

# 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 4

APRIL 2026

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

## Editor-in-Chief

**Bo Hyun Kim**

Soongsil University  
bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

**Jihwan An**  
POSTECH

**Younghak Cho**  
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

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

**Yongho Jeon**  
Ajou University

**Jonghan Jin**  
Meter-Lab. Inc.

**Maolin Jin**  
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

**Bongchul Kang**  
Kookmin University

**Sung-Mook Kang**  
Daegu Catholic University

**Hyun-Wook Kang**  
UNIST

**Yang Jin Kim**  
Pusan National University

**Hyo-Young Kim**  
Korea Polytechnic University

**Sanha Kim**  
KAIST

**Namkeun Kim**  
Sogang University

**Chang-Ju Kim**  
Korea Institute of Machinery & Materials

**Dong Sung Kim**  
POSTECH

**Seung Hwan Ko**  
Seoul National University

**Moonkyu Kwak**  
Kyungpook National University

**Hyunseop Lee**  
Dong-A University

**HyunWook Lee**  
Korea Railroad Research Institute

**Changwoo Lee**  
Konkuk University

**Chang-Whan Lee**  
Seoul National University of Science & Technology

**Kwang-Il Lee**  
Kyungil University

**Duhwan Mun**  
Korea University

**Jungjae Park**  
Meter-Lab. Inc.

**Hyung Wook Park**  
UNIST

**MinSoo Park**  
Seoul National University of Science & Technology

**Jung Woo Sohn**  
Kumoh National Institute of Technology

## Members of Editorial Board

**Sanghoon Ahn**  
Korea Institute of Machinery & Materials

**Dahoon Ahn**  
Seoul National University of Science & Technology

**Dongwhi Choi**  
Kyung Hee University

**Young-Man Choi**  
Ajou University

**Jungwook Choi**  
Chung-Ang University

**Jin-Seung Choi**  
Konkuk University

**Min-Woo Han**  
Dongguk University

**Segon Heo**  
Korea Institute of Machinery & Materials

**Jinah Jang**  
POSTECH

**Ki Nam Joo**  
Chosun University

**Woo Kyun Kim**  
University of Cincinnati

**Gap-Yong Kim**  
Iowa State University

**Beomjoon Kim**  
University of Tokyo

**Patrick Kwon**  
San Diego State University

**Wonkyun Lee**  
Chungnam National University

**Howon Lee**  
Seoul National University

**Bong-Kee Lee**  
Chonnam National University

**Hyun-Taek Lee**  
Inha University

**Sangjin Maeng**  
Hongik University

**Sangkee Min**  
University of Wisconsin-Madison

**Simon Park**  
VinUniversity

**Suk-Hee Park**  
Pusan National University

**Heonjun Yoon**  
Soongsil University

**Hae-Sung Yoon**  
Korea Aerospace University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

**VOLUME 43, NUMBER 4 / April 2026**

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

**Aims and Scope** The Journal of the Korean Society for Precision Engineering is devoted to publishing original research articles on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on various fields including: Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology.

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

**Abbreviation of Title** J. Korean Soc. Precis. Eng.

**Full Text Available** at <http://jkspe.kspe.or.kr/>

**Indexed in** SCOPUS, Korea Citation Index (KCI) and Korea Science

**Subscription Fee** Free to KSPE Members (Membership Fee: 50,000 KRW per Year)

**Published on** April 1, 2026 (Monthly)

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

**Publisher** Sang Won Lee (President, KSPE)

**Manuscript Editor** So Jin Kim

**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

- 317 연속 시간을 이용한 공간 활용을 통해 개선된 충돌 기반 탐색에 관한 연구  
임성택, 유서현, 강효재, 정찬희, 한대회, 강민성
- 325 궤도차량 탑재 다축 안정화 짐벌의 방진 성능에 미치는 엘라스토머 방진구 강성의 영향 분석  
배종인, 박훈혁, 최재욱
- 333 딥러닝 기반 간편 체형 분석 기술 검증  
표성건, 박창언, 이승희, 김정윤, 배은경, 김영호
- 345 스마트폰 카메라용 액추에이터 불구름면 마찰 측정 시스템 설계 및 검증  
박주호, 홍정하, 민상준, 이규선
- 351 입구 유속 변화가 사이클론 분리기 내 기체-입자 유동에 미치는 영향에 대한 수치적 연구  
김건호, 김덕형, 이성빈, 박희성
- 359 다중 파장 분석을 통한 비침습적 알코올 농도 측정  
조예찬, 박민석, 정민석, 전재훈
- 365 웨어러블 센서 성능 저하 양상 및 신호 복원과 자가진단  
전주형, 윤가은, 프영타오레, 이종호, 황태식, 임근배
- 371 온도 및 체류 시간 제어를 통한 메탄 열분해 수소 및 탄소 생성물 특성 연구  
이문희, 이상지, 김지엽, 주승엽, 김륜근, 남형석, 홍정구
- 378 Ansys APDL과 Point Cloud Meshing기반 반도체 Probe Card의 향상된 열-구조 연성 해석  
김성훈, 오민성, 김지은, 이경훈, 홍석무
- 385 가변 광학 배율을 이용한 마스크 투영 리소그래피로 제작된 하이드로겔 스케폴드의 기공 크기 정밀 제어  
이상선, 박재철

## CONTENTS

---

### REGULAR

- 317 A Study on Improving Conflict Based Search with Continuous Time Using Space Utilization  
**SeongTaek Im, SeoHyun Yoo, HyoJae Kang, ChanHui Jung, DaeHee Han, and Min-Sung Kang**
- 325 Analysis of the Influence of Elastomeric Isolator Stiffness on the Vibration Isolation Performance of Multi-axis Stabilized Gimbal Systems Mounted on Tracked Vehicles  
**Jong In Bae, Hoon Hyuk Park, and Jae Wook Choi**
- 333 Accuracy and Reliability of Deep Learning-based 2D Posture Analysis  
**Seonggeon Pyo, Changeon Park, Seunghee Lee, Jungyoon Kim, Eunkyung Bae, and Youngho Kim**
- 345 Design and Verification of a Tribo-system for Measuring Ball-raceway Rolling Friction in Smartphone Camera Actuators  
**Ju Ho Park, Jung Ha Hong, Sang Jun Min, and Gyu Sun Lee**
- 351 A Numerical Study on the Effects of Inlet Velocity Variation on Gas-particle Flow in a Cyclone Separator  
**Geonho Kim, Deokhyeong Kim, Sungbin Lee, and Heesung Park**
- 359 Multi-wavelength Optical Approach for Non-invasive Alcohol Detection  
**Ye Chan Cho, Min Seok Park, Min Seok Jeong, and Jae-Hoon Jun**
- 365 Signal Restoration and Self-assessment of Performance Degradation in Wearable Sensors  
**Juhyeong Jeon, Gaeun Yun, Phuong Thao Le, Jungho Lee, Tae Sik Hwang, and Geunbae Lim**
- 371 Hydrogen and Carbon Production via Methane Thermal Decomposition: Effects of Temperature and Residence Time  
**Mun Hee Lee, Sang Ji Lee, Ji Yeop Kim, Seung Yeop Joo, Ryun Geun Kim, Hyungseok Nam, and Jung Goo Hong**
- 378 Advanced Thermal-structural Coupling Analysis of Semiconductor Probe Card based on Ansys APDL and Point Cloud Meshing  
**Seong Hoon Kim, Min Seong Oh, Ji Eun Kim, Kyeong Hoon Lee, and Seok Moo Hong**
- 385 Precise Control of Pore Size in Hydrogel Scaffolds Fabricated by Mask Projection Lithography with Variable Optical Magnification  
**Sang Seon Lee and Jae Cheol Park**

# 연속 시간을 이용한 공간 활용을 통해 개선된 충돌 기반 탐색에 관한 연구

## A Study on Improving Conflict Based Search with Continuous Time Using Space Utilization

임성택<sup>1</sup>, 유서현<sup>1</sup>, 강효재<sup>1</sup>, 정찬희<sup>2</sup>, 한대희<sup>1</sup>, 강민성<sup>3,#</sup>  
SeongTaek Im<sup>1</sup>, SeoHyun Yoo<sup>1</sup>, HyoJae Kang<sup>1</sup>, ChanHui Jung<sup>2</sup>, DaeHee Han<sup>1</sup>, and Min-Sung Kang<sup>3,#</sup>

<sup>1</sup> 한양대학교 융합로봇시스템학과 (Department of Interdisciplinary Robot Engineering Systems, Hanyang University)

<sup>2</sup> 한양대학교 로봇공학과 (Department of Robot Engineering, Hanyang University)

<sup>3</sup> 한양대학교 스마트융합공학부 (School of Smart Convergence Engineering, Hanyang University)

# Corresponding Author / E-mail: wowmecha@hanyang.ac.kr, Tel: +82-31-400-5961

ORCID: 0000-0002-8459-5843

KEYWORDS: Multi-agent path finding (다중 에이전트 경로 탐색), Collision based search (충돌 기반 탐색), Path planning (경로 탐색), Robot navigation (로봇 네비게이션)

