows 10 64비트 운영체제와 7세대 i5 CPU를 사용하는 데스크톱에서 Python을 사용하여 얻은 것이다. 학습시간은 MLR, K-NN, 그리고 SVM 순으로 빨랐으며, 알고리즘의 실행 시간은 MLR, SVM, K-NN 순으로 빨랐다. 실행 시간은 제일 빠른 모델과 느린 모델 간의 차이가 약 0.749 ms 차이로 실행 주기인 500 ms를 고려할 경우 사소한 차이로 모델 선정 시 큰 영향을 주지 않는다. 또한, 학습 시간은 모델과 간 차이가 최대 약 5배 이상 차이가 나지만 제일 느린 모델의 학습 시간이 34.612 ms로 상당히 빨라서 모델 선정 시 큰 영향을 주지 않는다.

성능 평가 결과에 따르면 각 모델 간 학습시간과 실행 시간의 차이가 발생하였지만 TCMS에 적용 시 큰 영향을 줄 정도의 유의미한 차이가 아니었다. 하지만 학습모델의 정확도를 평가한 결과에 따르면 MLR, SVM, 그리고 K-NN을 사용하는 경우 타이어 트레드 깊이 추정 정확도 각각 35.2, 88.0, 그리고 96.9%로

Table 1 Number of training datasets

Velocity [km/h]	Tire tread depth				Total
	7 mm	5.6 mm	4.2 mm	1.4 mm	
40	72	72	144	144	432
50	72	72	72	72	288
60	72	72	72	72	288
Total	216	216	288	288	1,008

Table 2 Number of test datasets

Velocity [km/h]	Tire tread depth				Total
	7 mm	5.6 mm	4.2 mm	1.4 mm	
40	144	72	144	144	504
50	144	72	72	144	432
60	72	72	72	72	288
Total	360	216	288	360	1,224

Table 3 Accuracy of MLR for classify the tire tread depth [%]

Velocity [km/h]	Tire tread depth				Total
	7 mm	5.6 mm	4.2 mm	1.4 mm	
40	0.0	93.1	66.7	5.6	33.9
50	1.4	87.5	55.6	30.6	34.5
60	8.3	62.5	52.8	30.6	38.5
Total	2.2	81.0	60.4	20.6	35.2

Table 4 Accuracy of SVM for classify the tire tread depth [%]

Velocity [km/h]	Tire tread depth				Total
	7 mm	5.6 mm	4.2 mm	1.4mm	
40	91.0	77.8	97.9	98.6	93.3
50	50.0	81.9	100.0	94.4	78.5
60	88.9	87.5	98.6	97.2	93.1
Total	74.2	82.4	98.6	96.7	88.0

Table 5 Accuracy of K-NN for classify the tire tread depth [%]

Velocity [km/h]	Tire tread depth				Total
	7 mm	5.6 mm	4.2 mm	1.4mm	
40	98.6	95.8	98.6	98.6	98.2
50	95.8	87.5	98.6	98.6	95.8
60	97.2	88.9	100.0	98.6	96.2
Total	97.2	90.7	99.0	98.6	96.9

Table 6 Runtime and training time of machine learning models to classify tire tread depth

	MLR	SVM	K-NN
Training time [ms]	6.984	34.612	14.842
Runtime [ms]	1.209	1.530	1.958



확인되었다. 따라서, 이 논문에서는 정확도가 제일 높은 K-NN 을 TCMS의 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘의 학습 모델로 선정하는 것이 타당하다.

**5. 결론**

타이어의 공기압과 타이어 트레드 깊이는 타이어 관련 사고 를 예방할 수 있는 요소로 지속적인 모니터링이 요구된다. 특히, 자율주행의 안전을 위해 자율주행 시스템에 타이어 관련 정보 가 필수적으로 요구된다. 따라서, 이 논문에서는 기계학습을 사 용한 타이어 트레드 깊이 추정 알고리즘과 이를 사용한 TCMS 를 제안하였다. 이를 위해서 TCMS의 가속도 센서로 수집한 데 이터를 사용하여 타이어 트레드 깊이에 따른 축방향 가속도 변 화의 특징을 추출하였다. 그리고 TCMS에 적합한 기계학습 모 델을 선정하였다. 이 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 타이어 트레드 내부에 부착한 가속도 센서를 사용해서 얻은 축방향 가속도 정보를 통하여 트레드 깊이를 추정할 수 있 다. 시계열 데이터에서는 타이어의 마모도를 추정하기 어려워 보이지만 주파수 영역에서 대역별 파워의 분포가 다른 점을 이 용하면 트레드 깊이를 추정할 수 있는 가능성을 보여주었다.

둘째, 타이어 트레드 깊이를 추정하기 위한 세 가지 기계학습 모 델 중 K-NN이 가장 적합하였다. MLR, SVM, K-NN을 학습용 데이 터로 학습시킨 후 별도의 시험용 데이터로 정확도를 평가한 결과 K-NN이 가장 높은 정확도를 보였다. 또한 학습시간과 실행 시간은 기계학습 모델의 선정에 큰 영향이 없는 것으로 판명되었다.

셋째, 이 논문에서 제안된 TCMS의 타이어 트레드 깊이 추정 알 고리즘은 40, 50, 60 kmph의 속도로 마른 아스팔트 노면을 달리는 경우 약 96.9%의 정확도를 갖는 것으로 평가되었다. 그리고 추정 에 소요되는 시간은 약 1.530 ms로 실시간으로 처리 가능하다. 이 는 실제 차량에서 타이어 트레드 깊이를 높은 정확도로 추정 가능 함을 보여준다. 따라서, 과도하게 마모된 타이어로 인한 차량 미끄 러짐으로 인한 사고를 사전에 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구에는 차량의 다양한 주행 환경을 고려하지 못한 한계 가 있다. 즉 젖은 도로, 콘크리트 도로, 곡선 구간 등에서 수집 한 데이터를 고려하지 못했고 승용차에 탑승한 사람의 수가 변 화할 때 가속도의 특성이 어떻게 변화하는지에 대한 분석이 부 족하다. 또한, 타이어 내부에 장착되는 가속도 센서를 포함한 Equipment Module의 사용 전력이 커서 전원을 타이어 외부에 설치해야 하는 실정이다. 이를 해소하기 위한 저전력 설계 또는 에너지 하베스팅 기술 적용에 대한 추가 연구가 필요하다.

**ACKNOWLEDGEMENT**

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구 되었음.

**REFERENCES**

1. Dixit, V. V., Chand, S., Nair, D. J., (2016), Autonomous vehicles: Disengagements, accidents and reaction times, PLoS One, 11(12), e0168054.
2. Riedmaier, S., Ponn, T., Ludwig, D., Schick, B., Diermeyer, F., (2020), Survey on scenario-based safety assessment of automated vehicles, IEEE Access, 8, 87456-87477.
3. He, X., Liu, Y., Lv, C., Ji, X., Liu, Y., (2019), Emergency steering control of autonomous vehicle for collision avoidance and stabilisation, Vehicle System Dynamics, 57(8), 1163-1187.
4. Yuan, Y., Tasik, R., Adhatarao, S. S., Yuan, Y., Liu, Z., Fu, X., (2020), RACE: Reinforced cooperative autonomous vehicle collision avoidance, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69(9), 9279-9291.
5. Wang, H., Huang, Y., Khajepour, A., Zhang, Y., Rasekhipour, Y., Cao, D., (2019), Crash mitigation in motion planning for autonomous vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20(9), 3313-3323.
6. Yadav, R., Dahiya, P. K., Mishra, R., (2020), Comparative analysis of automotive radar sensor for collision detection and warning system, International Journal of Information Technology, 12(1), 289-294.
7. Malinverno, M., Avino, G., Casetti, C., Chiasserini, C.-F., Malandrino, F., Scarpina, S., (2018), Performance analysis of C-V2I-based automotive collision avoidance, Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)", 1-9.
8. Kim, T., Jeong, H.-Y., (2014), A novel algorithm for crash detection under general road scenes using crash probabilities and an interactive multiple model particle filter, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15(6), 2480-2490.
9. Kim, B.-K., Han, S.-C., Yi, H.-C., (2007), A study on rear lateral collision warning system of vehicle using fuzzy control algorithms, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 24(2), 73-85.
10. Yoon, M. Y., Choi, J. K., Jung, J. E., Boo, K. S., Kim, H. S., (2013), Development of vehicle side collision avoidance system with virtual driving environments, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 30(2), 164-170.
11. Baek, S., Kim, H., Boo, K., (2014), A method for rear-side vehicle detection and tracking with vision system, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 31(3), 233-241.
12. Yun, D., Kim, H., Boo, K., (2011), Brake performance evaluation of ABS with sliding mode controller on a split road with driver model, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 12(1), 31-38.
13. Lee, M. H., Park, H. G., Lee, S. H., Yoon, K. S., Lee, K. S., (2013), An adaptive cruise control system for autonomous vehicles, International Journal of Precision Engineering and

- Manufacturing, 14(3), 373-380.
14. Choi, E.-H., (2012), Tire-related factors in the pre-crash phase, (Report No. DOT HS 811 617). <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/811617>
  15. Askari, H., Hashemi, E., Khajepour, A., Khamesee, M. B., Wang, Z. L., (2019), Tire condition monitoring and intelligent tires using nanogenerators based on piezoelectric, electromagnetic, and triboelectric effects, *Advanced Materials Technologies*, 4(1), 1800105.
  16. Tjiu, W., Ahanchian, A., Majlis, B., (2004), Development of tire condition monitoring system (TCMS) based on MEMS sensors, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics*, 4.
  17. Liu, H., Deng, W., Zong, C., Wu, J., (2014), Development of active control strategy for flat tire vehicles, *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2014-01-0859>
  18. Wang, F., Chen, H., Cao, D., (2015), Nonlinear coordinated motion control of road vehicles after a tire blowout, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(3), 956-970.
  19. Horne, W. B., Dreher, R. C., (1963), Phenomena of pneumatic tire hydroplaning, *National Aeronautics and Space Administration*.
  20. Luchini, J., Motil, M. M., Mars, W., (2001), Tread depth effects on tire rolling resistance, *Tire Science and Technology*, 29(3), 134-154.
  21. Dijks, A., (1976), Influence of tread depth on wet skid resistance of tires, *Transportation Research Record*, 621, 136.
  22. Horne, W. B., (1962). Influence of the tire tread pattern and runway surface condition on breaking friction and rolling resistance of a modern aircraft tire, *National Aeronautics and Space Administration*.
  23. Velupillai, S., Guvenc, L., (2007), Tire pressure monitoring [applications of control], *IEEE Control Systems Magazine*, 27(6), 22-25.
  24. Wei, L., Wang, X., Li, L., Yu, L., Liu, Z., (2020), A low-cost tire pressure loss detection framework using machine learning, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(12), 12730-12738.
  25. Leng, Y., Wenfeng, D., Peng, S., Ge, X., Nga, G. J., Liu, S., (2012), Study on electromagnetic wave propagation characteristics in rotating environments and its application in tire pressure monitoring, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(6), 1765-1777.
  26. Kim, S. J., Jung, H., (2013), A study on the dynamic characteristics of TPMS piezoelectric element using finite element method, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 30(12), 1341-1347.
  27. Jeong, D., Choi, S. B., Lee, J., Kim, M., Lee, H., (2021), Tire dimensionless numbers for analysis of tire characteristics and intelligent tire signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 161, 107927.
  28. Zhang, H., Zhang, S., Zhang, Y., Huang, X., Dai, Y., (2020), Abrasion status prediction with BP neural network based on an intelligent tire system, *Proceedings of the 2020 CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*, 619-622.
  29. Karim, S. M., Rahman, Y., Hai, M. A., Mahfuza, R., (2021), Tire wear detection for accident avoidance employing convolutional neural networks, *Proceedings of the 2021 NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*, 364-368.
  30. Garcia-Pozuelo, D., Olatunbosun, O., Yunta, J., Yang, X., Diaz, V., (2017), A novel strain-based method to estimate tire conditions using fuzzy logic for intelligent tires, *Sensors*, 17(2), 350.
  31. Erdogan, G., Alexander, L., Rajamani, R., (2010), Estimation of tire-road friction coefficient using a novel wireless piezoelectric tire sensor, *IEEE Sensors Journal*, 11(2), 267-279.
  32. Yang, S., Chen, Y., Shi, R., Wang, R., Cao, Y., Lu, J., (2022), A survey of intelligent tires for tire-road interaction recognition, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 7(3), 520-532.
  33. Singh, K. B., Arat, M. A., Taheri, S., (2019), Literature review and fundamental approaches for vehicle and tire state estimation, *Vehicle System Dynamics*, 57(11), 1643-1665.
  34. Kim, Y.-J., Kim, H.-J., Han, J.-Y., Lee, S., (2020), Classification of tire tread wear using accelerometer signals through an artificial neural network, *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, 23(2\_2), 163-171.



**Jun Young Han**

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is machine learning, in-vehicle networking, and network-based control systems.

E-mail: jyhan@pusan.ac.kr



**Ji Hoon Kwon**

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is machine learning, in-vehicle networking, and network-based control systems.

E-mail: jhkwon09@pusan.ac.kr



**Hyeong Jun Kim**

Researcher in the Smart Robot Convergence and Applications Research Center at Pukyong National University. His research interest is artificial intelligence, its applications in automotive and industrial robots.

E-mail: hj.kim@pknu.ac.kr



**Suk Lee**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is industrial networks, in-vehicle networks, and home networks.

E-mail: slee@pnu.edu



# 유리섬유 강화 플라스틱 성형에서 섬유의 단면형상과 사출성형조건이 제품의 휨변형과 광택도에 미치는 영향

## Effect of Cross Section of Glass Fiber and Injection Conditions on the Warpage and Gloss in GFRP Injection Molding

한일용<sup>1</sup>, 박성현<sup>2</sup>, 정민수<sup>2</sup>, 김태균<sup>3</sup>, 박동삼<sup>1,#</sup>

Il Yong Han<sup>1</sup>, Sung Hyun Park<sup>2</sup>, Min Soo Cheong<sup>2</sup>, Tae Kyun Kim<sup>3</sup>, and Dong Sam Park<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 인천대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Incheon National University)

<sup>2</sup> LG전자 생산기술원 (Production Engineering Research Institute, LG Electronics)

<sup>3</sup> 한국바스프주식회사 EP Innovation Center (EP Innovation Center, BASF Co., Ltd.)

# Corresponding Author / E-mail: [dspark@inu.ac.kr](mailto:dspark@inu.ac.kr), TEL: +82-32-835-8418

ORCID: 0000-0001-6201-6604

KEYWORDS: Short fiber reinforced thermoplastic (단섬유 강화 열가소성 수지), Cross-sectional shape of glass fiber (유리섬유 단면형상), Injection condition (사출조건), Warpage (휨), Gloss (광택), Design of experiment (실험계획법)

*SFT, which has a high glass fiber content, is one of the effective methods to replace metal and secure weight reduction and price competitiveness. Also, paintless injection molding in which a functional pattern is applied to the mold surface can eliminate the cost of painting. In this study, three types of SFTs were manufactured by adding round glass fibers measuring  $\Phi 7$  and  $\Phi 10 \mu\text{m}$  and flat glass fiber measuring  $27 \times 10 \mu\text{m}$  for the experiment. DOE (Design of Experiment) was conducted to confirm the change in the warpage of the product and the gloss of the micro pattern due to the cross-sectional shape of glass fibers and the major injection conditions. Based on the results, it was identified that the flat SFT had a very small warpage compared to the round SFTs, and the holding pressure was the main factor in the warpage of all three SFTs. The  $\Phi 7 \mu\text{m}$  SFT had the largest gloss value, and the  $\Phi 10 \mu\text{m}$  SFT and the flat SFT had similar average values. All SFTs demonstrated an enormous change in gloss according to the change in mold temperature. The flat SFT had the smallest standard deviation in both warpage and gloss.*

Manuscript received: October 25, 2022 / Revised: December 16, 2022 / Accepted: December 22, 2022

### 1. 서론

다이캐스팅 공법은 알루미늄이나 마그네슘과 같은 높은 용융 온도를 가진 비철금속재료를 비교적 짧은 시간에 성형할 수 있을 뿐만 아니라 복잡한 형상이나 조립구조도 성형할 수 있어 자동차 분야에 많이 사용되고 있다. 하지만, 성형 후 디버링, 디게이팅의 절단공정과 주요 치수 맞춤을 위한 NC 가공 등의 많은 후공정으로 제조단가가 상승된다. 특히, 외관이나 표면에 기능을 요하는 도장공정은 제품가격을 상승시키는 주 원인이 되고 있다. 최근 자동차 산업에서는 부품가격을 낮출 수 있는 소재 및 공법에 대한 필요성과 내연기관에서 전기자동차로의 시장변

화에 따른 경량화 요구가 증가하는 추세이다. 이러한 요구조건을 충족시키기 위해 금속소재를 복합소재(Composite Material)로 대체하려는 연구가 많이 이루어지고 있다[1].

유리섬유 강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)을 이용한 사출성형 공정은 생산성이 우수하고, 강도를 확보할 수 있어 금속을 대체할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다.

하지만, GFRP 성형에서는 유리섬유의 이방성이나 잔류응력 등으로 인해 발생하는 변형(Warpage)에 대한 고려가 반드시 필요하며, 이를 개선하려는 많은 연구들이 이루어지고 있다.

Liu는 CAE와 실험계획법을 통해 자동차 펌프브라켓 부품의 변형량을 8.41% 줄이는 결과를 얻었다[2]. Park은 자동차 도어

커버 하우징의 변형 최소화를 위한 게이트 시스템 및 사출성형 조건에 대해 연구하였다[3].

또한, 금형 표면에 미세패턴을 가공하여 제품의관을 구현하거나 기능성을 적용하는 무도장 성형기술은 도장비용을 제거할 수 있는 방법이 될 수 있다[4].

미세패턴 가공법 중 펄스레이저(Pulse Laser) 가공은 매우 짧은 시간내 높은 에너지의 적용과 차단을 반복하며 표면을 가공한다. 이 때, 가공물에서 발생하는 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)를 제한하여 정밀한 패턴을 가공할 수 있어, 사출금형의 패턴가공에 활용되고 있다[5].

무도장 성형에서 광택(Gloss)은 패턴부의 기능을 평가하는 기준이 된다. 광택은 동일한 패턴을 가진 금형이라도 사용되는 수지나 사출성형조건에 따라 변할 수 있다. 원하는 광택을 확보하기 위해서는 성형되는 수지가 가공된 금형의 패턴에 얼마나 동일한 비율로 전사되는지가 중요하다. 전사가 제대로 이루어지지 않은 경우 제품표면의 광택이 상승하여 원하는 기능을 구현할 수 없다. 때문에, 금형 패턴의 전사성을 확보하기 위한 다양한 연구들이 이루어져 왔다.

Lee는 급속금형가열냉각기술(Rapid Heat and Cool, RHCM)과 사출압축성형(Injection Compression Molding, ICM), 일반성형(General Injection Molding, GIM)을 비교하여, 각 공법별 미세 패턴 전사성을 비교하였다. 연구결과 RHCM > ICM > GIM 순으로 패턴 전사성이 향상됨을 확인하였다[6]. Kwak은 유리섬유(Glass Fiber)가 50% 함유된 GFRP 성형에서 사출성형조건이 광택 및 전사성에 미치는 영향에 대해 연구하였으며[7], Jung은 사출성형조건 변화에 따른 유리섬유의 외관 돌출에 대해 연구하여, 유리섬유를 은폐할 수 있는 성형조건과 금형온도를 실험 및 해석을 통해 확인하였다[8].

본 연구에서는 자동차 부품의 가격경쟁력을 확보하기 위한 방안으로 금속소재를 높은 함량을 가진 복합소재로 대체하고, 동시에 금형 표면에 기능성 패턴을 가공하여 무도장 성형을 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 실험을 위해  $\Phi 7 \mu\text{m}$ ,  $\Phi 10 \mu\text{m}$  원형 유리섬유와  $27 \times 10 \mu\text{m}$ 의 Flat형 유리섬유를 기지재에 첨가하여 3가지 단섬유 강화 열가소성수지(Short Fiber Reinforced Thermoplastic, SFT)를 제작하였다. 각 SFT에서 유리섬유의 단면형상 및 주요 성형조건 변화가 변형과 광택에 어떤 영향을 주는지 확인하고자 실험계획법(Design of Experiment, DOE)을 진행하였고, 실험결과를 통해 금속대체 및 무도장 성형 시 유리섬유의 형상 및 사출성형조건을 제시하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 광택도(Gloss)

광택도는 광원에서 일정량의 빛을 측정하고자 하는 표면에 발사하여, 표면에서 난반사(Scattering)되어 측정 센서로 들어가지 못하는 빛은 제외되고, 정반사되어 센서로 들어오는 양의

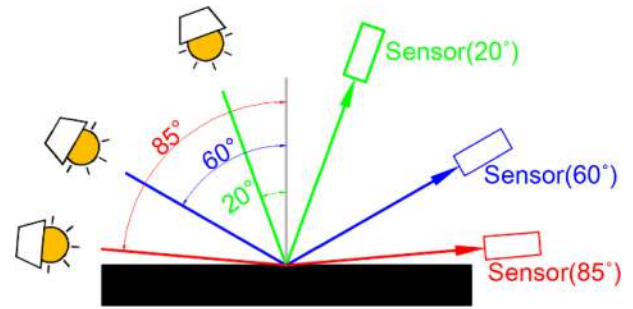


Fig. 1 Measurement angle of gloss

Table 1 Gloss range according to measurement angle

Measurement angle [°]	Gloss range
20	More than 70 GU (high gloss)
60	10-70 GU (medium gloss)
85	Less than 10 GU (low gloss)

비율(%)로 GU (Gloss Unit)라는 단위를 사용한다.

측정각도는 Fig. 1에서와 같이 입사광과 수직사이의 각도로 나타내며, 측정물의 광택 정도에 따라 20, 60, 85°로 구분하여 사용한다. Table 1은 측정물의 광택 범위에 따른 측정 각도를 보여준다. 저광택 표면의 경우 85° 이하에서 측정하게 된다.

### 2.2 실험계획법

실험계획법은 통계적인 기법을 이용하여 최소한의 실험 횟수로 최적조건을 도출하기 위해 사용되며, 크게 요인배치법(Factorial Design)과 반응표면법(Response Surface Method, RSM)으로 구분할 수 있다. 요인배치법 중 부분요인 배치법(Fractional Factorial Design)은 실험 초기 고차의 교호작용에 대한 정보를 희생시키고 중요한 주효과와 2차교호(Interaction) 작용만을 추출하는데 사용된다.

부분요인 배치법은 실험 횟수를 줄일 수 있는 장점이 있지만, 두 개 이상의 인자에 대한 효과가 혼재되어 있을 때, 효과를 분리할 수 없는 교락(Confounding)이 발생한다. 교락의 정도를 수치로 표현한 것을 해상도(Resolution)라고 하며, 해상도는 실험 횟수와 분석범위를 고려하여 III, IV, V 중 하나를 선정하여 사용한다. 해상도 III, IV는 주효과만을 분석하는데 많이 사용되며, V는 주인자와 2차교호작용의 확인이 가능하지만 실험횟수가 늘어나 부분요인 실험의 장점을 살릴 수 없다.



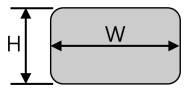
## 3. 실험

### 3.1 실험재료

금속대체를 위한 강도와 부품 가격 경쟁력을 고려하여 기지재와 유리섬유를 선정하였다.

먼저, 기지재료는 자동차분야에서 많이 사용되는 PA66 소재를

Table 2 Cross section and dimensions of glass fiber

Type (Size) [μm]	Cross section
Round (D <sub>1</sub> = Φ7)	
Round (D <sub>2</sub> = Φ10)	
Flat (W = 27, H = 10)	

선정하였다. PA66 소재는 유동성, 기계적 물성 및 유리섬유와의 결합력이 우수하여 기지재로 많이 사용되고 있다[9,10].

유리섬유 길이는 10 mm 이상의 장섬유를 사용하면 우수한 강도를 확보할 수 있지만, 재료가격이 상승하는 단점이 있다. 때문에, 본 연구에서는 길이 3 mm인 단섬유를 60% 첨가한 단섬유 강화 열가소성수지(Short Fiber Reinforced Thermoplastic, SFT)를 사용하였다. 단면형상 및 크기는 Table 2에 나타난 바와 같이 Φ7, Φ10 μm의 원형(Round)과 27 × 10 μm의 플랫(Flat) 형상으로 구분된다.

기지재와 유리섬유 모두 BASF사에서 양산에 적용되고 있는 재료이며, 압출공정에 의해 SFT를 제작하였다.

### 3.2 사출금형

실험을 위해 Fig. 2에 보인 시편 형상을 사출할 수 있는 금형을 사용하였다. 시편의 크기는 186 × 95 mm이며, 두께는 1.8 mm이다. 금형의 캐비티(Cavity)부에서 형성되는 시편 전면부는 제품의 힘을 평가하기 위해 성형면 외에 다른 구조를 적용하지 않았다.

시편의 배면을 형성하는 코어(Core)는 Fig. 2(b)에 나타난 해칭(Hatching) 영역에 무반사 패턴을 적용하기 위해 중앙부와 테두리부로 분할하였다. 164 × 72.5 mm 크기의 중앙코어에는 레이저 가공기(Laser 1200, Agie Charmilles)를 활용하여 무반사 패턴을 가공하였다. 게이트 아래에는 사출성형후 제품을 이동축에 고정하기 위한 Φ5 mm 크기의 록 핀(Lock Pin)과 제품 취출을 위한 밀핀이 테두리부에 설치되었다.

수천개의 육각형 형상이 정렬된 파리는 패턴은 빛의 반사를 억제하는데 효과적인 것으로 알려져 모바일 폰이나 카메라 렌즈의 무반사 코팅 대응으로 많이 활용되고 있다[11]. Fig. 3은 제품에 적용된 파리는 형태의 무반사 패턴의 형상을 보여준다. 빛의 난반사와 간섭을 유도하기 위해 제품에서 오목한 형상으로 설계되었고, 금형은 제품과 반대되는 볼록한 형상으로 가공하였다. 가공이 완료된 패턴은 3차원 표면형상 측정기(InfiniteFocus, Alicona)를 통해 측정하였다. Fig. 4는 측정된 코어의 패턴 형상을 보여주고, 측정된 패턴의 깊이 값의 범위는 90-104.8 μm로 분포되었으며, 패턴 깊이의 평균값은 99.7 μm이었다.

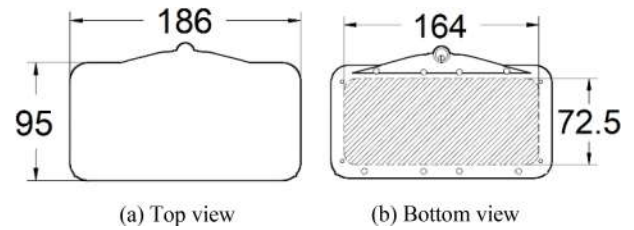


Fig. 2 Shape and size of specimen

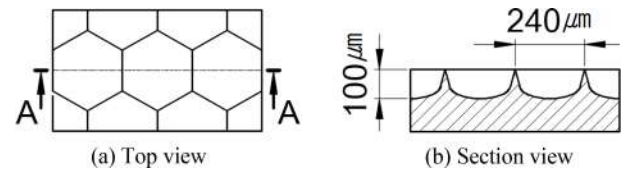


Fig. 3 Shape of micro pattern

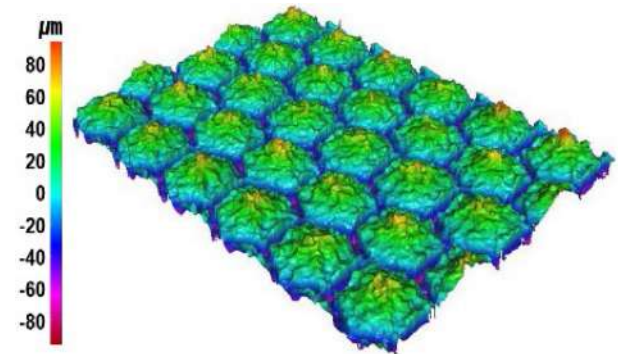


Fig. 4 Micro patterns processed on the mold surface

### 3.3 실험방법

샘플 제작은 180톤 전동식 사출기(S-2000i150B, FANUC)를 사용하였다.

실험인자는 공정조건 중 온도, 속도, 압력과 관련된 항목들로 선정하고자 성형온도, 금형온도, 사출속도와 보압을 선정하였고, 냉각시간을 추가하여 취출 후 수축 정도에 따른 경향을 확인하고자 하였다. 더불어, 속도에서 압력의 전환 시점도 제품의 잔류응력에 영향을 주는 인자이므로 V/P 전환위치도 실험인자에 추가하여 총 6개 인자를 선정하였다.

각 인자수준의 최소, 최대범위는 사출성형 조건변화가 결과값에 큰 영향을 미칠 수 있도록 가능한 차이를 크게 선정하였다. 성형온도와 금형온도는 제작사에서 추천되는 범위의 최소값과 최대값으로 하여, 성형온도는 280, 300°C로 하였고, 금형온도는 80, 100°C를 선정하였다. 사출속도는 최소 성형 및 금형온도 조건에서 선정하였다. 계량완료 80 mm에서 V/P 위치 16 mm까지 성형시 미성형이 발생되지 않는 속도 20 mm/s를 최소 사출속도로 선정하였다. 이 때, 제품의 충진률은 95.5%이었으며, 최대 V/P 위치는 충진률 92.7%에 해당하는 18 mm로 하였다. 최저보압조건은 18 mm의 V/P 위치에서 보압적용시 수축이 발생되지 않는 400 kgf로 선정하였다. 최대 속도 및 보압조건은

Table 3 DOE by injection conditions

Case	Melt temp. [°C]	Mold temp. [°C]	Injection speed [mm/s]	V/P position [mm]	Holding pressure [kgf]	Cooling time [s]
1	280	80	20	16	400	15
2	300	80	20	16	800	15
3	300	100	20	16	400	30
4	280	100	60	16	400	15
5	300	100	20	18	400	15
6	300	80	60	18	400	15
7	280	100	20	18	800	15
8	280	80	60	18	800	15
9	280	80	20	18	400	30
10	300	80	20	18	800	30
11	280	100	20	16	800	30
12	300	100	60	18	800	30
13	280	100	60	18	400	30
14	280	80	60	16	800	30
15	300	80	60	16	400	30
16	300	100	60	16	800	15

최대 성형 및 금형온도에서 제품 테두리부에 플래쉬가 발생하지 않는 속도 60 mm/s와 보압 800 kgf로 결정하였다. 마지막으로 냉각시간은 록 핀이 고화되어 취출이 가능한 시간인 15초를 최소시간으로 하였고, 최대시간은 최소시간의 두배에 해당하는 30초로 선정하였다.

주인자를 확인하기 위해 미니탭(Minitab)을 이용하여 실험계획을 설계하였다. 인자별 2수준으로 하는 해상도 IV의 2<sup>6-2</sup> 부분요인 배치법으로 구성하였다. Table 3은 설계된 실험계획에 의한 인자의 수준을 보여준다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 휨변형

제작된 샘플의 휨변형은 비접촉식 3차원 측정기(ZIP300, ogp)를 이용하여 측정하였다. 측정은 Fig. 5(a)에서 나타난 것과 같이 평탄한 블록위에 샘플을 위치시킨 후 블록면을 기준으로 Fig. 5(b)에 나타난 9점을 측정하였다. 각 위치에서 측정된 높이에서 제품의 두께(1.8 mm)를 뺀 값을 각 위치의 변형값으로 하였다.

각 Case별 1-9번 위치에서의 최소, 최대, 평균값을 Table 4에 기재하였다. 최소값과 최대값의 위치는 괄호 안에 나타내었다. 최소값과 최대값의 위치는 SFT별로 차이를 보임을 확인할 수 있었다. Φ7 μm SFT의 모든 최대값은 7번에 위치했으며, 최소값은 대부분 8번에서 확인되었고, 일부 Case에서는 2, 9번

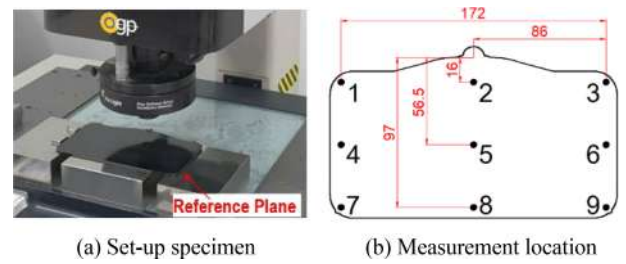


Fig. 5 Warpage measuring system

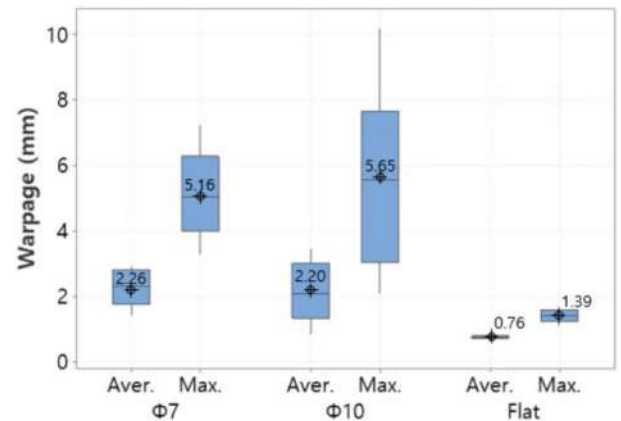


Fig. 6 Average and maximum box plot of warpage according to SFT

위치하였다. Φ10 μm SFT에서는 Case에 따라 3번과 7번에서 최대값을 보였다. 최소값은 대부분 9에서 위치했지만, 몇 개의 Case에서는 1, 2, 8 위치에서 확인되었다. Flat SFT의 경우 모든 최대값은 3번에서 확인되었고, 2번과 제품 중앙인 5번에서 변형이 가장 적은 것으로 나타났다.

Fig. 6은 조건별 제품의 휨량을 평균값과 최대값으로 비교한 그림(Box Plot)이다. 휨량은 원형 SFT와 Flat SFT에서 많은 차이를 보였다. 평균값보다는 최대값을 기준으로 휨량을 정의할 때 육안으로도 확인되는 샘플 간 휨량 차이를 대변할 수 있었다. 예로, 전체 샘플 중 가장 휨량이 큰 Φ10 μm SFT의 Case 5와 가장 휨량이 작은 Flat SFT Case 12에서의 최대값과 평균값의 차이를 비교해 보았다. 최대값을 기준으로 하는 경우 차이는 9.144 mm였고, 평균값을 기준으로 하는 경우 차이는 2.737 mm로 차이가 감소하였다. 때문에, 본 연구에서는 최대값을 제품의 변형량으로 정의하여 SFT간 휨량을 비교하였다.

SFT별 최대 휨량의 평균값 차이를 확인하기 위해 분산분석(ANOVA)을 진행하였다. 분산분석 결과, Φ10 μm SFT는 휨량이 5.65 mm로 가장 컸으며, 사출 조건에 대한 표준편차도 2.51로 조건변화에 가장 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. Φ7 μm SFT의 평균 휨량은 5.16 mm로 Φ10 μm SFT와 유사한 값을 가졌지만, 표준편차는 1.26으로 조건에 대한 영향은 Φ10 μm SFT 대비 작은 것을 확인할 수 있었다. Flat SFT는 평균 1.39 mm로 원형 SFT 대비 매우 작은 휨량을 보였으며, 표준



Table 4 Results of warpage and gloss

Case	Warpage [mm]									Gloss [GU]		
	Φ7			Φ10			Flat			Φ7	Φ10	Flat
	Min.	Max.	Average	Min.	Max.	Average	Min.	Max.	Average			
1	0.246 (8)	5.702 (7)	2.830	0.737 (9)	7.780 (7)	2.926	0.089 (2)	1.627 (3)	0.872	0.526	0.329	0.341
2	0.363 (8)	3.782 (7)	1.632	0.178 (9)	2.588 (3)	1.016	0.310 (5)	1.423 (3)	0.793	0.470	0.328	0.339
3	0.676 (8)	6.631 (7)	2.548	0.629 (9)	9.207 (7)	3.051	0.188 (5)	1.716 (3)	0.811	0.339	0.241	0.316
4	0.796 (9)	6.458 (7)	2.796	0.631 (9)	7.687 (7)	3.464	0.180 (5)	1.424 (3)	0.733	0.341	0.253	0.324
5	0.698 (8)	7.261 (7)	2.841	0.357 (9)	10.213 (7)	3.456	0.069 (2)	1.682 (3)	0.856	0.349	0.233	0.319
6	0.277 (8)	4.398 (7)	2.238	0.504 (8)	4.708 (3)	1.854	0.046 (2)	1.487 (3)	0.745	0.484	0.330	0.338
7	0.653 (8)	5.777 (7)	2.605	0.102 (9)	6.496 (7)	2.352	0.261 (5)	1.238 (3)	0.766	0.403	0.262	0.314
8	0.597 (8)	4.686 (7)	1.843	0.100 (1)	2.629 (3)	1.255	0.278 (5)	1.261 (3)	0.694	0.497	0.371	0.338
9	0.274 (8)	5.388 (7)	2.923	0.941 (2)	7.655 (7)	2.941	0.024 (2)	1.566 (3)	0.800	0.549	0.363	0.333
10	0.359 (8)	3.711 (7)	1.616	0.158 (9)	2.110 (3)	0.862	0.303 (5)	1.336 (3)	0.759	0.480	0.342	0.342
11	0.711 (2)	5.634 (7)	2.427	0.288 (9)	5.486 (7)	2.299	0.269 (5)	1.193 (3)	0.728	0.403	0.268	0.324
12	0.494 (9)	4.145 (7)	1.769	0.162 (1)	3.705 (3)	1.603	0.303 (5)	1.069 (3)	0.727	0.305	0.273	0.313
13	0.781 (8)	7.027 (7)	2.913	1.042 (8)	7.126 (3)	3.415	0.021 (2)	1.308 (3)	0.682	0.396	0.271	0.324
14	0.435 (8)	3.281 (7)	1.421	0.181 (9)	2.820 (3)	1.056	0.284 (5)	1.121 (3)	0.652	0.502	0.374	0.345
15	0.478 (8)	4.656 (7)	2.031	0.305 (1)	5.676 (3)	1.820	0.135 (2)	1.521 (3)	0.779	0.464	0.329	0.345
16	0.454 (9)	3.962 (7)	1.767	0.227 (1)	4.495 (3)	1.902	0.309 (5)	1.196 (3)	0.723	0.299	0.264	0.305

편차도 0.20으로 조건 변화에 가장 둔감하였다. Flat 유리섬유는 배향에 따른 제품의 수축 이방성이 적고 단면적이 커서 뒤틀림 하중에 대항하는 힘이 크기 때문에 우수한 변형특성을 갖는 것으로 판단된다.

각 SFT의 휨량에 영향을 주는 인자를 확인하기 위해 실험요인 분석을 진행하였다. 교호작용은 2차 교호작용까지 고려하였으며, 유의하지 않은 교호작용은 오차항으로 보내는 풀링(Pooling)을 진행하여, Fig. 7과 같이 Pareto 차트로 휨의 주인자를 나타내었다. Pareto 차트는 가장 큰 효과에서 가장 작은 효과까지 표준화된 효과의 절대값을 보여준다. X축으로 표시된 표준화된 효과는 효과가 0이라는 귀무 가설을 검정하는 t-통계량이며, Y축은 주인자 및 교호작용의 항(Term)을 표시하고 있다. 또한, 차트에서 점선으로 표시된 기준선은 유의수준을 넘어서는 임계값으로 본 연구에서는 5%를 유의수준으로 지정하였다.