*Multi-Agent Path Finding (MAPF) is an algorithm designed to identify collision-free paths for multiple agents, commonly used in fields like robotics and drone navigation. Conflict-Based Search with Continuous Time (CCBS) is particularly beneficial for real-world applications due to its capability to find paths in continuous time; however, it often experiences lengthy computation times. Although techniques such as prioritizing conflicts (PC), disjoint splitting (DS), and high-level heuristics have been implemented to reduce these times, challenges remain. To address these issues, this paper introduces methods to improve space utilization by calculating agent congestion. By optimizing space usage, we can identify paths that avoid potential collisions, even when those paths share the same cost. We propose enhancements to high-level heuristics, conflict prioritization, and low-level heuristics, as well as a method for calculating congestion in continuous time. These improvements lead to a reduction in agent collisions and a decrease in high-level expansions, resulting in a 30% increase in computational success rates compared to the existing CCBS. Incorporating space utilization into the search process significantly enhances MAPF performance.*

Manuscript received: March 25, 2025 / Revised: November 19, 2025 / Accepted: November 24, 2025

This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2024

### 1. Introduction

The Multi-Agent Path Finding (MAPF) problem is accompanied by multiple agents, each having a designated start and goal location. The challenge is to find paths for each agent without collisions. MAPF can be applied in scenarios like warehouse management where paths for many agents need to be determined [1,2]. One of the optimal solutions for the MAPF problem is minimizing the cost (Sum of Cost) [3]. However, this problem is riddled with challenges

of complexity and nonlinearity, making it NP-hard [4,5].

To address this issue, numerous AI researchers have attempted solutions through various prior works. However, most algorithms solve the problem by assuming 1) time discretization and 2) the duration of each action is one time step [6-8]. Such assumptions can become limitations when applied to robots in real-world settings. To operate actual robots, one must consider kinematic constraints such as rotation time and robot localization. Therefore, to overcome these challenges, several methods, like MAPF-Post, have been proposed

to address and surmount these limitations [9,10].

CCBS was developed to address the MAPF problem in continuous time and make MAPF suitable for real-world environments [11]. By integrating Safe Interval Path Planning (SIPP) into the low-level search of CBS (Conflict-Based Search), the algorithm helps MAPF operate in continuous time [12,13]. However, one major drawback of CCBS is that detecting collisions in continuous time requires a considerable amount of computational resources. To address this weakness, several algorithms have been proposed to minimize conflicts among agents to reduce computation time.

For example, Conflict-Based Search with Real-Time Conflict Resolution (CBS-RTC) introduced new types of conflicts to address specific MAPF conditions, such as corridor and target symmetry [14]. Furthermore, techniques like Disjoint Splitting (DS), Prioritizing Conflicts (PC), and enhanced heuristics are also applied to this algorithm to minimize the search time [15-17]. These methods enhanced the efficiency of CCBS by minimizing conflicts at higher-level nodes [18].

Han *et al.* pointed out, as illustrated in Fig. 1, that reuse of the same areas during computing individual agents' paths frequently occurs in MAPF algorithms, which can cause inefficiencies in the algorithm [19]. To optimize space utilization, a heuristic function that estimates the redundancy of vertices and edges in the agent's paths found by agents was proposed. This approach has been adopted by other algorithms like ECBS and DDM, enabling significant improvements in the computational performance while maintaining a similar level of optimality [20,21].

In addition, Chen *et al.* [22] introduced an algorithm that utilizes traffic flow to create guide paths in priority-based algorithms like PIBT, LaCAM\* [23,24], and MAPF-LNS to alleviate congestion [25-27]. These methods are more efficient even in jammed circumstances and show improvements in overall system performance. Therefore, one effective way to increase the success rate in MAPF is maximizing space usage. This paper proposes a method that calculates congestion and applies to the algorithm to enhance the computational performance and success rate of Improving CCBS. The goal is to minimize potential conflicts between agents during the search process by optimizing space utilization, ultimately reducing the branching of high-level nodes. To achieve this, we introduced a heuristic function for high-level nodes, improved the method for prioritizing conflicts, and proposed a heuristic function for low-level nodes. These approaches have led to an improvement in space utilization during the computation process.

In this study, experiments are conducted on diverse grid maps (empty-16-16, warehouse-10-20-10-2-2, den520d). The results

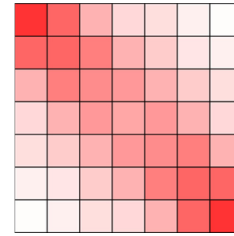


Fig. 1 Overuse of free space

showed that the method significantly reduced the branching of high-level nodes at least 10 times and up to 100 times compared to Improving CCBS by minimizing conflicts between agents. This reduction in the number of branches resulted in an average increase in success rate of approximately 30% across different grid maps. Moreover, the increase in the flow time can be negligible relative to prior algorithms, indicating that the proposed method is both efficient and practical.

## 2. Theoretical Background

### 2.1 Conflict Based Search with Continuous Time (CCBS)

CCBS is an algorithm designed to solve MAPF under continuous time, while considering kinematic characteristics such as rotation and acceleration of robots. The process of this algorithm is divided into a high-level stage and a low-level stage. The high-level stage detects conflicts between agents and generates constraints to resolve them, inheriting these from parent nodes to child nodes. Sequentially, the child nodes solve these conflicts through the low-level algorithm, Safe-Interval Path Planning (SIPP).

SIPP optimizes a single agent's path by categorizing between Safe Intervals and Unsafe Intervals based on the provided constraints. The agent is allowed to move or stop only within Safe Intervals, ensuring collision-free path planning. Although CCBS effectively finds optimal paths, its conflict detection process can be computationally expensive.

To enhance CCBS, Andreychuk *et al.* incorporated successful improvements from CBS. They introduced Disjoint Splitting (DS) to efficiently distinguish the search space using both Positive and Negative Constraints, guaranteeing that child nodes explore mutually exclusive solutions. This strategy noticeably boosts the search efficiency.

Furthermore, they introduced Prioritizing Conflicts (PC) to efficiently identify and resolve the most critical conflicts, reducing the number of expanded nodes and optimizing search performance. Finally, heuristic techniques were implemented in the high-level

search to improve the computation speed by estimating potential cost increases and prioritizing nodes with the highest impact on conflict resolution, thereby reducing unnecessary node expansions and enabling faster optimal pathfinding.

### 2.2 Space Utilization Optimization (SU-I)

SU-I is a heuristic designed to optimize space utilization in Multi-Robot Path Planning (MRPP) and Life-Long Multi-Robot Path Planning (LMPP). Its primary goal is to navigate robots while using space evenly during path planning, reducing conflicts and enabling more efficient discovery of optimal routes.

SU-I considers vertices, edges, and temporal information of the graph, directing paths stay away from congested areas. It tracks how much each part of the graph is used by other robots, helping them avoid heavily used routes and select paths with less traffic.

SU-I can be integrated into the  $A^*$  algorithm in two main ways: by incorporating it into the estimated cost-to-go to reduce potential conflicts, or into the cost-to-come to minimize actual conflicts along the path. These methods enable SU-I to achieve both path optimality and conflict avoidance simultaneously.

Additionally, SU-I anticipates interactions between robots' paths and selects routes that minimize these events, making it particularly effective in complex environments. The heuristic also improves path selection accuracy through multiple planning iterations, updating graph space utilization and continuously reducing path conflicts, thereby enhancing the overall efficiency of the process.

## 3. Methodology

As mentioned by Han *et al.* CCBS has the drawback of insufficient space utilization during the search process for agents. For example, as illustrated in Fig. 2(a), if the optimal single path is searched without considering the paths of other agents, collisions may occur. To resolve these collisions, the conflicts are set as constraints, leading to branching in the high-level nodes, and the SIPP is used for the single search of the robot based on the given constraints. However, if space utilization is insufficient, frequent branching of high-level nodes occurs due to collisions, leading to increased computational load. On the other hand, when search is conducted with space utilization in mind, it is possible to find a collision-free path with the same cost, as shown in Fig. 2(b).

The importance of space utilization and its impacts on overall algorithm performance have been emphasized in various studies. In this context, we propose three key

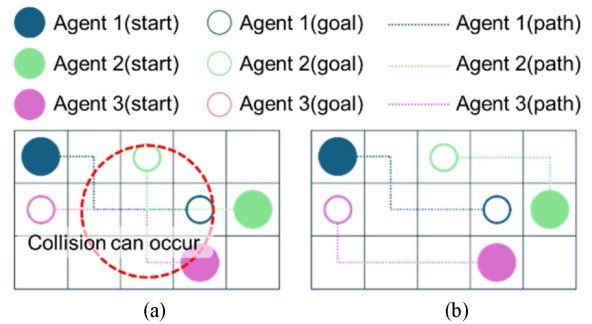


Fig. 2 Space utilization example. (a) without spatial utilization, (b) with spatial utilization

improvements to address this issue in CCBS: improving the High-Level heuristic function, refining the method for determining cardinality, and enhancing the Low-Level heuristic function. The purpose of these keys is to maximize space utilization, resulting in increasing the success rate of search and reducing the computational load.

Before presenting Algorithms, we first introduce several terms and notation used in this section. An agent's path is expressed as a sequence of nodes  $p[i]$ , where each node corresponds to the  $i$ -th position the agent reaches during its movement. For each node  $n_i$ , we denote its arrival time as  $n_i.g$ , and its spacial location on the grid map as  $(n_i.x, n_i.y)$ . Using these node states, the algorithm constructs a congestion array  $T$ , which records how many agents occupy each grid cell over time and is used to evaluate congestion-based heuristic values. The notation  $v_{pi}$  refers to the vertex currently occupied by agent  $i$ , and  $p$  denotes the path taken by an agent. We use  $n$  to denote the total number of agents in the scenario, and  $d$  denotes the Euclidean distance between the current node and the goal node, which is used as part of the heuristic evaluation. Finally,  $h$  denotes the heuristic value computed during the search process.

### 3.1 Congestion Calculation for Space Utilization

This paper proposes a method to calculate a congestion array based on the movement paths of agents. Various methods have been proposed in previous studies to optimize space utilization, and in this study, we adopt an approach that calculates a congestion array based on the movement paths of each agent. For example, when an agent moves from Node  $N_a$  to Node  $N_b$ , the congestion at  $N_a$  is recorded over time, and this congestion is reflected in the continuous flow of time. To do this, the time is divided into intervals, and the time of arrival at  $N_a$  is recorded in each interval, incrementing the congestion value of  $N_a$  by 1. This process is uniformly applied to the paths of all agents, ultimately calculating the congestion array.

**Algorithm 1:** Save congestion array

---

```

1  Congestion  $\leftarrow \{ \}$ 
2  for all  $p$  in Path do
3  for  $i=1$  to ;  $length(p) - 1$  do
4   $n_1 = p[i], n_2 = p[i + 1]$ 
5   $t_1 = n_1.g/timestep, t_2 = n_2.g/timestep$ 
6  Congestion[ $n_1.x$ ][ $n_2.y$ ][ $t_1$ ] += 1
7  Calculate intermediated node between  $n_1$  and  $n_2$ 
8  for each intermediate node between  $n_1$  and  $n_2$  do
9  Congestion[ $x$ ][ $y$ ][ $t$ ] += 1
10 end for
11 Congestion[ $n_2.x$ ][ $n_2.y$ ][ $t_2$ ] += 1
12 end for
13 end for

```

---

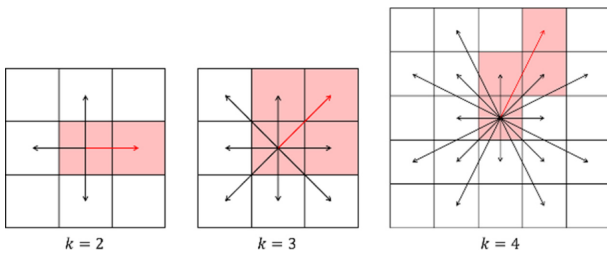


Fig. 3 Congestion increase according to the illustration of the  $2^k$  neighborhood for  $k=2, 3$  and  $4$

To effectively utilize the congestion array, the size and speed of each agent, as well as changes in the path over time, must be considered. Specifically, when an agent moves from Node  $N_a$  to Node  $N_b$ , the nodes located at intermediate points should also be included in the congestion array to accurately model the space that the agent actually occupies.

The robot's movement path is determined by a  $2^k$  neighborhood structure, as shown in Fig. 3. When the robot moves along the red arrows, all the red nodes along the path are included in the congestion calculation. This plays a crucial role in predicting all potential collision points on the path in advance and designing the path to avoid them.

Previous research applied methods to balance the search by setting the sum of vertex and edge congestion weights to 1. However, this study improves this methodology by adopting an approach that solely considers vertex congestion when finding the optimal path. This enables a more detailed analysis of the space that the agent actually occupies on the path, enhancing the accuracy and efficiency of the search. This congestion-based approach contributes not only to optimizing part of the search process but also to enhancing the efficiency of the overall search algorithm.

**Algorithm 2:** Get high-level congestion cost

---

```

1  cost  $\leftarrow 0$ 
2  for all  $p$  in Path do
3  for  $i = 1$  to  $length(p) - 1$  do
4   $n_1 = p[i], n_2 = p[i + 1]$ 
5   $t_1 = n_1.g/timestep, t_2 = n_2.g/timestep$ 
6  cost  $\leftarrow$  cost + Congestion[ $n_1$ ][ $n_2$ ][ $t_1$ ]
7  Calculate intermediate nodes between  $n_1$  and  $n_2$ 
8  for each intermediate node between  $n_1$  and  $n_2$  do
9  cost  $\leftarrow$  cost + Congestion[ $x$ ][ $y$ ][ $t$ ]
10 end for
11 cost  $\leftarrow$  cost + Congestion Congestion
    [  $n_2.x$  ][  $n_2.y$  ][  $t_2$  ]
12 end for
13 end for
14 return cost/length(Path)

```

---

### 3.2 Congestion-based High-level Heuristic Function for Space Utilization

Andreychuk *et al.* applied a heuristic to CCBS using a Linear Programming Problem (LPP) to estimate the minimum cost increase necessary to resolve conflicts and to identify the increase in solution cost during conflict resolution, thereby minimizing computation time. In this study, we expand this approach by applying a new heuristic function that incorporates the calculated congestion array. This congestion array stores values that represent the density of agents passing through specific nodes during a given time interval. Summing the congestion of each node and dividing by the number of agents calculates the average congestion to incorporate into the heuristic function. This guides the search process to avoid highly congested areas, thereby minimizing potential collisions and improving space utilization. Therefore, this approach considers all possibilities from the initial stage of the search to compute more optimized paths. For instance, by guiding the initial path configuration to avoid highly congested areas, potential collisions in the intermediate stages of the search can be prevented. This strategy significantly increases the success rate of search, especially when multiple agents move simultaneously in complex environments, through the use of space-utilized heuristic functions.

### 3.3 Prioritizing Conflicts for Space Utilization

The Prioritizing Conflicts is a method for determining which conflict should be resolved first when conflicts happen between agents. This method classifies conflicts into three types: Cardinal Conflicts, Semi-Cardinal Conflicts, and Non-Cardinal Conflicts,

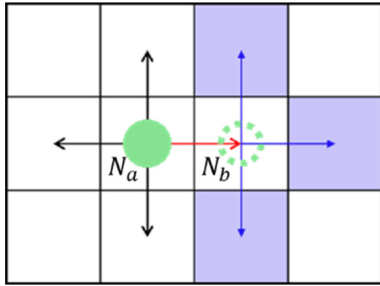


Fig. 4 Low level search heuristic calculation example

based on whether resolving the conflict causes an increase in the cost of the child nodes relative to the parent node. Cardinal Conflicts take place when the cost of the child nodes is higher than that of the parent node, Semi-Cardinal Conflicts occur when the cost of one child node's increases while the other remains the same, and Non-Cardinal Conflicts occur when the cost does not increase. PC primarily prioritizes conflicts based on path costs, addressing the highest-priority conflicts first to enhance the overall efficiency of search. In this approach, the path cost is determined by summing the path costs of all agents and then calculating the difference from the previous path costs to determine the priority of each conflict.

However, the traditional PC approach has limitations as it only considers costs without sufficiently reflecting space utilization. In this study, we propose an enhanced conflict prioritization method that incorporates congestion, considering both cost and space utilization simultaneously. To achieve this, we calculate the congestion-based increase in value after determining each agent's path. If all child nodes have higher congestion and path costs compared to their parent nodes, the conflict is defined as a Cardinal Conflict. If only one child node shows an increase in both congestion and path cost, it is classified as a Semi-Cardinal Conflict. If none of the child nodes meet the conditions for congestion and path cost increase, it is classified as a Non-Cardinal Conflict.

This method comprehensively considers both the path cost and congestion increase of the child nodes to determine the optimal conflict prioritization. An increase in congestion directly impacts space utilization, making conflict resolution that accounts for this factor more efficient during the search.

Additionally, the cost increase is defined as the sum of the changes in path cost and congestion cost. By resolving not only conflicts with the greatest impact on the total solution cost but also those with a huge impact on congestion, the number of expanded nodes at the High-level Node can be reduced. This approach plays a critical role in solving multi agent search problems in dense environments, resulting in improved computational efficiency and enhanced solution quality.