Figs. 7(a), (b)와 같이 Φ7 μm SFT에서는 보압, 금형온도, 성형온도와 사출속도 순으로 휨에 영향을 주는 것으로 나타났으며, Φ10 μm SFT에서는 보압과 금형온도, 사출속도 순으로 영향을 주었다. Fig. 7(c)의 Flat SFT에서는 보압, 사출속도, 성형온도 순으로 휨에 영향을 주었다. 3가지 SFT 모두 보압이 휨에 가장 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 Fig. 8의 주효과도에서도 확인할 수 있었다. 각 SFT의 상대비교를 위해 휨량을 동일한 범위(1~8mm)로 비교하였다. Φ10 μm SFT의 주인자는 다른 조건에 비해 큰 기울기를 가졌고, Flat SFT는 주인자로 확인된 조건들마저도 기울기가 크지 않았다. 또한, 보압이 증가함에 따라 휨량이 작아지는

것도 확인할 수 있었다.

이는, 높은 유리섬유의 함량에도 기지재의 수축제어가 중요하다는 것을 의미한다.

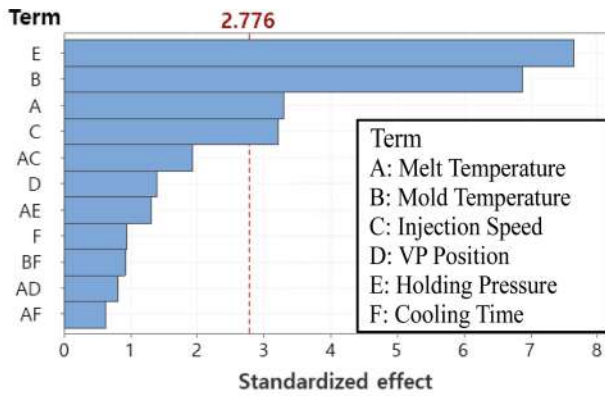
#### 4.2 광택도

광택계(Micro-TRI, BYK)를 이용하여, 패턴면의 광택도를 측정하였다. 패턴의 광택도는 10 GU 이하의 저광택 영역에 해당되므로 측정 각도를 85°로 하였다. 측정 결과는 Table 4에 나타내었다.

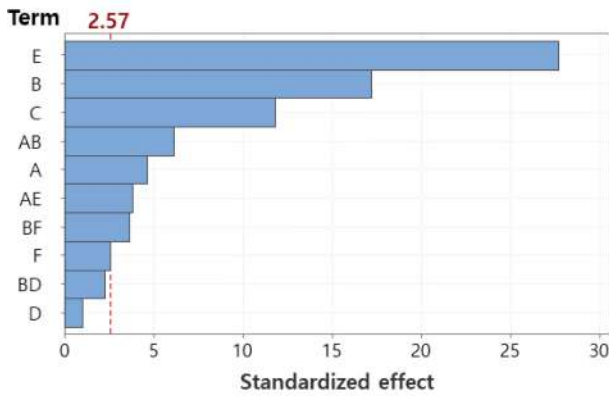
광택도도 휨량과 동일한 방식으로 분석하였다. 먼저, Fig. 9는 분산분석 결과를 보여준다. Φ7 μm SFT의 광택도 평균값은 0.43 GU로 가장 컸으며, 표준 편차도 0.081로 조건 변화에 따른 광택도 변화가 가장 컸다. Φ10 μm SFT와 Flat SFT는 각각 0.30과 0.33 GU로 유사한 평균값을 가지지만, 표준편차는 10 μm SFT가 0.048로 0.013을 갖는 Flat SFT 대비 큰 표준편차를 보였다. Flat SFT는 휨에서의 결과와 마찬가지로 조건변화에 가장 둔감하였다.

SFT별 광택도 결과는 첨가되는 유리섬유의 형태 및 수량이 큰 원인이 되었다. Φ7 μm SFT는 단면적이 작아 많은 수의 유리섬유가 첨가되고, 패턴부로 충전되는 수지를 방해하여 광택도가 상승한 것으로 판단된다.

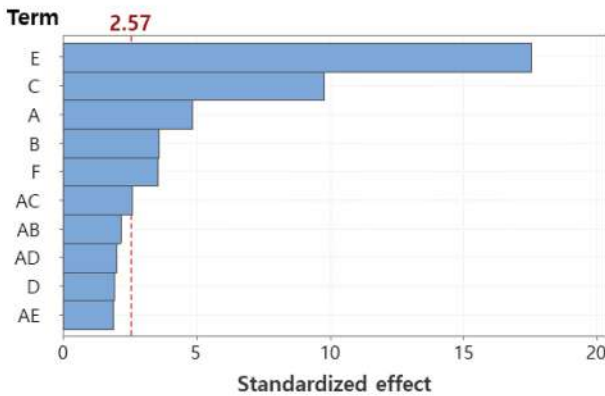
Figs. 10과 11의 Pareto 차트와 주인자도에서 확인할 수 있듯이 3가지 SFT 모두 금형온도가 광택도에 가장 큰 영향을 주는 인자였다. 즉, 금형온도 상승은 유동중 수지의 고화층 형성을 억제하여, 미세패턴 충전에 도움이 된다는 것을 의미한다.



(a) Φ7 μm SFT



(b) Φ10 μm SFT



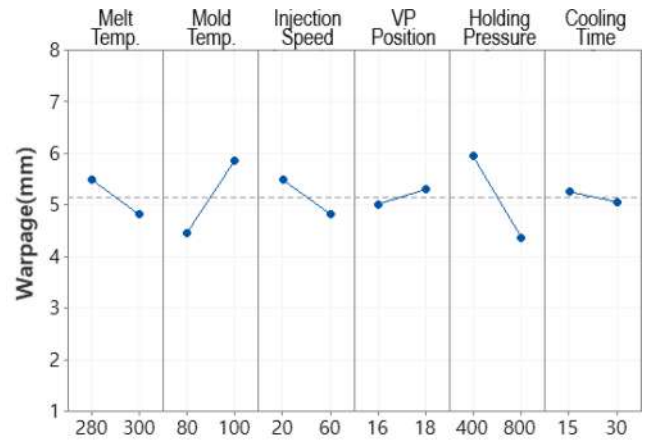
(c) Flat SFT

Fig. 7 Pareto chart of warpage according to SFT type

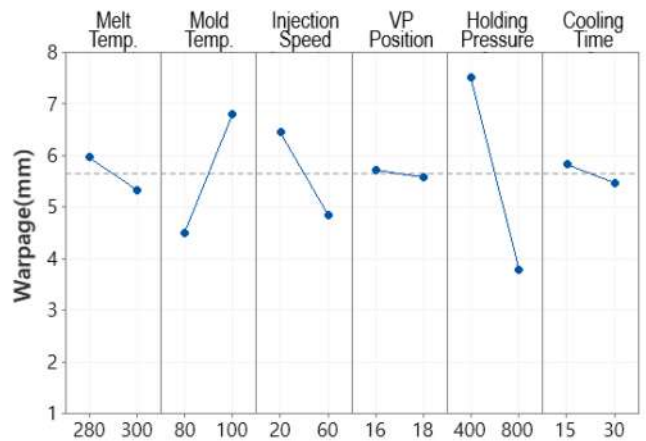
5. 결론

본 연구에서는 유리섬유 단면형상 및 사출조건 변화에 따른 휨변형과 광택도의 변화를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

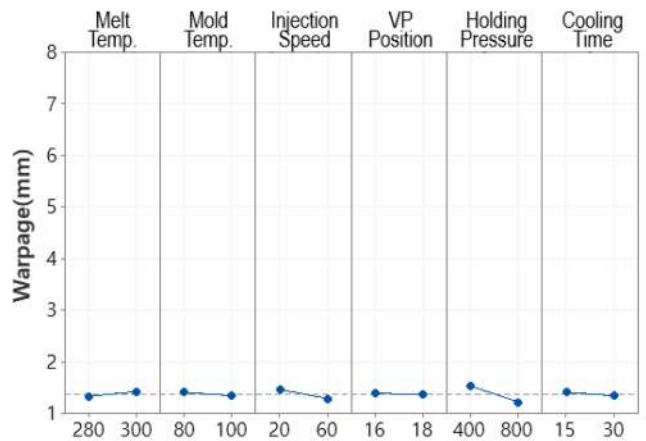
(1) 망소특성을 갖는 휨변형과 광택도에서 Flat SFT가 제품 품질확보에 가장 유리할 것으로 판단된다. 휨변형에서 원형 SFT 대비 월등히 낮은 휨량을 가졌으며, 광택도에서도 가장 낮은 평균값을 가진 Φ10 μm SFT와 유사한 수준임을 확인할 수 있었다.



(a) Φ7 μm SFT



(b) Φ10 μm SFT



(c) Flat SFT

Fig. 8 Main effect plot of warpage according to SFT type

(2) 또한, Flat SFT는 휨변형과 광택도 모두에서 사출성형조건 변화에 매우 둔감하였다. 이러한 특성은 양산 시 환경변화에 의해 발생하는 품질 산포에도 유리할 것으로 예상된다.

(3) 주인자 분석에서 SFT별 차이는 보이지 않았고, 휨변형은 보압, 광택도는 금형온도가 주인자임을 확인할 수 있었다.

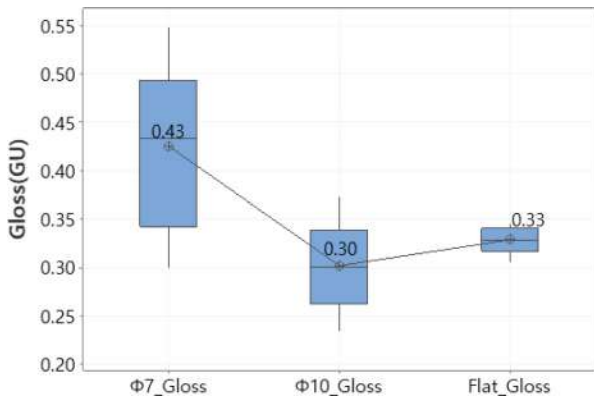
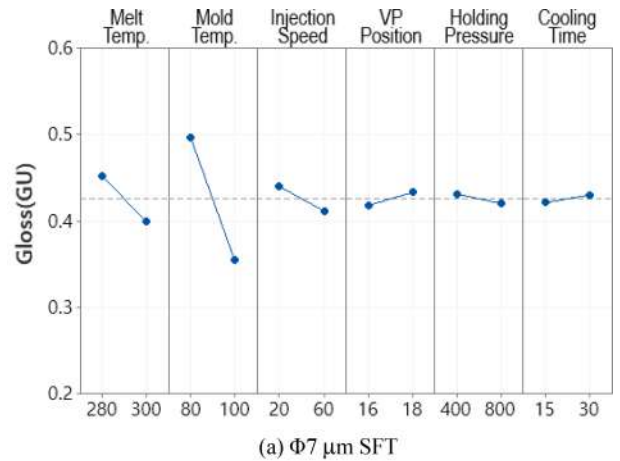
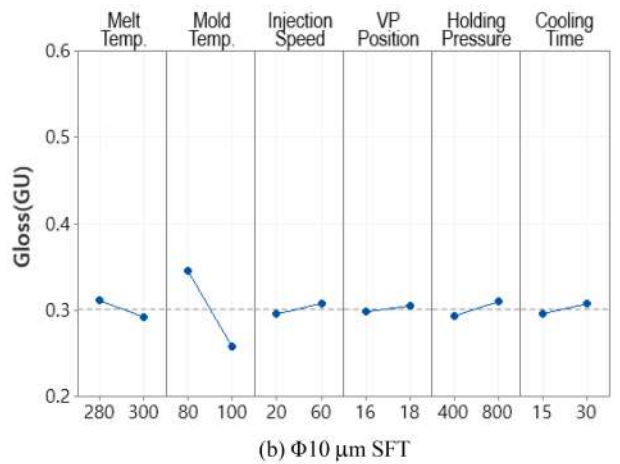


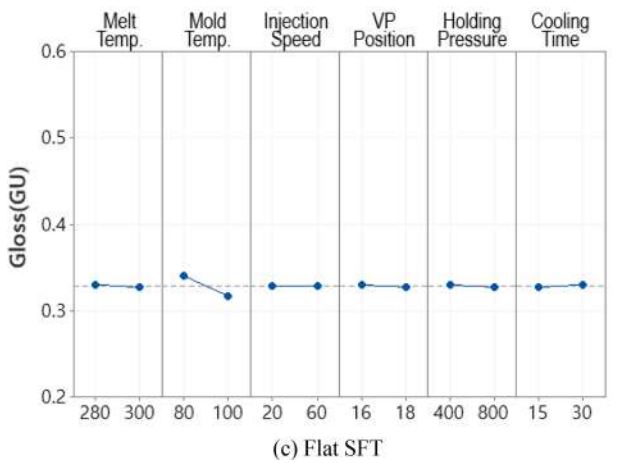
Fig. 9 ANOVA of gloss according to SFT



(a) Φ7 μm SFT

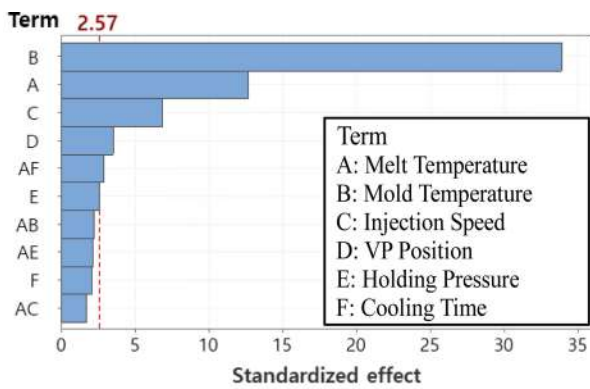


(b) Φ10 μm SFT

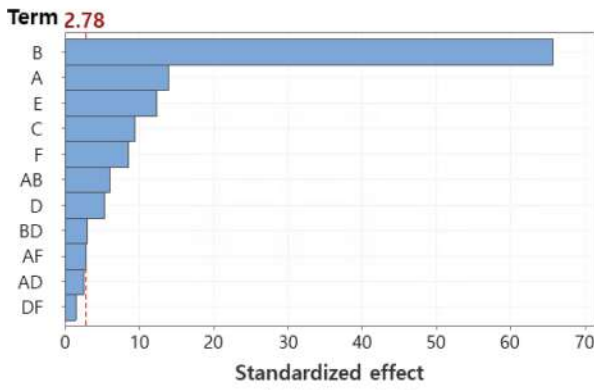


(c) Flat SFT

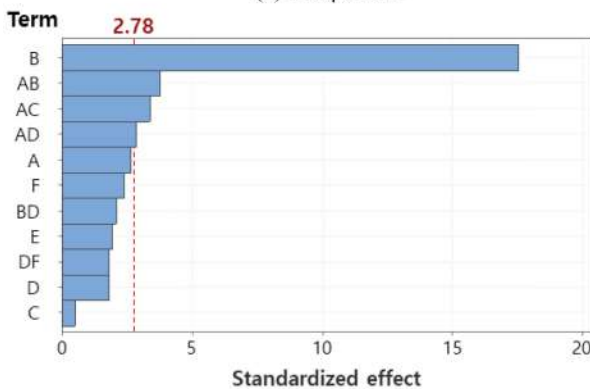
Fig. 11 Main effect plot of gloss according to SFT type



(a) Φ7 μm SFT



(b) Φ10 μm SFT



(c) Flat SFT

Fig. 10 Pareto chart of gloss according to SFT type

REFERENCES

- Jeoung, S., Ha, J., (2018), Lightweighting technology development and trends in automotive, Auto Journal, 40(8), 30-34.
- Liu, X., Fan, X., Guo, Y., Man, B., Li, L., (2021), Warpige optimization of the GFRP injection molding process parameters,

Microsystem Technologies, 27(12), 4337-4346.

3. Yu, M.-J., Park, J.-C., (2022), Optimization of gate and process design factors for injection molding of automotive door cover housing, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 21(7), 84-90.
4. Kim, W., (2009), Technological trend for polymer injection molding, Polymer Science and Technology, 20(1), 30-39.
5. Scholz, S. G., Griffiths, C. A., Dimov, S. S., Brousseau, E., Lalev, G., Petkov, P., (2011), Manufacturing routes for replicating micro and nano surface structures with bio-mimetic applications, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 4(4), 347-356.
6. Cho, S. W., Kang, J. J., (2011), An experimental study on the replication ratio of micro patterns of 7 inch LGP using injection/compression and RHCM, Transactions of Materials Processing: Journal of the Korean Society for Technology of Plastics, 20(1), 11-16.
7. Kwak, Y. S., (2017), A study on a transcription of pattern and improving gloss of the glass fiber reinforced plastic's surface, M.Sc. Thesis, Gongju University.
8. Jung, S. H., (2018), Effect of injection molding conditions on exterior projection of glass fiber, M.Sc. Thesis, Korea University of Technology and Education, Graduate School.
9. Bernasconi, A., Davoli, P., Basile, A., Filippi, A., (2007), Effect of fibre orientation on the fatigue behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide-6, International Journal of Fatigue, 29(2), 199-208.
10. Tang, W., Cao, Y., Qian, L., Chen, Y., Qiu, Y., Xu, B., Xin, F., (2019), Synergistic charring flame-retardant behavior of polyimide and melamine polyphosphate in glass fiber-reinforced polyamide 66, Polymers, 11(11), 1851.
11. Scholz, S. G., Griffiths, C. A., Dimov, S. S., Brousseau, E., Lalev, G., Petkov, P., (2011), Manufacturing routes for replicating micro and nano surface structures with bio-mimetic applications, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 4(4), 347-356.



#### **Il Yong Han**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Incheon National University and Professional in Production Engineering Research Institute, LG Electronics. His research interest is injection molding of vehicle field.

E-mail: hanilyong@inu.ac.kr



#### **Sung Hyun Park**

Specialist in Production Engineering Research Institute, LG Electronics. His research interest is injection molding of vehicle field.

E-mail: sh77.park@lge.com



#### **Min Soo Cheong**

Professional in Production Engineering Research Institute, LG Electronics. His research interest is injection molding of vehicle field.

E-mail: minsoo.cheong@lge.com



#### **Tae Kyun Kim**

Senior Researcher in EP Innovation Center, BASF Korea. His research interest is metal replacement with high performance plastic solutions.

E-mail: tae-kyun.kim@basf.com



#### **Dong Sam Park**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Incheon National University. His research interest is ultrasonic welding & cutting and mechanical design.

E-mail: dspark@inu.ac.kr

# 회전자력 작용에 의한 이온 수송에 관한 실험적 연구

## The Experimental Study of Ion Transportation by Rotating Magnetic Force

김현중<sup>1</sup>, 정관용<sup>1</sup>, 귀하오<sup>1</sup>, 김상영<sup>2,#</sup>  
Hyeon-Jung Kim<sup>1</sup>, Kwan-Yong Jeong<sup>1</sup>, Hao Guo<sup>1</sup>, and Sang-Young Kim<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 군산대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kunsan National University)  
<sup>2</sup> 군산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kunsan National University)  
# Corresponding Author / E-mail: sangyoungkim@kunsan.ac.kr, TEL: +82-63-469-4873  
ORCID: 0000-0002-9202-5306

KEYWORDS: Magnetic field (자기장), Ion transportation (이온 수송), Magneto-hydrodynamics (자기 유체역학), Water electrolysis (수전해), Hydrogen (수소)

*Hydrogen production using water electrolysis is generally a well-known phenomenon. Hydrogen produced using the water electrolysis method is an environment-friendly energy source called 'green hydrogen' that does not emit any environmental pollutants when using renewable energy as an energy source. This study aims to improve the efficiency of hydrogen production by using the ion transportation effect induced by a rotating magnetic force. For this purpose, the experimental conditions for ion transport were determined through an experiment using a copper wire and the rotating magnetic force for water electrolysis was applied using an alkali aqueous solution. Based on the results, an increase in the number of bubbles generated by the rotating magnetic force increased was observed. It is assumed that the efficiency of hydrogen production using water electrolysis can be improved by the rotating magnetic force.*

Manuscript received: July 11, 2022 / Revised: October 12, 2022 / Accepted: October 26, 2022

### NOMENCLATURE

PEM = Polymer Electrolyte Membrane  
HTE = High Temperature Electrolysis  
AE = Alkaline Electrolysis  
RMH = Rotary Magnet Holder  
RPM = Revolutions per Minute

## 1. 서론

수소는 화석연료의 유한성과 온실가스 및 대기 오염물질 배출 문제가 없는 청정 에너지원으로서 미래 에너지원으로 여겨지고 있다. 수소 생산 기술은 원료에 따라 크게 화석연료의 개질법,

바이오매스 전환법, 수전해법으로 분류된다. 수소 생산방법 중 수전해는 높은 순도의 수소를 생산하는 가장 일반적인 방법이다. 수전해를 이용한 수소제조는 간편할 뿐만 아니라 에너지의 저장 및 수송이 쉽다.

수전해 기술은 사용되는 방법에 따라 고분자 전해질막 전기분해(PEM), 고온 전기분해(HTE) 및 알칼리성 전기분해(AE) 방법으로 나눌 수 있다. PEM 방식은 고체 고분자 전해질막을 이용한 수전해 방식이며, 고분자 전해질막은 발생된 가스를 분리하고 수소 이온이 양극에서 음극으로 이동하는 통로 역할을 한다. HTE 방식은 작동 온도가 증가함에 따라 수전해 반응에 필요한 자유 에너지가 감소하면서, 수전해에 필요한 전기량이 감소한다는 원리를 사용한다. HTE 수전해 방식은 고온 또는 고전류 밀도를 필요로 하며, 생산 설비를 축소 및 단순화하고 고순도 수소를 대량으로 얻을 수 있지만 내구성과 효율이 낮고 작업 시간이 짧다. Chauveau et al. [1]은 고온 증기 전기분해가 수소의

대량 생산을 위한 가장 유망한 방법 중 하나라고 보고하였다.

AE 방식은 높은 에너지 효율과 낮은 설치 비용을 보여 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 AE 방식은 알칼리성 전해질을 사용해야 하므로 다양한 안전상의 이유로 취급이 어렵고 금속 부식에 취약하다.

수소 생산 기술에서 효율성과 안전성 확보는 가장 중요한 요소로 여겨진다. 현재 AE 방식을 이용한 수소 생산 효율 향상을 위한 연구는 주로 전극과 촉매의 개발, 전해질의 종류와 농도에 관한 연구가 대부분이다. Nagai et al. [2], Kaninski et al. [3], and De Souza et al. [4,5]은 알칼리성 전해질(KOH, NaOH), 산성 전해질(HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 전극 간 거리, 유동 효과 및 용액 온도와 같은 작업 매개 변수가 물의 수소 생성 속도에 미치는 영향을 조사하였다. Nikoli et al. [6]은 알칼리 전해조를 사용하여 복합 형태의 이온 및 현장에서 활성화하는 화합물을 추가하여 보다 효율적으로 수소를 생성하였으며, 이 보고서에서 생성된 수소의 질량 단위당 에너지 필요량은 약 15% 감소했다. Licht et al. [7]은 교반에 의한 전해조의 흐름으로 인해 전극 표면 근처의 이온 농도가 증가할수록 전기분해 효율이 향상될 수 있음을 보여주었으며, Zhang et al. [8]은 수소 생산을 위한 물 전기분해 시스템의 최적 설계에 대한 지침을 제공했다.

수소는 그 자체가 연료이자 매우 높은 효율로 전기를 생산할 수 있는 에너지원으로서 이차전지보다 훨씬 더 높은 에너지 밀도를 갖는 에너지 저장 매체이다. 수전해 기술을 이용한 수소 생산 시스템의 전해질에 대한 연구 결과에서 수산화칼륨(KOH)이 가장 효과적인 전해질로 평가되며[9], 30% 이상의 농도에서는 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다[10].

수소 이온 전도성 전해질의 구동 환경을 제어하여 ‘이온 활성화 전해질’을 구현하였으며, 기존 최고 효율의 수전해 장치에 비해 수소 생산 효율이 약 4배 높은 것으로 확인되었다[11]. 보고서에서 수소의 생산 효율은 전해질에서 이온의 확산 및 전도 속도에 따라 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다.

물의 이론상 수전해 전압은 1.23 eV이나, 수전해 시스템에는 분리기, 전해조, 반응기 등으로 인해 이온의 흐름을 방해하는 저항이 있어 실제로는 더 높은 전압이 요구된다. 따라서 수전해의 경제성과 효율을 높이기 위해서는 저항을 낮추는 것이 가장 중요하다.

자력이 전자나 이온의 위치를 제어하는데 사용될 수 있다는 것은 잘 알려져 있다. 이 현상은 대부분의 발전소에서 전기를 생산하기 위해 사용되며, 이온가속기, 이온빔 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 자력이 화학 전기장에 미치는 영향에 대한 이전 연구의 대부분은 전기도금을 포함하며, 자력에 의한 로렌츠력이 전해액의 대류를 증가시키고 농도 분극과 음 분극을 감소시켜 저전류 전기도금이 가능해진다. Matsushima et al. [12]은 구리도금 공정에 자력을 가함으로써 이온의 대류가 증가함을 확인하였으며, 자력에 의해 이온 농도 확산 속도와 전류 밀도가 증가하고 구리 표면의 증착 속도가 증가함을 확인하였다. Bund et al. [13]은 두 전극 사이의 전류 방향과 1T의 안정된 자력

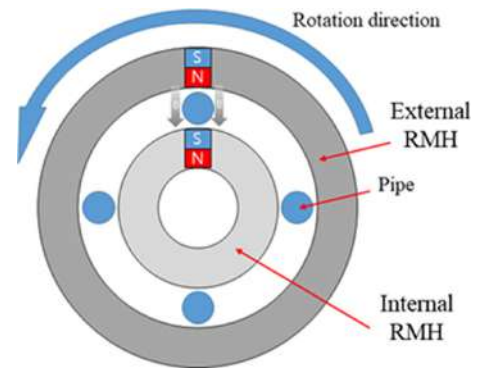


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

방향을 이용하여 전류 밀도를 제한하는 실험을 수행하였다. 이 실험을 통해 자력의 영향으로 미세입자가 형성되는 경향이 있음을 확인하였다.

또한, 자력을 이용한 이온의 위치 제어와 관련된 몇몇 연구가 수행되었다. Yunet et al. [14]은 코로나 방전에 의해 발생하는 이온은 자력을 이용하여 가속할 수 있으며, 자석을 사용하지 않을 때보다 약 3배의 속도를 얻을 수 있다고 보고하였다. 또한 수전해와 관련하여 Iida et al. [15] 및 Hisayoshi et al. [16]은 자력 하에서 전극 사이의 거리와 전해질의 종류에 따른 수전해 실험을 수행하였다. 실험에 따르면 전극 사이의 거리가 짧을수록 용액의 농도가 낮고 자기력이 강할수록 자기력으로 인한 전압차가 커진다는 것을 확인하였다.

따라서 자력에 의해 이온의 이동을 제어할 수 있고, 수전해 시스템의 저항이 낮아져 효율이 향상된 수전해 시스템을 개발할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 수전해 시스템 내부의 RMH의 회전을 통하여 자력의 발생 위치를 회전시켜 이온의 이동을 제어할 수 있는 수전해 시스템을 개발하고, 자력의 회전이 수소 생산에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 고안한 실험 장치의 개념도를 나타낸다. 자석의 다른 극은 파이프에 자기장을 부여하기 위해 파이프의 내부와 외부에 배치되었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 실험 장비는 수용액을 가득 채울 수 있는 2개의 챔버, 챔버를 연결하는 4개의 파이프 및 Rotary Magnet Holder (RMH)로 크게 나눌 수 있다. RMH는 Figs. 1과 2에서 나타난 것과 같이 내부 RMH와 외부 RMH로 구성된다.

### 2.2 Rotary Magnet Holder (RMH) 설계

RMH Type 1은 Fig. 3(a)와 같이 1열의 자석은 원주 방향 20° 간격으로 배치할 수 있도록 하였으며, 내부 및 외부 RMH에 각각 18개씩 배치되도록 설계하였다. 또한, 자기장을 회전시키기

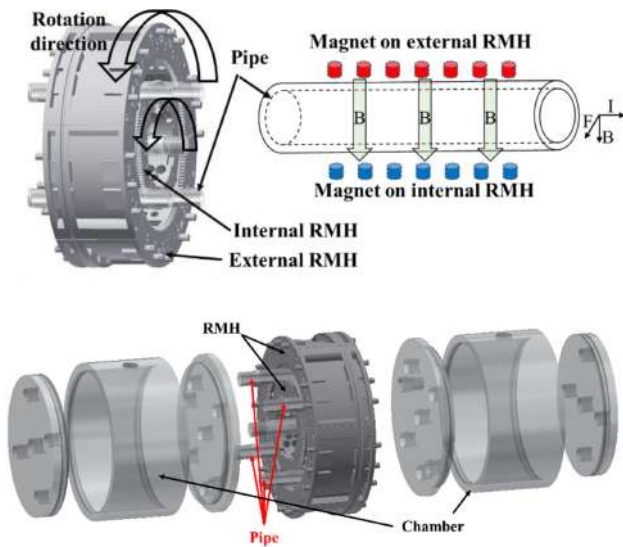


Fig. 2 Configuration of experimental apparatus

위해서 내부 및 외부 RMH는 벨트-폴리 시스템을 적용하여 동일한 속도로 회전하도록 제작되었다. 자석의 배치 간격은 20, 20/40, 40 및 60° 간격으로 선정하였으며, 이온 수송 효과를 확인하기 위해, 먼저 수용액 대신에 파이프에 구리 선을 관통시켜 코일을 형성하고, RMH의 회전속도에 따른 전압 신호를 측정하였다. RMH Type 2는 더 강한 자기력을 제공하기 위해 내부/외부 RMH에 파이프의 길이 방향으로 6열의 자석을 원주 방향으로 15/15/30° 간격으로 배치할 수 있도록 설계되었으며, 각 108개씩 총 216개의 자석을 배치할 수 있다. 이를 이용하여 Fig. 3(b)에 나타난 것과 같이 30° 간격으로 자석을 배치하였다. RMH Type 2를 이용한 실험에서도 RMH Type 1과 마찬가지로 구리 선을 이용하여 자기장 회전 시 발생하는 전압 신호를 측정하였다. 이러한 RMH Type 1 및 Type 2의 실험을 통해 30° 이상의 간격이 자속 변화를 유발하여 최대의 유도기전력을 발생시킴을 확인하였다. 또한, 1열의 자석보다 6열의 자석이 더 큰 유도기전력을 발생시킴을 확인하였다.

이러한 실험 결과로부터 본 연구에서는 Figs. 3(b) 및 3(c)에 나타난 바와 같이 이온 수송 효과를 증대시키기 위하여 파이프의 길이 방향으로 3열의 자석을 최대한 밀착시킨 15° 간격으로 배치 (1 패턴)하였으며, 이러한 패턴을 360° 동안 6번 반복 배치하여 패턴과 패턴 사이의 간격이 30°(15/15/30°)가 되도록 하였다.

RMH Type 3은 Fig. 3(c)와 같이 축 방향으로 각각 7열, 6열, 7열의 자석이 원주 방향 15° 간격으로 배치할 수 있도록 설계되었다. 이 패턴을 원주 방향으로 60° 간격으로 6회 반복하여 RMH Type 3은 원주 방향으로 15/15/30° 간격으로 내/외부 RMH용 자석 각 120개씩 총 240개를 배열하도록 설계되었다. RMH Type 3의 실험에서는 구리 선 대신에 챔버에 수용액을 채우고 구리 전극에 정전압을 인가하여 수전해 실험을 수행하였다.

Fig. 3과 같이 각 RMH 유형의 내부 RMH와 외부 RMH는 동일한 자석 배열을 갖도록 설계되었다. RMH Type 2와 Type 3의

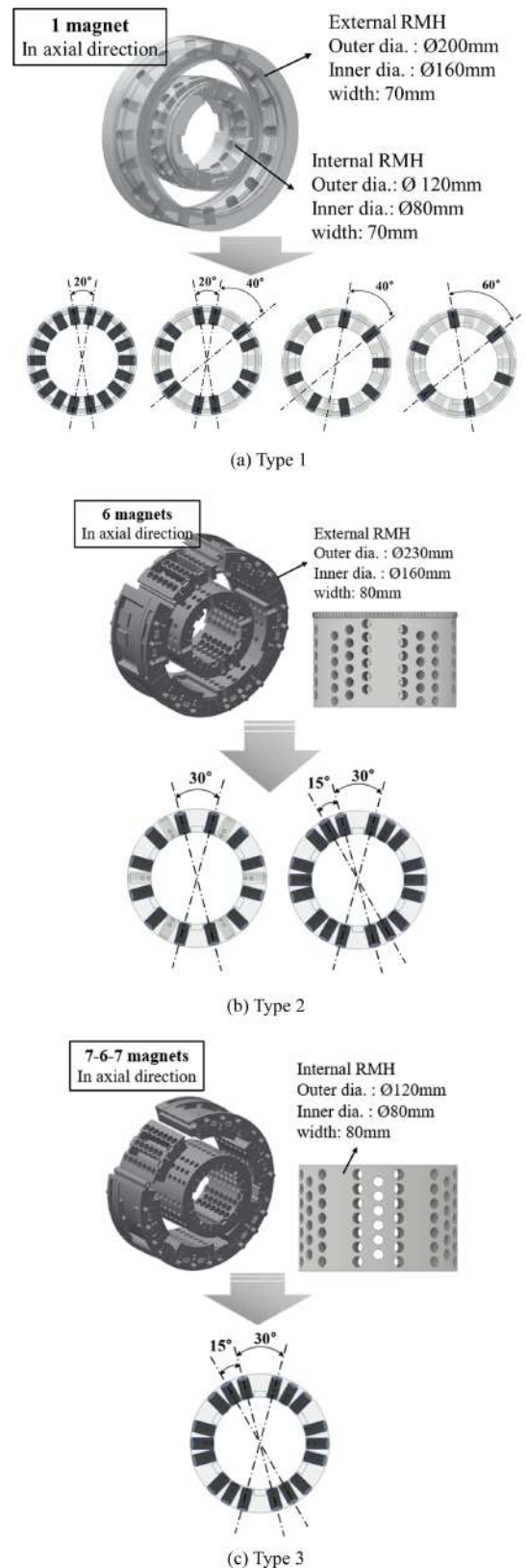


Fig. 3 RMH Types and magnet arrangements (a) Type 1, (b) Type 2, (c) Type 3

외부 및 내부 RMH는 자석의 인력으로 인해 벨트-폴리 시스템 없이 동일한 속도로 회전할 수 있었다.

Table 1 Type of experimental variable

RMH type	Magnetic force [G]	Magnet interval [°]	RPM (Experimental sequence)				Wiring	Aqueous solution [wt%]	Case
			1	2	3	4			
Type 1	4,048.5 (=0.405 T)	20					18	No aqueous solution	Case 1
		20/40	150	250	350	450			Case 2
		40							Case 3
		60							Case 4
Type 2		30					6	Case 5	
		15/15/30	130	217	304	391	18	Case 6	
			Case 7						
Type 3	4,510.3 (=0.451 T)	15/15/30	130	217	304	391	No wiring	NaCl 15	Case 8
								NaCl 20	Case 9
			391	304	217	130		NaCl 20	Case 10

2.3 실험 방법

Table 1은 RMH 유형, 자석 강도, 자석 배열, 회전속도, 측정 방법에 따라 총 10가지로 구분된다. RMH Type 1 실험은 20° (Case 1), 20/40° (Case 2), 40° (Case 3), 60° (Case 4) 간격으로 자석을 원주 방향으로 배열하여 진행하였다. RMH Type 2는 자석을 원주 방향으로 30° (Case 5) 간격으로 배치한 실험과 15/15/30° (Cases 6과 7) 간격으로 배치한 실험에 사용되었다. RMH Type 3은 자석을 15/15/30° 간격으로 배열하는 실험에 사용되었다(Cases 8-10). Cases 1-6의 실험에서는 지름 10 mm, 길이 10 mm의 네오디뮴 자석을 사용했다. 이 자석들 중 20개 샘플의 자력을 각 2회씩 가우스 미터(TM-801EXP, KANETEC, Japan)로 측정한 결과, 평균 약 4,048 가우스의 자기력을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

Cases 7-10에서는 지름 10 mm, 길이 15 mm의 네오디뮴 자석을 사용하였다. 이 자석의 20개 샘플의 자력을 동일한 방법으로 측정한 결과 평균 4,510 가우스의 자기력을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

먼저, 수전해 실험 조건을 도출하기 위해 구리 선을 이용하여 회전 자력에 의해 유도되는 전압을 측정하였다. Cases 1-7의 실험에서는 Fig. 4와 같이 수용액 대신에 구리 선을 파이프에 18회 통과시켜 코일을 형성하였다. RMH의 회전 시 발생하는 전압은 전압 측정장치(cDAQ-9178 및 NI 9206, National Instruments Corp., USA)를 이용하여 측정하였다. Fig. 5는 두 챔버 내부에 구리 전극(100 × 100 mm)이 고정된 모습을 보여준다.

Cases 8-10의 실험에서, 챔버에 수용액을 채우고 RMH를 회전시킨 후, 구리 전극에 DC 10 V의 정전압을 인가하여 수전해 실험을 수행하였다. Case 8의 경우 NaCl 15 wt% 수용액, Cases 9, 10은 NaCl 20 wt% 수용액을 사용하였다.

실험은 DC 10 V 정전압의 음극을 자력의 회전에 의해 수소 이온의 수송이 예상되는 전극에 연결하고 양극을 반대극에 연결하여 수행하였다. 먼저 RMH를 회전시키지 않은 상태에서



Fig. 4 Wiring configuration



Fig. 5 Copper electrode

DC 10 V 정전압을 약 60초간 인가하였다. 그 후, RMH의 회전 속도를 약 5초 동안 증가시켜 약 55초(Case 8) 및 약 35초 (Case 9) 동안 유지하였으며, 이 과정을 회전속도가 391 RPM이 될 때까지 반복하였다.

Case 10 (NaCl 20 wt%)에서는 RMH의 회전속도를 낮추면서 수전해 실험을 수행하였다. 먼저 RMH를 391 RPM의 속도로



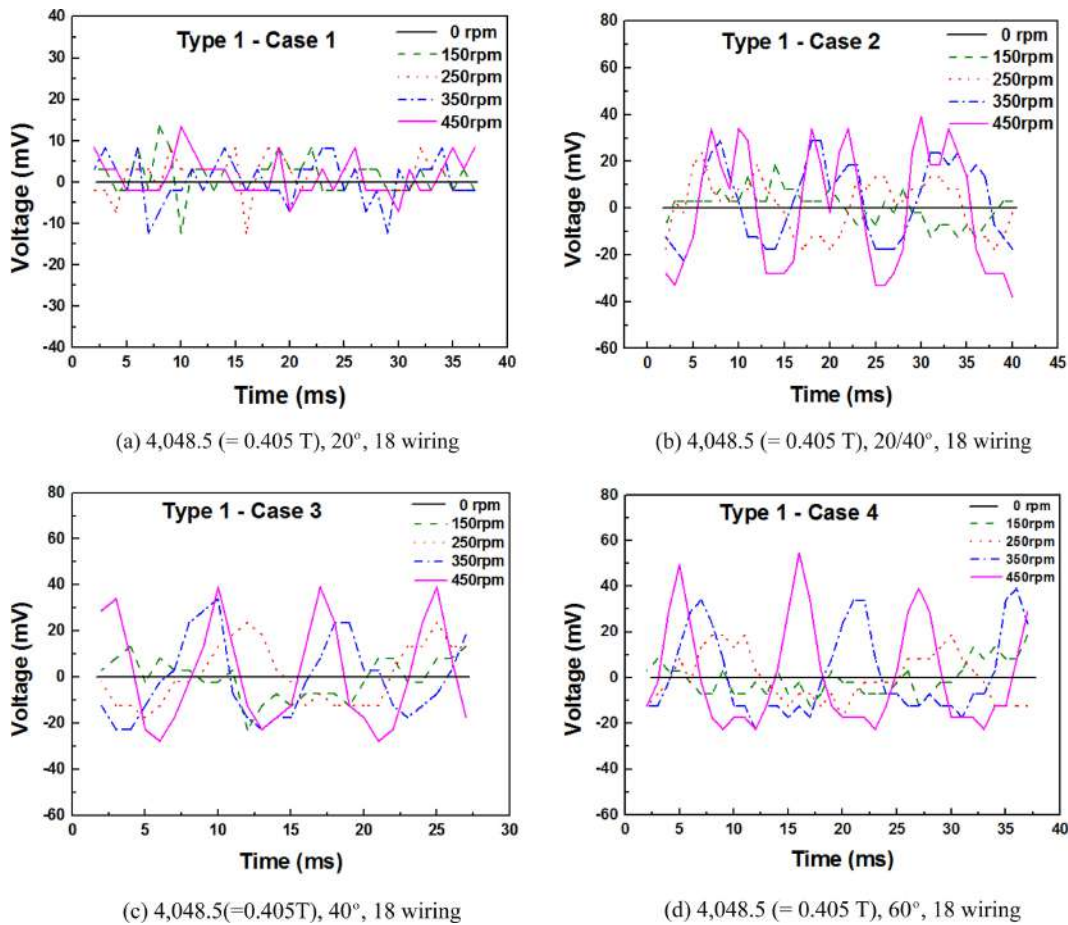


Fig. 6 Voltage signal measurement result of RMH Type 1 (Cases 1-4)

회전시키고 DC 10 V의 정전압을 인가하여 약 30초간 유지하였다. 그 후, RMH의 회전속도를 약 5초 감소시키고 약 25초 동안 유지하였으며, 이 과정을 회전속도가 0이 될 때까지 반복하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구의 목적은 RMH 회전속도, 자석 간격, 자석 수 변화에 따른 회전 자력이 수전해 반응에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 이를 위해 구리 배선을 이용한 유도 전압 측정과 NaCl 수용액을 이용한 수전해를 통한 실험적 연구를 수행하였다.

#### 3.1 회전 자력에 의한 전압 신호 측정 결과

수전해의 실험 조건을 알아보기 위해 Cases 1-7의 실험을 통해 회전 자력에 의해 유도된 전압을 측정하여 분석하였다.

##### 3.1.1 RMH Type 1

Fig. 6은 RMH Type 1 (Cases 1-4)의 전압 신호 측정 결과를 나타낸다. Fig. 6(a)는 Case 1의 실험에서 얻은 RMH의 회전속도에

따른 전압 신호를 나타낸 것이다. Case 1은 축 방향으로 1열의 자석을 배치하고, 원주 방향으로 20° 간격으로 18개의 자석(내/외부 RMH 각각)을 배치하였다.

RMH가 회전하지 않을 때는 전압 신호가 측정되지 않았지만, RMH가 회전할 경우 전압 신호가 발생했다. Case 1의 전압 신호의 전위차는 회전속도가 450 RPM일 때 약 15 mV로 측정되었으나 회전속도 증가에 따른 큰 차이는 관찰되지 않았다. 이는 자속을 변화시키기에는 자석 사이의 배열 간격이 너무 짧기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 6(b)는 Case 2의 실험에서 구한 RMH의 회전속도에 따른 전압 신호를 보여주고 있다. Case 2의 실험을 통해 자력의 회전속도가 증가할수록 유도전압이 증가함을 측정하였다. Case 2의 전압 신호의 전위차는 450 RPM에서 약 70 mV로 측정되었다. Case 1과 달리 전압 신호의 마루에서 두 개의 파장을 확인하였으며, 이는 자석의 배치 간격(20/40°)에 따른 현상으로 생각된다.

Fig. 6(c)는 Case 3의 실험에서 얻은 RMH의 회전속도에 따른 전압 신호를 보여준다. 앞의 경우와 마찬가지로 자력의 회전속도가 증가할수록 더 높은 전위차가 유도되는 것으로 측정되었다. 이러한 결과로부터 Case 1에서 사용한 20°는 자석의 배열

간격이 너무 좁아 적합하지 않은 것으로 판단된다. Case 3의 전압 신호의 전위차는 450 RPM에서 약 70 mV로 측정되었으며, Case 2와 같은 마루에서 파장 형태의 전압 신호는 관찰되지 않았다. 이는 자석 배열의 차이 때문이라고 생각된다.

Fig. 6(d)는 Case 4의 실험에서 구한 RMH의 회전속도에 따른 전압 신호를 보여준다. Case 4의 경우 전압 신호의 최대 전위차는 450 RPM에서 약 80 mV에서 측정되었으나, 평균 전위차는 차이는 Cases 2 및 3의 실험 결과와 유사했다.

RMH Type 1을 이용한 Cases 1-4의 실험 결과로부터 자속의 변화를 주기에는 자석 배열 간격 20°가 너무 짧아서 높은 전위차가 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 또한, 40° 이상의 모든 자석 배열 간격은 유사한 전위차를 생성할 것으로 생각된다. 또한, RMH 축 방향으로 1열의 자석 배치는 이온 수송을 위한 충분한 동력을 제공하지 못한다고 생각되었다.

3.1.2 RMH Type 2

Fig. 7는 RMH Type 2 (Cases 5-7)의 전압 신호 측정 결과를 나타낸다. RMH Type 2에서는 자력의 작용 범위를 넓히기 위해 6열의 자석을 축 방향으로 배열하였다.

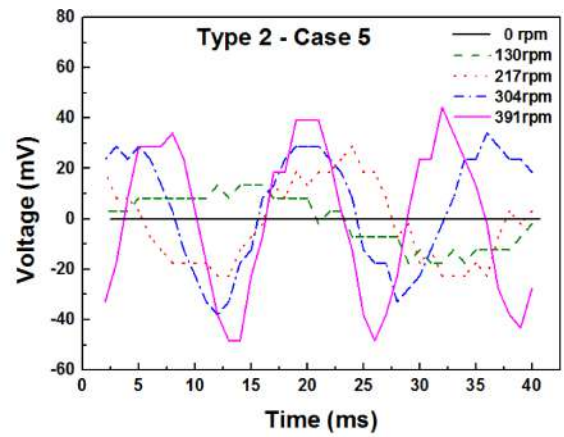
Fig. 7(a)는 Case 5의 실험에서 얻은 RMH의 회전속도에 따른 전압 신호를 나타낸다. Case 5는 원주 방향으로 30° 간격으로 자석을 배치하였다. 전압 신호의 전위차는 391 RPM에서 약 90 mV로 측정되었다. RMH에 장착되는 자석의 수를 늘렸음에도 불구하고 Type 1에 비해 전위차는 크게 증가하지 않았다. 이는 6개의 배선만을 이용하여 측정했기 때문인 것으로 생각된다. 전선의 수가 증가할수록 전위차가 커지므로 18개의 전선으로 동일한 실험을 하면 전선의 수에 비례하여 전위차가 증가할 것으로 예상된다.

Fig. 7(b)는 Case 6의 실험에서 RMH의 회전속도에 따른 전압 신호를 보여주고 있다. Case 6 실험에서는 자석을 원주 방향으로 15/15/30° 간격으로 배치하였다. 전압 신호의 전위차는 391 RPM의 회전속도에서 약 300 mV로 측정되었다.

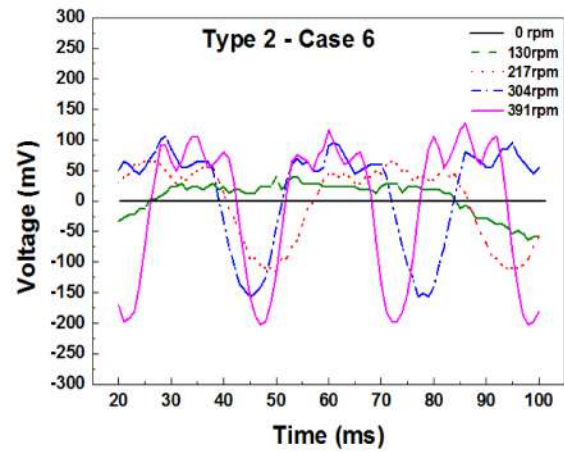
Case 2의 실험 결과와 같이 전압 신호의 마루에서 3개의 파장이 관찰되었다. 이는 15° 자석 배열 간격에 의한 것으로 생각된다.

Case 5의 결과와 비교하여 Case 6의 배선 수가 18개로 3배 증가함에 따라 전위차는 약 90 mV에서 약 300 mV로 약 3.3배 증가하였다. 또한, 1열의 자석을 축 방향으로 배치한 RMH Type 1 (Cases 2, 3 및 4)과 비교하여 6개의 자석을 축 방향으로 배치했을 때 약 70 mV에서 약 300 mV로 전위차가 약 4.3배 증가하는 것으로 측정되었다.

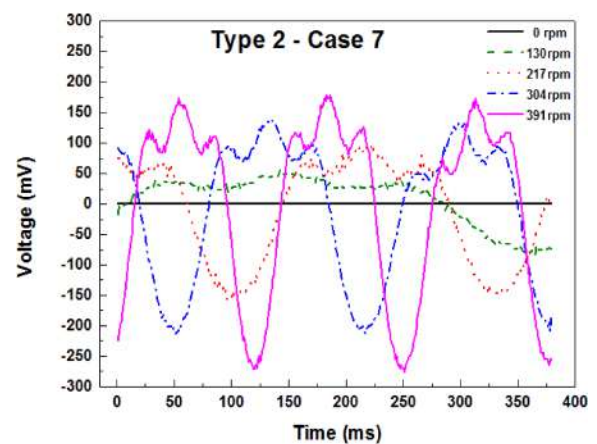
Fig. 7(c)는 Case 7의 실험에서 RMH의 회전속도에 따른 전압 신호를 보여주고 있다. Case 7에서는 Case 6보다 약 11% 더 강한 자석(4,510 G)을 사용하여 실험을 수행하였다. Case 7에서 측정된 전압 신호의 전위차는 391 RPM의 회전속도에서 약 450 mV였으며, 이는 Case 6보다 약 150 mV 높다. 이 결과로부터 자기력이 약 11% 증가하면 약 50% 증가된 전위차를 생성할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 4,048.5 (= 0.405 T), 30°, 6 wiring



(b) 4,048.5 (= 0.405 T), 15/15/30°, 18 wiring



(c) 4,510.3 (= 0.451 T), 15/15/30°, 18 wiring

Fig. 7 Voltage signal measurement results of RMH Type 2 (Cases 5-7)

3.1.3 RPM 속도에 따른 최대 전압차 측정 및 분석

Fig. 8은 실험 결과를 바탕으로, RMH Type 1과 Type 2의 RPM 속도에 따른 최대 전위차를 측정된 결과를 보여주고 있다

Fig. 8(a)는 RMH Type 1 (Cases 1-4)의 RMH 회전속도에

다른 최대 전위차를 측정된 결과를 나타낸다. Cases 2-4의 실험에서는 회전속도가 증가함에 따라 최대 전위차 또한 증가하는 특성을 나타냈다. Case 1의 경우 회전속도의 증가에 따른 큰 차이는 측정되지 않았으며, 450 RPM에서 최대 전위차가 약 15 mV로 감소하였다. 이는 자석 사이의 배열 간격이 20°로 Cases 2-4에 비해 짧기 때문인 것으로 생각된다. Case 2의 경우 최대 전위차가 약 85 mV로 가장 컸으며, Cases 3 및 4와 큰 차이는 없었다. RMH Type 1을 이용한 Cases 1-4의 실험 결과로부터 자속의 변화를 주기에는 자석 배열 간격 20°가 너무 짧아서 높은 전위차가 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 또한, 40° 이상의 모든 자석 배열 간격은 유사한 전위차를 생성할 것으로 생각된다. 또한, RMH 축 방향으로 1열의 자석 배치는 이온 수송을 위한 충분한 동력을 제공하지 못한다고 생각되었다.

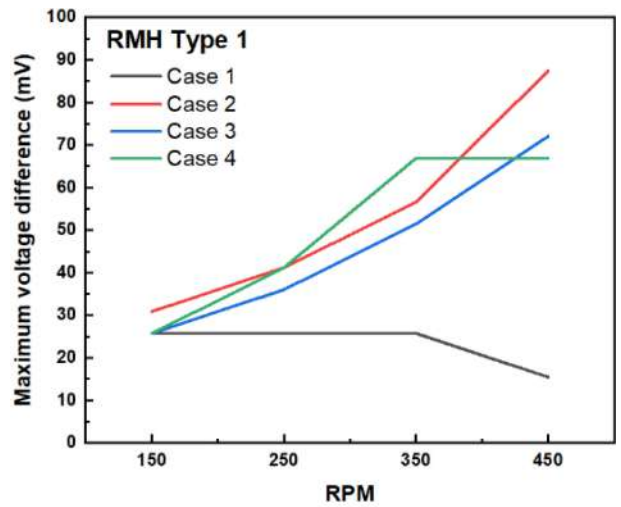
Fig. 8(b)는 RMH Type 2 (Cases 5-7)의 RMH 회전속도에 따른 최대 전위차를 측정된 결과를 나타낸다. Cases 5-7의 경우 회전속도가 증가함에 따라 최대 전위차 또한 증가하는 특성을 나타냈으며, 이는 Cases 1-4의 실험 결과와 유사했다. Case 7의 경우 최대 전위차가 391 RPM에서 450 mV로 Cases 5-7 중 가장 컸으며, Fig. 8(a)의 결과와 비교하여 최대 전위차가 가장 컸던 Case 2보다 약 365 mV 더 증가하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 최대 전위차가 가장 컸던 Case 7의 경우 수전해 실험 시 가장 좋은 효율을 보여줄 것이라고 생각된다.

RMH Type 1과 Type 2를 이용한 실험 결과는 배관에 전선을 관통시켜서 코일을 형성하고, 전압 측정장치(NI cDAQ-9178, National Instruments, USA)를 이용하여 자기장 회전 시에 발생하는 전압 신호를 측정된 결과를 나타낸다. RMH 회전 시 자력의 세기 및 RMH의 회전속도가 증가함에 따라 전위차가 증가하고 파장이 짧아졌다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 자석의 배열, 자력의 세기 및 자기장 회전속도에 비례하여 전하 및 이온의 수송량 및 속도가 증가될 것으로 생각된다.

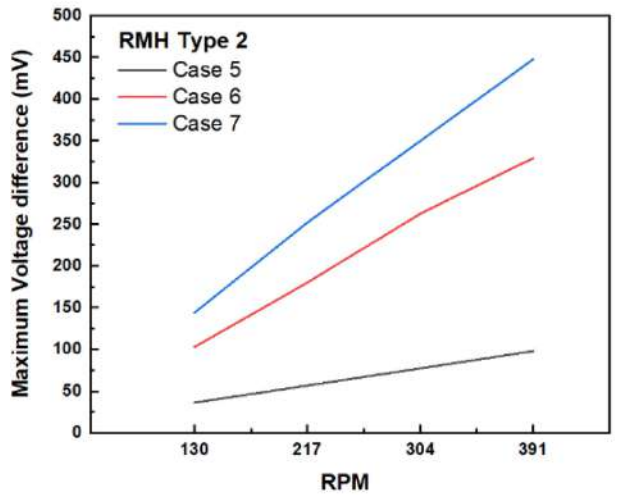
3.2 알칼리 전기분해에 대한 자기장의 영향

Fig. 9는 RMH의 회전속도, 자석의 간격, 전해질의 농도를 실험 조건으로 선정하고, 수전해 실험에서 자력의 회전에 따른 기포의 양을 관찰한 결과를 나타내며, Cases 8에서 10으로 RMH의 회전속도를 변경하기 직전의 음극의 사진이다. 모든 사진은 같은 날짜에 동일한 조명 아래서 동일한 카메라 셔터스피드(1/60초)로 동일한 실험실에서 촬영되었다.

Fig. 9(a) NaCl 15 wt% 수용액을 이용한 수전해 실험(Case 8)에서 RMH의 회전속도가 증가함에 따라 음극에서 발생하는 기포 사진이다. 전기분해 장치에 정전압을 인가하기 시작한 후 RMH가 회전하지 않고 60초 동안 기다린 후 첫 번째 사진을 촬영했다. 첫 번째 사진 촬영 후 RMH의 회전속도를 약 5초 동안 증가시켰고, 증가된 회전속도를 약 55초 동안 유지한 후 다음 사진을 촬영했다. 동일한 과정을 5회 반복하여 RMH의 회전속도를 최대 391 RPM까지 증가시킨 결과, RMH의 회전속도가



(a) RMH Type 1



(b) RMH Type 2

Fig. 8 Maximum voltage difference by RMH rotation speed

증가할수록 기포의 양이 증가하여 반응 수조 내부가 다수의 작은 기포들이 연기와 유사한 형태로 발생하는 현상을 육안으로 관찰하였으며, 이는 음극에서 발생하는 수소로 생각된다.

Fig. 9(b)는 20 wt% NaCl 수용액을 이용한 수전해 실험(Case 9)에서 RMH의 회전속도가 증가함에 따라 음극에서 발생하는 기포 사진이다. 수전해 실험 장치에 정전압을 인가하기 시작한 후 RMH가 회전하지 않고 60초 동안 기다린 후 첫 번째 사진을 촬영했다.

첫 번째 사진 촬영 후 RMH의 회전속도를 약 5초간 증가시켰고, 증가된 회전속도를 약 35초 동안 유지한 후 다음 사진을 촬영했다. Case 9의 실험 결과에서도 Case 8과 마찬가지로 회전속도가 증가할수록 발생하는 기포의 양이 증가함을 관찰하였다. 또한 Case 8에 비해 유지 시간이 짧음에도 불구하고 반응 수조 내부에 더 많은 기포가 발생하여 반응 수조 내부를 육안으로 확인하기 어려울 정도로 뿌연게 되는 현상을 관찰하였다. Case 9의 결과를 통해 수용액의 농도와 수전해 반응속도는 밀접한 관련이

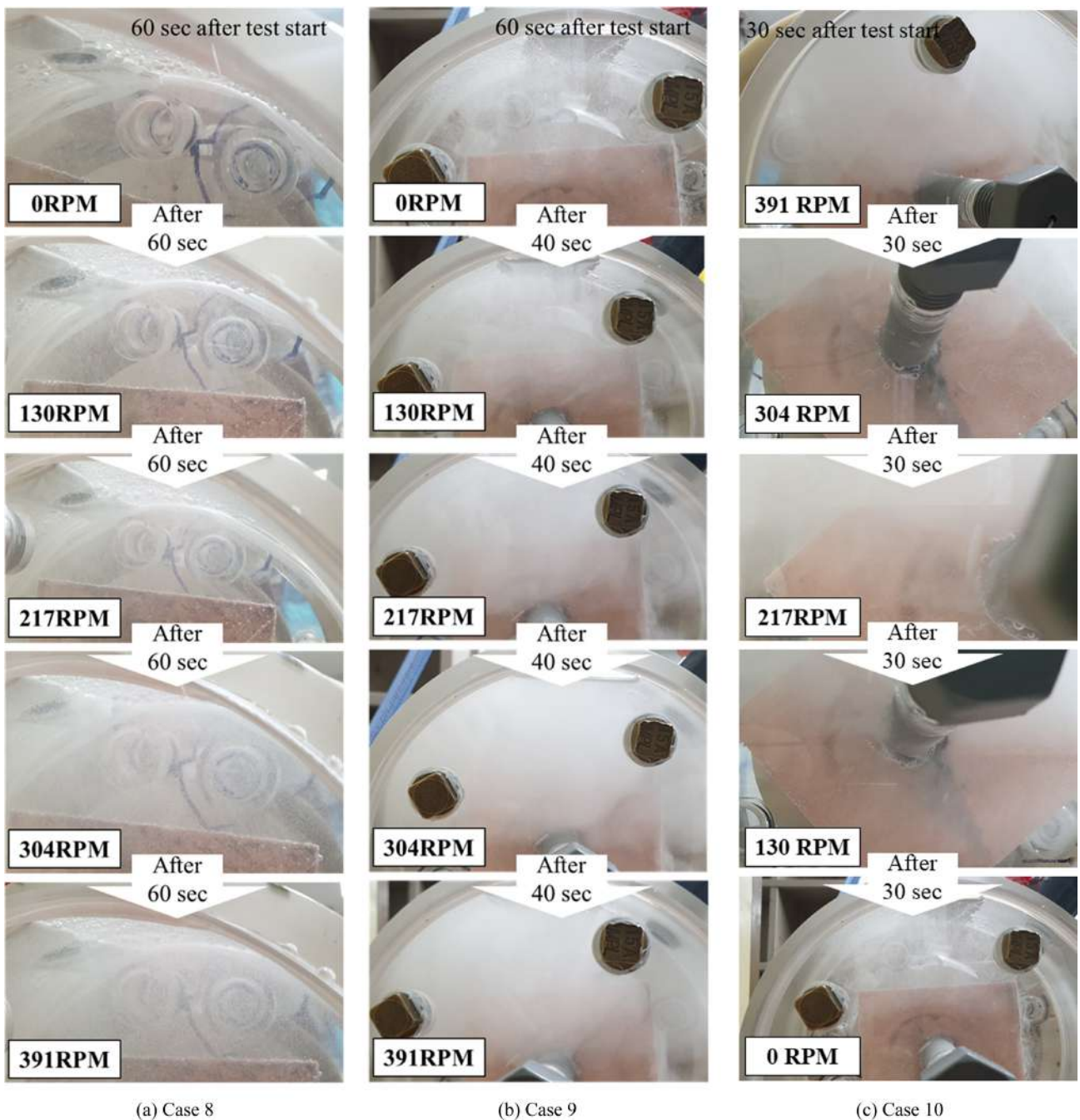


Fig. 9 Experiment of Cases 8-10

있다고 생각된다.

Moon and Pak [9]과 Gilliam 등[10]은 수용액 농도가 수소 생성에 비례하는 경향이 있으며, 약 30% KOH 조건에서 가장 높은 수소 생성을 보였다고 보고하였다. Iida et al. [15]은 정전류를 이용한 수전해 실험에서 수용액의 농도에 따라 IR-Drop의 감소를 보고하였다. 본 연구에서는 정전압을 사용하였기 때문에 수용액의 농도가 증가할수록 반응속도가 증가한다고 생각할 수 있다. 이는 수용액에 더 많은 이온이 존재하고 자력에 의해 수송되는 이온의 수가 증가하기 때문이라고 생각된다.

Cases 8과 9의 실험 결과는 RMH의 회전속도에 관계없이

실험시간이 증가할수록 수전해 반응속도가 증가함을 알 수 있다. 따라서 실험시간이 물의 전기분해에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Case 9와 동일한 조건에서 RMH의 회전속도를 감소시키면서 실험(Case 10)을 수행하였다.

Fig. 9(c)는 NaCl 20 wt% 수용액을 이용한 수전해 실험(Case 10)에서 RMH의 회전속도가 감소함에 따라 음극에서 발생하는 기포 사진이다. 수전해 실험 장치에 정전압과 RMH 회전을 인가하기 시작한 후 30초를 기다린 후 첫 번째 사진을 촬영했다. 첫 번째 사진 촬영 후 RMH의 회전속도를 약 5초간 감소시키고 약 25초 동안 감소된 회전속도를 유지한 후 다음 사진을

촬영했다. 동일한 과정을 5회 반복하여 RMH의 회전속도를 391 RPM에서 0 RPM까지 감소시켰다.

실험 시작 시 RMH는 391 RPM의 속도로 회전하고 동시에 정전압을 인가하였다. 그 결과 Fig. 9(c)와 같이 수전해 반응에 의한 기포가 매우 활발하게 발생하였다. 또한, RMH의 회전속도가 감소할수록 기포 발생량이 감소함을 관찰하였다. Cases 9, 10의 결과로부터 자기력의 회전속도와 수전해 반응속도는 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

Fig. 9에 도시된 음극과 달리, 양극에서는 명백한 기포 발생이 관찰되지 않았다. 대신, 양극 부근의 수용액에서 청색 물질이 생성됨을 관찰하였다. NaCl 수용액과 구리 전극을 사용하였기 때문에 양극에서 염소 이온이 구리와 반응하여 염화구리 화합물이 생성된 것으로 생각된다.

본 연구를 통해 회전 자력과 수전해 반응속도 사이에 관계가 있음을 관찰하였다. 그 결과 회전하는 자력을 이용하여 전기를 발생시키는 것과 같은 방식으로 이온을 수송하는 것이 가능하다고 생각되며, 이 현상을 이용하여 수전해 반응의 속도를 향상시키는 것도 가능하다고 생각된다.

4. 결론

총 3종의 RMH를 설계 및 제작하였다. 또한 회전 자력을 이용한 수전해 반응의 효율을 향상시키기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) RMH Type 1과 Type 2를 사용하고 배선을 이용하여 전압을 측정된 Cases 1-5의 실험 결과로부터 자속 변화를 일으키기에는 20°의 자석 배열 간격이 너무 짧은 것으로 판단되었다. 또한, 40° 이상의 모든 자석 배열 간격은 유사한 전위차를 생성할 것으로 판단된다. 측정된 전압 신호의 전위차와 자석의 배열을 고려하면 본 연구에서는 30°의 자석 배열 간격이 가장 적이라고 생각된다.

(2) RMH의 축 방향 자석의 개수를 1개에서 6개로 늘린 결과, 자력이 작용하는 구간이 확대되었고, 생성된 전압 신호는 70-약 300 mV로 전위차가 약 4.3배 증가하였다.

(3) 사용하는 자석의 자력을 약 4,049 G에서 약 4,510 G로 약 11% 증가시킨 결과, 생성된 전압 신호의 전위차가 약 300 mV에서 약 450 mV로 약 50% 증가하는 것으로 측정되었다.

(4) 배선을 이용한 실험 결과로부터 자기장의 배열, 회전속도 및 세기를 변화시킴으로써 이온수송을 조절할 수 있다고 생각된다.

(5) RMH Type 3을 이용한 Cases 8~10의 실험에서 RMH의 회전속도가 증가할수록 수전해 반응에 의해 발생하는 기포의 양이 증가함을 관찰하였다. 이는 회전하는 자력에 의한 이온수송에 의한 현상으로 생각되며, 이 현상을 이용하여 수전해 반응의 효율을 향상시킬 수 있다고 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 군산시가 지원하는 지역맞춤형 전기차 클러스터 전문인력 양성사업과 교육부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 과학기술분야 기초연구사업(NRF-2019R111A3A01062764)에 의해 지원되었음.

REFERENCES

1. Chauveau, F., Mougin, J., Mauvy, F., Bassat, J.-M., Grenier, J.-C., (2011), Development and operation of alternative oxygen electrode materials for hydrogen production by high temperature steam electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7785-7790.
2. Nagai, N., Takeuchi, M., Kimura, T., Oka, T., (2003), Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(1), 35-41.
3. Kaninski, M. P. M., Stojić, D. L., Šaponjić, Đ. P., Potkonjak, N. I., Miljanić, Š. S., (2006), Comparison of different electrode materials-energy requirements in the electrolytic hydrogen evolution process, *Journal of Power Sources*, 157(2), 758-764.
4. De Souza, R. F., Padilha, J. C., Gonçalves, R. S., De Souza, M. O., Rault-Berthelot, J., (2007), Electrochemical hydrogen production from water electrolysis using ionic liquid as electrolytes: Towards the best device, *Journal of Power Sources*, 164(2), 792-798.
5. De Souza, R. F., Padilha, J. C., Gonçalves, R. S., Rault-Berthelot, J., (2006), Dialkylimidazolium ionic liquids as electrolytes for hydrogen production from water electrolysis, *Electrochemistry Communications*, 8(2), 211-216.
6. Nikolic, V. M., Tasic, G. S., Maksic, A. D., Saponjic, D. P., Miulovic, S. M., Kaninski, M. P. M., (2010), Raising efficiency of hydrogen generation from alkaline water electrolysis-Energy saving, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(22), 12369-12373.
7. Licht, S., Wang, B., Mukerji, S., Soga, T., Umeno, M., Tributsch, H., (2001), Over 18% solar energy conversion to generation of hydrogen fuel; Theory and experiment for efficient solar water splitting, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(7), 653-659.
8. Zhang, H., Lin, G., Chen, J., (2010), Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 10851-10858.
9. Moon, K., Pak, D., (2015), The characteristics of hydrogen production according to electrode materials in alkaline water electrolysis, *Journal of Energy Engineering*, 24(2), 34-39.

10. Gilliam, R., Graydon, J., Kirk, D., Thorpe, S., (2007), A review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(3), 359-364.
11. Kim, J., Jun, A., Gwon, O., Yoo, S., Liu, M., Shin, J., Lim, T.-H., Kim, G., (2018), Hybrid-solid oxide electrolysis cell: A new strategy for efficient hydrogen production, *Nano Energy*, 44, 121-126.
12. Matsushima, H., Bund, A., Plieth, W., Kikuchi, S., Fukunaka, Y., (2007), Copper electrodeposition in a magnetic field, *Electrochimica Acta*, 53(1), 161-166.
13. Bund, A., Koehler, S., Kuehnlein, H., Plieth, W., (2003), Magnetic field effects in electrochemical reactions, *Electrochimica Acta*, 49(1), 147-152.
14. Yun, U. H., Jung, J. S., Kim, J. G., (2017), A study on ionic wind distribution characteristics according to magnetic field in needle-to-ring electrode, *Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Annual Conference*, 77. <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07268405>
15. Iida, T., Matsushima, H., Fukunaka, Y., (2007), Water electrolysis under a magnetic field, *Journal of the Electrochemical Society*, 154(8), E112.
16. Matsushima, H., Kiuchi, D., Fukunaka, Y., (2009), Measurement of dissolved hydrogen supersaturation during water electrolysis in a magnetic field, *Electrochimica Acta*, 54(24), 5858-5862.



**Hyeon-Jung Kim**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University. His research interest is mechanic and hydrogen energy.  
E-mail: khj0069@kunsan.ac.kr



**Kwan-Yong Jeong**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University. His research interest is mechanics.  
E-mail: gwanyongjeong@kunsan.ac.kr



**Hao Guo**

Ms. in the Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University. His research interest is mechanics.  
E-mail: guohao8963@gmail.com



**Sang-Young Kim**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University. His research interest is in the material, fatigue and fracture, mechanic and hydrogen energy.  
E-mail: sangyoungkim@kunsan.ac.kr

# 딥러닝 기반의 열화상 카메라를 이용한 화점 추적 팬-틸트 시스템 구현

## Deep Learning Based Fire Point Chasing Pan-Tilt System Using Thermal Camera

정현재<sup>1</sup>, 박현빈<sup>1</sup>, 김무림<sup>2</sup>, 주백석<sup>3,#</sup>  
Hyeonjae Jeong<sup>1</sup>, Hyunbin Park<sup>1</sup>, Maolin Jin<sup>2</sup>, and Baeksuk Chu<sup>3,#</sup>

<sup>1</sup> 금오공과대학교 대학원 기계공학과 (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology)  
<sup>2</sup> 한국로봇융합연구원 인터랙티브로봇 연구본부 (Department of Interactive Robotics R&D Division, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence)  
<sup>3</sup> 금오공과대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)  
# Corresponding Author / E-mail: bschu@kumoh.ac.kr, TEL: +82-54-478-7398  
ORCID: 0000-0002-3253-1506

KEYWORDS: Deep learning (딥러닝), YOLO (올로), Thermal camera (열화상 카메라), Pan-tilt (팬-틸트), Autonomous tracking (자율 추적), Firefighting (소화)

*There have been frequent fatal accidents of firefighters at fire scenes. A firefighting robot can be an alternative to humans at a fire scene to reduce accidents. As a critical function of the firefighting robot, it is mandatory to autonomously detect a fire spot and shoot water. In this research, a deep learning model called YOLOv7 was employed based on thermal images to recognize the shape and temperature information of the fire. Based on the results of the test images, which were not used for learning purposes, a recognition rate of 99% was obtained. To track the recognized fire spot, a 2-DOF pan-tilt actuation system with cameras was developed. By using the developed system, a moving target can be tracked with an error of 5%, and a variable target tracking test by alternately covering two target braziers showed that it takes about 1.5 seconds to track changing targets. Through extinguishment experiments with a water spray mounted on the pan-tilt system, it was observed that the temperature of the brazier dropped from 600 degrees to 13 degrees. Based on the obtained data, the feasibility of a robotic firefighting system using image recognition was confirmed.*

Manuscript received: December 2, 2022 / Revised: December 22, 2022 / Accepted: December 26, 2022

### 1. 서론

매년 화재현장에서 인명사고가 끊임없이 발생하고 있다. 소방청에서 발표한 연도별 소방 공무원의 부상자 수를 Fig. 1에 그래프로 나타냈다[1]. 자료에 의하면 2012-2016년보다 2017-2020년에 부상자가 약 2배 늘어났고, 2017년 이후로는 화재로 인한 부상자의 수가 가장 많았다. 이를 통해 최근 들어 화재 현상에서의 사고가 더욱 많이 생기고 있고, 특히 화재진압 과정에서 사고가 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

한편, 최근 로봇 관련 기술이 발전함에 따라 소방대원 대신 위험한 현장에 투입할 소방로봇이 잇따라 개발되고 있다. Fig. 2에 현재까지 개발된 여러 소방로봇들을 나타냈다. Fig. 2(a)는 미국 로스앤젤레스 소방서의 RS3 소방로봇이다. RS3 소방로봇은

로봇에 부착된 카메라를 통해 사람이 화재현장을 보면서 수동으로 조작하는 방식을 사용한다[2]. 이런 방식은 카메라의 시점으로만 화재현장을 보고 판단해야 하기 때문에 현장을 완벽하게 파악한 뒤 소방할 수 없다는 문제점이 있다. Fig. 2(b)는 휴림 로봇의 스마트 소방로봇이다. 이 로봇은 화재 감지 시스템과 연동해 화재 위험을 감지하여 소방하는 방식이다[3]. 이 방식은 화재 감지 시스템이 존재하는 시설에만 사용이 가능하다는 한계가 존재하고, 화재 감지 시스템이 고장 난 경우에는 화재를 감지하기 어렵다는 문제점을 가지고 있다.

이런 문제점들로 인해 최근 카메라와 인공지능을 활용해 영상인식 기술로 화염을 인식하는 연구가 활발하게 진행되고 있다[4-10]. Fig. 3은 RGB 카메라로 촬영한 영상을 딥러닝 모델에 적용해 화염을 인식한 연구 사례이다[11]. 이 연구에서는 불이





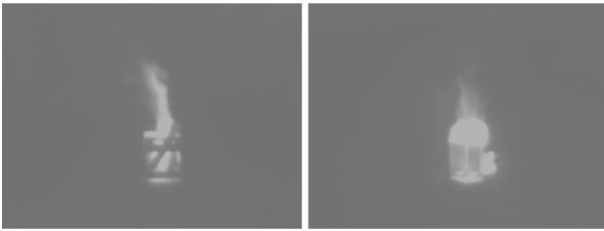


Fig. 5 Examples of image data for training

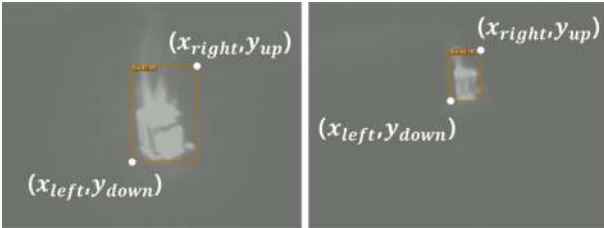


Fig. 6 Detected bounding boxes using YOLOv7

실시간 객체 탐지에 뛰어난 성능을 보이는 YOLOv7을 이용해 화점을 검출하고 이를 소방 설비에 적용하는 시스템을 제안한다.

2.2 화염 검출기를 통한 중심점 추출

화염 검출기를 만들기 위해 화로대를 이용해 불을 발생시키고 학습에 필요한 데이터 셋을 획득했다. 열화상 카메라로 동영상을 촬영한 뒤 프레임별로 나누어 동영상을 이미지화하여 Fig. 5와 같은 학습용 이미지 데이터 1,461장과 검증용 데이터 364장을 만들었다. 이 이미지 데이터를 YOLOv7를 이용하여 학습시키고 Fig. 6과 같이 화염을 인식하는 검출기를 만들었다.

검출기가 화염을 인식한 뒤 이를 추적하기 위해서는 검출기가 생성한 검출박스의 중심점 좌표가 필요하다. 검출기가 검출박스를 생성할 때 사용하는 모서리 점의 x, y좌표를 이용해 검출박스의 중심점 좌표를 계산했다. 이를 계산하는 식은 식(1), 식(2)와 같다. 계산한 중심점의 좌표를 직렬통신으로 팬-틸트 시스템의 모터를 제어하는 MCU (Microcontroller Unit)인 OpenCR 보드로 보낼 수 있도록 했다.

$$x_{center} = (x_{right} + x_{left}) / 2 \tag{1}$$

$$y_{center} = (y_{up} + y_{down}) / 2 \tag{2}$$

3. 팬-틸트 시스템 구성

3.1 비주얼 서보잉 알고리즘

YOLOv7에서 직렬통신을 통해 검출박스의 중심점 좌표를 OpenCR 보드로 보낸 후 Fig. 7과 같은 피드백 제어기법으로 모터를 제어한다[15]. 팬틸트 시스템의 제어 목적은 노즐이 향하는 방향과 화점을 일치시켜 소화하는 것이다. 노즐과 카메라는

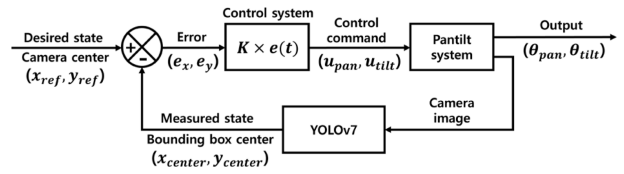


Fig. 7 Feedback control of pan-tilt system

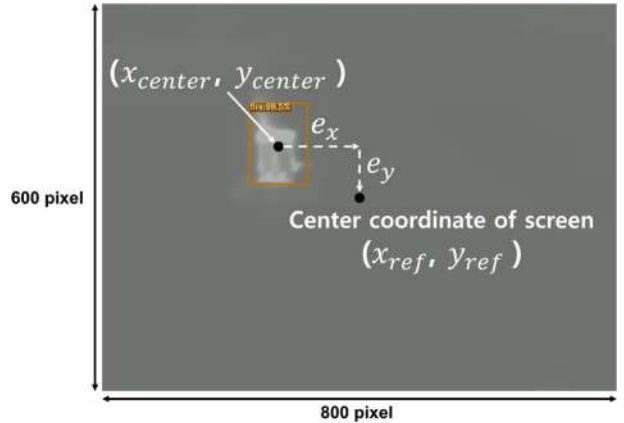


Fig. 8 Error between bounding box and center coordinate

일체형으로 설치되어 있기 때문에 카메라의 광축의 방향은 노즐의 방향과 일치한다. 카메라의 광축은 곧 카메라 화면의 중심이기 때문에 화소로 표현된 화면의 중심(x\_ref, y\_ref)과 목표물의 중심(x\_center, y\_center) 사이의 위치 오차를 최소화하여 카메라의 광축과 목표물을 일치시킴으로써 노즐의 방향이 화점을 향할 수 있도록 제어하고자 했다. 위치 오차를 이용해 두 모터를 제어하는 식은 식(3), 식(4)와 같다. 다음과 같은 피드백 제어를 통해 2개의 모터가 (theta\_pan, theta\_tilt)만큼 움직임으로써 검출박스의 중심이 항상 화면의 중앙에 놓이도록 알고리즘을 구성했다.

$$u_{pan} = K \times e_x = K \times (x_{ref} - x_{center}) \tag{3}$$

$$u_{tilt} = K \times e_y = K \times (y_{ref} - y_{center}) \tag{4}$$

3.2 팬-틸트 시스템 구성

시스템이 목표물인 화점을 추적하기 위해서는 2축으로 움직일 수 있는 팬-틸트 시스템을 구축해야 한다[16]. 모터 2개를 이용해 2축으로 움직일 수 있도록 했고, Fig. 9와 같이 분사 노즐과 일반 카메라 그리고 열화상 카메라를 설치할 수 있는 헤드부를 3D 프린터를 이용해 제작했다. 이때 카메라가 얻은 이미지 정보를 바탕으로 모터를 제어하기 때문에 모터의 회전축과 분사 노즐, 카메라가 동일선상에 위치할 수 있도록 설계해 카메라가 화점을 바라보고 있을 때 노즐도 동일한 곳을 조준할 수 있도록 했다.