**Algorithm 3:** Get low-level congestion cost

```

1  moves ← {}
2  cost ← 0
3  for each m in moves do
4  if m.id == current Node.id then
5  continue
6  end if
7  distance ← √((m.i - goal.i)² + (m.j - goal.j)²)
8  cost ← cost + ( c array [ m · g / timestep ] [ m.i ] [ m.j ] / distance )
9  end for
10 h ← h + ( cost / moves.size() )

```

**3.4 Congestion-base Low-level Search Heuristic Function for Space Utilization**

This paper proposes a method that incorporates congestion into the heuristic function of the Low-Level Search to preemptively identify paths for a single agent that will not cause conflicts with the paths of other agents. This method focuses on identifying paths that can avoid potential conflicts with other agents, even when the costs are identical, by considering congestion. To accomplish this, the congestion at each potential node is calculated and reflected in the heuristic value during the search process for a single agent. Specifically, as the agent evaluates potential paths from one node to the next, the congestion of the surrounding nodes is measured and integrated into the heuristic. For example, as shown in Fig. 4, if an agent is evaluating moving from Node  $N_a$  to Node  $N_b$ , the congestion around  $N_b$  is assessed by inspecting the nodes in the blue region. This process predicts the congestion in the future paths and determines the feasibility of moving to  $N_b$ .

Congestion calculation is performed using a Congestion Array. The congestion around  $N_b$  is computed by considering the congestion levels of nodes accessible from  $N_b$ , based on the Congestion Array, and then dividing this value by the distance from  $N_b$  to the goal node. The heuristic value is determined by summing the congestion of all nodes and then dividing by the number of accessible nodes. This approach enables the anticipation of future congestion during the search process, allowing the agent to avoid moving to nodes with high surrounding congestion. This is particularly effective in preventing conflicts when multiple agents navigate in complex environments simultaneously. Therefore, incorporating congestion into the Low-level Search improves space utilization and increases search success rates

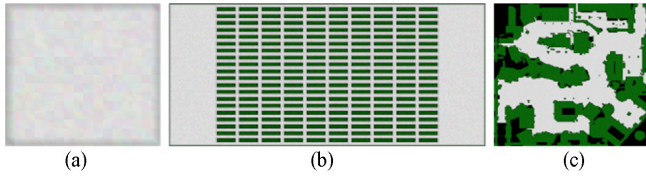


Fig. 5 Example of grid map for evaluation. (a) empty-16-16, (b) warehouse-10-20-10-2-2, (c) den520d

compared to traditional search algorithms, while minimizing conflicts between agents.

### 4. Experiments

#### 4.1 Evaluation Setup

To evaluate the impact of the proposed heuristic modifications on CCBS-DS-PC-H, we conducted extensive experiments across various MAPF scenarios. We compared the congestion-based space utilization heuristic with the H2 heuristic proposed in previous research. The experiments were conducted on three grid map environments shown in Fig. 5: empty-16-16, warehouse-10-20-10-2-2, and den520d.

- **empty-16-16:** A grid map with wide-open spaces to evaluate performance in low density, unobstructed environments
- **warehouse-10-20-10-2-2:** A structured grid resembling a warehouse with narrow aisles, representing high-density environments
- **den520d:** A complex, obstacle-rich map to assess the algorithm’s robustness in dynamic and cluttered scenarios

In each scenario, the agents were modeled as disk-shaped entities with a radius of  $\sqrt{2}/4$ . The time limit for each computation was set to 1 minute. The experiments were conducted on a computer with a Ryzen 5800x CPU and 32GB RAM. The neighborhood structure was defined by a  $2^k$  neighborhood, with  $k$  set to 3 and 5 for comparative analysis. The primary metrics used for comparison were the number of CT (Constraint Tree) node branches and the success rate of the computations.

#### 4.2 Evaluation Results and Analysis

The experimental results illustrate the superior performance of CCBS with the proposed congestion-based space utilization heuristic. As shown in Fig. 6, the proposed heuristic maps, demonstrating the consistent superiority of the congestion-based approach.

This performance improvement is further validated by the results shown in Fig. 7 where the number of CT node branches are compared. The results refer to the congestion-based heuristic that

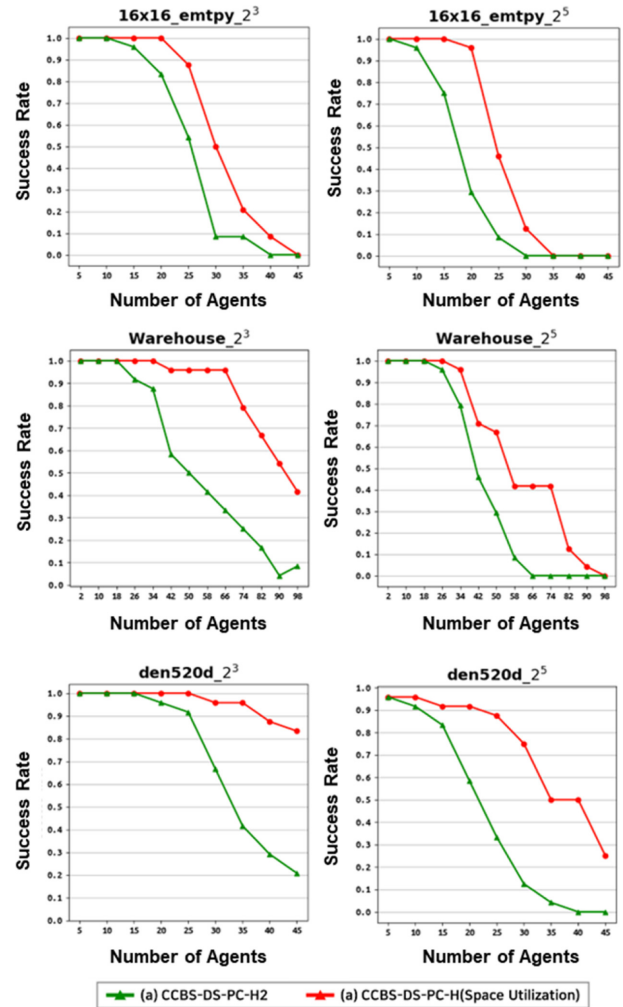


Fig. 6 Success rates for CCBS and its modifications on different  $2^k$ -connected grids

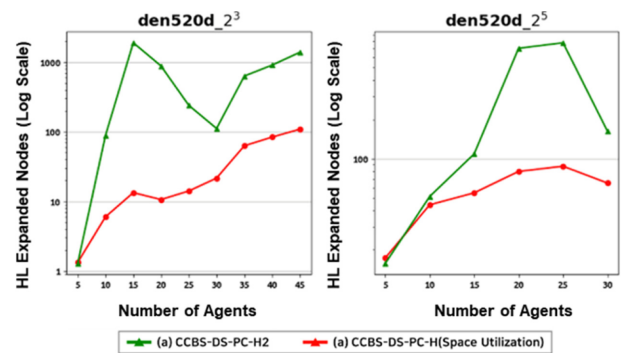


Fig. 7 Expanded CT nodes for solved instance of CCBS

reduces the number of branches by up to 100 times in certain cases, with a minimum reduction of at least 10 branches. This reduction in branching can be attributed to the increased space utilization, which lowers the likelihood of collisions with other agents. These conclusions suggest that broad space utilization during pathfinding can significantly reduce the risk of future collisions.

The results of this experiment demonstrate the impact of integrating congestion-based heuristics into CCBS. By prioritizing space utilization, the proposed approach improves computational efficiency, increasing the success rate of pathfinding in complex environments. These findings highlight the necessity of space utilization in future research of multi-agent pathfinding algorithms, especially in environments with high agent density or numerous obstacles.

## 5. Conclusion

In this study, we introduced an approach to optimize space utilization in the enhanced CCBS algorithm to increase the success rate of MAPF. By introducing congestion-based heuristics for both high-level and low-level nodes and refining the conflict prioritization method. We effectively reduced the likelihood of collisions between agents, including a significant reduction in the branching of high-level nodes and improved the computational efficiency of the algorithm. Experiments conducted on various grid maps, including empty-16-16, warehouse-10-20-10-2-2, and den520d, demonstrated that the proposed method significantly outperformed the existing Improving CCBS. Specifically, the proposed method reduced high-level node branching by at least 10 times and up to 100 times, while increasing the algorithm's success rate by over 30% across different scenarios. Additionally, the impact on flow time relative to existing algorithms was minimal, confirming the practicality and effectiveness of the proposed approach. These results emphasize the importance of space utilization in MAPF algorithms, particularly in environments with high agent density or complex obstacles. Future research could explore the development of space utilization-based constraints, guide path, and the integration of congestion-based heuristics into other MAPF algorithms, potentially leading to even greater performance improvements and higher success rates in real-world applications.

## REFERENCES

1. Wurman, P. R., D'Andrea, R., Mountz, M., (2008), Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses, *AI Magazine*, 29(1), 9-9.
2. Morris, R., Pasareanu, C. S., Luckow, K. S., Malik, W., Ma, H., Kumar, T. S., Koenig, S., (2016), Planning, scheduling and monitoring for airport surface operations, *Proceedings of the Workshops of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence Planning for Hybrid Systems*.
3. Dresner, K., Stone, P., (2008), A multiagent approach to autonomous intersection management, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 31, 591-656.
4. Yu, J., LaValle, S., (2013), Structure and intractability of optimal multi-robot path planning on graphs, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 27(1), 1443-1449.
5. Badawy, M., Khalifa, H., Arafat, H., (2019), New approach to enhancing the performance of cloud-based vision system of mobile robots, *Computers & Electrical Engineering*, 74, 1-21.
6. Sharon, G., Stern, R., Felner, A., Sturtevant, N. R., (2015), Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding, *Artificial Intelligence*, 219, 40-66.
7. Sharon, G., Stern, R., Goldenberg, M., Felner, A., (2013), The increasing cost tree search for optimal multi-agent pathfinding, *Artificial Intelligence*, 195, 470-495.
8. Goldenberg, M., Felner, A., Stern, R., Sharon, G., Sturtevant, N., Holte, R. C., Schaeffer, J., (2014), Enhanced partial expansion A, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 50, 141-187.
9. Hönic, W., Kumar, T., Cohen, L., Ma, H., Xu, H., Ayanian, N., Koenig, S., (2016), Multi-agent path finding with kinematic constraints, *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 26, 477-485.
10. Ma, H., Hönic, W., Kumar, T. S., Ayanian, N., Koenig, S., (2019), Lifelong path planning with kinematic constraints for multi-agent pickup and delivery, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 7651-7658.
11. Andreychuk, A., Yakovlev, K., Surynek, P., Atzmon, D., Stern, R., (2022), Multi-agent pathfinding with continuous time, *Artificial Intelligence*, 305, 103662.
12. Phillips, M., Likhachev, M., (2011), Sipp: Safe interval path planning for dynamic environments, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 5628-5635.
13. Sharon, G., Stern, R., Felner, A., Sturtevant, N. R., (2015), Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding, *Artificial Intelligence*, 219, 40-66.
14. Li, J., Harabor, D., Stuckey, P. J., Ma, H., Gange, G., Koenig, S., (2021), Pairwise symmetry reasoning for multi-agent path finding search, *Artificial Intelligence*, 301, 103574.
15. Li, J., Harabor, D., Stuckey, P. J., Felner, A., Ma, H., Koenig, S., (2019), Disjoint splitting for multi-agent path finding with conflict-based search, *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 29, 279-283.
16. Boyarski, E., Felner, A., Stern, R., Sharon, G., Betzalel, O., Tolpin, D., Shimony, E., (2015), Icbs: The improved conflict-based search algorithm for multi-agent pathfinding, *Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search*, 6(1), 223-225.

17. Li, J., Felner, A., Boyarski, E., Ma, H., Koenig, S., (2019), Improved heuristics for multi-agent path finding with conflict-based search, Proceedings of the International Joint Conferences on Artificial Intelligence, 442-449.
18. Andreychuk, A., Yakovlev, K., Boyarski, E., Stern, R., (2021), Improving continuous-time conflict based search, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 11220-11227.
19. Han, S. D., Yu, J., (2022), Optimizing space utilization for more effective multi-robot path planning, Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, 10709-10715.
20. Han, S. D., Yu, J., (2020), Ddm: Fast near-optimal multi-robot path planning using diversified-path and optimal sub-problem solution database heuristics, IEEE Robotics and Automation Letters, 5(2), 1350-1357.
21. Barer, M., Sharon, G., Stern, R., Felner, A., (2014), Suboptimal variants of the conflict-based search algorithm for the multi-agent pathfinding problem, Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search, 19-27.
22. Chen, Z., Harabor, D., Li, J., Stuckey, P. J., (2024), Traffic flow optimisation for lifelong multi-agent path finding, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 38(18), 20674-20682.
23. Okumura, K., Machida, M., Défago, X., Tamura, Y., (2022), Priority inheritance with backtracking for iterative multi-agent path finding, Artificial Intelligence, 310, 103752.
24. Okumura, K., (2023), Lacam: Search-based algorithm for quick multi-agent pathfinding, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 37(10), 11655-11662.
25. Li, J., Chen, Z., Harabor, D., Stuckey, P. J., Koenig, S., (2021), Anytime multi-agent path finding via large neighborhood search, Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 4127-4135.
26. Li, J., Chen, Z., Harabor, D., Stuckey, P. J., Koenig, S., (2022), Mapf-Ins2: Fast repairing for multi-agent path finding via large neighborhood search, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 36(9), 10256-10265.
27. Li, J., Chen, Z., Zheng, Y., Chan, S.-H., Harabor, D., Stuckey, P. J., Ma, H., Koenig, S., (2021), Scalable rail planning and replanning: Winning the 2020 flatland challenge, Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 31, 477-485.



#### **SeongTaek Im**

M.Sc. candidate in the Department of Interdisciplinary Robot Engineering Systems, Hanyang University. Her research interest includes multi-robot systems, path planning for multiple mobile robots or agents, task and motion planning.

E-mail: st9051@hanyang.ac.kr



#### **SeoHyun Yoo**

M.Sc. candidate in the Department of Interdisciplinary Robot Engineering Systems, Hanyang University. Her research interest includes multi-robot systems, path planning for multiple mobile robots or agents, task and motion planning.

E-mail: sh0430@hanyang.ac.kr



#### **HyoJae Kang**

Ph.D. candidate in the Department of Interdisciplinary Robot Engineering Systems, Hanyang University. His research interest includes mechanism design, control architectures and programming, gripper and other end-effectors, and entertainment robotics.

E-mail: majaae5@hanyang.ac.kr



#### **ChanHui Jung**

Researcher in the Department of Robot Engineering, Hanyang University. His research interest includes precision engineering, multi-robot systems, path planning for multiple mobile robots or agents, task and motion planning.

E-mail: qhrejddlvltm@hanyang.ac.kr



#### **Daehee Han**

M.Sc. candidate in the Department of Interdisciplinary Robot Engineering Systems, Hanyang University. His research interest motion and path planning, integrated planning and control, AI-enabled robotics, and reinforcement learning.

E-mail: hdh1645@hanyang.ac.kr



#### **Min-Sung Kang**

Associate professor in the School of Smart Convergence Engineering, Hanyang University. His research interest includes mechanism design, planning, control architectures and programming, embedded systems.

E-mail: wowmecha@hanyang.ac.kr

# 궤도차량 탑재 다축 안정화 짐벌의 방진 성능에 미치는 엘라스토머 방진구 강성의 영향 분석

## Analysis of the Influence of Elastomeric Isolator Stiffness on the Vibration Isolation Performance of Multi-axis Stabilized Gimbal Systems Mounted on Tracked Vehicles

배종인<sup>1</sup>, 박훈혁<sup>1</sup>, 최재욱<sup>1,#</sup>  
Jong In Bae<sup>1</sup>, Hoon Hyuk Park<sup>1</sup>, and Jae Wook Choi<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 한화시스템 HW1팀(HW 1 Team, Hanwha Systems)

# Corresponding Author / E-mail: [jwchoi@hanwha.com](mailto:jwchoi@hanwha.com), TEL: +82-31-8020-7350

ORCID: 0009-0004-0080-1411

KEYWORDS: Elastomeric isolator (엘라스토머 방진구), Dynamic characteristics (동특성), Vibration isolation (진동절연), Gimbal system (짐벌)

*As modern warfare shifts towards electronic warfare and Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (ISR), there is an increasing demand for stabilized gimbal systems mounted on tracked vehicles to operate reliably in harsh combat environments. However, high-frequency disturbances generated by the vehicle can degrade the quality of the imagery produced by these systems. To mitigate image blur caused by vibration, elastomeric isolators are used; yet, their nonlinear behavior under shock and vibration makes performance prediction challenging. This study aims to model the nonlinear dynamics of these isolators and identify the optimal configuration. Numerical simulations were conducted to pinpoint leading candidate isolators, which were then tested through operational vibration and shock assessments on four isolators with varying stiffness. The selected isolator achieved vibration attenuation of 83% on the X-axis and 72% on the Y-axis. It also met a safety margin of 1.54 for the image sensor and demonstrated durability through endurance testing.*

Manuscript received: August 7, 2025 / Revised: November 21, 2025 / Accepted: December 29, 2025

This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2025

### NOMENCLATURE

$d_{sh}$  = Shock Deflection

$d_{st}$  = Static Deflection

$d_t$  = Total Deflection

$d_v$  = Deflection due to Vibration

$f_n$  = Natural Frequency

$f_s$  = Shock Natural Frequency

$g$  = Acceleration due to Gravity

$g_o$  = Vibration Acceleration Output

$G_i$  = Input Shock Level

$G_o$  = Shock Response Acceleration

$k$  = Static Spring Rate

$k_d$  = Dynamic Spring Rate

$k_s$  = Shock Corrected Spring Rate

$s_i$  = Input Random Vibration

$t$  = Shock Input Pulse Duration

$T_r$  = Resonant Transmissibility

$T_s$  = Shock Transmissibility

$w$  = Supported Weight

$x_o$  = Vibratory Output Motion

$G_{RMS}$  = Root Mean Square Acceleration in g Units

$IE$  = Isolation Efficiency

### 1. 서론

현대 전장에서의 정밀 타격 및 신속 대응 능력은 군사 플랫폼의 생존성과 전투 효율성을 결정짓는 핵심 요소로 작용한다. 특히 전자전 및 감시/정찰 중심으로 작전이 고도화됨에 따라, 다양한 전투 환경에서 안정적으로 운용 가능한 안정화 짐벌 시스템의 수요가 급증하고 있다. 이러한 요구에 부응하여 안정화 짐벌 시스템은 표적 탐지, 추적, 식별, 조준 등의 기능을 실시간으로 수행할 수 있는 핵심 임무 장비로 자리 잡고 있으며[1], 해당 시스템의 성능은 곧 플랫폼의 작전 성공 여부를 좌우하는 중대한 변수로 작용한다.