분사 노즐이 화점을 정확하게 조준했다면 물을 직사 해야 불에 도달할 수 있다. 직사 살수를 위해서는 높은 압력의 물이 필요하기 때문에 고압용 펌프를 사용했다. 또한, 이에 맞는 고압용 노즐과 장거리 분사가 가능한 고압용 직사 노즐을 사용하여 분사

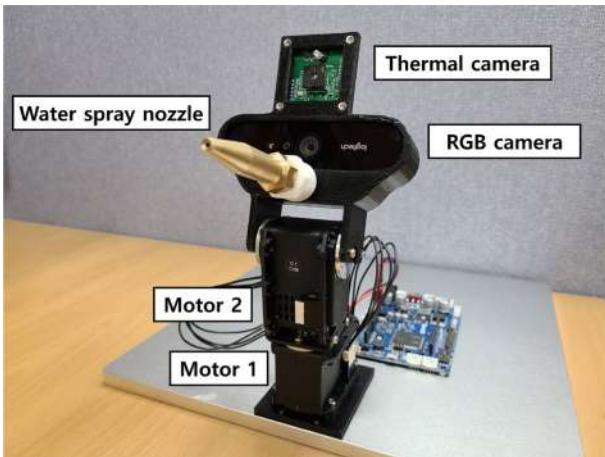


Fig. 9 Pan-tilt system

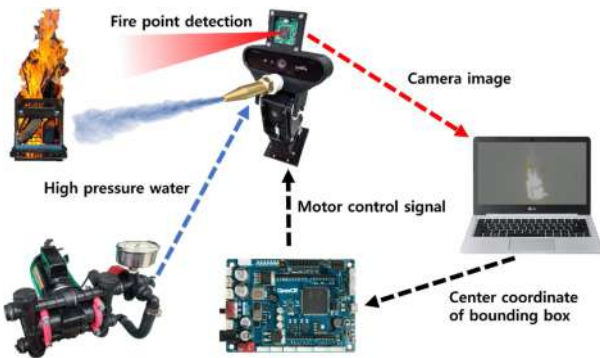


Fig. 10 Water spray control system configuration

Table 1 Specification of the developed pan-tilt system

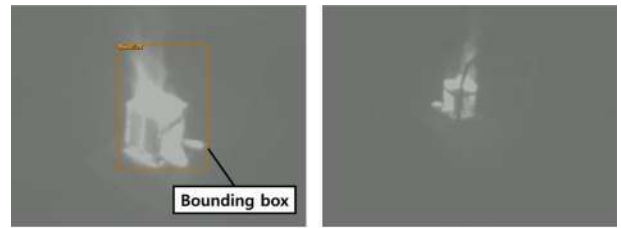
Components	Name	Specification
Computer	TFG256XX	CPU: Intel Core i7-10875H GPU: GeForce RTX 2060
Camera	ThermoCam 160B	Resolution: 160×120 Scene Dynamic Range: -10~+140°C
MCU	OpenCR	Microcontroller: ARM Cortex-M7
Motor	MX-64R	Stall torque: 6 N·m
Pump	26820200	Max pressure: 200 PSI Displacement: 7.6 LPM

시스템을 구성했다. 분사 성능을 테스트해본 결과 최대 5 m까지 직사가 가능한 것을 확인했다. 전체 시스템의 흐름도는 Fig. 10과 같고, 각 시스템을 구성하는 부품의 제원은 Table 1과 같다.

#### 4. 인식 및 추적 소화 실험을 통한 검증

##### 4.1 인식 성능 테스트

YOLOv7으로 만든 화점 검출기의 화염 인식 성능을 검증하기



(a) Success

(b) Fail

Fig. 11 Example image of recognition results

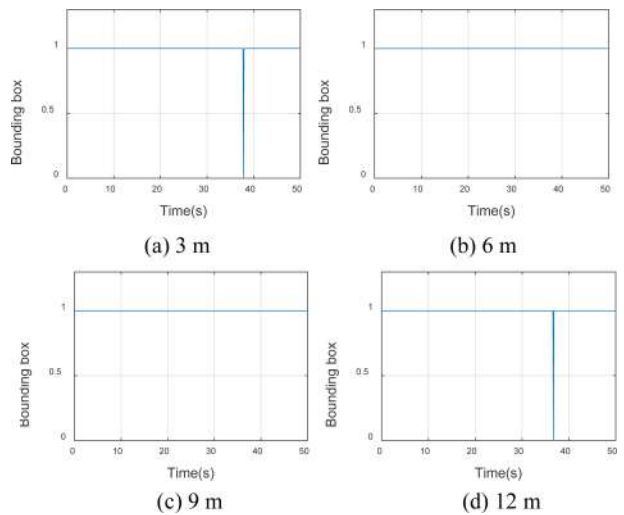


Fig. 12 Recognition test results based on distance between the fireplace and the camera

위해 테스트 데이터베이스로 인식 성능 테스트를 진행했다. 테스트 데이터는 학습 데이터와 다른 시간, 장소에서 화염을 3 m 간격으로 다양한 각도에서 4차례 촬영하여 테스트의 신뢰도를 높이고자 했다. 실험은 검출기가 화염을 인식해서 검출박스를 생성하는지 여부를 파악하는 방식으로 실험을 진행했다. 인식 테스트 결과 이미지 예시는 Fig. 11과 같다. 대부분 Figs. 11(a)와 같이 인식에 성공했지만, 11(b)처럼 장애물에 가려진 경우 인식에 실패하는 경우가 존재하는 것을 확인했다. 이를 수치화하기 위해 검출기가 화염을 인식해 검출박스가 생성된 경우에는 1, 생성되지 않은 경우에는 0을 반환하도록 하여 MATLAB 프로그램을 이용해 Fig. 12와 같이 그래프로 나타냈다. 초당 10프레임으로 50초씩 총 4개의 동영상으로 테스트하여 도출한 그래프를 분석한 결과 총 2,000프레임 중 단 2프레임에서 인식에 실패해 인식률이 99.9%에 달하는 것을 확인할 수 있었다. 테스트 데이터는 학습 데이터와 다른 장소와 시간에서 취득한 데이터지만 열화상 카메라의 특성상 배경이 달라지거나 빛의 유무에 영향을 적게 받기 때문에 인식률이 높게 나온 것으로 분석했다.

##### 4.2 추적 성능 테스트

이번 장에서는 검출기가 화염을 인식한 다음 팬-틸트 시스템이 화점을 잘 추적하는지 두 가지의 실험을 통해 성능을 검증한다.

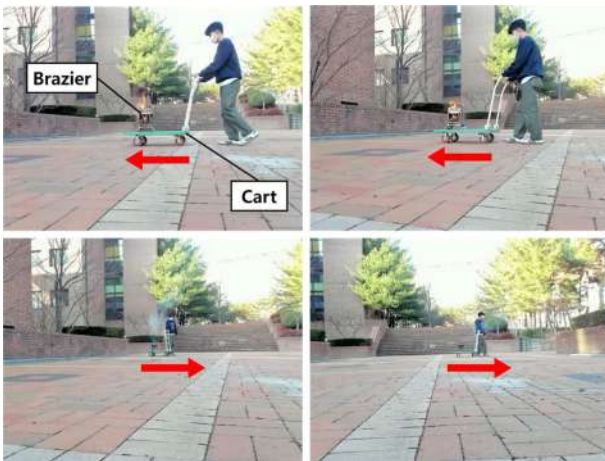


Fig. 13 Moving target tracking experiment

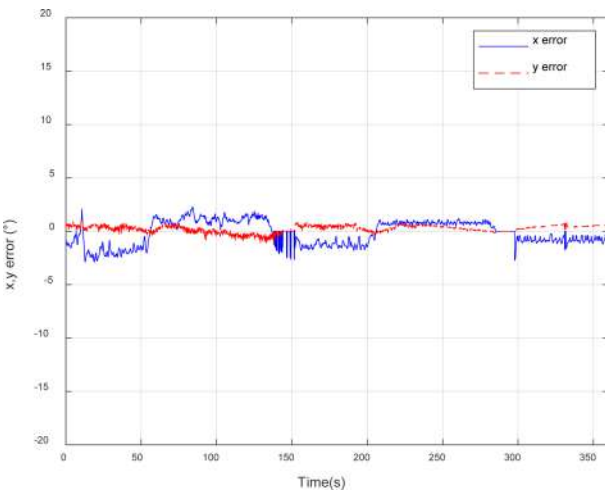


Fig. 14 Result of moving target tracking experiment

4.2.1 동적 목표물 추적 성능 테스트

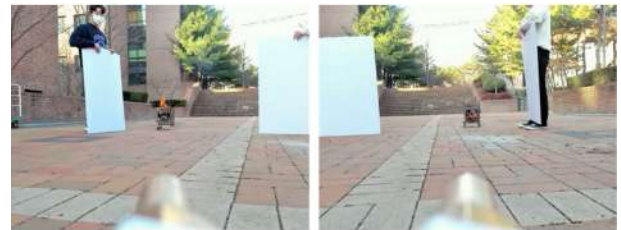
첫 번째 실험은 움직이는 목표물을 팬-틸트 시스템이 지속적으로 추적할 수 있는지 성능을 테스트했다. 대차 위에 화로대를 설치한 뒤 Fig. 13과 같이 좌우 10 m 전후 15 m 범위에서 ‘ㄱ’ 형태로 대차를 움직이면서 실험을 진행했다. 검출박스 중심 좌표와 열화상 카메라 화면 중심 좌표 사이의 오차를 이용해 카메라의 광축과 목표물 간의 사잇각을 계산하여 추적 성능을 평가했으며 이를 Fig. 14와 같이 그래프로 나타냈다. 그래프 분석 결과 x축 최대 오차는 3도로 카메라의 수평 화각인 57도에 비해 오차가 5% 이내로 발생하는 것을 확인했다. y축 최대 오차는 1도로 카메라의 수직 화각인 43도에 비해 오차가 3% 이내로 발생하는 것을 확인했다. 대차를 이용해 화로대를 움직이기 때문에 높이 변화가 거의 없어서 y좌표의 오차가 x좌표 오차보다 적게 발생했다. 이를 통해 팬-틸트 시스템이 움직이는 목표물을 지속적으로 추적하는 것을 확인할 수 있었다.

4.2.2 기변 목표물 추적 성능 테스트

두 번째 실험은 Fig. 15와 같이 두 개의 화로대를 설치하고



(a) Experiment method



(b) Camera view

Fig. 15 Variable target tracking experiment

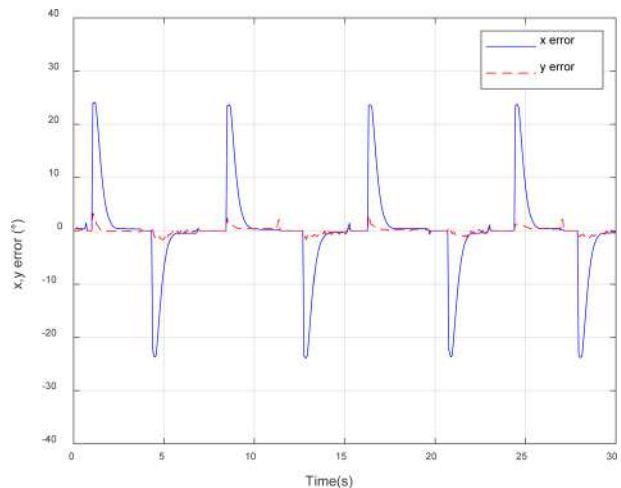


Fig. 16 Results of variable target tracking experiment

가림막을 이용하여 번갈아 가면서 화로대를 노출하여 변화하는 화점을 잘 추적하는지에 관한 성능을 파악하였다. 이번 실험에서도 이전 실험과 동일하게 검출박스의 중심과 화면의 중심좌표 사이의 오차로 목표물과 카메라 광축 간의 사잇각을 계산해 추적 성능을 평가했다. 검출박스의 중심과 화면의 중심의 오차를 그래프로 Fig. 16과 같이 나타냈다. 그래프 분석 결과 목표물이 바뀔 때마다 카메라의 광축과 목표물 간의 사잇각이 24도 정도 차이가 발생하지만 팬-틸트 시스템이 빠르게 움직여 오차가 1.5초 이내에 0도에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 두 개의 추적 성능 실험을 통해 목표물이 움직이거나 바뀌어도 팬-틸트 시스템이 지속적으로 추적 가능한 것을 확인했다.

4.3 소화 성능 테스트

추적까지 완료했다면 고압 펌프로 만든 분사 시스템을 이용해 직사 살수로 불을 꺼야 한다. 소화 성능을 검증하기 위해

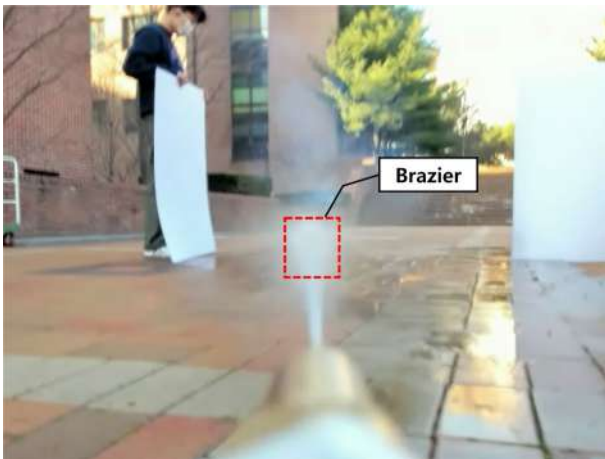


Fig. 17 Extinguishment experiment

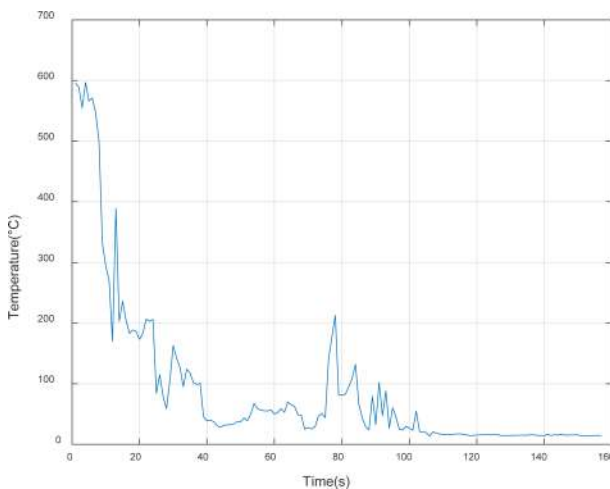


Fig. 18 Result of extinguishment experiment

Fig. 17과 같이 화로대로부터 4 m 떨어진 거리에서 직사 살수를 할 때 화로대의 온도 변화를 측정했다. 비접촉식 적외선 온도계로 살수 직전부터 화로대의 온도가 충분히 낮아질 때까지의 온도 변화를 측정했다. 측정 결과를 Fig. 18과 같이 그래프로 나타냈다. 실험 결과 화로대의 온도가 600도에서 13도로 온도가 충분히 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 물줄기에 의해 화로대 안의 다른 장작이 측정 범위에 들어와 종종 그래프 중간에 온도가 올라갔지만, 곧 소화가 모두 완료되었다. 이를 통해 분사 시스템의 직사 살수 방식이 소화가 가능함을 확인했다.

5. 결론

본 논문에서는 화점 자율 추적 시스템을 만들기 위해 YOLOv7이라는 딥러닝 모델을 이용해 화점 검출기를 만들고 이를 바탕으로 화점을 스스로 추적하고 물을 분사하는 팬-틸트 시스템을 구현했다. 화점 인식률을 높이기 위해 열화상 이미지를 사용했고, 피드백 제어를 통해 팬-틸트 시스템을 제어했다.

그리고 직사 살수 방식을 이용하여 소방 효과를 극대화했다. 테스트 데이터로 인식 성능을 확인한 결과 99%의 인식률을 확인했다. 동적 목표물 추적 실험 결과 5% 이내의 오차로 잘 추적하는 것을 확인했다. 또한, 가변 목표물 추적 실험 결과 1.5초 이내로 추적하는 것을 확인했다. 마지막으로 소화 성능 테스트를 통해 분사 시스템의 직사 살수 방식이 화염을 효과적으로 소화시킨 것을 확인했다. 추후에는 두 개 이상의 화염이 동시에 발생하거나 넓게 분포되어 있는 경우와 같이 복잡한 상황을 대비해 이에 대응하는 학습 데이터를 추가하고, 화염의 온도와 크기를 기준으로 소화할 화염의 우선순위를 정하는 추가 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2022년도 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원에서 지원한 ICT 혁신인재 4.0(1711174110) 사업의 연구결과로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. National Fire Service Academy, The number of injured firefighter by year. [https://www.nfa.go.kr/cherish/news/notice/?boardId=bbs\\_0000000000000047&mode=view&cntId=288](https://www.nfa.go.kr/cherish/news/notice/?boardId=bbs_0000000000000047&mode=view&cntId=288)
2. Yonhapnews, U.S. firefighting robot was out in force on the LA building fire for the first time. <https://www.yna.co.kr/view/AKR20201015028100075>
3. Moneytoday, Hyulim robot developed AI-IoT fusion smart fire fighting robot. <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2022010709225481172>
4. Son, G. Y., Park, J. S., (2021), Implementation of fire detection system based on video analysis with deep learning, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 25(9), 782-788.
5. Kim, Y.-J., Kim, E.-G., (2016), Image based fire detection using convolutional neural network, Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 20(9), 1649-1656.
6. Kim, Y., Cho, H., (2020), Detecting location of fire in video stream environment using deep learning, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 69(3), 474-479.
7. Wu, H., Hu, Y., Wang, W., Mei, X., Xian, J., (2022), Ship fire detection based on an improved YOLO algorithm with a lightweight convolutional neural network model, Sensors, 22(19), 7420.
8. Goyal, S., Shagill, M., Kaur, A., Vohra, H., Singh, A., (2020), A yolo based technique for early forest fire detection, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 9(6), 1357-1362.

9. Majid, S., Alenezi, F., Masood, S., Ahmad, M., Gündüz, E. S., Polat, K., (2022), Attention based CNN model for fire detection and localization in real-world images, *Expert Systems with Applications*, 189, 116114.
10. Muhammad, K., Ahmad, J., Mehmood, I., Rho, S., Baik, S. W., (2018), Convolutional neural networks based fire detection in surveillance videos, *IEEE Access*, 6, 18174-18183.
11. Ramasubramanian, S., Muthukumaraswamy, S. A., Sasikala, A., (2020), Fire detection using artificial intelligence for fire-fighting robots, *Proceedings of the 2020 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 180-185.
12. Girshick, R., (2015), Fast r-cnn, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 1440-1448.
13. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A., (2016), You only look once: Unified, real-time object detection, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 779-788.
14. Wang, C.-Y., Bochkovskiy, A., Liao, H.-Y. M., (2022), YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors, *arXiv Preprint arXiv:2207.02696*. <https://arxiv.org/pdf/2207.02696.pdf>
15. Ziegler, J., Nichols, N., (1943), Process lags in automatic control circuits, *Transactions of the ASME*, 65(5), 433-440. <http://doi.org/10.1115/1.4018788>
16. Kurihara, K., Hoshino, S. i., Yamane, K., Nakamura, Y., (2002), Optical motion capture system with pan-tilt camera tracking and real time data processing, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*, 1241-1248.



#### **Hyeonjae Jeong**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is robotics.

E-mail: guswo1104@naver.com



#### **Hyunbin Park**

He is currently pursuing the Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is robotics.

E-mail: qkrgusqls500@gmail.com



#### **Maolin Jin**

Principal Researcher & Director with the Korea Institute of Robots & Convergence. His research interest is robot motion control, disaster robotics, and factory automation

E-mail: mulimkim@kiro.re.kr



#### **Baeksuk Chu**

Professor in the Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests include robotics, mechatronics, and intelligent control and reinforcement learning.

E-mail: bschu@kumoh.ac.kr



## 역압을 이용한 공압 튜브 캐리어 도착 속도 조절 연구

# A Study on Controlling Arrival Velocity of Pneumatic Tube Carriers Using Counterpressure

홍성호<sup>1,2</sup>, 이재열<sup>2</sup>, 백종환<sup>2</sup>, 김상호<sup>2</sup>, 함제훈<sup>2</sup>, 서진호<sup>1,3,#</sup>  
Sung-Ho Hong<sup>1,2</sup>, Jae Youl Lee<sup>2</sup>, Jonghwan Baek<sup>2</sup>, Sang Ho Kim<sup>2</sup>, Jehun Hahm<sup>2</sup>, and Jin-Ho Suh<sup>1,3,#</sup>

<sup>1</sup> 부경대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University)  
<sup>2</sup> 한국로봇융합연구원 인터랙티브로봇연구본부 (Interactive Robotics R&D Division, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence)  
<sup>3</sup> 부경대학교 에너지수송시스템공학부 (Division of Energy Transport Systems Engineering, Pukyong National University)  
# Corresponding Author / E-mail: [suhgang@pknu.ac.kr](mailto:suhgang@pknu.ac.kr), TEL: +82-51-629-6189  
ORCID: 0000-0002-8673-4528

KEYWORDS: Pneumatic tube (기송관), Airborne carrier (기송관 캐리어), Counterpressure (역압), Instantaneous velocity (순간 속도), Pressure feed (압력 이송)

*A pneumatic tube system is a system that transmits and receives objects quickly inside pipes and is used in urgent situations or when transferring or returning objects. It is mainly used in hospitals, large marts, and automation systems. For long-distance transportation (up to 10 km) high pressure is used at industrial plant industrial sites. A large amount of flow rate and high pressure are used to generate instantaneous pressure and flow to the opposite side, where the transport target is stored in a separately manufactured carrier and transported. Specially manufactured carriers considering significant frictional force in the straight, curved, rising, and lower sections during long-distance transport are employed. The other party experimentally generates reverse pressure to lower the care speed inside the transfer pipe that arrives at a high speed and operates the worker valve to reduce the speed, but the valve must be operated every time according to pressure and distance changes. In the present work, a method of arriving at a carrier in a stable pipe through speed reduction by controlling the flow rate and reverse pressure depending on the distance from the transmission unit and calculating the reverse pressure compared to the teleportation speed is presented.*

Manuscript received: August 1, 2022 / Revised: October 8, 2022 / Accepted: October 13, 2022

### 1. 서론

기송관은 압축 공기나 부분 진공에 의해 원통형 용기를 관망으로 밀어내는 시스템으로, 유체를 운반하는 기존의 배관라인과는 달리 고체 물체를 운반하는데 사용된다[1,2]. 기송관은 압축 공기의 압력을 이용하여 물체를 압력 이송하는 시스템으로 물체의 수발신이 요구되는 지점마다 송수신 스테이션을 설치해 물체를 수발신에 사용되며 반송물들을 신속하게 이동할 수 있으므로 응급 상황이 빈번한 병원 또는 산업환경에서 시료의 분석을 위한 신속한 기송관의 수요가 높은 편이다[3]. 기송관 시스템은 현존하는 운송 시스템 중 투자 대비 효율성이 가능 높으며, 소형 물품을 운송하는데 유사한 이송 시스템 대비 약 50%

이하의 비용으로 시스템을 설치할 수 있어 반복적인 물품 운송에 높은 효율을 기대할 수 있다[4,5].

제철소의 경우 공정 중 수집한 시편을 운반하는 캐리어에 관하여 공압을 사용하여 분석실까지 이송하는 시스템이 사용되고 있으며 이송 거리는 짧게는 3 km에서 길게는 8 km로 장거리 이송이 요구되어 높은 압력의 압축 공기와 이송을 위한 많은 유량이 요구된다[6]. 빠른 속도로 이동하는 캐리어가 분석실 도착하는 순간에는 속도를 감속하기 위한 역압(Counter-Pressure)을 발생하여 순간적으로 안전 속도로 감속하는 시스템 제어가 적용하고 있다. 역압을 발생하여도 고속 이동하는 기송관 캐리어의 순간 속도는 통상 12 m/s로 역압을 통한 감속 효과가 크지 않아 분석실의 수신단에서는 기송관 캐리어의 손상이 빈번하게

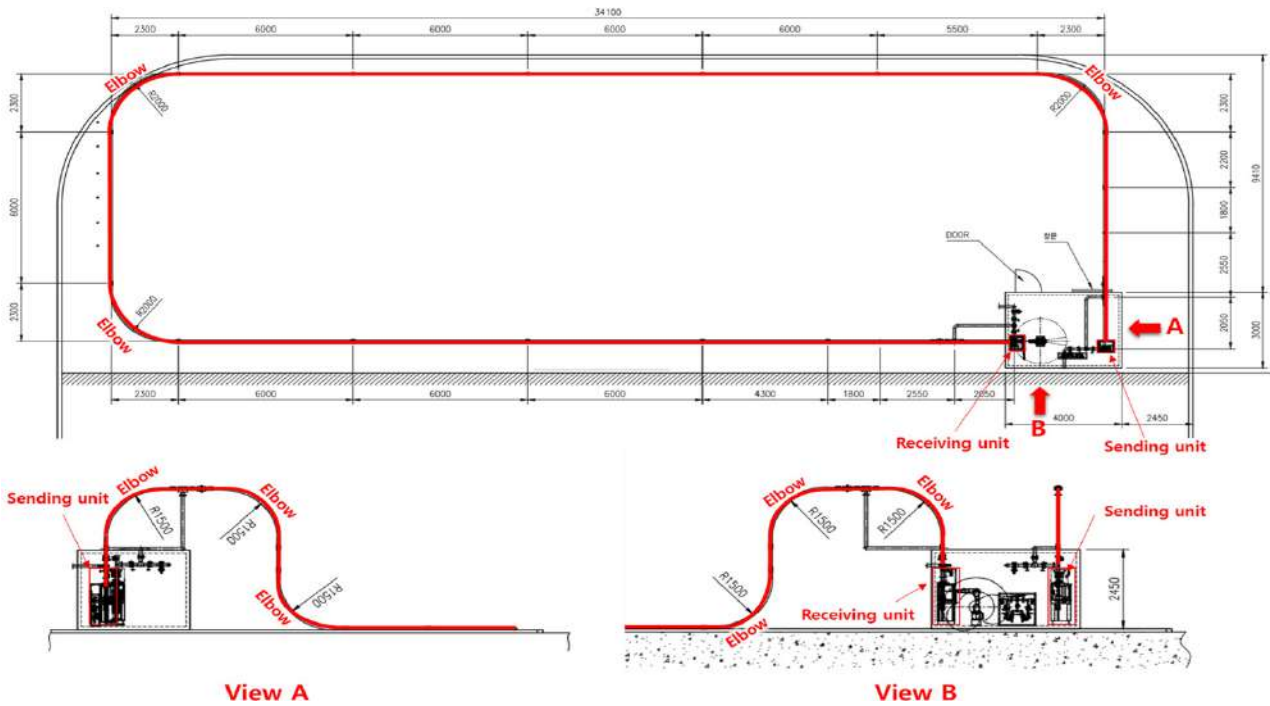


Fig. 1 2D layout of the pneumatic transferring tube system

발생하는 문제가 있다.

본 연구에서는 실제 기송관 시스템과 동일한 구성으로 기송관 시험환경을 구축하여 송신과 수신단에서 압력에 따른 기송관 캐리어의 이송 시간과 수신단에서 순간적인 속도를 측정하고 최적의 역압 발생 시간에 대한 제어시스템을 제안하고 실증한 사례를 기술하였다.

### 2. 기송관 시스템

본 연구를 위해 현재 제철소에 구축된 시스템과 동일한 구성품을 적용하여 모사 시험 환경을 Fig. 1과 같이 구축하였다. 사용된 기송관은 압력배관용 탄소강관으로 내압력 10 MPa, 내열 온도 -15~350°C의 특성을 가지는 80A SCH80 규격의 STPG370 강관을 적용하였다. 설치 기송관의 전체 연장은 71 m로 현장 설치 및 운영 조건을 모사하기 위하여 기송관망의 3개소의 방향 전환을 위한 곡선 배관을 구성하고 Fig. 1의 Views A, B와 같이 2개소의 상승과 하강 곡선 배관 구간을 구성하여 직선 형태와 방향 전환에 따른 저항 특성 등을 분석할 수 있는 모사 환경을 구축하였다. Fig. 2는 시편을 이송하는 캐리어이며, 재질은 AL6061-T5로 제작되었고 제작 중량은 5 kg이다.

### 3. 시스템 파라미터

기송관 시스템에서 배관 길이와 직경에 따라 이송에 필요한

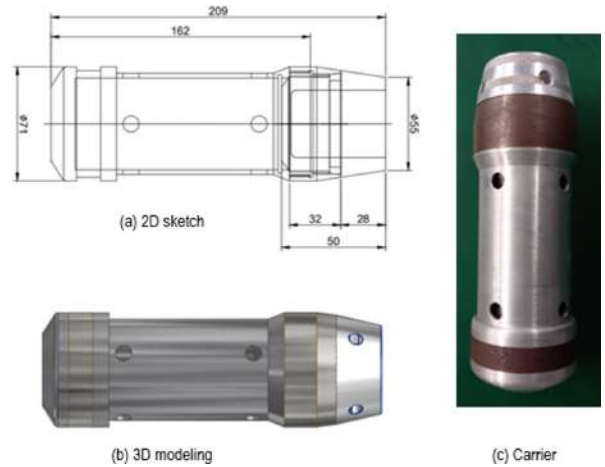


Fig. 2 Carrier transferred in the pipe

압력과 유량을 산정할 수 있다. Table 1은 기송관 시스템 재원이며, 각 데이터를 이용하여 필요로 하는 압력과 유량을 산출하였다.

#### 3.1 압력 강하

배관의 길이와 내경을 고려하여 유체 압력 강하를 확인하기 위해 관내 이송체의 속도를 기준으로 배관 내 층류와 난류 구분을 위해 Reynolds 수를 확인하였다[7].

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{1}$$

식(1)에 사용되는 배관의 내경 62 mm 적용하면, Reynolds 수는



Table 1 Pneumatic tube system parameter

Parameter	Symbol	Value	Unit
Tube carrier net mass	-	1.3	kg
Mass of carrier with payload	m	1.8	kg
Carrier cross-section diameter	-	0.45	m
Static friction in Steel pipe	$\lambda$	0.02	
Velocity	v	13	m/s
Air density of fluid	$\rho$	1.2	kg/m <sup>3</sup>
Air kinematic viscosity	$\mu$	$1.51 \times 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s
Pipe inner diameter	D	0.623	m
Acceleration of gravity	g	9.8	m/s <sup>2</sup>
Length of pipe	L	60	m
Absolute roughness	$\epsilon$	0.0675	mm

4,000을 초과하므로 난류가 발생한다. 난류에 의해 유체가 배관 내 마찰로 배관의 거칠기에 영향이 존재하므로, 산업용 강관 기준과 Moody Diagram을 고려하며 식(2)를 이용하여 표면 거칠기는 0.02로 정의하였다.

$$Rr = \frac{\epsilon}{D} \tag{2}$$

$$\Delta\rho = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \tag{3}$$

식(3)은 기송관 시스템에서 압력 강화를 예측하는데 사용되는 수식으로 모든 파라미터를 적용하면 226 Pa의 압력 강하가 발생할 것으로 예측되었다[8].

### 3.2 기준 속도 도달 시간

배관 내 캐리어의 목표 도달시간을 예측하기 위하여 기준 속도는 식(4)와 같이 요구 속도, 캐리어 질량, 기송관 직경, 마찰 및 압력 감소에 의해 계산 가능하며 계산 결과 0.024 s 이내 기준 속도에 도달하는 것을 예측할 수 있다.

$$Tt = \frac{vm}{(\pi d^2 \cdot 4\Delta\rho) - \mu mg} \text{ (Second)} \tag{4}$$

### 3.3 캐리어 최대 가속도와 최대 작용 힘

식(5)는 설정한 기준 속도까지 도달 시간 예측을 통하여 최대 가속도를 계산하였고 최대 529 m/s<sup>2</sup>로 계산되었으며 캐리어를 순간 방출하기 위한 압력 기준을 산정하였다.

$$Pn = \frac{\Delta v}{\Delta T} \text{ (m/s}^2\text{)} \tag{5}$$

최대 가속도를 기반으로 캐리어가 받고 있는 순간 최대 작용 힘은 식(6)으로 계산하며 최대 가속도 529 m/s<sup>2</sup>를 기준으로 952 N의 힘이 필요한 것으로 계산되었다.

Table 2 Pneumatic tube system air requirement spec

Pipe length [m]	Velocity [m/s]	Pressure [bar]	Volume [Liter]
60	13	4.1	182

$$\vec{F} = m \cdot a \tag{6}$$

### 3.4 캐리어 방출 시 필요 압력 및 요구 압축 공기 소비량

식(1)부터 식(6)에서 캐리어를 공압으로 방출하기 위한 필요 압력은 식(7)에 의해 최종 계산하였다.

$$Bar = \frac{\vec{F}}{D_c} \text{ (N/m}^2\text{)} \tag{7}$$

여기서, D<sub>c</sub>는 압력 방출 시 캐리어에 직접적으로 압력이 접촉되는 면적이며, 단위 변환을 하면 필요한 압력은 최소 4.1 bar로 예측이 되었다. 이송 캐리어를 기송관 배관을 이용하여 목적지까지 이송할 경우 필요로 하는 압축 공기 소비량은 식(8)부터 식(10)과 같이 계산하였다[9].

$$Ar = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D \tag{8}$$

$$Q = v \cdot Ar \tag{9}$$

$$Vo = Q \cdot \frac{D}{v} \tag{10}$$

60 m 설치 기송관에 압축 공기 압력 4.1 bar를 이용하여 캐리어를 13 m/s 속도로 이송하기 위해서는 압축 공기압력 토출은 39.1 LPM이 필요하며, 소요되는 압축 공기는 182 L가 필요한 것으로 계산되었으며 Table 2에 계산 결과를 나타내었다.

## 4. 캐리어 순간 속도 측정

### 4.1 순간 속도 측정 방법

기송관 송신 측 모듈에서 캐리어를 방출하는 관내 압력 차를 이용하여 순간 최대 속도로 출발하여 배관을 빠르게 이동하게 되며 수신 측 도착까지 속도를 유지하여 수신 측 모듈에 발생된 역압으로 캐리어의 감속을 유도한다. 이때, 캐리어의 순간 속도를 정확하게 측정하고 감속에 필요한 역압과 유량을 확인하기 위하여 수신 측 모듈 인근에 센서를 부착하여 측정하였다.

배관 내에서는 이송하는 캐리어의 순간 속도를 측정하기 위하여 관내 기밀을 유지할 수 있는 광학 타입의 근접 센서를 수신단에서 캐리어가 도착하기 이전 2 m 위치에 설치하였으며 검출 센서는 입사한 적외선을 전압의 형태로 변화시켜 광검출이 가능하도록 초전(Pyroelectric) 효과를 이용한 센서를 이용하여 순간적으로 이동하는 캐리어의 속도를 측정하였다.

Fig. 3은 기송관 배관에서 캐리어가 순간적으로 이동을 하는

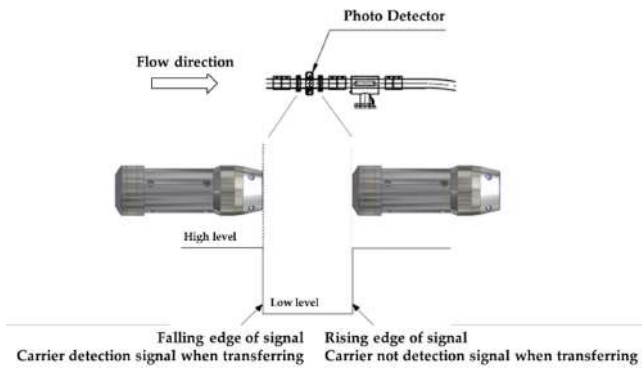


Fig. 3 Measure the instantaneous carrier speed

경우 캐리어의 순간 속도( $T_c$ )를 측정하는 방법이며, 이는 캐리어가 순간적으로 검출되는 시점과 캐리어가 센서에 반응이 없는 시점의 시간을 이용하여 식(11)을 이용하여 속도를 예측하였다.

$$T_c = \frac{D_l}{t} \tag{11}$$

여기서  $D_l$ 은 캐리어 길이이며,  $t$ 는 순간 근접센서의 반응 시간이다.

#### 4.2 역압 산출 방법

캐리어 도착 시 역압의 압력과 유량 산출과정에서 오류가 있는 경우 감속 효과가 없어 캐리어에 강한 충격을 전달될 수 있으며, 반대로 역압이 큰 경우에는 캐리어의 감속을 빠르게 유도하여 수신단에 도착하지 않고 배관 내부에 캐리어가 멈추는 상황이 발생될 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 순간 속도 측정 후 도착까지 예상 시간을 예측 계산이 필요하며 식(12)에 의해 확인이 가능하다.

$$T_d = \frac{2}{T_c} \tag{12}$$

측정된 시간을 식(12)를 기준으로 40 LPM, 6 L가 필요한 것으로 계산되었으며 캐리어 감속 성능 시험을 위한 시험 조건으로 정의하고 압력은 방출 시 사용된 동일한 압력을 유지하는 조건을 정의하였다.

### 5. 기송관 제어 시스템

기송관 제어는 Fig. 4와 같이 다수의 공압 솔레노이드 밸브를 제어하는 복합 공압 제어 시스템으로 구성되며 적용된 솔레노이드 밸브는 공급 공압, 캐리어 이송, 역압 발생의 개폐를 담당하며 각 밸브에 오동작 확인을 위한 2중 개폐 확인 센서와 압력 센서로 구성이 된다. 기송관 시스템 특성상 캐리어에 이송 대상을 수납하여 수신 측에 전달 후 다시 캐리어 회수 방법을 역순으로 수신 측에서 캐리어를 방출하여 송신 측에 전달하는 방법이 동일하여 송신 측과 수신 측이 동일 구조로 설계되었다.

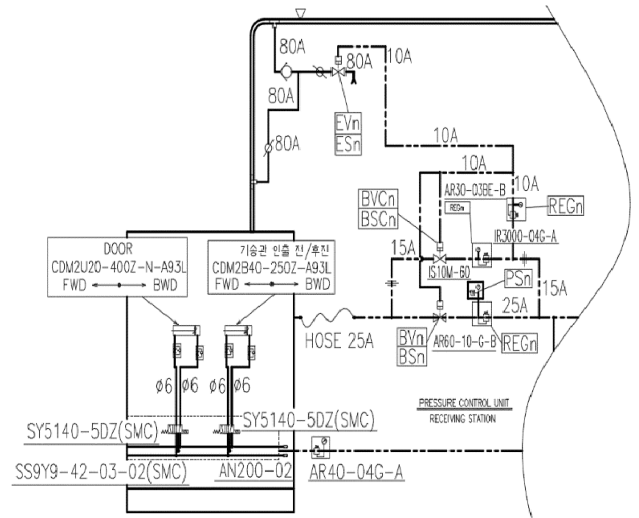


Fig. 4 Pneumatic tube system diagram

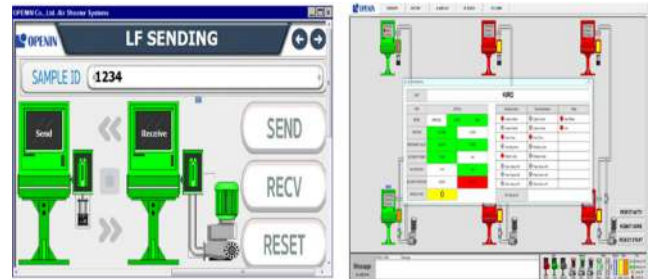


Fig. 5 Pneumatic tube operating system

사용자 시스템은 Fig. 5와 같이 사용자 편의성을 고려해 개발하였으며 메인 제어 시스템은 Embedded Windows 기반, HMI 형태로 운용 효율성을 고려하여 사용자 세부 조작이 최소화되도록 구성하였다.

### 6. 성능 평가

#### 6.1 캐리어 송신 및 수신

Fig. 6은 구축된 기송관 시스템으로 캐리어를 배관 내부에 수납과 배출을 위한 캐리어 이송 및 회수 유닛으로 구성되며 메인 시스템에서는 송신 측 및 수신 측 상황을 모니터링과 캐리어의 현재 이동 상황과 공급 및 배출되는 공압 용량을 확인할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 7은 수신 측에서 캐리어의 도착 정보를 확인하고 순간적인 속도 측정을 통한 역압 밸브를 개방하기 위한 센서 위치를 나타내었으며, 수신 측 캐리어 도착 2 m 이전 지점에 설치하였다.

Fig. 8은 캐리어 이송 시 감지와 미감지 구간에 대해 나타내었으며 선정된 압력 파라미터를 사용하여 송신 측에서 캐리어를 개방하고 수신 측에서 순간 속도를 측정하여 캐리어가 감지되는 여부를 확인하였다.



Fig. 6 Pneumatic tube main system

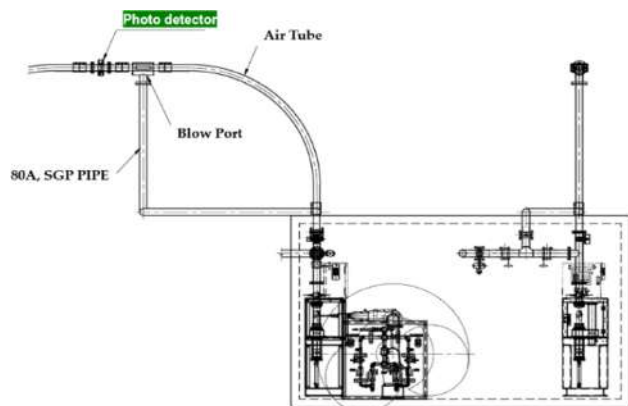


Fig. 7 Instantaneous measurement speed with sensor

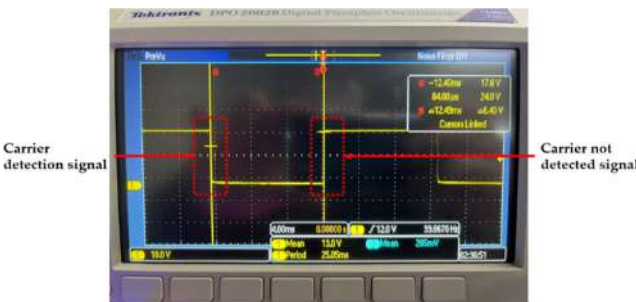


Fig. 8 Measure the instantaneous carrier velocity

6.2 역압 방출에 따른 감속 효과

역압 방출에 따른 감속 효과의 검증은 송신 측에서 캐리어 방출 시 압축 공기 압력과 유량은 동일하게 적용하고 수신 측에서 측정된 순간 시간을 고려하여 역압 방출 압축 공기 압력과 유량 변화에 따른 감속 효과를 분석하였고 수신 측에서 캐리어 감속 효과 확인은 캐리어가 수신 측에 도착 시 도착 구역에 압력 센서를 이용하여 순간적인 압력 변화에 따른 감속 효과를 확인하였다.

Table 3은 캐리어 이송 목표 시간 4.62 s, 순간 속도 12.4 m/s, 역압 4.1 bar를 송신단에서 동일한 조건에서 시험을 하였다. 단, 수신단에서는 역압 방출에 따른 효과 검증을 위해 역압 발생 공기량에 차이를 두어 실험을 진행하였으며, 예측된 역압보다

Table 3 Carrier deceleration effect

Discharge pressure [liter]	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.3
Impact force [N]	14.5	8.8	1.3	0.8	0.5	-
Destination time [s]	4.6	4.6	4.5	4.4	4.3	-

Table 4 Carrier deceleration effect with instantaneous speed

Sending Pressure [bar, l/min]	4.5/42	5.3/45	6/48	6.8	7.6/54
Instantaneous speed [m/s]	12.8	12.1	11.5	9.1	8.1
Discharge pressure [l/min, liter]	42/6.8	45/7.6	48/8.8	51.8/11	54.8/13
Impact force [N]	0.48	0.53	0.55	0.51	0.57

적계(4 L) 발생하는 경우 캐리어에 강한 충격(14.54 N)이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 또한 예측된 이상의 역압(6.3 L)을 발생하는 경우 캐리어가 수신단에 도착하지 않고 배관 내에서 멈추는 현상을 확인할 수 있다.

유량 변화에 따른 감속 효과 중 예측된 방출량 40 LPM, 6 L 보다 이전에서 감속 효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 캐리어의 최대 감소 효과는 예측치 인근에서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

순간 속도는 매 측정 시 약 3%의 차이가 발생을 하였으나, 이는 고려하지 않았으며, 다만 목표 이상 속도가 13 m/s에서 순간 측정 시의 속도가 감소가 된 원인은 배관 구성에서 3개의 곡관과 2개 상승 및 하강 곡관 배관 내부에서 캐리어와 배관 내부 마찰로 인한 감속에 따라 속도가 저하된 것으로 판단하였다.

6.3 순간 속도 측정에 따른 역압 방출 효과

역압에 따른 방출 효과는 식(8)부터 식(10)에서 캐리어 방출 시 필요 압력 및 압축 공기량을 산출하여 역압에 따른 감속 효과를 검증하였다.

실제 캐리어 방출 시 사용되는 압력 및 압축 공기량은 매번 일정하게 방출할 수 없으며, 예측된 이상의 압축 공기량으로 방출하며, 이는 장거리 이송 과정에서 캐리어가 중간에 멈추는 경우를 미연에 방지하고자 예측된 이상의 압축 공기를 사용한다. 본 연구는 예측된 이상의 압축 공기를 사용하여 수신단에 도착하는 캐리어의 손상을 최소화하기 위해 도착 시 순간 속도를 측정하여 감속에 필요한 역압을 산출하고 발생하는 것을 검증하였다.

60 m 설치 기송관에 방출 시 최소로 요구되는 압력은 4.1 bar 및 압축 공기 182 L가 요구된다. 본 실험에서는 최소 요구 방출 압력 변화를 두어 순간 속도를 측정하였으며, 역압 발생 시의 효과를 Table 4와 같이 검증하였다.

순간 속도는 기송관 수신단 2 m 지점에서 캐리어의 순간 속도 측정하여 역압 방출량을 예측하였으며, 역압 방출량을 제어함으로써 캐리어의 안정성을 확인하였다.

## 7. 결론

기송관 시스템은 분산된 제조 환경에서 생산 시편을 분석실까지 빠르게 이동하고 분석하기 위한 이송시스템으로 사용되고 있으나 이송 거리가 긴 환경에서는 이송 부량을 최소화하기 위하여 과도한 압력과 유량으로 운영되어 수시로 수송신되는 캐리어의 도착 안전성을 확보하기 어려워 소모성 자재로 사용되고 있다. 본 연구에서는 캐리어의 손상을 최소화하고자 도착 순간 속도를 측정하여 역압을 발생하는 최적 조건을 정의하기 위한 시험을 수행하였으며 제시된 시험 환경에서 캐리어 순간 속도를 바탕으로 계산된 역압 방출량을 제어함으로써 감속 효과가 발생하는 것을 확인하였다. 기존 경험에 의존하여 조작하는 시스템을 자동화 시스템으로 변경하여 캐리어의 손상을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(202106712, 수산식품 스마트 가공 기술개발).

## REFERENCES

1. Jang, M., Jung, M.-S., Hahm, J., Hong, S.-H., Seo, K.-H., Suh, J.-H., Lee, J., (2021), Development of high traction in-pipe robot adjustable 500~800 mm pipe and verification of the capability, *Journal of Power System Engineering*, 25(4), 52-61.
2. Jeong, M.-S., Lee, J., Hong, S.-H., Jang, M., Shin, D., Hahm, J., Seo, K.-H., Seo, J.-H., (2021), Development of the pipe construction robot for rehabilitation work process of the water pipe lines, *The Journal of Korea Robotics Society*, 16(3), 223-231.
3. Lee, J., (2008), Pneumatic tube system, *Journal of Sarek*, 37(8), 34-42. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01029093>
4. Kim, T., Park, R., Jeong, J., Kim, W., (2019), Transport of a capsule immersed in a vertical pipe, *Journal of the Korean Society of Visualization*, 17(1), 19-25.
5. Jeong, J., Oh, J., (2021), Transport of a capsule immersed in the pipe Part I. Theoretical equation and construction of experimental loop, *The Korean Society for Fluid Machinery Journal of Fluid Machinery*, 24(1), 47-54.
6. Hong, S. H., Lee, J. Y., Kim, S. H., Hahm, J. H., Hur, J. Y., Park, J. H., Suh, J. H., (2022), Study on the arrival of pneumatic tube carrier using reverse pressure, *Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering 2022 Spring Conference*, 312-313.
7. Kwon, S., Jeong, S., Kim, Y., (2014), The research of velocity estimation method in pipe pumping for slurry transportation, *Journal of the Korean GEO-Environmental Society*, 15(3), 21-32.
8. Jang, C.-M., Lee, S.-Y., Suh, S.-H., (2007), Pressure drop in a circular pipe of waste collection piping system, *The Korean Society for Fluid Machinery Journal of Fluid Machinery*, 10(4), 55-60.
9. Nugraha, A. D., (2017), Design pneumatic tube transfer system pada kapal rumah sakit KRI dr soeharso 990, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. [https://repository.its.ac.id/45175/1/1.Andi%20Dwi%20Nugraha\\_4215105008-With%20Scan.pdf](https://repository.its.ac.id/45175/1/1.Andi%20Dwi%20Nugraha_4215105008-With%20Scan.pdf)

**Sung-Ho Hong**

Senior researcher of Integrated Robotics Systems Research Center in Korea Institute of Robotics and Technology Convergence. His research interest is embedded control system, and multi-robot system.  
E-mail: hong6286@kiro.re.kr

**Jae Youl Lee**

Center Director of Integrated Robotics System Research Center in Korea Institute of Robotics & Technology Convergence. His research interest is pipe robotics, professional service robot and system integration.  
E-mail: jylee0914@kiro.re.kr

**Jonghwan Baek**

Researcher of Integrated Robotic Systems Research Center, Korea Institute of Robotics and Technology Convergence. His research interest is image processing, and industrial robotic system.  
E-mail: jh100@kiro.re.kr

**Sang Ho Kim**

Researcher of Integrated Robotic Systems Research Center, Korea Institute of Robotics and Technology Convergence. His research interest is industrial robotic system.  
E-mail: ksh4642@kiro.re.kr

**Jehun Hahm**

Senior research of Integrated Robotics System Research Center in Korea Institute of Robotics & Technology Convergence. His research interest is intelligent control, and autonomous driving robot.  
E-mail: jhham@kiro.re.kr

**Jin-Ho Suh**

Professor in the Major of Mechanical System Engineering, Division of Energy Transport Systems Engineering, College of Engineering, Pukyong National University. His research interest is disaster response robot, underwater robots, and system control & integration in field robotics.  
E-mail: suhgang@pknu.ac.kr



# 레이저 유도 전사를 이용한 유연기판의 액체금속 미세 패터닝

## Micro-Patterning of Liquid Metal on Flexible Substrate Using Laser Induced-Forward Transfer

조민제<sup>1,2</sup>, 지석영<sup>1,3</sup>, 조정호<sup>2</sup>, 장원석<sup>1,3,#</sup>  
Minje Jo<sup>1,2</sup>, Seok Young Ji<sup>1,3</sup>, Jungho Cho<sup>2</sup>, and Won Seok Chang<sup>1,3,#</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 나노공정장비연구소 (Department of Nano-Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery & Materials)  
<sup>2</sup> 충북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)  
<sup>3</sup> 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과 (Department of Nano-Mechatronics, University of Science & Technology)  
# Corresponding Author / E-mail: paul@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7134  
ORCID: 0000-0002-3426-1781

KEYWORDS: Laser induced-forward transfer (레이저 유도 전사), Liquid metal (액체금속), Flexible electronics (유연전자), Dynamic release layer (희생층), Circuit repair (회로 수정)

*We have developed a direct conductive patterning method with micro-scale line widths using the laser-induced-forward transfer (LIFT) and liquid metal. As this method does not need post-thermal processing, there is no thermal damage even on heat-sensitive polymer substrates by low-power laser irradiation on the dynamic release layer (DRL). Unlike other liquid metal patterning processes, this procedure can easily achieve fine line widths of a few tens of micrometers corresponding to laser spot size. The solid-state UV pulse laser with 266 nm wavelength and 20 ns pulse duration was used to transfer Eutectic Gallium Indium (EGaln) liquid metal and the results for the single and multi-pulse laser irradiation were investigated to determine the effective process conditions. The applicability of flexible circuit fabrication and selective circuit repair was successfully tested on Polyimide (PI) substrate. After the LIFT process, the electrical properties of liquid metal on the pattern were measured to be approximately  $5\sim 8 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$  of resistance.*

Manuscript received: August 3, 2022 / Revised: November 17, 2022 / Accepted: November 18, 2022

### 1. 서론

최근 얇고 휴대하기 편하며 신체에 부착하거나 착용할 수 있는 플렉서블 혹은 웨어러블 디바이스에 대한 소비자의 요구가 증대됨에 따라 많은 기업과 연구자들이 유연한 디스플레이, 배터리, 폴더블 스마트폰 그리고 다양한 웨어러블 디바이스에 대한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그중 기기의 기판을 구부리거나 휘는 등의 변형이 가해질 때 회로의 파손이 없고 기판의 변형에도 일정한 전류가 흐를 수 있도록 하는 유연회로 제작기술에 대한 연구가 활발하다[1-6].

변형에도 전기회로가 쉽게 단선되지 않으며 이후 변형을 없애 기판을 초기의 상태로 되돌리더라도 전류흐름의 변함이 없는 회로를 제작하기 위하여 상온에서 액체 상태로 존재하는

액체금속을 전극 소재로 패터닝하는 기술이 최근 많은 주목을 받고 있다. 전극이 액체 상태로 존재하면 구부리거나 휘는 등의 변형을 가하여도 끊어지지 않고 저항의 변화가 미미한 장점이 있다. 이러한 장점으로 유연전자소자의 제작 시 전체 전극을 액체금속으로 사용하거나 혹은 변형을 가하였을 때 곡률반경이 큰 부분에만 액체금속으로 전선을 형성하는 연구가 이루어지고 있다[1].

대표적인 방법으로는 펜이나 노즐을 이용하여 프린팅을 하는 방법, 스텐실 마스크 위에 액체금속을 스프레이의 형태로 뿌리는 방법 그리고 PDMS나 SU-8과 같은 물질을 이용하여 몰드를 형성한 후 그 안에 액체금속을 주입하는 방법 등이 있다. 하지만 이런 패터닝의 방법들은 선폭이 200  $\mu\text{m}$  상으로 미세 패터닝이 어렵고 펜, 노즐, 스텐실 마스크 그리고 몰드 등을 사용하여

패터닝하므로 원하는 위치에만 선택적으로 전도성 물질을 패터닝 해야 하는 리퍼어 공정과 같은 정밀 패터닝 공정에는 사용할 수 없는 단점이 존재한다[3-6].

본 연구에서는 저출력의 나노초 레이저를 이용하여 열에 약한 기판에도 열적 손상 없이 미세 패턴을 구현하고 원하는 위치에 선택적으로 전도성 물질을 전사 할 수 있는 액체금속 레이저 유도 전사 패터닝 공정 기술을 개발하였다.

2. 소재 및 공정

2.1 액체금속

액체금속이라 불리는 물질 중 독성이 거의 없는 갈륨과 인듐의 합금이 주로 연구개발에 이용되고 있다. 갈륨과 인듐의 합금인 액체금속은 일반적으로 Galinstan(68% Ga, 22% In, 10% Sn)과 EGaln (Eutectic Gallium Indium, 75% Ga, 25% In)의 상업적 명칭으로 구분된다. 본 연구에서 가장 크게 고려한 점은 끓는점으로 희생층으로 사용되는 금(끓는점, 1,064°C)보다 높은 끓는점을 가진 물질을 사용해야 희생층의 어블레이션이 되는 레이저 공정 조건에서 전사물질의 열적 손상이 없이 전사공정을 진행할 수 있다.

2.2 레이저 유도 전사

레이저에 의한 국소 부위의 순간적인 고온상승에 열적 안정성을 갖도록 더 높은 끓는점을 갖는 EGaln을 사용하였다(끓는점, EGaln 2,000°C, Galinstan 1,300°C) [8].

레이저 유도 전사(Laser Induced-Forward Transfer, LIFT)는 Fig. 1(a)와 같이 투명한 도너 기판에 전사하고자 하는 물질인 도너 층을 코팅한 후 전사하고자 하는 기판인 리시버 기판 위에 도너 기판을 뒤집어 놓고 레이저를 조사하여 전사하고자 하는 물질에 충격파를 발생시켜 그 폭발력으로 도너 층을 리시버 기판 방향으로 밀어내어 선택적으로 전사가 되는 기술이다[7]. 이때 열에 매우 취약하거나 어블레이션의 임계치가 너무 낮은 소재에 레이저를 인가할 경우 전사하고자 하는 물질의 손상을 가질 수 있다. 본 연구에서 전사하고자 하는 액체금속도 레이저의 직접적인 영향을 받게 될 경우 쉽게 어블레이션이 되면서 제대로 된 전사가 이루어지지 않으며 도너기판에 코팅되는 액체금속의 두께는 정확하게 조절되기 어려워 레이저 파워에 따른 전사조건이 위치별로 불균일한 결과를 가져온다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 투명한 도너 기판과 액체금속 사이에 희생층(Dynamic Release Layer, DRL or Sacrificial Layer)을 증착하여 레이저 유도 전사 공정을 실시하는 희생층을 이용한 레이저 유도 전사(Laser Induced-Forward Transfer, DRL-LIFT) 기술을 사용하였다[12]. 도너 기판은 본 연구에서 사용한 266 nm 레이저 파장의 투과도를 고려하여 쿼츠 기판을 사용하였다[9-11].

희생층으로는 UV 파장에서의 흡수율이 높아 어블레이션이

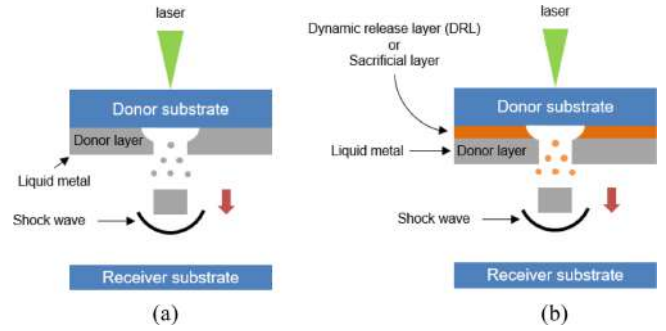


Fig. 1 Process diagrams of (a) Laser induced-forward transfer (LIFT) and (b) Laser induced-forward transfer with dynamic release layer (DRL-LIFT)

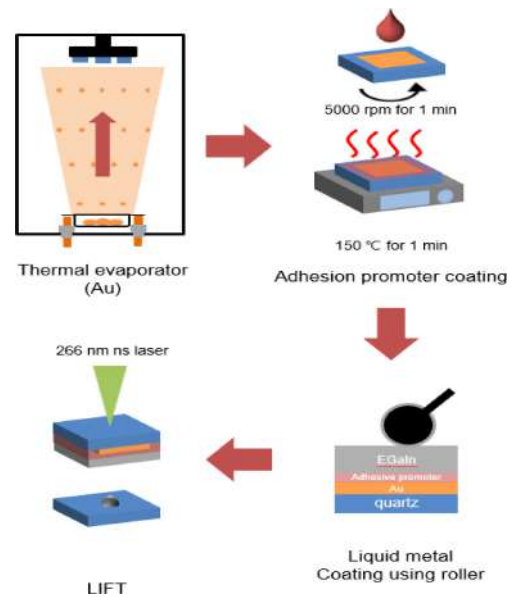


Fig. 2 The sample preparation procedure for laser induced-forward transfer with DRL

일어나는 레이저 임계 에너지 밀도가 작은 금을 사용하였다 [13]. 그러나 금은 액체금속과의 접착력이 좋지 않아 부분적으로 코팅이 되지 않거나 코팅 후 액체금속 표면에 단차가 크게 생기는 등 코팅이 균일하게 되지 않는 문제가 있다. 이를 위하여 액체금속과 접착 특성이 좋은 다공성 폴리머이면서 박막의 접착제 (Adhesion Promotor)로 많이 사용되는 mr-APS1 (N-(2Aminoethyl)-3-Aminopropyltrimethosylsilane, Micro Resist Technology GmbH) 을 약 10 nm의 두께로 코팅하여 사용하였다. 전체 공정도를 Fig. 2에 도시하였다.

2.3 레이저 시스템

레이저 유도 전사에 사용한 시스템 구성을 Fig. 3에 도시하였다. 레이저 빔은 인가하는 에너지를 미세하게 조절 가능한 감쇠기 통과 후 미러를 통해 갈바너 스캐너에 정렬하여 샘플에 도달하게 된다. 초점은 수직과 대각선 방향으로 설치된 있는 두대의 카메라를 통해서 조절하였다. 레이저는 Solid State Q-Switched



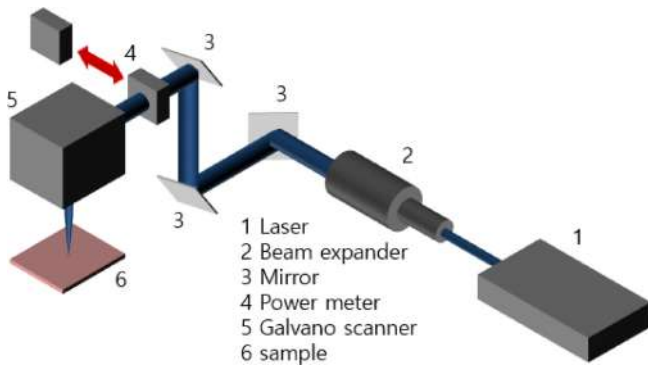


Fig. 3 Laser scanning system for LIFT process

UV 레이저(Avia 266-3, Coherent)를 사용하였으며 중심파장 266 nm, 펄스폭 20 ns, 반복률 30-300 kHz, 평균 출력은 3 W이다. 인가된 빔의 직경은 스캐너 내부의 렌즈를 이용하여 조사면에서 수십  $\mu\text{m}$  이내로 빔 크기가 조절되도록 설정하여 사용하였다. 레이저의 반복률은 30 kHz로 고정하고 갈바너 스캐너(inteliSCAN III 10, SCANLAB)를 이용하여 레이저 스폿의 크기에 따라 펄스의 오버랩(Overlap)을 조절할 수 있도록 스캔 속도를 설정하였다.

### 3. 액체금속 패터닝 및 선택적 전사

레이저 유도 전사 공정에서 희생층으로 사용될 금의 가장 효율적인 두께를 찾기 위해 레이저를 한 펄스씩 조사하여 액체금속이 손상 없이 전사 되는 레이저 에너지 밀도 조건을 찾는 실험을 수행하였다. DUV (Deep UV)인 266 nm 파장의 레이저 빔이 금에 조사 될 때 레이저 빔의 침투 깊이는 금의 흡수율( $\alpha = 8.41 \times 10^5 [1/\text{cm}]$ )의 역수로 약 12 nm로 계산된다[14]. 펄스폭 20 ns의 나노초 레이저가 조사될 때 주변부에 열 영향이 미치는 점을 고려하여 희생층의 최소 두께를 15 nm로 선정하고[15], 25, 50, 75, 100 nm의 두께 변화를 가질 때 다양한 에너지 밀도에 따른 액체금속 전사 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

실험결과 사진(Fig. 4)은 20 ns의 레이저 한 펄스 조사 후 리시버 기판에 전달된 액체금속을 찍은 결과이다. 에너지 밀도가 4.5 J/cm<sup>2</sup> 이상이 될 경우 중심부에 리시버 기판이 손상된 것으로 보이는 원 형상과 함께 손상부 주변에 액체금속이 부분적으로 전사된 것을 볼 수 있다. 이것은 가우시안 분포를 가지는 레이저 펄스에 의해 에너지 밀도가 높은 빔 중앙부는 액체금속과 희생층을 모두 어블레이션 시키고 리시버 기판까지 손상시키며 손상부 주변에도 레이저에 의한 열 영향으로 액체금속의 전사가 원활하게 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

또한, 희생층의 두께가 두꺼워 질수록 같은 에너지 밀도에서 액체금속이 전사가 되지 않는 조건이 관찰된다. 낮은 에너지 밀도에서는 나노초 레이저에 의한 가열이 희생층에 충분한 어블레이션을 일으키지 못해 액체금속을 밀어낼 수 있는 충격파

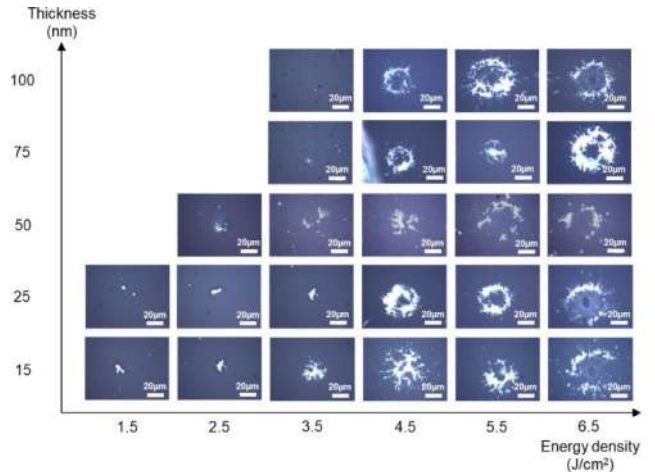
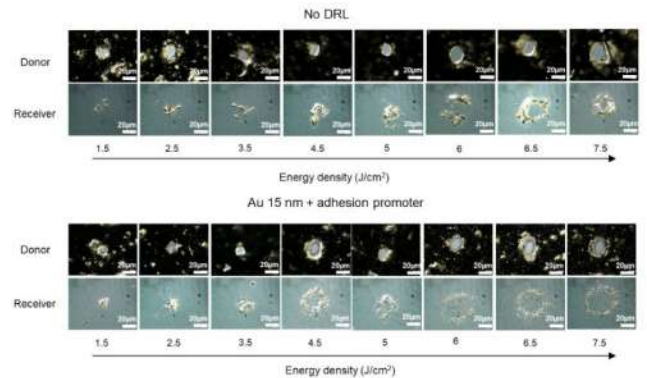
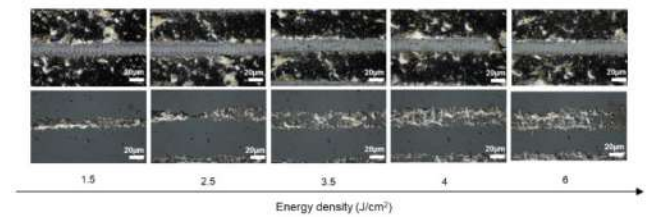


Fig. 4 Optical images of liquid metal transfer results after single-shot laser exposure for various thickness of DRL (Au) and laser energy density



(a) Experimental results for single-shot LIFT w/o DRL (upper: donor substrate, lower: receiver substrate) depending laser energy density



(b) Experimental results for line patterning by DRL-LIFT (upper: donor substrate, lower: receiver substrate) depending laser energy density

Fig. 5 (a) Single-shot LIFT results w/o DRL and (b) Line patterning results by DRL-LIFT

(Shock-Wave)가 생성되지 않았음을 알 수 있다. 본 실험을 통하여 이론적으로 계산한 DUV의 금 박막에서의 침투깊이와 유사한 15 nm가 희생층의 두께로 적합함을 확인하였고 이때 레이저 빔의 에너지 밀도는 리시버 기판에 열적 손상을 주지 않는 3.5 J/cm<sup>2</sup> 이하로 설정해야 됨을 확인하였다.

희생층의 존재 여부에 따른 액체금속 전달 효율을 비교하기 위하여 Fig. 5(a)에서 도시한 바와 같이 희생층이 있을 때와 없을 때 공정 후 도너 기판(위)과 리시버 기판(아래)을 현미경으로 관찰하였다.

Fig. 5(a)를 보면, 레이저 에너지가 증가함에 따라 에너지 밀도가 증가할수록 희생층이 있는 경우와 없는 경우 모두 레이저 빔의 강도가 센 가운데는 어블레이션이 과도하게 일어나면서 리시버 기판에 손상을 가했으며 주변부만 액체금속이 전달되어 도넛 형태의 모양이 형성되거나 액체금속이 리시버 기판에 도달할 때 강한 충격에 의하여 작은 입자로 파손된 형태를 보인다. 낮은 레이저 밀도 조건에서는 희생층이 없을 때, 전술한 바와 같이 기판 위에 액체금속이 균일하게 코팅되지 않아 액체금속의 두께가 불규칙하게 형성된다. 이에 레이저에 의해서 액체금속이 어블레이션 되면서 발생하는 충격파에 의해 전사된 액체금속 역시 불규칙한 형태로 전사가 되는 것을 확인할 수 있다.

하지만 희생층을 이용한 레이저 유도 전사에서는 낮은 레이저 에너지 밀도에 의해 희생층만 어블레이션되고 이때 발생하는 충격파에 의해 액체금속이 전사되기 때문에 액체금속의 어블레이션에 의한 손상 없이 액체금속을 전사할 수 있다. 이때 적절한 레이저 에너지 밀도를 사용하면 빔 스팟의 모양과 유사한 원 형상으로 액체금속이 전사가 되어 과도한 레이저 파워에 의한 액체금속과 기판의 열적 손상을 입히지 않는 것을 확인하였다.

단일 펄스에서의 액체금속이 전사되는 레이저의 공정 조건을 선정 후 과도한 레이저 에너지가 인가되지 않도록 레이저 펄스간의 오버랩이 생기지 않는 빔 스캐닝 속도(300 mm/s)로 설정하여 라인 패터닝을 시도하였다. 패터닝 결과를 Fig. 5(b)에서 볼 수 있다. 단일 펄스에서 액체금속이 전사되는 1.5 J/cm<sup>2</sup>에서 펄스간의 오버랩이 발생하지 않게 되면서 균일한 패턴이 전사되는 것을 확인할 수 있었다. 그보다 높은 레이저 밀도에서는 앞서 실험처럼 패턴 내부의 액체금속이 어블레이션 되면서 두 선으로 전사가 되는 것처럼 보이는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험을 통해서 얻은 최소 패턴의 선폭은 10 μm로 측정되었다. 전사된 액체금속의 전도성을 확인하기 위해서 단순한 선 패턴이 아닌 회로 형태의 패턴을 라인 패터닝 실험에서 선정된 조건으로 유연기판인 PI (Polyimide) 기판에 Fig. 6(a)에 도시된 바와 같이 간단한 전극 패턴을 형성하였다.

리시버 기판을 구부린 상태에서도 전류가 흐르는지 테스트하기 위하여 1 × 1 mm의 전극 패드를 형성하고 길이 1.5 mm, 선폭 약 40 μm의 패턴이 형성되었다. 이렇게 구현한 패턴을 이용하여 양쪽에 위치한 액체금속 전극패드에 프로브를 접촉시켜 측정된 저항값은 8 Ω로 측정되었으며 변형 전후에도 저항값이 변하지 않는 것을 확인하였다.

레이저를 이용하여 미세한 전도성 물질을 선택적으로 전사할 수 있는 장점을 적용하기 위해 전극 리페어 공정을 시도하였다.

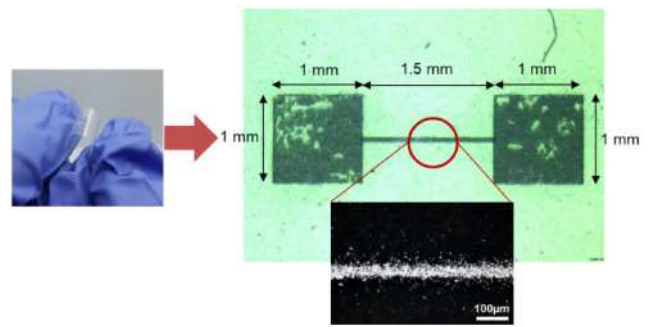


Fig. 6 Liquid metal line and electrode patterning on polyimide (PI) substrate

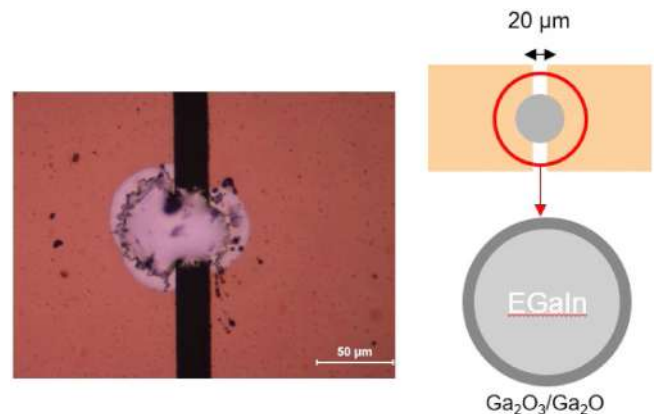


Fig. 7 Liquid metal repair fabrication between gold electrodes

이를 실험하기 위하여 20 μm 간격으로 떨어져 있는 1 × 1 mm 금 전극 패드 사이에 액체금속을 선택적으로 전사를 하였다. 그 결과 저항값이 5 Ω가 나오며 두 전극 패드를 성공적으로 연결시키는 것을 알 수 있었다.

액체금속은 다른 금속 소재보다 일반적으로 다소 높은 저항값을 형성하는데 이것은 액체금속 표면에 형성되는 산화막에 의해서 기인한다. 액체금속의 산화막은 금속과 접촉 시 접촉 저항이 증가하는 단점을 가지고 있지만 도너 기판에 액체금속을 코팅할 때는 산화막이 기판과의 접촉력을 향상시키는 효과를 준다. 이러한 산화막의 장단점을 공정에 잘 활용하는 것이 필요한데, Fig. 2의 공정도에서 도너 기판에 접착층을 도포한 후 액체금속을 코팅할 때 액체금속 표면에 수 nm의 두께로 형성되는 산화막에 의해서 접착층과의 코팅이 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 도너기판에 액체금속이 코팅된 후에 표면에 산화막이 존재하고 이 상태로 금속전극 리페어를 수행할 경우는 산화막과 금속의 접촉저항에 의해 저항이 높게 형성되므로 전사공정 전에 산화막을 제거하는 것이 필요하다. 이를 위하여 레이저 전사공정 전에 액체금속이 코팅된 도너기판을 염산(HCl)이 들어 있는 챔버에서 산화막 제거 공정 후 공정을 진행하여 연결하고자 하는 금속 전극과의 작은 저항을 갖는 회로 리페어 공정을 성공적으로 수행할 수 있었다.

#### 4. 결론

플렉서블 혹은 웨어러블 디바이스의 전극으로서 많은 연구가 이루어지는 액체금속을 기존의 연구보다 얇은 선폭을 가지며 대면적으로 공정이 가능하며 저출력의 레이저를 이용하여 빠르고 간단하게 리페어와 패터닝 공정을 할 수 있는 기술을 개발하였다. 이 연구를 통해 액체금속을 다양한 기판 위에 전사할 수 있으며 열에 약한 물질일지라도 기판에 손상 없이 선택적으로 전사할 수 있다.

금을 희생층으로 사용하여 액체금속이 레이저의 직접적인 영향을 받지 않고 온전한 상태의 액체금속이 전사될 수 있는 희생층의 두께를 찾을 수 있었으며  $1.5 \text{ J/cm}^2$ 라는 낮은 에너지 밀도를 이용하여 빔 직경에 해당하는  $10 \mu\text{m}$ 의 선폭을 형성할 수 있었다. 이를 통해 레이저 빔 직경을 조절한다면 더욱 작은 선폭의 액체금속 전사가 가능할 것으로 판단된다.

본 결과를 바탕으로 구부리거나 휘 수 있는 기판에 전극으로 사용할 수 있는 액체금속을 정밀하게 선택적으로 전사함으로써 전극의 인터커넥션과 전극 리페어 공정의 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 나노소재기술개발사업(2018M3A7B4069995)과 한국기계연구원 주요사업(NK236E, NK240G)의 일환으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- Li, G., Wu, X., Lee, D.-W., (2015), Selectively plated stretchable liquid metal wires for transparent electronics, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 1114-1119.
- Ji, S. Y., Ajmal, C. M., Kim, T., Chang, W. S., Baik, S., (2017), Laser patterning of highly conductive flexible circuits, *Nanotechnology*, 28(16), 165301.
- Zheng, Y., Zhang, Q., Liu, J., (2013), Pervasive liquid metal based direct writing electronics with roller-ball pen, *Aip Advances*, 3(11), 112117.
- Jeong, S. H., Hjort, K., Wu, Z., (2015), Tape transfer atomization patterning of liquid alloys for microfluidic stretchable wireless power transfer, *Scientific Reports*, 5(1), 1-7.
- Li, G., Wu, X., Lee, D.-W., (2016), A galinstan-based inkjet printing system for highly stretchable electronics with self-healing capability, *Lab on a Chip*, 16(8), 1366-1373.
- Jin, S. W., Park, J., Hong, S. Y., Park, H., Jeong, Y. R., Park, J., Lee, S.-S., Ha, J. S., (2015), Stretchable loudspeaker using liquid metal microchannel, *Scientific Reports*, 5(1), 1-13.
- Germain, C., Charron, L., Lilje, L., Tsui, Y. Y., (2007), Electrodes for microfluidic devices produced by laser induced forward transfer, *Applied Surface Science*, 253(19), 8328-8333.
- Morley, N., Burris, J., Cadwallader, L., Nornberg, M., (2008), GaInSn usage in the research laboratory, *Review of Scientific Instruments*, 79(5), 056107.
- Banks, D. P., (2008), Femtosecond laser induced forward transfer techniques for the deposition of nanoscale, intact, and solid-phase material, Ph.D. Thesis, University of Southampton.
- Fardel, R., Nagel, M., Nüesch, F., Lippert, T., Wokaun, A., (2009), Shadowgraphy investigation of laser-induced forward transfer: Front side and back side ablation of the triazene polymer sacrificial layer, *Applied Surface Science*, 255(10), 5430-5434.
- Boutopoulos, C., Alloncle, A., Zergioti, I., Delaporte, P., (2013), A time-resolved shadowgraphic study of laser transfer of silver nanoparticle ink, *Applied Surface Science*, 278, 71-76.
- Banks, D., Kaur, K., Gazia, R., Fardel, R., Nagel, M., Lippert, T., Eason, R., (2008), Triazene photopolymer dynamic release layer-assisted femtosecond laser-induced forward transfer with an active carrier substrate, *EPL (Europhysics Letters)*, 83(3), 38003.
- Noginov, M., Zhu, G., Gavrilenko, V., (2007), Sensitized nonlinear emission of gold nanoparticles, *Optics Express*, 15(24), 15648-15655.
- Johnson, P. B., Christy, R.-W., (1972), Optical constants of the noble metals, *Physical Review B*, 6(12), 4370-4379.
- Chichkov, B. N., Momma, C., Nolte, S., Von Alvensleben, F., Tünnermann, A., (1996), Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Applied Physics A*, 63(2), 109-115.

**Minje Jo**

M.S. in Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is nano mechatronics.

E-mail: [jminje1205@gmail.com](mailto:jminje1205@gmail.com)

**Seok Young Ji**

Ph.D. candidate in the Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science & Technology (UST). His research interest is nano mechatronics.

E-mail: [ji10047@kimm.re.kr](mailto:ji10047@kimm.re.kr)

**Jungho Cho**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is welding physics and process engineering.

E-mail: [junghocho@chungbuk.ac.kr](mailto:junghocho@chungbuk.ac.kr)

**Won Seok Chang**

The head of the Department of Nano-Manufacturing Technology of KIMM and Professor in the Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science & Technology (UST). His research interest is laser based material processing and lithography.