안정화 짐벌 시스템은 카메라 모듈과 안정화 구동 장치로 크게 구분되며, 카메라 모듈은 직접적으로 영상을 확보하는 전자광학(Electro-optical, EO) 카메라, 적외선(Infra-red, IR) 카메라, 레이저거리측정기(Laser Range Finder, LRF) 와 이를 제어하는 전자보드 등으로 구성된다[2]. 안정화 구동 장치는 카메라 모듈을 지지하고 카메라의 시선 지향(Line of Sight, LOS) 기능을 구현하는 부분으로서 베어링, 모터, 위치센서, 및 방진구 등을 포함하여 짐벌 메인 프레임에 조립되는 구조를 갖는다. Fig. 1은 안정화 짐벌 시스템의 형상과 해당 시스템을 모사한 시험용 모델을 나타냈다. 시험용 모델은 총 8개의 방진구가 양단을 지지하는 구조를 갖는데, 짐벌 내부의 카메라 모듈을 효율적으로 지지하고 각 방진구가 갖는 모멘트 하중을 최소화하는 구조를 갖는다.

안정화 짐벌 시스템의 성능은 영상 장비의 성능이 우수해야만 좋은 품질의 영상을 획득할 수 있다. 하지만 분해능이 높은 영상을 촬영하는 장비가 있다고 해도 영상 획득시 외란의 영향을 받게 되면 영상 품질은 저하된다. 이러한 외란은 짐벌 시스템이 장착된 플랫폼의 운용시 유입되게 되는데, 이때 유입된 진동은 짐벌 시스템의 시선의 흔들림을 유발하고 시선 흔들림은 영상 품질에 미치는 영향이 큰 성분은 높은 주파수 대역의 진동인데, 주파수가 높을수록 동일 시간 더 많은 횟수의 흔들림이 발생하여 영상 번짐이 깊어지기 때문이다. 이러한 유입 외란을 감쇠시키기 위해 짐벌 시스템은 방진구를 포함한 방진 설계가 이루어져야 한다[3]. 방진 설계는 크게 스프링 방진, 탄성체 방진, 능동/준능동 방진 설계 등 다양한 방식이 있지만, 본 연구에서는 소형화 설계에 적합하고 경량성을 확보할 수 있으며 고주파수 영역에서 우수한 방진 성능을 발휘하는 탄성체 방진 설계를 적용하고자 한다. 탄성체 방진 설계는 탄성이 현저한 고분자 물질에 해당하는 엘라스토머 재질의 방진구를 사용한다. 엘라스토머 방진구는 장치로 유입되는 높은 주파수 대역의 진동을 감쇠시켜 열에너지로 변환한다. 이는 영상 품질을 저해시키는 진동을 차단하는 데 효과적으로 작동한다.

이러한 장점이 있지만 엘라스토머 방진구의 동특성은 가진 조건에 따라 변하는 비선형 특징으로 진동 및 충격이 적용된 조건에서의 성능을 예측하는데 어려움이 따른다. 외란에 의한 진동 및 충격은 짐벌 시스템에 영향을 미쳐 영상 성능 및 기능 저하,

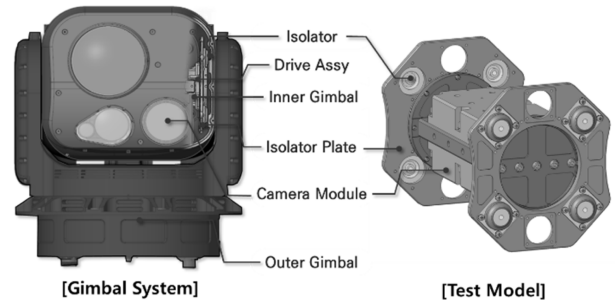


Fig. 1 Stabilized gimbal system

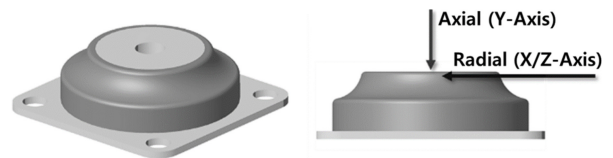


Fig. 2 Elastomeric isolator

장치의 파손을 유발할 수 있는 만큼 설계 단계에서 그 특성을 분석하는 것은 매우 중요하다. 관련하여 짐벌 시스템의 시험 및 해석 기법에 관한 연구로 Kim 등[4-7], 짐벌 시스템의 제어 관련 연구로 Cho 등[8-10]에 의해 이루어졌으나 본 논문과 같이 방진구의 강성에 따른 방진 성능을 실 운용 진동을 기반으로 하여 복합적으로 분석하고 연구한 사례는 미미하다.

본 논문은 비선형 특성을 갖는 엘라스토머 방진구의 성능을 초기 수치분석을 기반으로 예측하고 선별된 방진구간 성능을 시험을 통해 분석함으로써 최적의 방진구를 선정하고자 한다. 제품 사양서에 제시된 공칭값은 특정한 조건에서 만족하는 값이기 때문에 일반적인 환경에서는 동일한 결과를 얻을 수 없어 성능 예측에 불확실성을 키우게 된다. 본 연구의 방진구 사양은 운용 레벨과 유사한 진동시험을 기반으로 방진구의 강성을 산출하여 수치분석의 정확성을 높이고자 하였다. 연구는 방진구를 수치분석을 통해 성능을 예측하여 시험군을 선정하고 선정된 방진구를 시험용 모델에 장착하여 운용성능 진동시험과 충격시험 기반으로 강성에 따른 영향을 분석하고 내구성과 안정성을 검증하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 방진구 선정

엘라스토머 방진구는 금속으로 된 딱딱한 체결부와 무르고 탄력있는 엘라스토머로 구성된다. 물리적으로 점탄성(Viscoelastic) 특성을 지니는데, 천연고무(Natural Rubber), 합성고무(Synthetic Rubber), 고분자화합물(Polymer) 등이 여기에 포함된다. Fig. 2는 엘라스토머 방진구의 형상 및 시험 및 분석간 데이터의 기준 축이다.

안정화 짐벌 시스템에 적용하기 위한 방진구 선정은 제작사인 미국의 LORD사에서 제공하는 선정 방식을 통해 검토했다[11].

Table 1 Elastomeric isolator performance characteristics

Isolator No.	Dynamic spring rate [N/mm]	
	Radial axis (X & Z)	Axial axis (Y)
0	96.8	115.2
1	195.3	244.8
2	384.8	554.2
3	892.4	663.4
4	1969.8	1905.7

제품사양서에서 제시된 공칭값은 특정한 조건(0.91 mm의 최대 동적 입력에 의한 결과)으로 실제 적용조건과는 차이가 있다.

본 연구에서는 방진구 선정간 수치분석을 통한 성능 예측의 신뢰성 확보를 목적으로 5-500 Hz 대역에서 0.002 G<sup>2</sup>/Hz의 랜덤 진동 시험을 통해 방진구의 강성을 도출하였다. 실험을 통해 도출한 방진구의 동적 스프링 강성은 Table 1에 정리하였다.

방진구의 기계적 성질은 강성과 지지 질량에 의해 결정되며 시스템의 고유진동수는 이러한 요소들의 함수로 정의된다. 방진구의 선정간 엘라스토머의 비선형 특성상 수치분석만으로 정확한 성능 특성을 검증함에 한계가 있는 만큼, 이러한 함수를 기반으로 예측 가능한 방진구의 고유진동수와 거동 변위를 계산하고 1차적인 시험용 방진구 선정을 목적으로 절차를 진행하였다.

방진 시스템의 고유진동수( $f_n$ )와 엘라스토머 방진구의 강성( $k$ )은 식(1)과 식(2)로 정의된다. 여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $w$ 는 방진구의 지지 중량을 나타낸다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{w/g}} \tag{1}$$

$$k = \frac{(f_n)^2 \cdot w}{g} \tag{2}$$

시스템이 노출되는 랜덤 진동 환경에서는 입력이 확률적으로 변동하므로 최대 응답을 예측하기는 어렵다. 특히 엘라스토머 방진 요소는 실제 운용 중 약 3 $\sigma$  수준에서 공진 응답이 뚜렷하게 나타나는 것으로 알려져 있으며, 이는 장비가 경험할 수 있는 대부분의 피크 응답을 포함하는 보수적 설계 기준에 해당한다[12]. 따라서, 보수적 설계 기준에서 시스템의 입력 가속도는 식(3)과 같이 계산된다.

$$g_o = 3 \sqrt{\frac{\pi}{2} s_i f_n T_r} \tag{3}$$

식(3)의  $g_o$ 는 3 $\sigma$  수준의 시스템 입력 가속도로 랜덤진동레벨( $s_i$ )과 고유진동수( $f_n$ ), 공진전달률( $T_r$ )의 상관식으로 정리된다.