E-mail: [paul@kimm.re.kr](mailto:paul@kimm.re.kr)

# Scheduling for Assembly Line with Human–Robot Collaboration

Kosuke Inoue<sup>1,2,#</sup>, and Hideki Aoyama<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Integrated Design Engineering, Keio University

<sup>2</sup> Makino Milling Machine Co., Ltd.

<sup>3</sup> Faculty of Science and Technology, Keio University

# Corresponding Author / E-mail: [inoueko@makino.co.jp](mailto:inoueko@makino.co.jp), TEL: +81-46-401-2373

ORCID: 0000-0003-1757-2841

KEYWORDS: Assembly scheduling, Skill, Cooperative assembly, Collaborative assembly, AGV

*In the scheduling of assembly lines with human–robot collaboration, variations in workload caused by differences in the available working hours of workers and robots must be minimized. A scheduling method that considers buffers shared by automated guided vehicles and cooperative assembly by multiple workers is proposed herein. In particular, cooperative work requires an assembly schedule that minimizes the make span and satisfies the delivery date, while accounting for the possibility of work partitioning, the number of workers, as well as their available time slots and skills. Hence, it is difficult to obtain an exact optimal solution within a reasonable computation time using existing methods such as mathematical programming. Heuristic or metaheuristic approaches are effective for solving this problem. However, these approaches are not suitable for cooperative assembly by multiple workers. Therefore, a genetic algorithm supported by dispatching rules with four genes is proposed. Computational experiments are conducted based on multiple worker skills. The results showed that when the worker skills are the same, the genetic representation of the job name and part processing order is effective, whereas when the worker skills are different, the genetic representation of the cooperative process with the worker for each operation is effective.*

Manuscript received: August 9, 2022 / Revised: October 7, 2022 / Accepted: October 20, 2022

## 1. Introduction

In the manufacturing industry of a society where the labor force is declining, automation is necessitated to improve the production volume per worker. However, in assembling high-value-added products, many tasks exist that are difficult unless humans are involved, and the effective operation of an assembly line involving human–robot collaboration is required. Since humans and robots differ not only in terms of production capacity per unit time, but also in workable time zones, the workload of each process fluctuates significantly. Furthermore, the workload of each process fluctuates owing to changes in product specifications and high-mix production. When the workload variation between processes is significant, the production volume is restricted by processes involving high workloads; therefore, variations in workload must be suppressed. In this study, we focused on a shared buffer that

aggregates intermediate products on an assembly line and cooperative work in which multiple workers perform multiple processes simultaneously for the same assembly target to reduce the variation in workload on the assembly line, where human–robot collaboration is involved.

In a shared buffer, the buffer capacity is shared by aggregating the intermediate products of an entire assembly line to effectively exploit the buffer capacity even when the workload of each process fluctuates. It can be easily realized by transporting the assembly target to a place other than the workplace in the next process using an automated guided vehicle (AGV). Figure 1 shows the shared buffers for intermediate products transported by AGV. In case that another intermediate product exists in next station, the intermediate product cannot go to next station. When the intermediate product is transported to a shared buffer, the station will be ready for other intermediate product to be placed. In cooperative work, multiple

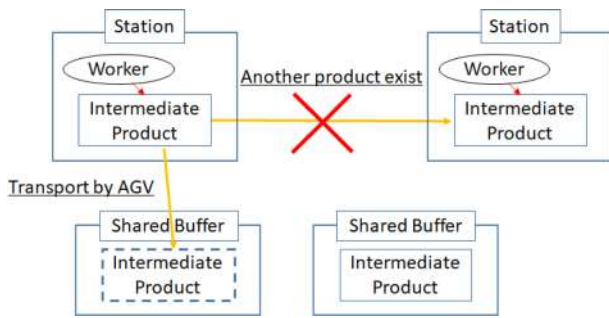


Fig. 1 Shared buffer utilization by AGV

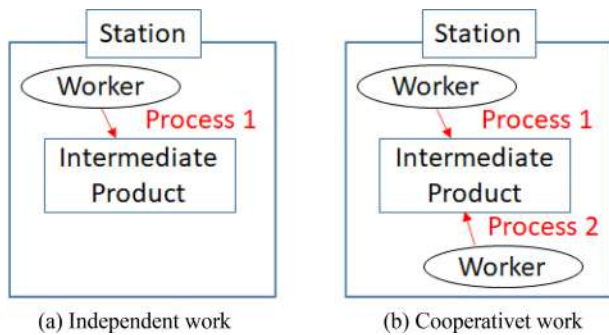


Fig. 2 Independent work and cooperative work

workers perform multiple processes simultaneously for the same assembly target to dynamically allocate the production capacity based on fluctuations in the workload of each process. Figure 2 shows the difference between independent work and cooperative work. An intermediate product can be assembled faster by cooperative work. Cooperative work cannot be performed at all times owing to restrictions such as the possibility of work division, number of workers, and workable time zone. Moreover, even if cooperative work can be conducted, the effectiveness degree can change depending on the skill difference among the workers.

In an assembly line where the workload of each process fluctuates significantly, the scheduling of each production resource such as workers and robots becomes increasingly important to effectively suppress variations in the workload. Therefore, a model that can collectively manage elements such as unit transport by AGVs, evacuation to a buffer, a workable time zone between workers and robots, worker skills, and cooperative work is required. Furthermore, because many factors must be considered and scheduling becomes more complicated, an algorithm that derives a feasible and efficient schedule within a permissible time is required. The objectives of this study are to make such a model and scheduling algorithm.

Studies that model the assembly line typically describe the constraints of intermediate products [3,4,6-9] and AGVs [2,3,13];

however, none of these studies involve worker skills or shifts. Some studies consider worker skills [5,12] but shifts and intermediates are not considered. Meanwhile, other studies involve cooperative work by multiple workers [1] but do not consider worker skills.

Regarding the scheduling algorithm, in studies that involve the occupancy constraint of the location where the intermediate product is placed, a method for deriving the exact optimum solution of the schedule via mathematical programming has been proposed. However, it has been shown that as the scale of the problem increases, it becomes difficult to solve it in an acceptable time [3,6,8]. In addition, by lengthening the scheduling time unit, a solution can be derived in an acceptable time even for a complicated problem that manages cooperative work by multiple workers [1]; however, this results in a low time resolution of scheduling.

Heuristic and metaheuristic methods can be used to derive a solution to this problem in an acceptable time regardless of the time resolution of scheduling [2-4,7-9,13]. Among them, the genetic algorithm is applicable to many areas; for example, in studies that consider worker skills, a method based on the arrangement of workers as a gene [5,11] has been proposed. However, no method has been proposed for assigning cooperative work by multiple workers.

In this study, we target scheduling problems that consider cooperative work by multiple workers with different skills in an assembly line where robots collaborate with multiple workers with a limited work time zone, where units are transported by AGVs and evacuated to a buffer. We propose a solution based on the modeling of an assembly line and the genetic algorithm. Additionally, we conduct a numerical experiment in which different skills and shifts are set for each worker while targeting the assembly line of machine tools, as well as verify the usefulness of the proposed method.

## 2. Scheduling Problem Setting

### 2.1 Assembly Line Model to Be Scheduled

The model of the assembly line targeted in this study is described. In the assembly line, multiple units are assembled individually and then combined; finally, all the units are combined. In the assembly of machine tools, the bed and column are individually assembled as a unit and then combined. Assembly per assembly target is defined as one job, and one job comprises multiple processes. A predetermined order relationship exists between processes, and one worker or robot performs work for one

process. The processes of different units can be performed in parallel. Furthermore, cases exist where processes of the same unit can be performed in parallel. For example, when assembling multiple components to one unit, one worker may perform individual assemblies, or multiple workers may assemble components in parallel. In cooperative work, multiple workers perform multiple processes of the same unit simultaneously. Examples of processes in assembling a machine tool include mounting a unit on an AGV by a worker, assembling components to a unit by a worker or robot, and connecting a bed and column by a worker or robot.

The location wherein the process is executed is called the workplace, and the location wherein one or more workplaces where the same type of process is performed is called the station. Multiple processes are preset for one station, and processes of different units may be set. For example, bed and column assembly processes may be executed at station A. One unit is transferred to the workplace at a time, and a preset process is performed.

Subsequently, the worker goes to an arbitrary workplace and executes one process at a time. The worker's skills are predetermined, whereas the ability to execute a specific process and the execution time change depending on the skill. In addition, the shift is predetermined for the worker, and the process can be executed during the shift, not outside the shift.

The robot is fixed to a specific station and executes one process at a time. Executable processes are preset for a specific robot. Within the station, the robot can perform processes in multiple preset workplaces. For example, different processes can be performed in two workplaces reachable by the robot arm. The operating time of the robot is set in advance, and the robot can be operated 24 h a day.

A unit is mounted on an AGV and transported between stations. The occupancy of an AGV is released when units (a bed and a column) are combined or when a finished product is unloaded.

If the destination station is occupied when it traverses between stations of a unit, the AGV equipped with the unit traverses to the shared buffer space and waits for the destination station to become available. If no free space is available in the shared buffer space, it remains at the source station and waits for the destination station or shared buffer space to become available. The capacity of the shared buffer space is to be predetermined. Figure 3 shows the processes: a unit of job 1 waits at the station where previous process of job 1 is executed, then waits at shared buffer, then waits at the next station until next process starts in the form of a Gantt chart. The movement time of the unit is sufficiently small with respect to the execution time of the process and is thus negligible.

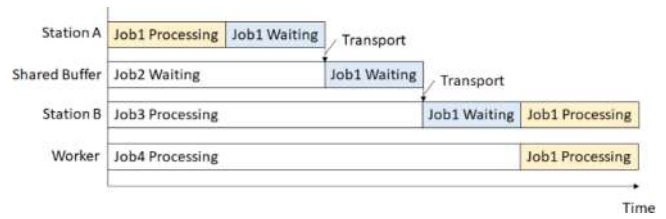
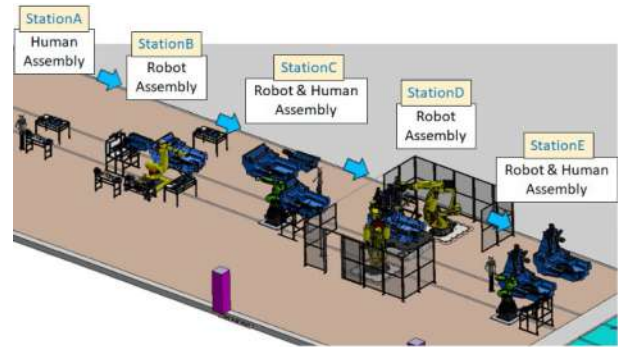
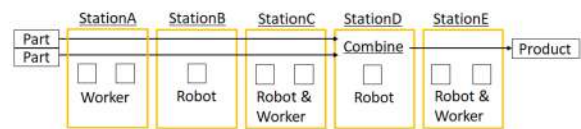


Fig. 3 The unit occupies the station or shared buffer until the next process start



(a) Overview



(b) Placement of stations, workers, and robots

Fig. 4 Assembly line with human-robot collaboration

**2.2 Condition Setting for Machine Tool Assembly Line**

The machine tool assembly line shown in Figure 4 is represented by the model described in Section 2.1 above as an example of the assembly line. The assembly line in Fig. 4 comprises stations A to E. One machine tool is assembled by assembling the necessary components to the bed and column and connecting them. One job is executed by performing the following processes:

- (1) Station A comprises two workplaces, and workers perform their tasks.
- (2) Beds and columns are appropriately transported from station A to the workplace of station B. Station B comprises one workplace, and components are assembled by a robot.
- (3) Beds and columns are appropriately transported from station B to the workplace of station C. Station C comprises two workplaces, and components are assembled by a worker and robot.
- (4) Beds and columns are transported from station C to the workplace of station D. Station D comprises one workplace, and a robot connects the bed and column.
- (5) The combined bed and column are transported from station D

to the workplace of station E. Station E comprises two workplaces, and the workers and robots perform their tasks.

The following specific conditions are set:

- Workers can shift stations A, C, and E as appropriate to perform arbitrary work.
- At stations B, C, and E, only one robot can perform its task. At station D, two robots can perform their tasks, but they are considered as one robot because the processes are always synchronized.
- The worker’s day shift comprises a continuous work time of 4 h in the first half, a break time of 0.75 h, and a continuous work time of 4 h in the second half. The night shift begins immediately after the day shift and involves a continuous work time of 4 h in the first half, a break time of 0.75 h, and a continuous work time of 3.5 h in the second half.
- The robot operates 24 h a day.
- Two workers are assigned each to the day and night shifts.

### 3. Scheduling Method based on GENETIC Algorithm

#### 3.1 Gene Expression for Scheduling

Herein, we propose a scheduling method based on a parameter-free genetic algorithm (PFGA) [10,12]. Table 1 shows the genes assigned to the three jobs, which are represented by genes assigned to four classes. The four classes are (1) job name, (2) processing order of bed/column, (3) cooperative process with workers for each operation, and (4) assigned worker number for each operation. These genes are considered as one chromosome. The parameter values of these genes in Table 1 show an example of a genetic representation of three jobs in which four workers and three cooperative processes are assigned. The genes of each class are described as follows:

① Job name

Genes are represented by integers from 1 to the total number of jobs. By changing the gene that represents the job name assigned to the job processing order, the job processing order will change.

② Processing order of bed/column

Genes 1 and 2 represent a bed and a column, respectively, which are processed in the order in which the genes are listed. For example, the notation “1, 2” represents scheduling in which the bed is processed first, and the notation “2, 1” represents scheduling in which the column is processed first. It is assigned to the process before the bed and column are connected at station D, i.e., the process of stations A, B, and C.

③ Cooperative process with workers for each operation

Regarding the processes performed by the operator, the

Table 1 Example of genetic representation of three jobs (A job is represented by genes assigned to four classes)

Job processing order	1	2	3
① Job name	2	1	3
② Processing order of bed/column	1, 2	2, 1	1, 2
③ Cooperative process with workers for each operation	1, 0, 1	1, 1, 1	0, 1, 0
④ Assigned worker number for each operation	1, 3, 4, 4, 2, 1, ..., 1, 2	4, 3, 2, 1, 2, 3, ..., 4, 3	1, 1, 2, 4, 3, 3, ..., 4, 3

processes for which cooperative work is realizable by the operator are flagged; the gene of processes 1 and 0 indicate that the cooperative work is performed and not performed, respectively. For example, cooperative work can be performed in three steps, then three genes will be assigned in order. When a gene of this class is “1, 0, 1,” it is scheduled to perform cooperative work, not perform cooperative work, and perform cooperative work, in that order.

④ Assigned worker number for each operation

The worker number is a gene assigned to the process performed by the worker. The order of genes of the worker number is arranged in the order of the bed process, the column process, and the process after the bed and column are integrated.

#### 3.2 Scheduling Process

Figure 5 shows the entire flow of the scheduling process using PFGA. The flow is as follows:

- Step 1: An empty local population is generated.
- Step 2: In all jobs, for genes in classes (1) job name, (2) processing order of bed/column, (3) cooperative process with workers for each operation, and (4) assigned worker number for each operation, the genes that should be included in each class are randomly arranged and assigned. However, only when Step 2 is performed for the first time, “(1) job name” is not random but is arranged in the order of the delivery date set for each job.
- Step 3: The genes of classes (1) job name, (2) processing order of bed/column, (3) cooperative process with workers for each operation, and (4) assigned worker number for each operation assigned in Step 2 are combined into one chromosome and stored in the local population. After performing Step 3 for the first time, Steps 2 to 3 are repeated because only one chromosome exists in the local population.
- Step 4: Two chromosomes in the local population are randomly extracted and crossed as parent chromosomes to generate two child chromosomes (The crossover method is



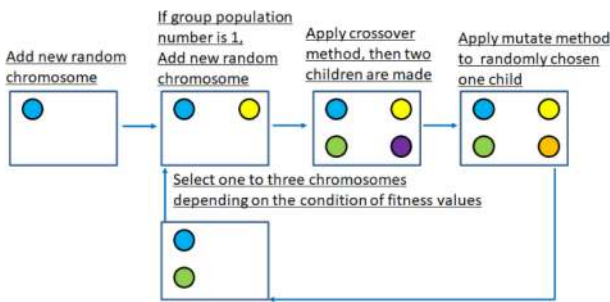


Fig. 5 The entire flow of scheduling process using PFGA

described in Section 3.3.).

- Step 5: Two child chromosomes generated in Step 4 are selected randomly and mutated (The mutation method is described in Section 3.4.).
- Step 6: A total of 1 to 3 chromosomes from the two parent chromosomes extracted in Step 4, and the two child chromosomes generated in Steps 4 and 5 are returned to the local population (The method for selecting chromosomes to be returned to the local population is described in Section 3.5.).
- Step 7: If only one chromosome exists in the local population, return to Step 2; if two or more chromosomes exist, return to Step 4, and repeat the process up to Step 6. This repetition is performed for a predetermined number of generations.

**3.3 Chromosome Crossover Method**

Multipoint crossover is applied to the “(1) job name” gene on the chromosome. Figure 6 shows an example of crossover for a chromosome with eight jobs. The numbers shown in the figure represent the “(1) job name” in the genes that constitute the chromosome. In Step 4 of Section 3.2, two parent chromosomes are extracted from the local population, as shown in Fig. 6(a). The number of chromosome cuts,  $n$ , in crossover is randomly determined between 1 and the number of jobs, -1. For example, if the number of jobs is eight, then the number of disconnections will be one to seven. For the two parent chromosomes, the cleavage position  $cp$  is randomly determined, the cleavage is performed with the number of cleavage  $n$ , and the genes are crossed to generate a child chromosome. In the example shown in Fig. 6, the number of cuts  $n$  is three, and the cut position  $cp$  is 2, 5, and 6.

When a crossover is performed, child chromosomes are generated in the following processes (Steps 1 to 3) such that the same job number does not overlap in the chromosome.

Step 1: As shown in Fig. 6(b), two parent chromosomes A and B randomly selected from the local population are cleaved by the number of cuts  $n$  to achieve subparents A1, ..., An + 1, B1, ..., Bn + 1.

Step 2: Regarding the job name genes of the even-numbered

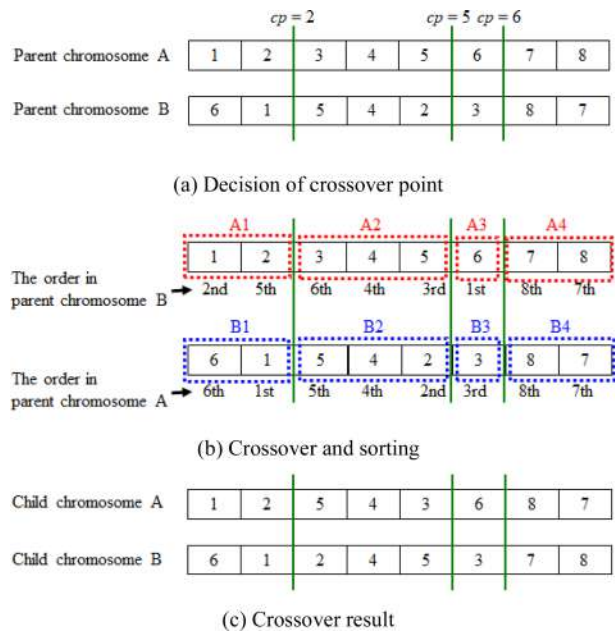


Fig. 6 Chromosome crossover processes

subparents of parent chromosome A, as shown in Fig. 6(b), the order of the job name genes arranged in parent chromosome B is verified, and within each even-numbered subparent of parent chromosome A, they are rearranged based on the order to generate child chromosome A, as shown in Fig. 6(c).

Step 3: Regarding the job name genes of the even-numbered subparents of parent chromosome B, as shown in Fig. 6(b), the order of the job name genes arranged in parent chromosome A is verified, and within each even-numbered subparent of parent chromosome B, they are rearranged based on the order to generate child chromosome B, as shown in Fig. 6(c).

When moving the position of the “(1) job name” gene, the “(2) processing order of bed/column,” “(3) cooperative process with workers for each operation,” and “(4) assigned worker number for each operation” genes that represent the job move simultaneously. Multipoint crossover is applied to the “(3) cooperative process with workers for each operation” and “(4) assigned worker number for each operation” genes related to the same “(1) job name.” For the “(2) processing order of bed/column” gene on the chromosome, the randomly selected parent gene is inherited without modification.

**3.4 Chromosome Mutation Method**

One child chromosome is randomly selected from the two child chromosomes generated by crossover. The numerical value  $m$  is randomly determined from 1 to the number of jobs possessed by the selected child chromosome, and the jobs in the child chromosome are randomly selected  $m$  times. One class is

randomly selected from the four classes of the selected job, and the gene is mutated as follows:

If the selected mutation class is “(1) job name,” when the processing order “O-order” before the mutation of the job is smaller than the processing order “M-order” after the mutation, then the processing order of the jobs in between is shifted forward individually. When the O-order before the mutation of the job is larger than the M-order after the mutation, the processing order of the jobs in between is shifted individually.

When the selected mutation class is “(2) processing order of bed/column,” only one mutant gene exists, but two genes are mutated simultaneously. For example, if the original gene is 1, 2, then genes 2, 1 are mutated; if it is 2, 1, then genes 1, 2 are mutated.

If the selected mutation class is a “(3) cooperative process with workers for each operation,” then the gene to be mutated is randomly selected from the genes of that class, and genes 1 and 0 are switched.

If the selected mutation class is “(4) assigned worker number for each operation,” a gene to be mutated is randomly selected from the genes of that class, and the gene is mutated to a gene randomly selected from the worker’s name.

### 3.5 Chromosome Selection Method

The selection of chromosomes to be returned to the local population in Step 6 of Section 3.2 is performed in one of the following cases (Cases 1 to 4) based on the fitness evaluation value derived using the method shown in Section 3.8.

- Case 1: If two child chromosomes have a higher fitness rating than the two parent chromosomes, then the two child chromosomes and the parent chromosome with the higher fitness rating are returned to the local population. This operation increases the number of chromosomes in the local population by one.
- Case 2: If two child chromosomes have a lower fitness rating than the two parent chromosomes, then the parent chromosome with the higher fitness rating is returned to the local population. This procedure reduces the number of chromosomes in the local population by one.
- Case 3: If one parent chromosome has a higher fitness evaluation value than two child chromosomes, then the parent chromosome and the child chromosome with the higher fitness evaluation value are returned to the local population. This operation does not change the number of chromosomes in the local population.
- Case 4: If one child chromosome has a higher fitness evaluation value than the two parent chromosomes, then the

Table 2 Scheduling policy

Scheduling policy	A	B	C
Gene of job number	Yes	Yes	Yes
Gene of unit priority	Yes	Yes	Yes
Gene of cooperative work	No	Yes	Yes
Worker assignment for each task	No	No	Yes
Worker priority for a task	Highly skilled worker	Highly skilled worker	Decided by gene

child chromosome is returned to the local population, and Steps 2 and 3 in Section 3.2 are performed. This operation does not change the number of chromosomes in the local population.

### 3.6 Scheduling Policy

In this study, the scheduling policies A to C shown in Table 2 were set, and a comparative evaluation was performed.

Policy A: Scheduling is performed by the genes of two classes: “(1) job name” and “(2) processing order of bed/column.” The genes of “(3) cooperative process with workers for each operation” and “(4) assigned worker number for each operation” are not used. Cooperative work should always be performed when possible. If multiple worker candidates are present simultaneously, then the worker with higher skills is prioritized. If the skill levels of the workers are the same, then the workers are assigned in the ascending order of the worker number.

Policy B: Scheduling is performed based on three classes of genes: “(1) job name,” “(2) processing order of bed/column,” and “(3) cooperative process with workers for each operation.” The gene of “(4) assigned worker number for each operation” is not used. If multiple worker candidates are present simultaneously, as in policy A, then the workers with higher skills are prioritized. If the skill levels are the same, then the workers are assigned in the ascending order of the worker number.

Policy C: Scheduling is performed based on four classes of genes: “(1) job name,” “(2) processing order of bed/column,” “(3) cooperative process with workers for each operation,” and “(4) assigned worker number for each operation.” By performing the genetic manipulation of (4), the assignment of highly skilled workers to processes that do not require high skill levels can be avoided. If multiple worker candidates are present simultaneously, then the worker defined by the gene is prioritized.

### 3.7 Process Allocation (Dispatching) Policy

The process was dispatched based on the following rules:

- Rule 1: For each job, the high-priority unit (bed or column)

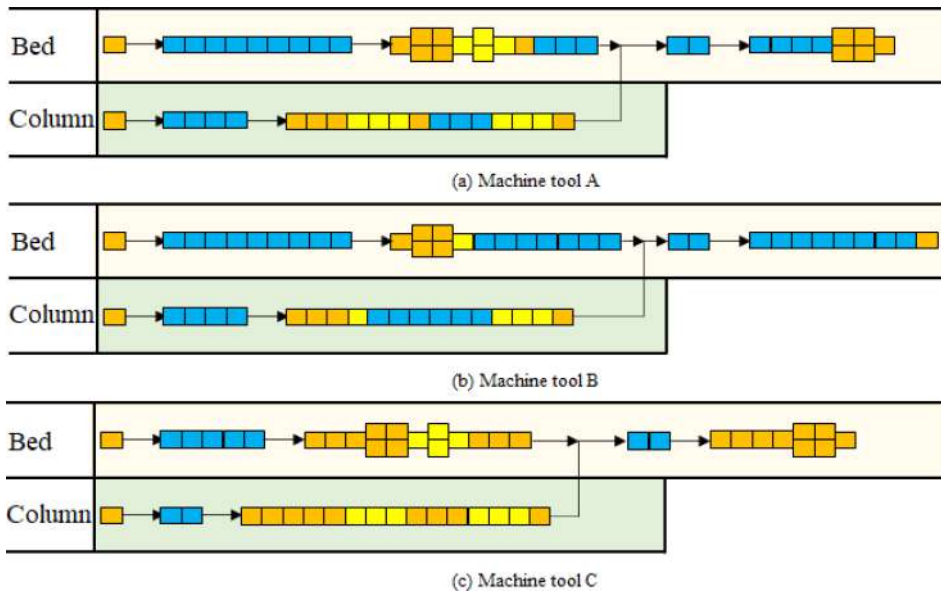


Fig. 7 Assembly process of machine tools. Two boxes lined up vertically indicate cooperative work

process, low-priority unit (bed or column) process, and post-bonding unit (bed and column) process are allocated from the genetic information described in the “(2) processing order of bed/column” class.

- Rule 2: Each process is allocated to the earliest possible time.
- Rule 3: If multiple workers who can be assigned are present simultaneously, then they are assigned based on the policy shown in Section 3.6.
- Rule 4: When the process is completed, if the next workspace is available, the unit is shifted to the next workspace; if the next workspace is not available but the shared buffer space is, the unit is shifted to the shared buffer space; if neither the next workspace nor the shared buffer space is available, then the unit will remain in the same workspace.
- Rule 5: Even if a new process exists that can be assigned to the same workplace immediately before the assigned process, if the shared buffer space is full and waiting is necessitated in the workplace, the waiting time zone may interfere with the schedule of the allocated process. In this case, a new process is assigned after the assigned process.

**3.8 Schedule Evaluation: Calculation of Fitness Evaluation Value**

For the schedule generated based on the dispatching rule, the gene fitness is evaluated by the total time from the start of the first work to the end of all work (makespan), as well as the delivery date penalty. Because the job end time does not exceed the delivery date, the fitness evaluation value EV is calculated based on Rules 1 and 2 below, and the schedule is evaluated.

- Rule 1: If the job end time exceeds the delivery date, then the penalty is calculated by adding the fixed penalty and the penalty proportional to the exceeded time (Fixed penalties and proportionality constants are preset.).
- Rule 2: The penalty calculated in Rule 1 is added to the makespan and then used as the fitness EV (The formula for calculating EV is shown in Section 4.1.).

**4. Evaluation Experiment**

**4.1 Experimental Conditions**

Numerical experiments were conducted to verify the effectiveness of the proposed scheduling method. In the numerical experiment, scheduling was performed using an assembly comprising seven types of machine tools. Figure 7 shows the assembly process of machine tools A, B, and C, and the processes performed by the robot and operator to assemble the bed and column are shown separately. The orange, blue, and yellow boxes shown by the black frames in the figure represent one process. The process is performed in order from left to right. Arrows indicate that the station being processed will change. The blue box represents the robot process. The orange box represents normal work, i.e., a process that can be performed by all workers who do not require advanced skills. The yellow boxes represent high-difficulty tasks, i.e., tasks that require a high degree of skill, and processes that can be performed by a limited number of workers. The process in which two boxes are lined up vertically represents a process in which two workers can work simultaneously. For

Table 3 Job combination and job breakdown

		Job combination I	Job combination II	Job combination III	Job combination IV
Machine tool A	Number	3	4	3	5
	Delivery deadline	April 10, 11, 14	April 11, 12, 14, 17	April 14, 16, 18	April 14, 16, 17, 17, 20
Machine tool B	Number	2	3	6	4
	Delivery deadline	April 10, 13	April 12, 14, 16	April 13, 16, 17, 17, 18, 19	April 14, 15, 17, 21
Machine tool C	Number	4	3	2	5
	Delivery deadline	April 10, 10, 12, 12	April 11, 14, 17	April 14, 18	April 14, 15, 17, 19, 20
Machine tool D	Number	1	2	2	5
	Delivery deadline	April 11	April 11, 14	April 14, 17	April 14, 15, 17, 18, 22
Machine tool E	Number	1	4	5	4
	Delivery deadline	April 10	April 11, 14, 16, 16	April 13, 15, 17, 17, 20	April 15, 15, 19, 20
Machine tool F	Number	1	2	4	2
	Delivery deadline	April 11	April 14, 16	April 14, 15, 17, 20	April 15, 18
Machine tool G	Number	3	2	3	5
	Delivery deadline	April 10, 11, 14	April 14, 17	April 13, 16, 19	April 14, 15, 19, 19, 22

Table 4 Worker skill pattern

	Shift	Skill level pattern 1	Skill level pattern 2	Skill level pattern 3
Worker 1	Day	Normal task: 1 High difficulty task: 1	Normal task: 1.2 High difficulty task: 1.2	Normal task: 1.2
Worker 2	Day	Normal task: 1 High difficulty task: 1	Normal task: 0.6 High difficulty task: 0.6	High difficulty task: 1.2
Worker 3	Night	Normal task: 1 High difficulty task: 1	Normal task: 1 High difficulty task: 1	Normal task: 0.6
Worker 4	Night	Normal task: 1 High difficulty task: 1	Normal task: 0.8 High difficulty task: 0.8	High difficulty task: 0

processes that allow cooperative work, if the skill levels of two workers who work simultaneously are equal, then the work time is also equal. Machine tools D and E have the same assembly process as machine tool A; however, their total processing times are 1.5 and 0.7 times, respectively. Machine tool F has the same assembly process as machine tool B, but its total processing time is 1.4 times longer. Machine tool G has the same assembly process as machine tool C, but its total processing time is 0.7 times longer.

Job combinations I, II, III, and IV with 15, 20, 25, and 30 number of jobs, respectively, were set (see Table 3). Additionally, Table 3 shows the breakdown and delivery date for machine tools A to G in job combinations I, II, III, and IV. These job combinations were determined based on job data from an actual conventional assembly line. The scheduling dates for each job combination (I, II, III, and IV) were verified to be April 1 and April 7. In addition, as shown in Table 4, combination patterns 1, 2, and 3 of the worker’s skill values and the shift of the workers (day shift/night shift) were set. Worker skill values were set for each of two types of processes, i.e., normal and high-difficulty

work. The actual work time RT can be expressed by the skill value of the worker corresponding to the process, S, and the standard time of the process, ST, as shown in Eq. (1). When the skill value S of the worker corresponding to the process is 0, the work cannot be performed. Although it is desirable that the skills of all workers should be equal, some workers have lower skills. As a result, in some cases, lower skill workers cannot perform some tasks. We then assumed that they would be covered by a combination with higher-skilled workers, as shown in Table 4.

$$RT = ST/S \tag{1}$$

The EV for each scheduling is calculated using Eq. (2).

$$EV = w1 \times MS + w2 \times PE \tag{2}$$

In Eq. (2), MS represents the makespan, PE the delivery penalty, and the time unit for each is one hour. The makespan and delivery date are weighted by w1 and w2, respectively. In this evaluation experiment, w1 = 1 and w2 = 5 were prioritized to satisfy the delivery date. PE is calculated using Eqs. (3) and (4) based on the

conditions. The smaller the EV, the higher is the evaluated value.

$$PE = 0 \text{ (when FI is than DU)} \tag{3}$$

$$PE = (FI - DU) \times i + j \text{ (when FI has passed DU)} \tag{4}$$

Equation (3) is applied when the job completion date FI is earlier than the job delivery date DU. Equation (4) is applied when the job completion date FI exceeds the job delivery date DU. In Eq. (4), i is the penalty coefficient proportional to the time over the delivery date, and j is the fixed penalty value assigned when the delivery date is exceeded; in this numerical experiment, i = 1 and j = 24 h (1 day). FI-DU is the period between FI and DU, expressed in units of h.

**4.2 Scheduling Results and Discussion**

Figure 8 shows the result of dividing the EV of schedule policies A, B, and C shown in Section 3.6 by the number of jobs to obtain the EV per job when scheduling on April 1 and April 7 for job combinations I, II, III, and IV (whose number of jobs are 15, 20, 25, and 30, respectively) shown in Table 3 for each of the worker skill value combination (1, 2, and 3) shown in Table 4. The average value of 10 trials is shown. Based on a preliminary experiment, the number of generations of the genetic algorithm was set to 300. The calculation times per trial based on a computer with a Core i7-6600U CPU and 16 GB of memory, regardless of the rules, were as follows: 2 min when the number of jobs was 15; 4 min, 20; 6 min, 25; 8 min, 30.

Although policies A and B are similar, policy B yielded slightly higher evaluation scheduling results. Since policy C comprises more gene combinations than policies A and B, it can yield highly evaluated scheduling results, although they are lower than those yielded by policies A and B. In dispatching policy B, rules are set for consecutive processes, and if the skills are the same, the same worker is assigned in the ascending order of the worker number; furthermore, the possibility of assigning the same worker is high. In policy C, workers are assigned to each process. Therefore, cases exist where the workers are different for each process; consequently, some processes require a wait time for the appropriate workers.

Therefore, policy C yields lower scheduling results than policies A and B.

In skill value combination pattern 1, policy B resulted in lower evaluation results than policy A in some cases. In the abovementioned pattern, since the skill values of all the workers are the same, the work time of each process by two workers who perform cooperative work is the same, and no waiting time is generated during the cooperative work. Because cooperative work

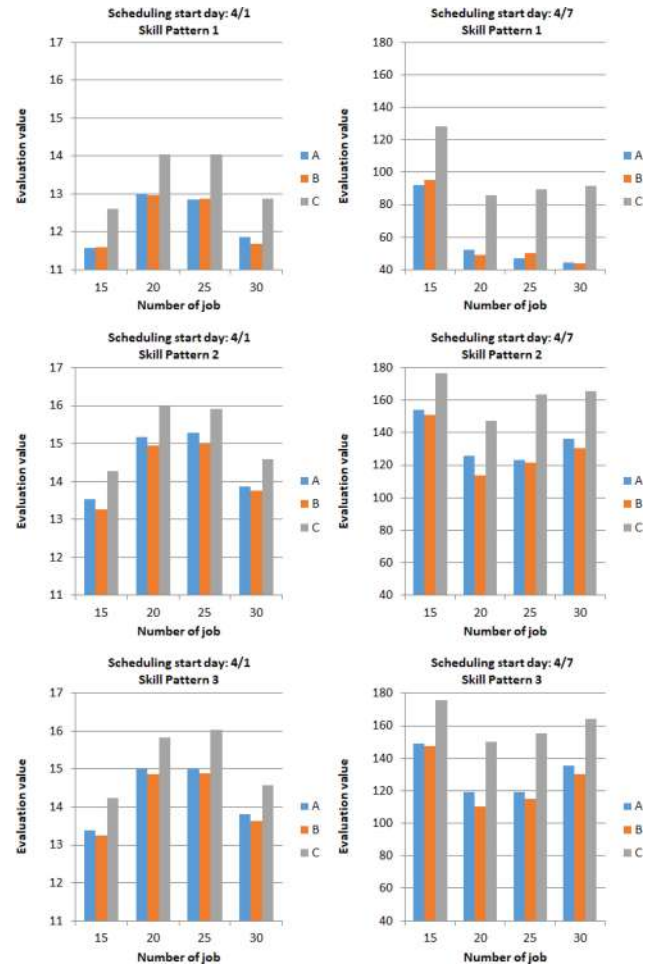


Fig. 8 Evaluation values of makespan and delivery penalty for three different worker skill patterns calculated based on three different scheduling policies. Scheduling policy B is effective for skill patterns 2 and 3, where skill of each worker differs

is always performed in policy A whereas the presence or absence of cooperative work is considered in policy B, it is assumed that scheduling evaluation results lower than those yielded by policy A will be obtained when cooperative work is not performed in policy B. However, when the number of jobs is 20 or 30, policy B yields a higher evaluation scheduling result than policy A. Under the scheduling conditions of this study, the work time per day using only robots is 8.5 h. Therefore, to efficiently perform work using only the robot, storing AGVs in the middle of multiple processes in the buffer may be more effective than proceeding with the process via cooperative work. Hence, it is assumed that the scheduling result of policy B, which considers the presence or absence of cooperative work, yields a higher evaluation value than policy A, which always performs cooperative work.

In skill value combination patterns 2 and 3, policy B always yielded a higher evaluation scheduling result than policy A. If the skills of two workers who perform cooperative work are different and their work

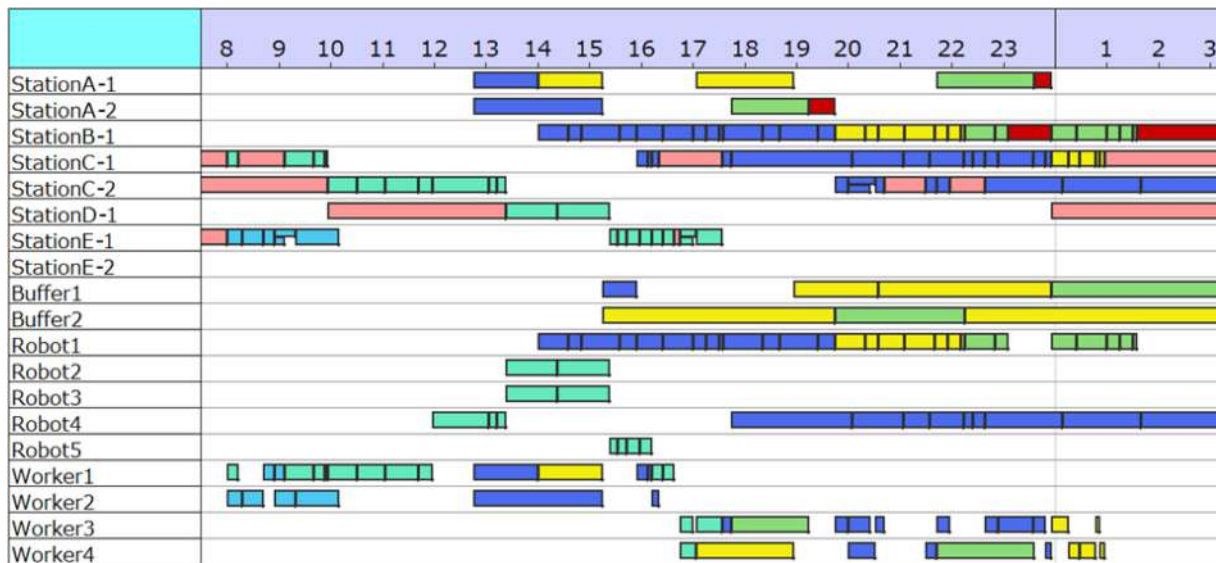


Fig. 9 Schedule Gantt chart. Red bars indicate waiting before the process station, and light-red bars indicate waiting at the next process station. Other bars represent job difference

times differ, then waiting time may be incurred. Hence, it is assumed that high evaluation scheduling results are obtained when cooperative work is not performed, and that those results are obtained by policy B, which considers the cooperative work, instead of policy A, which always performs the cooperative work.

The evaluation values between skill value combination patterns 2 and 3 did not differ significantly. Pattern 3, which includes workers with low skill values, yielded a worse evaluation value than combination pattern 2; however, the number of high-difficulty work processes was less than that of normal work. Therefore, it is assumed that even if a process exists that cannot be performed based on the situation, it will not impose a significant effect.

Figure 9 shows the obtained scheduling results partially in the form of a Gantt chart. The horizontal axis represents time, and the bars in the Gantt chart represent the state in which a bed or column is placed in each station or shared buffer space, as well as the state in which the robot/worker is operating. The red bar of the station indicates that the bed or column is waiting in the workplace after work, and the light red bar of the station indicates that the bed or column has shifted to the workplace where the next process is to be performed and is waiting for work. Colors other than red and light red indicate the difference between jobs.

**5. Conclusion**

Scheduling issues in assembly lines that include unit transport by AGVs, evacuation to buffer, different skills, and collaborative work of multiple workers and robots with workable time zones,

and cooperative work by multiple workers were investigated in this study. Subsequently, an assembly line model was proposed, as well as a scheduling method that combines a genetic algorithm and dispatching rules based on that model. In the proposed method, the machine tool assembly line is represented by the genes of four classes: “(1) job name,” “(2) processing order of bed/column,” “(3) cooperative process with workers for each operation,” and “(4) assigned worker number for each operation.” We successfully achieved a schedule based on the EV of the schedule.

A scheduling system was constructed based on the proposed method, and numerical experiments were conducted to determine the appropriate conditions for reducing the makespan and fulfilling the delivery date. When the worker skills were the same, the scheduling evaluation results that accounted for the job name and processing order of bed/column, or those that accounted for the account job name, the processing order of bed/column, and cooperative process with workers for each operation did not differ significantly. However, when the worker skills differed, the scheduling that accounted for the job name, the processing order of bed/column, component priority, and cooperative process with workers for each operation was effective. Hence, the appropriate allocation of cooperative work by considering worker skills can effectively improve the production volume in a complicated assembly line, where the workload of each process fluctuates significantly.

**REFERENCES**

1. Borreguero-Sanchidrián, T., Pulido, R., García-Sánchez, Á.,

- Ortega-Mier, M., (2017), Flexible job shop scheduling with operators in aeronautical manufacturing: A case study, *IEEE Access*, 6, 224-233.
2. Chen, C., Tiong, L. K., Chen, I.-M., (2019), Using a genetic algorithm to schedule the space-constrained AGV-based prefabricated bathroom units manufacturing system, *International Journal of Production Research*, 57(10), 3003-3019.
  3. Elmi, A., Topaloglu, S., (2013), A scheduling problem in blocking hybrid flow shop robotic cells with multiple robots, *Computers & Operations Research*, 40(10), 2543-2555.
  4. Fu, G., (2004), A method for solving jobshop scheduling problems with limited common buffers, *transactions of the institute of systems, Control and Information Engineers*, 17(3), 113-121. Japanese
  5. Gong, G., Deng, Q., Gong, X., Liu, W., Ren, Q., (2018), A new double flexible job-shop scheduling problem integrating processing time, green production, and human factor indicators, *Journal of Cleaner Production*, 174, 560-576.
  6. Heger, J., Voss, T., (2018), Optimal scheduling of AGVs in a reentrant blocking job-shop, *Procedia Cirp*, 67, 41-45.
  7. Hino, R., Kusumi, T., Yoo, J. K., Shimizu, Y., (2005). Job shop scheduling focusing on role of buffer, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, 71(702), 685-692. Japanese
  8. Liu, S. Q., Kozan, E., Masoud, M., Zhang, Y., Chan, F. T., (2018), Job shop scheduling with a combination of four buffering constraints, *International Journal of Production Research*, 56(9), 3274-3293.
  9. Maleki-Daroukolaei, A., Modiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Seyyedi, I., (2012), A three-stage assembly flow shop scheduling problem with blocking and sequence-dependent set up times, *Journal of Industrial Engineering International*, 8(1), 1-7.
  10. Matsui, S., Yamada, S., (2007), An empirical performance evaluation of a parameter-free genetic algorithm for job-shop scheduling problem, *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 3796-3803.
  11. Peng, C., Fang, Y., Lou, P., Yan, J., (2018), Analysis of double-resource flexible job shop scheduling problem based on genetic algorithm, *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 1-6.
  12. Sawai, H., Kizu, S., (1998), Parameter-free genetic algorithm inspired by "disparity theory of evolution", *Proceedings of the International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, 702-711.
  13. Zeng, C., Tang, J., Yan, C., (2014), Scheduling of no buffer job shop cells with blocking constraints and automated guided vehicles, *Applied Soft Computing*, 24, 1033-1046.

**Kosuke Inoue**

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

**Hideki Aoyama**

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





# 기판에 사전변형률이 인가된 박막의 구조 해석

## Structural Analysis of Thin Film with Applied Pre-Strain in Substrate

김정엽<sup>1,#</sup>, 장성환<sup>2</sup>, 박아영<sup>3</sup>, 황보윤<sup>1</sup>, 송준엽<sup>3</sup>  
Jung Yup Kim<sup>1,#</sup>, Sunghwan Chang<sup>2</sup>, Ah-Young Park<sup>3</sup>, Yun Hwangbo<sup>1</sup>, and Jun Yeob Song<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 나노역학장비연구실 (Department of Nano Mechanics, Korea Institute of Machinery & Materials)  
<sup>2</sup> 한국기계연구원 나노공정장비연구실 (Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery & Materials)  
<sup>3</sup> 한국기계연구원 초정밀장비연구실 (Department of Ultra Precision Machines & Systems, Korea Institute of Machinery & Materials)  
# Corresponding Author / E-mail: jykim@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7889  
ORCID:0000-0002-3795-6415

KEYWORDS: Pre-strain (사전변형률), Wrinkling (주름), Buckling (좌굴), Finite element analysis (유한요소해석), Stretchability (신축성)

*Stretchability enables the device to be patched to a curved surface or to be folded several times to maximize usability. Among many methods, the pre-strain method is advantageous in that the stretchability as much as the pre-strain applied to the substrate is guaranteed even without material improvement. When the pre-strain is restored to its original state, the thin film gets wrinkled or the substrate gets buckled. Wrinkles and buckling that appear in this way are affected by the physical properties and dimensions of the substrate, and it is necessary to analyze their effect. In this study, a theoretical approach was used and a nonlinear post-buckling analysis was performed using a finite element method. The analysis was divided into two steps: the pre-strain step and the recovery step. According to the analysis results, it was possible to predict and analyze the wrinkle and buckling behavior due to pre-strain according to the physical properties and dimensions of the substrate. The pre-strain analysis method can be applied to multi-layer structures with three or more layers and can be used as a method to analyze wrinkle suppression and wrinkle shape control in future studies.*

Manuscript received: August 25, 2022 / Revised: November 19, 2022 / Accepted: November 29, 2022

### NOMENCLATURE

$P_c$	=	Critical Load
$\sigma_c$	=	Critical Stress
$\epsilon_c$	=	Critical Strain
$\lambda$	=	Wave Length
A	=	Amplitude
k	=	Winkler's Modulus of an Elastic Half-Space
$h_f$	=	Thickness of Thin Film

### 1. 서론

착용형 에너지 소자, 인체 패치형 소자 그리고 디스플레이

소자는 신축성이 있으면 변형이 되더라도 전기적 특성이 유지되어 형태에 제약을 받지 않게 되므로 많은 연구자들의 관심을 받고 있다[1,2]. 신축성을 구현하기 위해서 구조적 방법 또는 재료적 방법의 접근을 하여 개선하는 시도들이 많은 연구자들에게 의해서 수행되고 있다[3,4]. 신축성 개선을 위한 구조적 방법으로 웨이브, 주름형 배선, 아일랜드-브리지 구조, 코일, 오리가미 키리가미, 섬유, 균열, 인터락, 사전변형률 등을 이용하는 방법이 있으며, 재료적 방법으로는 나노와이어, 나노파티클, 액체 금속, 전도성 폴리머와 같은 다양한 재료를 도입하고 있다[5,6]. Kim의 연구와 같이 사전변형률의 구조적 방법과 나노와이어의 재료적 방법을 동시에 사용할 수 있다[7]. 신축성 소자의 기판에는 PDMS나 폴리우레탄과 같은 소프트한 재료가 사용된다. 특히 Qi의 연구를 보면 PDMS는 화학적, 열적 안정성, 투명성, 생체적합성이 우수하고 표면 또는 벌크 물성의 개질이 가능하여

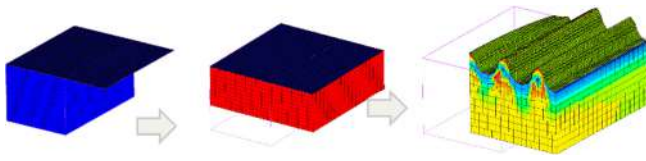


Fig. 1 Procedure for fabricating thin film with pre-strain

신축성 전자소자의 기판 재질로 광범위하게 사용된다[8]. 신축성을 확보하는 대표적 방법으로 Fig. 1과 같이 소프트 기판에 사전변형률 인가 후 하드 박막을 증착하고 기판을 초기상태로 릴리스(Release)시켜 제작하는 방법이 있다[9,10]. 이 방법은 최소한 사전변형률만큼의 신축성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 이 방법의 경우 복귀하는 과정에서 주름과 좌굴 현상이 발생하여 이것을 이론적, 수치적으로 분석하는 것이 필요하다. 수치적 분석의 경우 비선형 후좌굴(Post-Buckling) 문제로, 많은 컴퓨팅 자원이 소모되므로 효율적인 전략이 필요하다. Chung과 Cheng의 연구에서는 이론식을 이용하여 단일 박막관점에서 주름현상을 분석하였다[11,12]. Diab은 Ruga Mechanics라는 용어를 도입하였으며 주름의 특성을 예측하였다[13]. Ma는 사전변형률이 인가된 상태에서의 주름의 특성을 이론적으로 분석하였다[14]. 그리고 주름 형성에 관한 연구는 많으나 사전변형률을 확실하게 모사한 사례는 적다. 대부분 Nikaravesh의 연구에서와 같이 사전변형률이 모델링되지 않은 소프트 기판과 하드 박막을 단순 압축만 인가시켜 해석하였다[15]. 그러나 Cao의 연구에서 상용코드인 Abaqus에서 제공하는 Model Change 기능을 이용하여 사전변형률을 모사한 결과를 보여주었으나 다중스텝 및 접촉 등 적용여부와 같은 구체적 정보는 기술되어 있지 않았다[16]. Omairey의 경우 상용코드를 이용하여 전산 균질화 기법을 적용한 사례를 보여주었다[17].

본 연구에서는 사전변형률 인가된 박막의 거동을 살펴보고자 한다. 사전변형률의 대표적인 이론적 접근 방법들을 비교 분석하였으며 수치해석적 방법에 있어서 다중 스텝으로 모델링하여 거동을 살펴보고자 한다. 본 연구 대상의 모델은 길이에 비해서 두께가 아주 얇고 변형의 형태가 주기성을 갖기 때문에 주기성을 보이는 부분만 모델링하고 주기경계조건을 인가하는 전산 균질화 기법을 이용하였다. 이를 바탕으로 사전변형률 인가 후 박막 거동을 정확히 파악하고 예측하고자 하였다. 또한 사전 변형률 인가에 의한 기계적 거동의 영향을 주는 설계 인자에 대한 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 이론적 접근

박막에 발생하는 주름의 이론적 접근은 고체역학에 기반을 두고 있으며 20세기 초반에 제시되었다[18,19]. 이론식은 2가지 관점에서 전개할 수 있으며 본 연구에서는 이것들의 특징을 살펴보고자 한다. 그리고 주름도 좌굴 특징을 가지고 있어 용어

정리가 필요하다. 본 논문에서 박막에만 발생하는 사인함수형 변형을 주름이라 하고 기판과 박막에 발생하는 굽힘형 변형을 좌굴이라고 정의하였다. 이론적 검토는 단일 박막의 미분방정식을 이용한 오일러(Euler) 좌굴식이다. 이것은 단일 구조물에 기반을 두는 식이다. 이것은 하부기판을 하부지지하중으로 취급하는 Biot 방법[18]과 하부기판과 박막을 두 개의 박막을 복합체와 같이 등가적으로 취급하는 방법이 있었다[10].

### 2.1 하부기판을 지지체로 고려한 주름해석(Biot 방법)

PDMS와 같은 소프트 기판위에 형성된 여러가지 하드 박막에 발생하는 주름을 분석하고자 하였다. 아래와 같은 박막의 미소단위요소에 작용하는 힘들은 Fig. 2와 같으며 이것의 평형식으로부터 식(1)을 얻었다.

$$\bar{E}_f I \frac{d^4 w}{dx^4} + P \frac{d^2 w}{dx^2} + k w = 0 \tag{1}$$

식(1)의 첫째 항은 오일러-베르누이 굽힘에 해당하며 둘째 항은 축방향(Axial) 오일러 좌굴하중에 해당한다. 셋째 항은 하부 기판을 탄성 반무한 지지체로 취급한 것인데 하부 기판에 작용하는 힘을 윈클러 모듈러스(Winkler Modulus)를 사용하여 나타냈다. 여기에서 수직변위  $w$ 는  $x$ 좌표의 함수로서  $w(x) = A \sin(2\pi x/\lambda)$ 와 같이 진폭  $A$ , 파장  $\lambda$ 를 가지는 사인함수로 가정하였다. 이론식에서 평면변형률 상태로 가정하여 탄성계수는  $\bar{E} = E/(1-\nu^2)$ 를 사용하였다.  $\bar{E}_f$ 는 박막의 탄성계수,  $\bar{E}_s$ 는 기판의 탄성계수이다. 그리고  $\nu$ 는 프와송비(Poisson's Ratio),  $I$ 는  $I = bh^3/12$  ( $h$ : thickness,  $b$ : width)이며 박막의 2차 면적모멘트이다. 넷째항에서 윈클러 모듈러스  $k$ 는  $k = \bar{E}_s b \pi / \lambda$ 이다 [18]. 식(1)의 해를 구하기 위하여 식(1)의 미분 방정식에  $w(x) = A \sin(2\pi x/\lambda)$ 를 대입하면 식(2)와 같이 주름현상을 발생시키는 힘  $P$ 를 얻을 수 있다.

$$P = \bar{E}_f w \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 + \frac{\bar{E}_s w}{4} \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^{-1} \tag{2}$$

식(2)를 파장( $\lambda$ )에 관하여 미분( $dp/d\lambda = 0$ )하면 힘을 최소로 하는 파장( $\lambda$ )을 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda = 2\pi h_f \left( \frac{\bar{E}_f}{3\bar{E}_s} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

식(3)을 식(2)에 대입하면 주름을 발생시키는 임계하중을 식(4)와 같이 구할 수 있으며 이것으로부터 임계응력과 임계변형률을 식(5)와 식(6)과 같이 얻었다.

$$P_c = b h_f \left( \frac{9}{64} \bar{E}_f \bar{E}_s^2 \right)^{\frac{1}{3}} \tag{4}$$

$$\sigma_c = \left( \frac{9}{64} \bar{E}_f \bar{E}_s^2 \right)^{\frac{1}{3}} \tag{5}$$

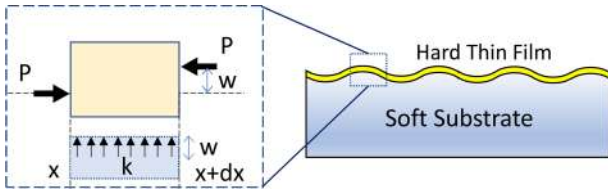


Fig. 2 Forces of a thin film element on a substrate

$$\epsilon_c = \frac{1}{4} \left( \frac{3\bar{E}_s}{\bar{E}_f} \right)^{\frac{2}{3}} \tag{6}$$

그리고 진폭(A)를 얻기 위하여 임계변형률( $\epsilon_c$ )을 제외한 변형률  $\epsilon - \epsilon_c$ 를 고려하고 테일러 급수를 적용하면 식(7)을 얻을 수 있어 식(8)과 같이 진폭과 변형률의 관계를 구할 수 있다.

$$\epsilon - \epsilon_c = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \sqrt{1 + \left( \frac{dw}{dx} \right)^2} dx - 1 = \frac{\pi^2 A^2}{\lambda^2} \tag{7}$$

$$A = h_f \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_c} - 1} \tag{8}$$

2.2 등가단면계수를 이용한 좌굴 해석

또 다른 방법으로 식(1)에서 첫째항과 둘째항 만을 고려하면 Fig. 3과 같이 된다. 이후 힘의 평형식을 세우고 경계조건을 적용하면 잘 알려진 오일러 좌굴 하중식 식(9)를 얻을 수 있다. 식(9)에 경계조건으로 양끝단의 기울기 0을 적용하면 임계좌굴하중( $P_c$ )은 식(10)이 된다.

$$\bar{E}_f I \frac{d^4 w}{dx^4} + P \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \tag{9}$$

$$P_c = \frac{4\pi^2 \bar{E} I}{L^2} \tag{10}$$

그리고 소프트 기판과 하드 박막의 이중 층으로 구성된 경우 등가굽힘강성을 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{E} I = \frac{(\bar{E}_f h_f^2 + \bar{E}_s h_s^2) + 4\bar{E}_f h_f \bar{E}_s h_s (h_f + h_s)^2}{12(\bar{E}_s h_s + \bar{E}_f h_f)} \times b \tag{11}$$

그리고 이 경우 임계변형률은 아래의 식(12)와 같이 전단변형 효과를 포함한 식이 사용되었다[10]. 식(12)의 계수 중에서 1.2는 전단보정계수에 기인한다. 여기서 등가인장강성은  $\bar{E} A = (\bar{E}_s h_s + \bar{E}_f h_f) \times b$ 이다.

$$\epsilon_c = \frac{1}{1 + \frac{1.2 P_c}{\bar{E} A}} \frac{P_c}{\bar{E} A} \tag{12}$$

하드 박막의 두께가 상대적으로 얇은 경우는 전단효과를 무시할 수 있다. 그러므로 식(12)는 식(13)과 같이 단순화될 수 있다.

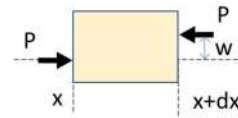


Fig. 3 Forces of a thin film (Euler's approach)

$$\epsilon_c = \frac{P_c}{\bar{E} A} = \frac{4\pi^2 \bar{E} I}{L^2 \bar{E} A} \tag{13}$$

2.3 임계길이 및 사전변형률의 영향 고찰

앞에서 기술한 두 가지의 접근 방법에 의해서 임계변형률은 각각 도출될 수 있다. 두 번째 오일러 좌굴하중에 의한 변형률은 길이의 제곱에 반비례한다. 그렇기 때문에 각각 도출된 두 개의 식을 통하여 식(14)와 같이 임계 길이(L)를 확인하여 박막주름과 좌굴의 발현 여부를 판별할 수 있다. 전단효과를 고려할 경우 식(14)와 같이 다소 복잡한 관계를 가지고 있다. 그러나 하드 박막의 두께가 상대적으로 얇은 경우 전단효과를 무시할 수 있으므로 임계길이는 식(15)와 같이 간결한 식으로 표현된다.

$$L = 4\pi \sqrt{\bar{E} I \left( \frac{\bar{E}_f / (3\bar{E}_s)^{\frac{2}{3}}}{(\bar{E}_s h_s + \bar{E}_f h_f)} - \frac{0.3}{\bar{G}(h_f + h_s)} \right)} \tag{14}$$

$$L = 4\pi \sqrt{\left( \frac{\bar{E}_f}{3\bar{E}_s} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{\bar{E} I}{\bar{E} A}} \tag{15}$$

식(3)은 박막 주름의 파장을 나타낸 식이며 기판과 박막의 탄성계수와 박막의 두께만의 함수로 표현된다. 식(8)은 박막 주름의 진폭이며 변형률이 임계변형률보다 작은 경우 근호안의 값이 음수가 되므로 임계변형률보다 같거나 큰 경우에서만 정의된다. 식(3)과 식(8)에 따르면 변형률이 증가함에 따라 주름의 파장은 변함이 없는 상태에서 주름의 진폭만 증가하는 것으로 나타난다.

사전변형률이 인가된 경우에서 주름의 파장 및 진폭의 경우 Khang의 연구에서는 식(16), 식(17)과 같이 단순히 변형률에 사전변형률을 대입하였다[9]. 식(16)에 따르면 파장은 사전변형률과 무관하게 표현된다.

$$\lambda = 2\pi h_f \left( \frac{\bar{E}_f}{3\bar{E}_s} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{16}$$

$$A = h_f \sqrt{\frac{\epsilon_{pre}}{\epsilon_c} - 1} \tag{17}$$

그러나 실제로는 사전변형률이 인가된 경우 주름의 파장은 사전변형률의 크기에 반비례하여 작아지는 관계가 있다고 가정할 수 있다. 사전변형률이 작다면 파장에 미치는 영향을 무시할 수 있으나 사전변형률이 큰 값을 가지는 경우 Cheng의 연구에서는

식(18), 식(19)와 같이 파장을 사전변형률의 함수로 표현하고 이에 따른 진폭의 식(20)을 구하였다[12].

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 + \epsilon_{pre}} \tag{18}$$

$$\lambda = \frac{2\pi h_f}{1 + \epsilon_{pre}} \left( \frac{\bar{E}_f}{3\bar{E}_s} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{19}$$

$$A = h_f \sqrt{\frac{\epsilon_{pre}}{(1 + \epsilon_{pre})\epsilon_c} - 1} \tag{20}$$

### 3. 기판에 사전변형률이 인가된 박막의 구조해석

#### 3.1 개요 및 경계조건

사전변형률이 인가된 소프트 기판 위에 하드 박막을 형성시킨 후 발생하는 후좌굴(Post-Buckling) 거동을 분석하고자 하였다. 후좌굴 거동에서 강성의 크기가 줄어들어 수치적으로 수렴하지 않기 때문에 비선형 전문 해석코드인 MSC/MARC를 활용하였다. 해석모델 요소의 크기는 예상되는 파장의 1/8보다 작게 하여야 파장의 형태에 왜곡이 생기지 않는다. 해석모델의 최소 요소 사이즈는 10 nm이며 Fig. 4(a)와 같이 204,049개의 절점과 449,798개의 4절점 평면변형률 요소로 구성되었다. 실제 제작공정과 같게 모사하려고 Fig. 4(b)와 같이 단계 1(사전변형률 단계)과 단계 2(릴리스 단계)를 구분하여 두 개의 단계로 나누어 경계조건을 인가하였다. Fig. 4(c)의 사전변형률 단계에서는 소프트 기판의 왼쪽 면을 구속하고 오른쪽 면을 한 점으로 링크(Link)시킨 후 링크된 한 점에 인장변형을 증가(Ramp-Up)시키며 작용하였다. Fig. 4(d)의 릴리스 단계에서 사전변형률이 인가된 소프트 기판과 하드 박막의 접촉면은 인위적으로 접합되며 이전 단계와는 반대로 오른쪽 면을 구속하고 박막과 기판의 왼쪽 면이 한 점으로 링크되고 링크된 한 점에 하중을 인가하였다. 상세하게는 이전단계에서 인장변형을 인가할 때 얻어지는 반력은 기판과 박막 모두에 작용하며 그 크기는 감소(Ramp Down) 되도록 부가하였다. 해석모델은 길이에 비해서 두께가 아주 얇고 변형의 형태가 주기성을 갖기 때문에 주기성을 보이는 부분만 모델링하는 전산 균질화 기법을 적용하였다. 즉, 해석모델의 좌우 끝단에 주기경계조건(Periodic B.C.)을 주어 해석모델이 전체의 거동을 대표할 수 있도록 하였다. 해석과정에서 사전변형률 인가 후 임계하중 이상의 하중이 박막에 작용되면 불안정성(Instability)으로 좌굴이 발생하여 사인함수형 변형이 유발되는데 이것은 해석모델의 불완전성(Imperfection)에 매우 민감한 영향을 받는다. 본 연구에서는 왼쪽 크들 중의 극히 일부를 제거하여 x 방향 구속을 풀어준 부분을 만들어 의도적으로 불완전성을 만들었다. 초기 길이  $L_0$ 는 408  $\mu\text{m}$ , 사전변형률 인가 후 길이  $L_1$ 는 510  $\mu\text{m}$ 이다.

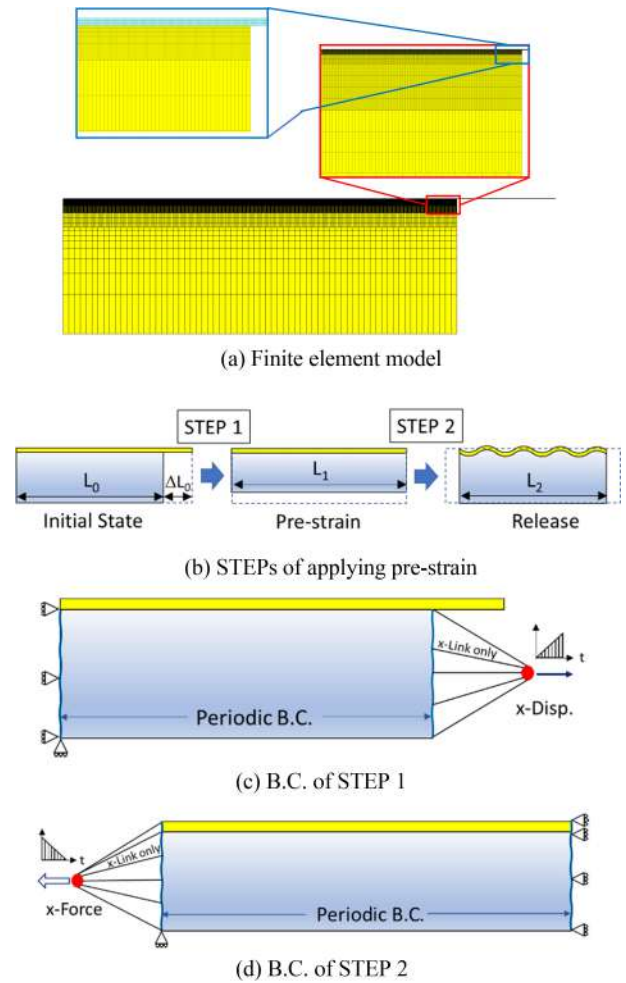


Fig. 4 FE model, STEPs and boundary condition

#### 3.2 박막의 탄성계수에 따른 주름 특성

기판의 재료는 흔히 사용되는 PDMS를 채택하였으며 그 탄성계수는 2.5 MPa이다. Figs. 5, 6, 7, 8에서 기판 두께는 140  $\mu\text{m}$ 이고 20%의 사전변형률이 인가된 경우의 해석결과이다. Figs. 5(a), 5(b)에서 박막의 두께는 120 nm이고 박막의 탄성계수는 25 GPa이다. 하드 박막은 초기에는 단순 압축 변형을 하다가 하드 박막의 하중이 임계하중을 넘어서면 Fig. 5(a)와 같은 사인함수 형태의 변형이 나타난다. Fig. 5(a)의 미세스 응력 값은 주름의 피크와 밸리 위치에서 거의 같은 값을 형성하고 있으며 두께 방향으로 꼭대기 위치에서만 응력 값이 크고 바닥의 위치에서는 응력이 거의 작용하지 않음을 나타낸다. Fig.5(b)의 주 응력을 보면 피크 위치에는 인장 응력이 밸리 위치에는 압축 응력이 작용하고 있다. 마찬가지로 꼭대기 위치에서만 응력이 작용하고 있다. 그리고 탄성계수가 25,000 MPa인 경우 1 GPa 이상의 값을 가질 수 있어 소성변형이 발생할 수 있다. 그렇기 때문에 응력 값을 낮추거나 소성변형이 되더라도 파단되지 않도록 하여야 한다. 그리고 Fig. 5(c)의 미세스 응력을 보면 응력 값에 관계하는 주름의 주요 변수는 박막의 탄성계수이며 박막의 두께의 영향은 매우 작음을 보여준다.

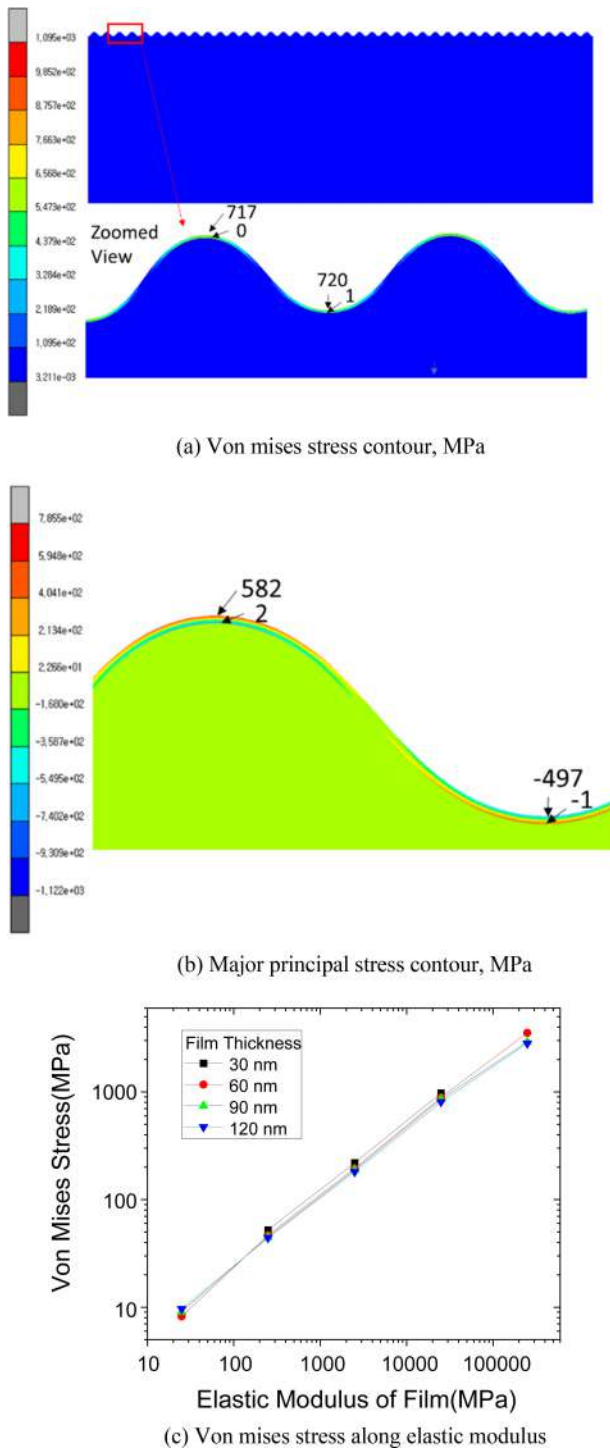


Fig. 5 Stress results of a thin film

Fig. 6에 사전변형률에 의해 발생한 주름의 파장과 진폭의 이론식 계산결과와 유한요소해석 결과를 박막의 탄성계수에 따라 나타냈다. 그래프에서 파장과 진폭은 박막의 두께로 나누어서 정규화(Normalization)하였다. 박막의 파장과 진폭은 식(3), 식(8)과 같이 박막의 탄성계수 크기에 비례 관계에 있다. 이론식과 해석의 결과는 이러한 관계를 잘 따르고 있다. 박막 두께가 30, 60 nm인 경우 이론식과 해석의 결과 차이가 다소 나고 있다.

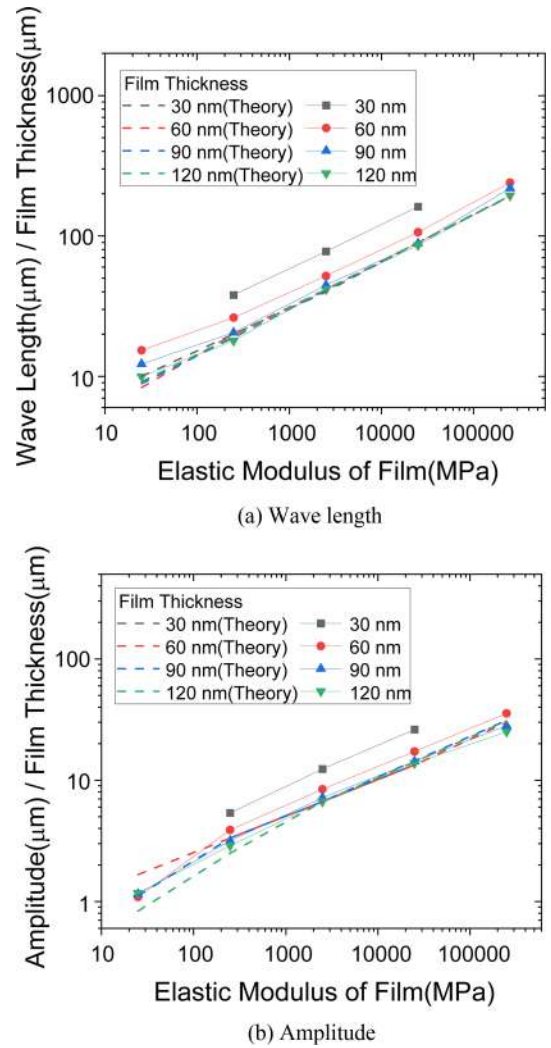
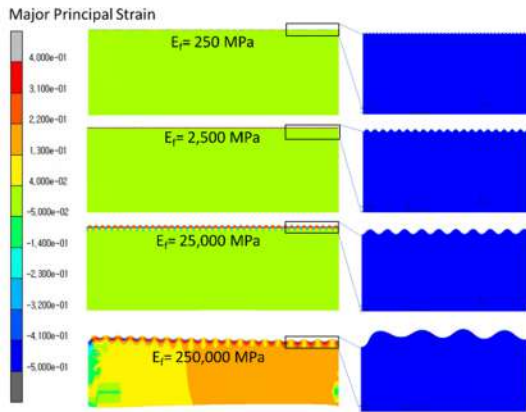


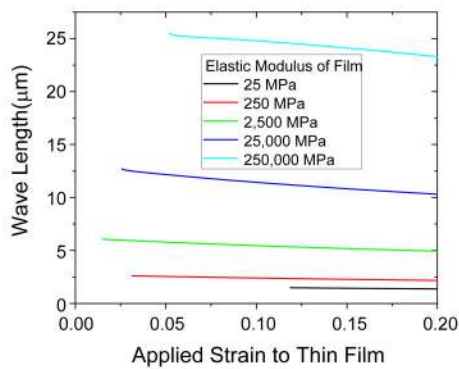
Fig. 6 Wave length and amplitude along elastic modulus

그 원인은 유한요소모델의 요소크기로 분석된다. 현재 요소크기는 191 nm이며 이것의 최소 6분할 이상이 필요하나, 모델의 요소 크기 축소는 전체 요소수의 급격한 증가를 가져와 엄청난 컴퓨팅 자원이 필요하므로 이는 후속연구에서 보완하고자 한다. 그리고 박막 두께 30 nm의 경우 탄성계수의 값이 25, 250,000 MPa일 경우에는 주름이 형성된 변형모습이 나오지 않았는데, 그 원인으로 역시 유한요소모델의 요소크기에 기인하는 것으로 분석된다.

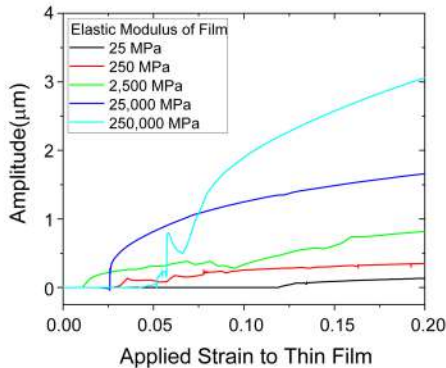
위의 결과 중에서 하드 박막의 두께가 120 nm일 때의 해석 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 사전변형률은 20%이며 하드 박막에 인가되는 변형률의 증가에 따라 주름의 파장과 진폭 변화 결과를 보여준다. Fig. 7(a)을 보면 박막의 탄성계수 25,000 MPa까지는 기판이 박막의 거동에 큰 영향을 주지 않는다. 그렇지만 하드 박막의 탄성계수 250,000 MPa에서는 기판의 변형률이 균일하지 않아 기판이 하드 박막에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. Figs. 7(b), 7(c)의 결과를 보면 하드 박막에 발생하는 주름의 파장과 진폭은 박막의 탄성계수의 크기에 비례하는 결과를 그대로 보여준다. Fig. 7(b)에는 박막에 좌굴이 발생하여 사인함수



(a) Deformed shape along elastic modulus



(b) Wave length



(c) Amplitude

Fig. 7 Thin film behavior along elastic modulus

형상이 발생한 시점 이후의 결과만을 기록하였다. 파장의 크기는 사전변형률이 증가함에 따라 반비례하여 완만하게 감소하고 있다. 그리고 Fig. 7(c)의 결과를 보면 좌굴 발생 이후 진폭은 사전변형률에 비례하여 증가하고 있다.

본 연구와 같이 본 연구와 같이 단계 1에서 소프트 기관만의 사전변형률에 의해 발생한 변형에너지가 단계 2의 릴리스 단계에서 소프트 기관에 추가된 하드 박막의 변형에도 사용된다. 그렇기 때문에 최종 변형된 길이는 기관의 초기 상태로 완벽하게 회복하지 못하고 초기 길이보다 약간 크게 되는 잔류 변형이 생기게 된다. 이것의 비회복률(Un-Returned Length Rate, URLR)을  $URLR = (L_2 - L_0) / L_0 \times 100$ 으로 정의하고 이것의 계산결과를 Fig. 8에

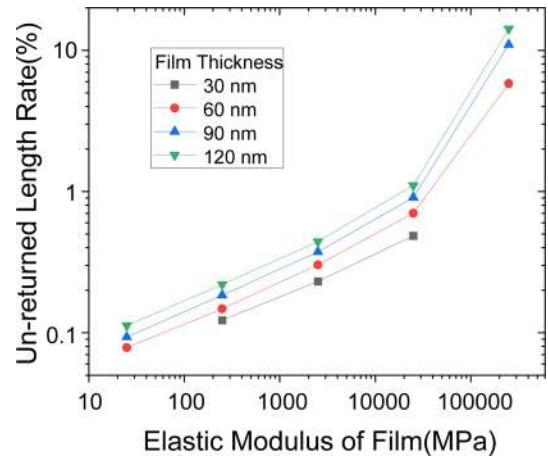


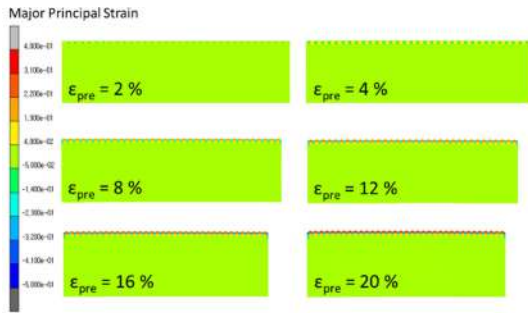
Fig. 8 Un-returned length rate

나타냈다. 결과를 보면 박막의 탄성계수가 250,000 MPa인 경우는 10%까지 URLR이 생길 수 있음을 확인하였으며 이것을 줄이기 위해서는 소프트 기관의 두께를 증가시켜 전체적으로 증가된 변형에너지를 확보하는 것이 필요하다.