이때, 고유진동수에서 시스템이 갖는 전체 진동 변위( $x_o$ )는 식(4)와 같고 한 방향 기준 진폭 변위( $d_v$ )는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_o = \frac{g_o}{(2\pi \cdot f_n)^2} \tag{4}$$

$$d_v = \frac{x_o}{2} \tag{5}$$

한편, 방진구에 정적으로 작용하는 하중에 의한 처짐( $d_{st}$ )은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 진동 및 정적 하중에 의한 총 변위( $d_t$ )는 식(7)로 표현이 가능하다.

$$d_{st} = \frac{g \cdot w}{k} \tag{6}$$

$$d_t = d_v + d_{st} \tag{7}$$

이러한 응답 특성 분석은 방진구 설계 및 선정간 기초 데이터로 활용되며, 방진구의 정적 변위를 예측하고 허용된 공간 내에서 설계가 가능한지 평가하는 기준이 된다.

엘라스토머는 충격에 따라 강성의 수치가 약 1.2-1.6배 증폭되는 특성을 갖는 데, 본 논문에서는 제조사에서 제안하는 대표적인 비율 1.4배의 보정 계수를 적용하여 충격 강성( $k_s$ )을 식(8)과 같이 정의하였다. 충격 고유진동수( $f_s$ )는 식(9)와 같이 표현이 가능하다.

$$k_s = 1.4 \cdot k \tag{8}$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{w/g}} \tag{9}$$

충격 응답에 대한 전달률( $T_s$ )은 시험 조건에 해당하는 톱날파형 충격을 고려하여 충격 진동수( $f_s$ )와 충격 펄스 지속시간( $\tau$ )을 이용하여 식(10)과 같이 근사적으로 정리하였다.

$$T_s \cong 3.1 \cdot f_s \cdot \tau \tag{10}$$

$$G_o = T_s \cdot G_i \tag{11}$$

$$d_{sh} = \frac{G_o}{(2\pi \cdot f_s)^2} \tag{12}$$

충격 입력에 대한 시스템 전달 에너지( $G_o$ )는 식(11)로 충격전달률과 입력된 충격량( $G_i$ )의 곱으로 산정이 가능하며, 최종적으로 충격에 의한 변위( $d_{sh}$ )는 식(12)와 같이 표현이 가능하다. 수치분석을 통해 선정한 방진구의 예상 특성은 Table 2에 정리하였다.

시험용 방진구의 선정은 고유진동수와 변위를 기준으로 하였다. 고유진동수 측면에서 방진구의 선정은 방진구를 제외한 시험용 모델이 갖는 공진주파수(190.2 Hz)에  $\sqrt{2}$  배 나는 134.4 Hz 이하 성능을 가져야하다[13]. 이는 방진구와 시험용모델의 모드 커플링(Mode Coupling)현상을 방지하고 안정적인 시스템을 설계하기 위한 기준으로 활용된다. 변위를 고려한 방진구의 선정은 제조사의 방진구 최대 허용 변형량( $\pm 3.5$  mm)이하의 모델 선정을 목표로 하며, 과도 변형에 의한 방진구 파손과 제품 설계간 허용

Table 2 Predicted performance values of the isolators

Section	Axis	Isolator No.				
		0	1	2	3	4
Natural frequency $f_n$ [Hz]	X & Z	35.2	50.0	70.2	106.9	158.9
	Y	38.4	56.0	84.3	92.2	156.2
Total deflection $d_t$ [mm]	X & Z	1.0	0.6	0.3	0.2	0.2
	Y	0.8	0.5	0.3	0.3	0.2
Shock deflection $d_{sh}$ [mm]	X & Z	3.5	3.6	2.9	2.6	1.9
	Y	3.6	3.2	2.5	2.1	1.7

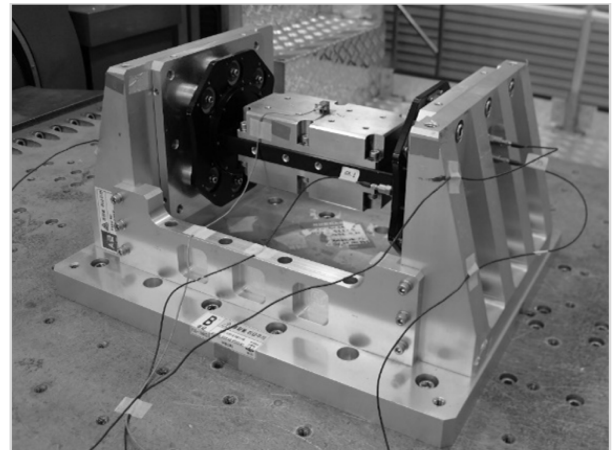
공간내 충돌 발생 여부를 평가하는 기준으로 활용된다. 이러한 기준으로 실험용 방진구를 선정할 결과, 0번과 1번 방진구는 변위에 의한 파손이, 4번 방진구는 제품 적용시 공진에 의한 파손이 예상되었다. 시험용 방진구는 이러한 절차를 기반으로 2, 3번이 적합한 방진구로 판단하였으며, 수치분석간 설계 허용치 이상이 예상되는 1, 4번 방진구는 방진구 강성에 따른 영향 분석을 목적으로 추가하여 진행하였다.

## 2.2 시험 구성

본 시험에서는 방진구의 방진 특성을 분석하기 위해 실 운용 조건과 유사한 환경을 재현할 수 있도록 실제 장비와 동일한 중량과 무게중심을 갖는 시험용 모델을 제작하였다. 시험 구성은 고정 장치 하단에 입력 외란 측정용 가속도 센서(Accelerometer)를 부착하고 방진구가 적용된 시험용 모델의 응답 특성 측정용 가속도 센서를 카메라 모듈 위치 더미에 부착하여 입력과 출력 데이터를 확보할 수 있도록 구성하였다. 방진구의 성능 평가를 위한 시험용 모델과 고정 장치 형상은 Figs. 3(a)에 나타냈으며, 시험 구성은 3(b)와 같이 구성하였다.

방진구의 방진 성능 분석은 운용성능 진동시험과 충격시험, 내구성진동시험으로 구성하였으며, 방진구 기준 Radial 방향을 X축으로, Axial 방향을 Y축으로 외란을 인가하였다. 시험 순서는 2종의 동특성 시험(운용성능 진동시험, 충격시험)을 통해 강성에 따른 특성 분석을 수행하여 최적의 성능을 갖는 방진구 선정하고 해당 방진구에 내구성진동시험을 수행하여 방진구의 내구성과 안정성을 검증하는 순서로 진행하였다.

방진 성능 분석을 위해 수행한 운용성능 진동시험은 장치가 장착된 지상 플랫폼이 목표물을 향해 24발의 발포 사격시 장치로 유입되는 실측 데이터를 기반으로 입력 외란 데이터를 정의하였다. 운용성능 진동시험에서의 외란은 시간-가속도(Time-acceleration) 데이터로 획득 후 가진 장치가 구현 가능하도록 주파수 영역에서의 진동 에너지 분포로 PSD (Power Spectral Density) 프로파일로 변환 산출하였다. 변환 절차는 시간 영역에서의 가속도 신호를 FFT (Fast Fourier Transform)을 수행하여 개별 파워 스펙트럼을 산출하고, 이를 평균하여 전체 PSD를 도출하는 방식으로 진행하였다. 이렇게 정의된 PSD를 기반으로 가속도의 RMS (Root Mean Square) 값을 계산하여 시험장비의 입력으로 인가하였다.