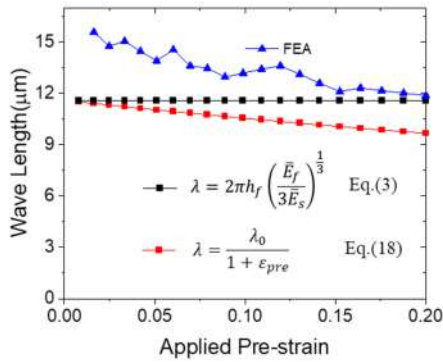
### 3.3 기관 사전변형률과 기관 두께에 따른 주름 특성

Fig. 9에서 하드 박막의 탄성계수는 75,000 MPa, 소프트 기관 두께는 140  $\mu\text{m}$ 이다. 단계 1에서 소프트 기관에 1-20%만큼 사전변형률을 각각 인가하면 단계 2에서 이에 따른 하드 박막에 주름이 발생하는데 사전변형률을 20개 구간으로 나누었으며 마지막 최종 릴리스가 완료된 이후의 결과를 이론해와 함께 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9에서 사전변형률이 커지면 하드 박막에 인가되는 변형이 커지며, Fig. 9(a)에서처럼 하드 박막의 변형률이 증가하여 릴리스 이후 최종변형길이  $L_2$ 의 크기가 작아진다. 그리고 Figs. 9(b)와 9(c)의 결과를 보면 하드 박막의 파장과 진폭의 해석결과는 이론식과 정량적으로 약간의 차이가 있으나 정성적 경향은 같다. 파장의 해석결과는 식(18)과 같이 변형률의 크기에 반비례하고 있다. 진폭의 해석결과는 파장의 결과와 유사한 경향을 보여준다. 이론식과의 정량적 차이는 요소 크기, 접촉 등 해석적 요인이 원인으로 예상된다.

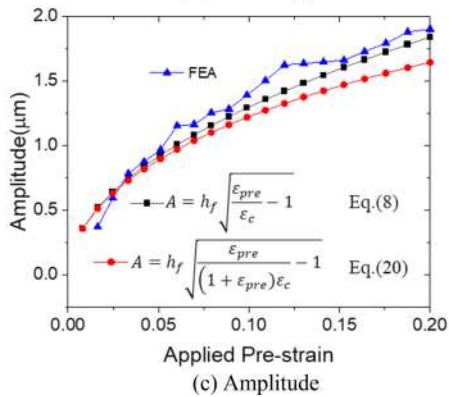
Fig. 10에서 탄성계수 75,000 MPa인 박막에 대하여 기관의 두께를 20, 80, 140  $\mu\text{m}$ 으로 변화시키며 기관 두께 효과를 분석하였다. 앞서와 마찬가지로 사전변형률에 의해 하드 박막의 변형률이 20% 인가되도록 하였으며 하드 박막 변형률 증가에 따라 나타나는 순차적 결과를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10(a)를 보면 기관의 두께가 감소하면 릴리스 이후 최종변형길이  $L_2$ 의 길이가 증가한다. 이는 하드 박막의 변형률이 20%로 동일한 상태에서 소프트 기관의 두께가 감소하면 변형에너지가 그만큼 감소하므로 하드 박막의 변형량도 감소하게 된다. 그리고 주목할 만한 특징으로 소프트 기관의 두께가 20  $\mu\text{m}$ 인 경우에도 단계 2에서 좌굴이 발생하지 않았다는 것이다. 이는 기관에 사전변형률이 인가된 경우 최소한 사전변형률이 회복되는 단계에서는



(a) Deformed shape along pre-strain



(b) Wave length



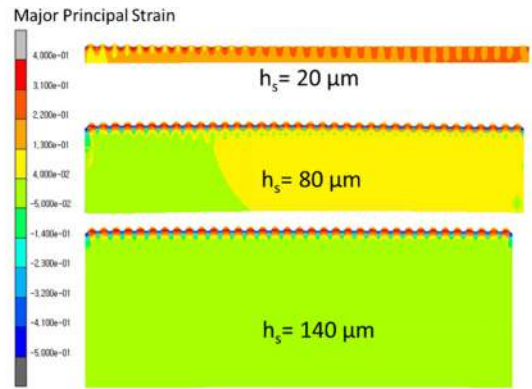
(c) Amplitude

Fig. 9 Thin film behavior along pre-strain value

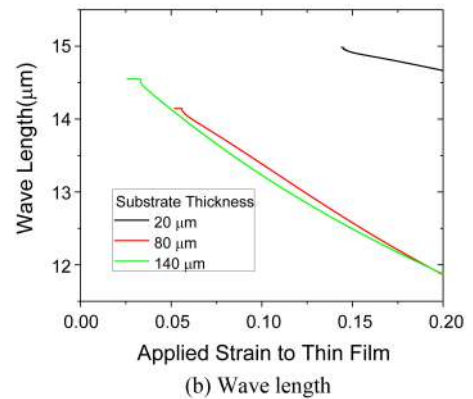
좌굴이 발생하지 않는다고 볼 수 있다. 본 연구의 사례를 벗어나는 경우 좌굴이 발생할 가능성을 배제할 수 없다고 하지만 본 연구의 범위내에서 좌굴이 발생하지 않았음을 확인하였다. 그리고 비교를 위하여 Appendix에 사전변형률이 인가되지 않았을 경우의 거동을 분석하였다. 본 Appendix의 결과를 보면 사전변형률을 인가한 경우 다중스텝으로 나누어 해석한 결과와 변형 모습에서 차이가 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

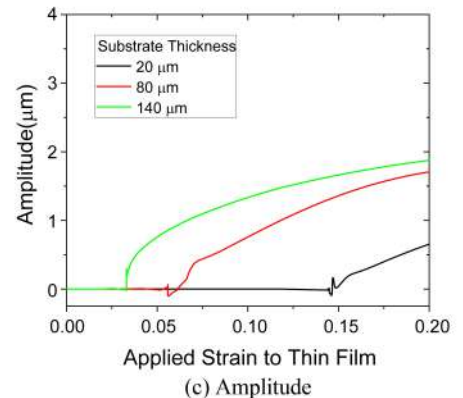
본 연구에서는 사전변형률이 인가된 기판에 의한 박막 주름과 좌굴의 이론식을 살펴보고 유한요소해석을 이용한 수치해와 비교하였다. 이론적 수식의 경우 기판을 반무한 지지체로 취급하여



(a) Deformed shape along substrate thickness



(b) Wave length



(c) Amplitude

Fig. 10 Thin film behavior along substrate thickness

박막의 힘의 평형을 고려하는 방법과 소프트 기판과 하드 박막을 하나의 등가박막으로 간주하여 오일러 좌굴로 취급하는 방법이 있다. 오일러 좌굴의 박막이 상대적으로 얇은 경우 전단효과를 무시할 수 있어 이를 반영한 이론식을 제시하였다. 그리고 비선형 유한요소해석을 통하여 실제와 같이 두 개의 단계로 나누어서 모델링하였으며 전산균질화 기법을 적용하였다. 이론식과 수치해석에서 박막의 탄성계수, 기판의 두께, 및 사전변형률 등의 인자에 따른 박막의 파장, 진폭, 응력, 변형률 등의 특성에 관한 결과를 얻었다. 주름의 파장과 진폭의 경우 이론식과 수치해가 어느 정도 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 해석결과를 보면 사전변형률을 이용하는 경우 파장 및 진폭의 주요 인자는 탄성계수이며 기판의 두께가 20  $\mu\text{m}$ 로 얇아지더라도 좌굴이

발생하지 않고 원래의 상태로 복귀하는 특징을 확인할 수 있었다. 기판에 사전변형률이 인가된 경우 최소한 사전변형률이 회복되는 단계에서는 거의 좌굴이 발생하지 않는다고 볼 수 있다. 그리고 기판이 초기 상태로 완벽하게 회복하지 못하는데 이것은 박막의 탄성계수가 틀수록 잔류변형률이 커지므로 이를 방지하기 위해서는 기판의 두께를 증가시키는 것이 필요하다. 이와 같이 본 연구에서 제시한 결과는 사전변형률이 인가된 신축성 소자의 기계적 거동을 정확하게 예측 및 설계할 수 있어 신축성 소자의 개발 및 응용에 있어 설계 가이드를 제공할 수 있다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업의 일환인 “1 mm 이하 곡률반경을 가지는 신축 디바이스용 50% 이상의 형태 가변이 가능한 점접착소재 개발(No. 20011317)” 사업의 지원과 산업통상자원부 소재부품 기술개발사업의 일환인 “스트레처블 디스플레이용 고전도/초탄성 전극 소재 및 구조체 기술 개발(No. 20017558)” 사업의 지원에 의한 것입니다. 그리고 고려대 홍문표 교수님, 김상일 교수님, 송준호 교수님, 이궁원 교수님의 도움에도 감사드립니다.

## REFERENCES

- Ahn, J.-H., Je, J. H., (2012), Stretchable electronics: Materials, architectures and integrations, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45, 103001.
- Bowden, N., Brittain, S., Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Whitesides, G. M., (1998), Spontaneous formation of ordered structures in thin films of metals supported on an elastomeric polymer, *Nature*, 393, 146-149.
- Rogers, J. A., Someya, T., Huang, Y., (2010), Materials and mechanics for stretchable electronics, *science*, 327(5973), 1603-1607.
- Kim, D.-H., Lu, N., Huang, Y., Rogers, J. A., (2012), Materials for stretchable electronics in bioinspired and biointegrated devices, *MRS Bulletin*, 37(3), 226-235.
- Lang, W., Jakobs, F., Tolstosheeva, E., Sturm, H., Ibragimov, A., Kesel, A., Lehmus, D., Dicke, U., (2011), From embedded sensors to sensorial materials-The road to function scale integration, *Sensors and Actuators A: Physical*, 171(1), 3-11.
- Wu, W., (2019), Stretchable electronics: Functional materials, fabrication strategies and applications, *Science and Technology of Advanced Materials*, 20(1), 187-224.
- Kim, A., Ahn, J., Hwang, H., Lee, E., Moon, J., (2017), A pre-strain strategy for developing a highly stretchable and foldable one-dimensional conductive cord based on a Ag nanowire network, *Nanoscale*, 9, 5773-5778.
- Qi, D., Zhang, K., Tian, G., Jiang, B., Huang, Y., (2021), Stretchable electronics based on PDMS substrates, *Advanced Materials*, 33(6), 2003155.
- Khang, D.-Y., Jiang, H., Huang, Y., Rogers, J. A., (2006), A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates, *Science*, 311(5758), 208-212.
- Wang, S., Song, J., Kim, D.-H., Huang, Y., Rogers, J. A., (2008), Local versus global buckling of thin films on elastomeric substrates, *Applied Physics Letters*, 93(2), 023126.
- Chung, J. Y., Nolte, A. J., Stafford, C. M., (2011), Surface wrinkling: A versatile platform for measuring thin-film properties, *Advanced Materials*, 23(3), 349-368.
- Cheng, H., Song, J., (2014), A simply analytic study of buckled thin films on compliant substrates, *Journal of Applied Mechanics*, 81(2), 024501.
- Diab, M., Zhang, T., Zhao, R., Gao, H., Kim, K.-S., (2013), Ruga mechanics of creasing: From instantaneous to setback creases, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 469(2157), 20120753.
- Ma, Y., Xue, Y., Jang, K.-I., Feng, X., Rogers, J. A., Huang, Y., (2016), Wrinkling of a stiff thin film bonded to a pre-strained, compliant substrate with finite thickness, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 472(2192), 20160339.
- Nikraves, S., Ryu, D., Shen, Y.-L., (2020), Instabilities of thin films on a compliant substrate: Direct numerical simulations from surface wrinkling to global buckling, *Scientific Reports*, 10(1), 5728.
- Cao, Y., Hutchinson, J. W., (2012), Wrinkling phenomena in neo-Hookean film/substrate bilayers, *Journal of Applied Mechanics*, 79(3), 031019.
- Omairey, S. L., Dunning, P. D., Sriramula, S., (2019), Development of an ABAQUS plugin tool for periodic RVE homogenisation, *Engineering with Computers*, 35(2), 567-577.
- Biot, M. A., (1937), Bending of an infinite beam on an elastic foundation, 4(1), A1-A7.
- Bazant, Z. P., Cedolin, L., (2003), *Stability of structures: Elastic, inelastic, fracture and damage theories*, Dover Publications, Inc..



**APPENDIX**

**A1. 사전변형률 없는 기판과 박막의 구조해석**

**A1.1 사전변형률 없는 기판과 박막의 압축 거동 분석**

Appendix에는 기판에 사전변형률이 인가되지 않았을 때를 분석한 결과를 나타내었다. 기판과 박막에 압축변위가 동시에 인가되었다. 사전변형률을 인가한 경우와 비교하기 위하여 Fig. 10과 같이 탄성계수 75,000 MPa인 박막에 대하여 기판의 두께를 20, 80, 140  $\mu\text{m}$ 으로 변화시키며 기판 두께 효과를 분석하였다.

해석 모델은 4절점 평면변형률 요소로 구성되어 있으며 기판과 박막의 한쪽 끝면 x-변위를 동시에 구속하고 다른 쪽 끝의 x-변위를 변형률이 20% 되도록 동시에 압축시켜서 박막 주름 또는 기판 좌굴이 발생하도록 하였다. 그리고 모델의 아랫면의 한 점만 y방향을 구속하였다. 그리고 주기경계조건을 인가하기 위하여 한쪽 끝의 y 변위가 다른쪽 끝의 y 변위에 종속적인 관계를 가지도록 하였다.

소프트 기판의 두께가 20, 80  $\mu\text{m}$ 인 경우에 기판에 좌굴이 발생하였다. 그리고 소프트 기판의 두께가 140  $\mu\text{m}$ 인 경우에 좌굴이 발생하지 않았다. 하지만 박막에 형성된 주름이 기판의 영향을 받아서 중심에서 멀어질수록 파장이 커지고 있는 형상을 하고 있다. 이것은 오일러 좌굴과 같이 기판이 가늘고 긴 형상을 할수록 쉽게 좌굴이 일어나는 특징을 그대로 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 실제 사전변형률 영향에 대한 실제 검증은 후속연구에서 기판 두께에 따른 좌굴의 발현여부를 확인하여 이루어 질 수 있다.

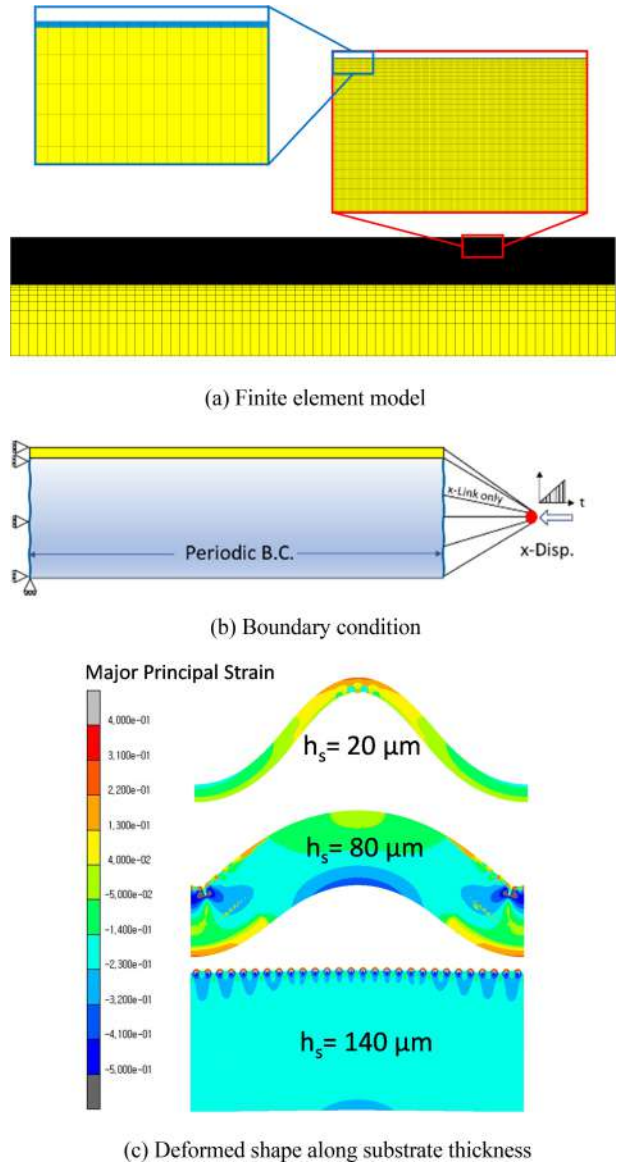


Fig. A1 Compression behavior along substrate thickness without pre-strain

**Jung Yup Kim**

Principal Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is semiconductor test & packaging and FEA.

E-mail: jykim@kimm.re.kr

**Sunghwan Chang**

Principal Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is smart IOT systems and BioMEMS devices.

E-mail: schang@kimm.re.kr

**Ah-Young Park**

Senior Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. Her research interest is electronic packaging.

E-mail: apark@kimm.re.kr

**Yun Hwangbo**

Principal Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is fatigue and transfer printing.

E-mail: ofs7@kimm.re.kr

**Jun Yeob Song**

Vice President of Korea Institute of Machinery & Materials. His research interests include the areas of wafer bonding, multi-chip package, and flexible semiconductor package.

E-mail: sjy658@kimm.re.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)

- 투고논문의 책임은 저자(들)에게 있다.
- 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, 적층제조시스템, 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.

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

### 제6조 (접수)

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

### 제7조 (심사 및 게재 결정)

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

### 제8조 (저작권)

- 논문내용에 대한 책임은 저자(들)에게 있다.
- 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.
- 게재된 논문 및 기타 투고물의 저작권은 학회에 있으며, 학회의 승인 없이 무단으로 복제할 수 없다.
- 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)

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

### 제11조(게재료)

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

# 한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

## 논문집필요령

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

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제1조 (목적)

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

## 제2조 (투고 및 접수)

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

## 제3조 (심사위원 선정)

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

## 제4조 (심사 방법)

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

## 제5조 (심사 기간)

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

## 제6조 (저자수정기한)

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

## 제7조 (게재 판정)

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

## 제8조 (특집논문심사)

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

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제9조 (비밀유지)

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

## 제10조 (이의제기)

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

## 제11조 (심사료)

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

# (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

## 제 1 장 총칙

### 제1조 (목적)

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

### 제2조 (윤리규정 적용범위)

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

### 제3조 (부정행위의 범위)

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

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

## 제 2 장 저자

### 제4조 (저자의 정직성)

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

### 제5조 (저자의 기준)

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

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

### 제6조 (저자의 준수사항)

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



## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- 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 주어지야 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 이의제기 또는 변론 내용과 그에 대한 처리결과
- ③ 연구 부정행위에 대한 최종결과가 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안 된다.

# 한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

1. 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
2. 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 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://kspe.or.kr/files/KSPE\\_학술활동\\_윤리규정.pdf](http://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. 춘추계 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

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

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

- JKsPE, 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](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 2 · February 2023

## REGULAR PAPERS

**Flow Field Analysis of Lubricating Air Film in Aerostatic Restrictor with Double U-Shaped Pressure-Equalizing Grooves**

J. Yin · J. Yu · C. Lou · D. Li · X. Shen · M. Li 145

**Numerical and Experimental Parametric Study on the Mechanism of Web-Warping in Chain-Die Forming with Variable Cross-Section**

F. Han · Z. Qian · Y. Wang · X.-K. Wang · S. Mu · S.-C. Ding 159

**Enhanced Hydrogen Delayed Fracture of 1.5 GPa Hot Stamping Steel Sheet with Sheared Surface by Double Punching Method**

J.-Y. Kim · S.-C. Yoon · H.-J. Kim · M.-G. Lee 173

**A Study on the Impact of Blank Holder Pressure on Forming Pressure and Product Quality in Hydrostatic Forming**

T.T. Nguyen · T.D. Nguyen 187

**Friction-Assisted Dissimilar Solid State Lap Joining of Aluminum and Copper Pipes**

J.-W. Kang · S. Zhang · T.-A. Bui Thi · S.-T. Hong · S. Lee · H.N. Han 199

**Design of a Finger-Sized Voice Coil Motor for High-Speed Scanners**

S. Kang · Y.-G. Jeong · Y.-M. Choi 209

**Whole Body Vibration Impact Assessment on Dumper Operator Using Computational Learning Technique**

K. Ramar · L.A. Kumaraswamidhas · P.S. Balaji · A. Agasthian 219

**Advanced Representative Rail Temperature Measurement Point Considering Rail Deformation by Meteorological Conditions and Rail Orientation**

C. Park · J. Yoon · S. Hong · C. Park · Y. Jeong · J. Kim · B. Lee · H. Lee · C. Song · S.J. Cho 239

**Defect Modelling and Tool Selection for Ultrasonic Machining Process Using Finite Element Analysis**

M.M. Mirad · B. Das 251

**Development of a TPU/CNT/Cu Composite Conductive Filament with a High CNT Concentration**

H. Kim · H. Yoo · S. Shin · J. Cho · S.-W. Han · I. Lee 265

**Design, Analysis and Experimental Investigation of Micro Piezoelectric Vibrational Energy Harvester with Enhanced Power Extraction at Low Frequency**

M. Shahbaz · S. Iqbal · M.M. Saleem · R.I. Shakoor 273

**Calculation of Tooth Thickness Errors and Its Adjustment on Meshing Backlash of Harmonic Drive**

C. Yang · H. Ma · T. Zhang · J. Zheng · Z. Liu · Q. Cheng 289

## SHORT COMMUNICATION

**A 3D-printed Microcantilever Holder for Atomic Force Microscopes Using a Mounted Microcantilever**

S. Lee 303

## REVIEW

**Recent Development of Dry Metal Forming**

M. Geng · L. Cai · J.-C. Kim · H.-S. Choi · S.-T. Hong 309

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

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

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



# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 10 · Number 1 · January 2023

## REGULAR PAPERS

### **Fabrication System for Large-Area Seamless Nanopatterned Cylinder Mold Using the Spiral Laser Interference Exposure Method**

Y.-W. Ma · J.H. Park · S.J. Lee · J. Lee · S. Cho · B.S. Shin 1

### **Comparison the Effect of MQL, Wet and Dry Turning on Surface Topography, Cylindricity Tolerance and Sustainability**

S. Masoudi · M.J. Esfahani · F. Jafarian · S.A. Mirsoleimani 9

### **Enhancing Solar Radiant Heat Transfer Using Supersonically Sprayed rGO/AgNW Textured Surfaces**

T. Kim · C. Park · Y. Kim · A. Aldalbahi · M. El-Newehy · S. An · S.S. Yoon 23

### **Study on Cutting Force and Tool Wear in Machining of Die Materials with Textured PCD Tools Under Ultrasonic Elliptical Vibration**

S. Maeng · H. Ito · Y. Kakinuma · S. Min 35

### **Hybrid Wire-Arc Additive Manufacturing of Conformal Cooling Channels: A Feasibility Study**

J.P.M. Pragana · I.M.F. Bragança · C.M.A. Silva · P.A.F. Martins 45

### **Intelligent Operation Monitoring of an Ultra-Precision CNC Machine Tool Using Energy Data**

V. Selvaraj · Z. Xu · S. Min 59

### **Waterproof and Wear-Resistant Surface Treatment on Printed Parts of Polyamide 12 (PA12) by Selective Laser Sintering Using a Large Pulsed Electron Beam**

J. Kim · D.-M. Chun · H.W. Park · J. Kim 71

### **One-Step Fabrication of Superhydrophobic Surfaces with Wettability Gradient Using Three-Dimensional Printing**

J. Sung · H.M. Lee · G.H. Yoon · S. Bae · H. So 85

### **Additive-Manufactured Flexible Triboelectric Sensor Based on Porous PDMS Sponge for Highly Detecting Joint Movements**

S.-Y. So · S.-H. Park · S.-H. Park · G.-M. Gwak · S.-K. Lyu 97

### **Accelerated Design of High-Efficiency Lead-Free Tin Perovskite Solar Cells via Machine Learning**

T. Bak · K. Kim · E. Seo · J. Han · H. Sung · I. Jeon · I.D. Jung 109

### **Laser Patterning Technology Based on Nanosecond Pulsed Laser for Manufacturing Bifacial Perovskite Solar Modules**

B.-Q. Lin · C.-P. Huang · K.-Y. Tian · P.-H. Lee · W.-F. Su · L. Xu 123

### **Variable Speed Wind Turbine Control Using the Homotopy Perturbation Method**

A. Shalbfafian · S. Ganjefar 141

### **A Novel Vibration Model for Explanation of the Frequency Features in Multistage Wind Turbine Gearboxes Considering the Effects of Inter-stage Meshing Frequency Modulation**

Y. Nie · F. Li · L. Wang · J. Li · Y. Li · M. Sun · M. Wang · G. Li 151

### **A Hybrid Self-Powered System Based on Wind Energy Harvesting for Low-Power Sensors on Canyon Bridges**

H. Cao · X. Wu · H. Wu · Y. Pan · D. Luo · A. Azam · Z. Zhang 167

### **Fully Self-Powered Electrospray System via Triboelectric High Voltage Generator and Its Use to Control Wettability of Various Surfaces**

S.H. Lee · S. Cho · S. Jang · D. Lee · D. Kam · J.H. Choi · Z. Hanif · M. La · S.J. Park · D. Choi 193

### **Influences of Wire Diameters on Output Power in Electromagnetic Energy Harvester**

Y. Peng · L. Zhang · Z. Li · S. Zhong · Y. Liu · S. Xie · J. Luo 205

### **A Noise-Robust Feature Extraction Method for Rolling Element Bearing Diagnosis: Linear Power-Normalized Cepstral Coefficients (LPNCC)**

K. Kim · H. Yoon · B.D. Youn 217

**3D Measurement Using a Single Image for Smart Manufacturing of Microscopic Products in a Ceramic Powder Pressing Process**

H.S. Kim · Y. Han · J. Kim 233

REVIEWS

**Recent Progress in Learning Algorithms Applied in Energy Management of Hybrid Vehicles: A Comprehensive Review**

D. Xu · C. Zheng · Y. Cui · S. Fu · N. Kim · S.W. Cha 245

**Current Applications and Development of Composite Manufacturing Processes for Future Mobility**

J.Y. Choi · J.H. Jeon · J.H. Lyu · J. Park · G.Y. Kim · S.Y. Chey · Y.-J. Quan · B. Bhandari · B.G. Prusty · S.-H. Ahn 269

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

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

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

# 한국정밀공학회 2022년 제10차 이사회 회의록(요약)

◎ 일 자 : 2022년 12월 9일(금) 16:00~16:50

◎ 장 소 : 학회회의실/화상회의

◎ 참석자 : 양승환, 이석우, 민병권, 안성훈, 백주현, 송창규, 김동성, 신형정, 주백석, 송용남, 정영훈, 김규만, 김보현, 김양진, 김영진, 박 근, 박영빈, 손정우, 안형준, 이광일, 이창우, 정훈의, 황지홍, 김창주, 이동원, 이지혜, 주기남, 현승민, 노유정, 이현욱, 김대욱, 김범준, 민상기, 이동진, 김건희, 김종혁, 서진호, 조정대, 최영재, 정재일, 오정석, 김영범, 위임 30명 총 76명 참석

## 1. 주요 보고 및 토의사항

- 1) 2022-2023 회장 업무인계인수 예정 (12.21.(수))
- 2) IJPEM, IJPEM-GT Springer Annual Meeting (12.9.(금))
- 3) IJPEM-ST ISSN 발급완료
- 4) ASPEN 2022 참석(11.15.(화)~11.19.(금)), 싱가포르 난양공대)
- 5) ICPE 2022 초청강연 등 참석

## 2. 주요 승인 및 토의사항

- 1) 신입회원(안) 인준: 정회원 1명
- 2) 추계학술대회 최우수논문 선정(안) 승인
  - ① 일반세션, 특별세션 등 총 29편 - 시상식: 2023 춘계학술대회 폐막식 중
- 3) 부문위원회 명칭 변경(안) 승인

변경 전	변경 승인(안)
생체공학 / Biomechanical Engineering	바이오헬스 / Bio Health

### 4) 위원회 신설(안) 승인

#### ① MAKER Korea

- 북미지역 생산공학자 모임 MAKER USA 와 연계 및 국제교류 활성화
- 위원장: 오정석(KIMM, 위원 구성은 위원장에게 위임)

#### ② ASPEN 위원회

- ASPEN 개최, 운영 및 교류 전담 위원회
- 위원장: 이동윤(KITECH, 위원 구성은 위원장에게 위임)

### 5) 부문위원회 학술행사 개최(안) 승인

#### ① 정밀측정 부문위원회(위원장 진종한(KRISS))

- 제6회 정밀측정 워크숍
- 2023.3.29.(수)~3.31.(금), 제주 신라스테이

### 6) IJPEM-ST 발행일 변경(안) 승인

#### ① 변경 전: 2022.12.31. / 변경 후: 2023.1.1.

### 7) 2023 저널별 추가 위촉(안) 승인

#### ① JKSPÉ 편집위원:

- 김창주(KIMM), 배장호(경성대), 이봉기(전남대) (이상 3명)

#### ② Member of Editorial Board, IJPEM-GT

- 박민수(서울과기대), 박태현(숭실대), Hao Yi(Chongqing University, China), Jonghyun Park(Missouri University of Science and Technology, USA), Jung-Sik Kim(Beihang University, China), Hyun Chan Kim(University of Michigan, USA) (이상 6명)

### 8) JKSPÉ 별쇄본 및 책자 저자 발송 폐지(안) 승인

- ① 변경 전: 온라인 파일(.pdf) 발송, 추가로 저자 희망 시 별쇄본 및 책자 발송
- ② 변경 후: 온라인 파일(.pdf)만 발송

## 신입회원인준명단

### · 정회원 ·

회원 번호	이름	소속	회원 번호	이름	소속
20228794	심우섭	중앙보훈병원	20228797	윤현중	대구가톨릭대
20228796	황윤재	UNIST	20228798	노진성	한밭대

# 2023년 사단법인 한국정밀공학회 임원

## 회장

이석우(한국생산기술연구원)

## 수석부회장

민병권(연세대학교)

## 부회장

안성훈(서울대학교) 이상원(성균관대학교) 배규호(DN솔루션즈) 김정(KAIST)

## 감사

김재환(인하대학교) 송창규(한국기계연구원)

## 총무이사

김동성(POSTECH) 김보현(숭실대학교) 신현정(KAIST)

## 재무이사

김창주(한국기계연구원) 송용남(고려대학교) 정영훈(경북대학교)

## 편집이사

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

## 사업이사

강태준(인하대학교) 권지연(동국대학교) 김무림(한국로봇융합연구원) 김승중(고려대학교) 김진호(영남대학교)  
김태곤(한국생산기술연구원) 박상후(부산대학교) 박용재(강원대학교) 손용(한국생산기술연구원) 이경창(부경대학교)  
이동원(전남대학교) 이영수(삼성전자) 이인환(충북대학교) 이지혜(한국기계연구원) 임지석(영남대학교)  
전용호(아주대학교) 주기남(조선대학교) 현승민(한국기계연구원) 홍성태(울산대학교)

## 기획홍보이사

노유정(부산대학교) 류시형(전북대학교) 이주연(서울과학기술대학교) 이현욱(한국철도기술연구원) 장원석(한국기계연구원)  
최영재(한국생산기술연구원)

## 국제이사

Martin B. Jun(Purdue Univ.) Simon Park(Univ. of Calgary) 김대욱(Univ. of Arizona) 김범준(The Univ. of Tokyo) 문승기(Nanyang Technological Univ.)  
민상기(Univ. of Wisconsin, Madison) 여운홍(Georgia Tech.) 이동진(건국대학교) 이지현(Univ. of Calgary) 이차범(Texas A&M Univ.)  
정용국(KTH Royal Institute of Tech.) 정하승(Michigan State Univ.) 조영태(창원대학교) 차석원(서울대학교) 최재원(The Univ. of Akron)

## 대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원) 김경동(한국공작기계산업협회) 김종혁(현대위아) 서진호(부경대학교) 이강재(DN솔루션즈)  
조영환(LIG넥스원(주)) 조정대(한국기계연구원)

## 부문회장

김건희(한밭대학교) 진종한(한국표준과학연구원) 정재일(국민대학교) 이동윤(한국생산기술연구원) 박형욱(UNIST)  
오정석(한국기계연구원) 김종백(연세대학교) 엄광문(건국대학교) 김호찬(안동대학교) 김영범(한양대학교)

## 특별회원사

### 다이아몬드

DN솔루션즈 한국화낙(주) 신도리코(주) 현대위아(주) (주)이수페타시스 (주)화신정공 (주)케이씨텍 화천기공(주)

### 플래티늄

HP Korea(유) SK실트론(주)

### 골드

(주)마리알로 헥사곤 (주)에이스나노켄 (주)엔도로보틱스 지앤피테크놀로지(주) (주)프로토텍

### 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 2/ February 2023**

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

월간 · 제40권 제2호 [통권 제383호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 1월 25일

발행일 2023년 2월 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](mailto:kspe@kspe.or.kr)

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

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

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

회계 김상원 / (02)393-0724 / [account@kspe.or.kr](mailto: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

**March 1, 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 4<sup>th</sup> industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)** is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. **The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:**

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

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

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

#### • Publication Date (Scheduled)

**Vol. 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 Cincinnati, USA

**Jun Ni** / University of Michigan, USA / Shanghai Jiao Tong University, China

### Editors

**Hyeong-Joon Ahn** / Soongsil University, Korea

**Hae-Jin Choi** / Chung-Ang University, Korea

**Chih-Hsing Chu** / National Tsing Hua University, Taiwan

**Martin B.-G. Jun** / Purdue University, USA

**Dong Yoon Lee** / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

**Seungchul Lee** / POSTECH, Korea

**Sangkee Min** / University of Wisconsin-Madison, USA

**Seung-Ki Moon** / Nanyang Technological University, Singapore

**Duhwan Mun** / Korea University, Korea

**Simon Park** / University of Calgary, Canada

### Editorial Board

**Seung-Kyum Choi** / Georgia Institute of Technology, USA

**Haseung Chung** / Michigan State University, USA

**Youngkuk Jeong** / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

**Yongho Jeon** / Ajou University, Korea

**Jay-I. Jeong** / Kookmin University, Korea

**Hyungjung Kim** / Seoul National University, Korea

**Yangjin Kim** / Pusan National University, Korea

**Jihyun Lee** / University of Calgary, Canada

**Wonkyun Lee** / Chungnam National University, Korea

**David Rosen** / Agency for Science, Technology and Research, Singapore

**Joo-Sung Yoon** / Kyungnam University, Korea



## SCOPUS, KCI 등재 학술지

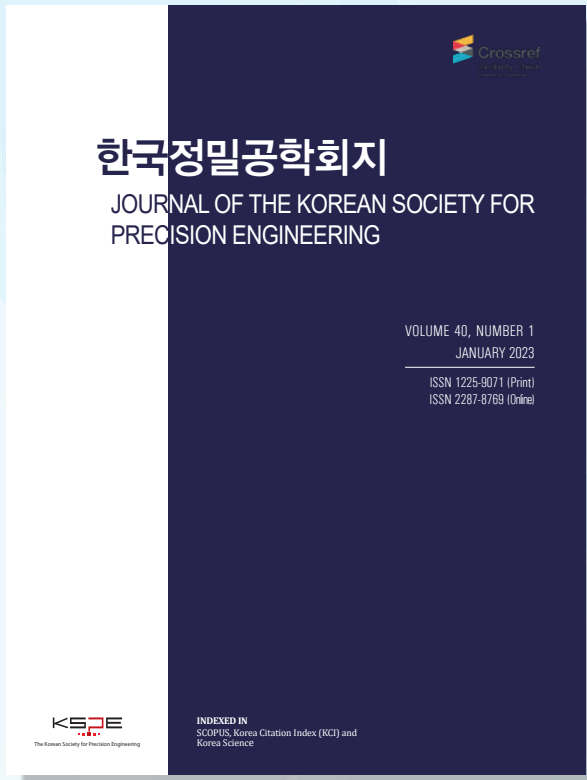
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

### Scope

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

학술대회 Full Paper  
논문을 투고 시 게재료가  
면제됩니다.

논문 본문을 영문으로  
작성하여 투고 시, 게  
재료가 청구되지 않습  
니다.



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 JKSP Search for JKSP

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



+82-518-2928(T)

+82-518-2937(F)



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

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



12F, SKY1004 Bldg., 50-1

Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,

04508, Republic of Korea





두산공작기계의 새이름

**DN SOLUTIONS**의

위대한 여정은 계속됩니다.

두산공작기계는 지난 50년 동안 Machine Greatness의 가치를 중심으로  
공작기계 업계 글로벌 리더로서의 명성을 쌓아왔습니다.

이제 새로운 시대가 시작됩니다. DN 솔루션즈라는 새로운 이름과 함께  
미래 지향적인 자동화, 소프트웨어 및 기술로 차별화된 공작 기계의 유산을 이어갈 것입니다.

Manufacturing Solutions Leader, DN 솔루션즈



Learn more at [DN-SOLUTIONS.COM](https://www.dn-solutions.com)

# LIG



## The New One LIG Nex1

무인화, 드론, 로봇, 인공지능에 이르기까지  
미래 전장을 압도할 혁신으로 새로움을 선사하다.  
차원이 다른 기술, 미래를 이끄는 혁신 with LIG Nex1

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
- 나노마이크로기술 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 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

후원 | KOFST 제주특별자치도 (사)제주컨벤션뷰로  
한국과학기술단체총연합회

International Conference on  
**PR**recision 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](http://www.presm.org) | Email [presm@kspe.or.kr](mailto: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

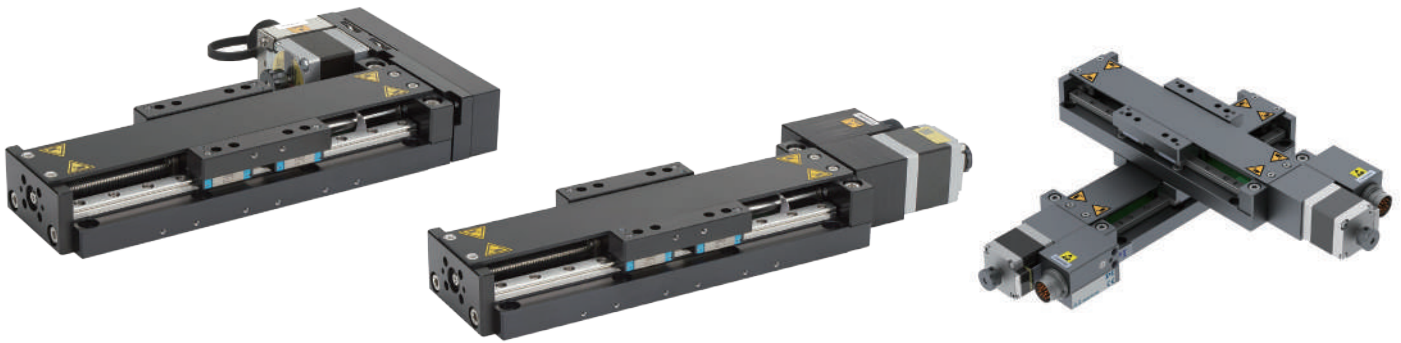
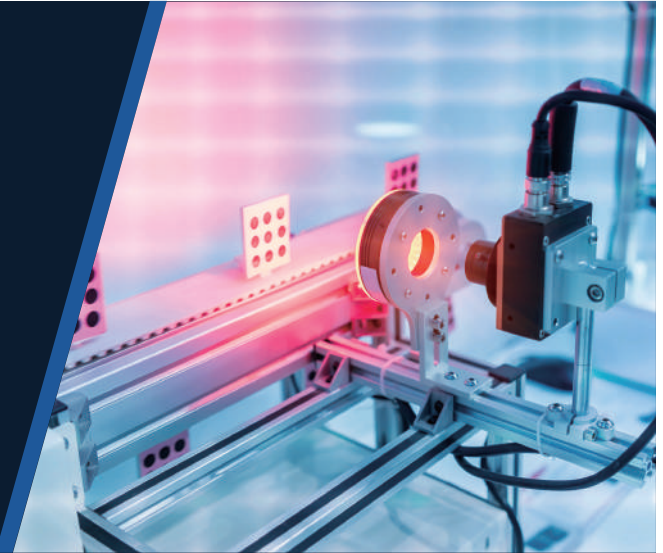
## 추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

솔비치삼척 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