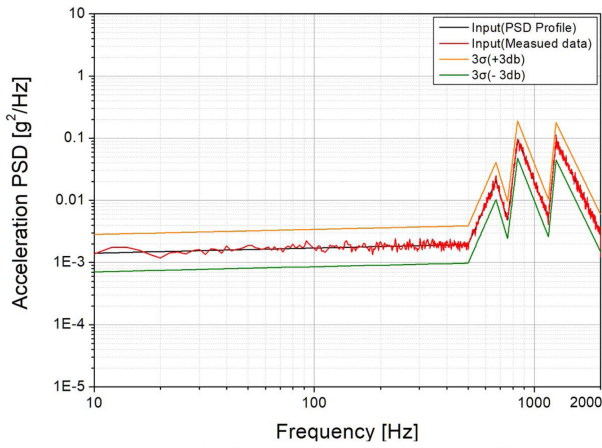
(a) Test model and jig configuration



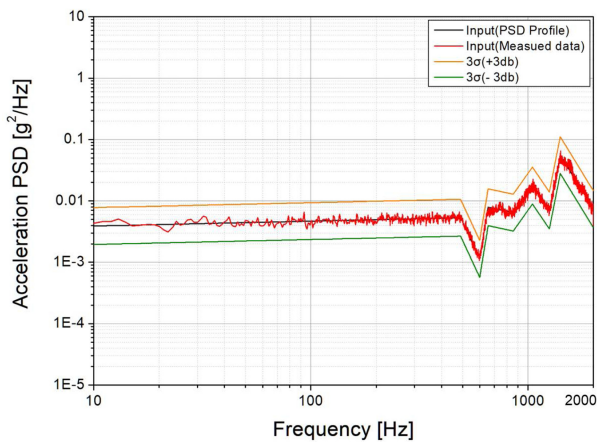
(b) Performance test setup

Fig. 3 Test setup for performance evaluation of isolators

시험 입력은 미국 국방 표준 규격(MIL-STD-810G)에 따라 장비의 허용 오차 범위를  $\pm 3$  db 이내로 유지하도록 제어하였다[14]. 이를 통해 실제 환경에서 발생 가능한 변동성을 반영하면서도 규격을 만족하는 시험 조건을 확보하였다. 장치에 인가된 운용성능 진동 시험 입력 프로파일은 Figs. 4와 같으며, 4(a)는 X축 방향, 4(b)는 Y축 방향 입력 데이터를 나타내었다. 각 축의 입력 에너지크기는 10-2,000 Hz 주파수 구간에서 X축 프로파일은 5.08 Grms, Y축



(a) Vibration test input of x-axis profile



(b) Vibration test input of y-axis profile

Fig. 4 Vibration test input for operational performance

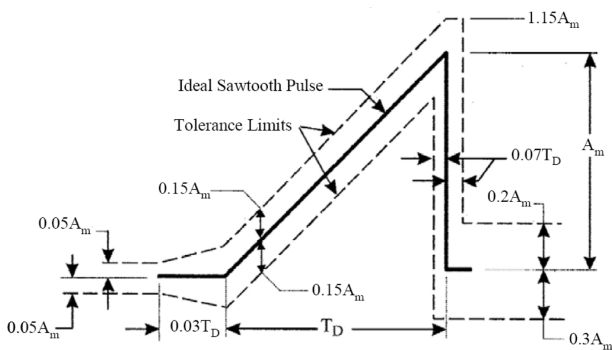


Fig. 5 Shock test input waveform [14] (Adapted from Ref. 14 on the basis of OA)

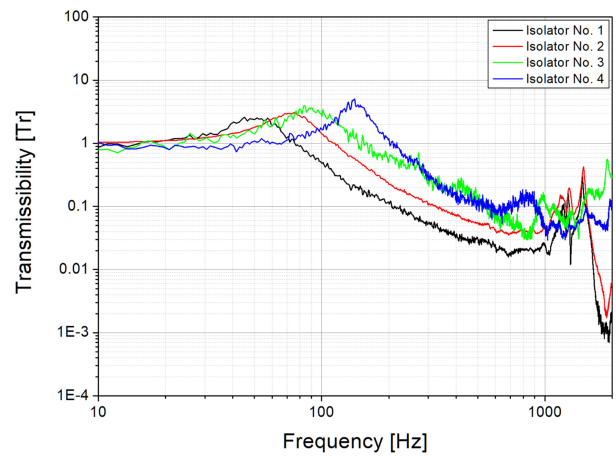
프로파일은 3.81 Grms의 값을 갖는다.

충격시험은 미국 국방 표준 규격(MIL-STD-810G) 절차를 기반으로 Fig. 5와 같이 수행되었으며[14], 30±3 G의 충격을 충격 펄스 지속시간 11±1.1 ms의 톱니파형(Sawtooth Pulse) 충격을 기준으로 인가하였다.

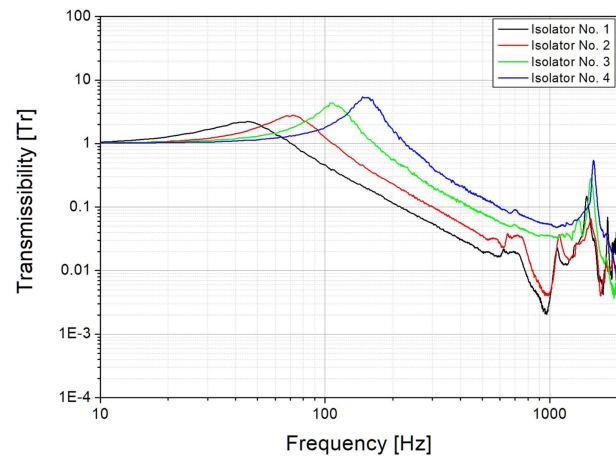
내구성시험은 앞서 진행한 운용성능 진동시험과 충격시험 결과를 바탕으로 최종 선정된 방진구의 내구성 분석을 위해 수행되었으며, 방진구의 내구성과 안정성을 확인하고자 수행되었다.

Table 3 Isolator characteristics during operational vibration

Section		Isolator No.			
Axis	Data	1	2	3	4
X	$f_n$ [Hz]	42.7	74.5	83.0	137.9
	$T_r$	2.57	3.11	3.93	5.02
	$G_{RMS}$	0.675	0.845	1.712	2.421
	$IE$	87%	83%	66%	52%
Y	$f_n$ [Hz]	43.5	73.2	106.2	152.6
	$T_r$	2.23	2.81	4.36	5.49
	$G_{RMS}$	0.767	1.071	1.241	1.715
	$IE$	80%	72%	67%	55%



(a) Transmissibility in the X-axis direction



(b) Transmissibility in the Y-axis direction

Fig. 6 Vibration transmissibility graph during operational vibration

### 3. 시험 결과

#### 3.1 운용성능 진동시험 결과

운용성능 진동시험은 짐벌 시스템의 안정화 성능 구현 환경을 모사하는 시험 조건에서 수행되었으며, Fig. 6에 도시된 바와 같이

각 방진구의 전달률 응답을 로그스케일로 나타내어 비교하였다. 시험의 결과 분석은 인가된 입력 대비 진동 저감 성능 개선을 분석하였다. Table 3는 해당 시험에서 확인한 방진구 별 특성을 나타낸 결과이다. Table 3에서 나타낸 방진효율(IE)는 식(13)과 같은 형태로 가속도센서로 측정한 시험용 모델의 입력 외란 데이터(Test Input)와 응답 특성 데이터(Test Output)로 정의하였다.

$$IE = \frac{Test - Test Output}{Test Input} \times 100 \quad (13)$$

시험 결과 방진구의 고유진동수는 수치분석으로 예측한 방진구 고유진동수(Table 1)와 비교하면 평균 9% 수준이며, 일부에서 최대 29%까지 편차가 발생하였다. 이러한 차이는 엘라스토퍼 방진구가 주파수에 따라 변화하는 비선형 특성, 수치분석과 동특성 시험조건의 차가 영향에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 평균 오차가 9% 수준인 점을 고려하면 랜덤 진동 시험 기반으로 도출한 방진구 강성을 이용한 수치분석은 고유진동수 예측 측면에서 경향성과 일정 수준의 신뢰성을 가진다 볼 수 있다. 운용성능 진동시험을 통해 확인한 방진구의 특성은 강성이 증가할수록 방진효율은 줄어들고, 고유진동수와 공진전달률이 커지는 것을 확인할 수 있다. 방진 효율은 방진구간 최대 X축 35%, Y축 25%의 방진 효율 차이를 보였다. 진동시험 측면에서 방진구의 설계는 강성을 낮춰 고유진동수를 줄여, 감쇠 영역을 키우고 방진 효율을 키우는 것이 실 운용간 안정화 기능 구현에 더 우수한 성능을 보일 것으로 판단된다.

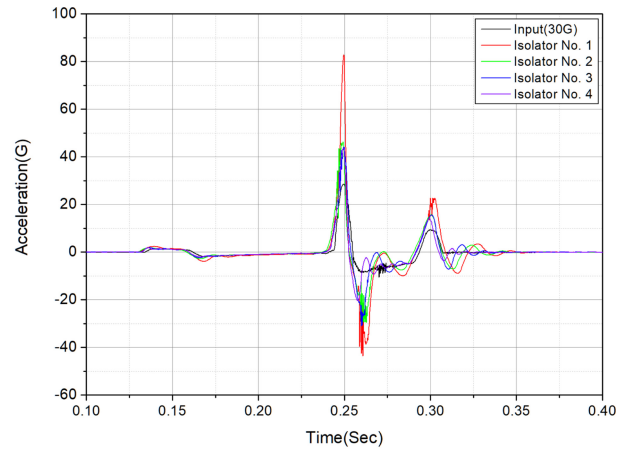
### 3.2 충격시험 결과

충격시험은 장비 운용시 실제로 발생할 수 있는 충격 환경에 대한 방진구 성능 확인을 목적으로 수행되었다. 성능의 분석은 충격 입력시 방진구를 거쳐 카메라 모듈로 전달되는 충격 거동 분석하였으며, 충격시험 결과는 Fig. 7에 도시된 바와 같은 거동을 보였고 Table 4의 표로 충격 응답에 대한 각 방진구별 최대 가속도 결과를 정리하였다.

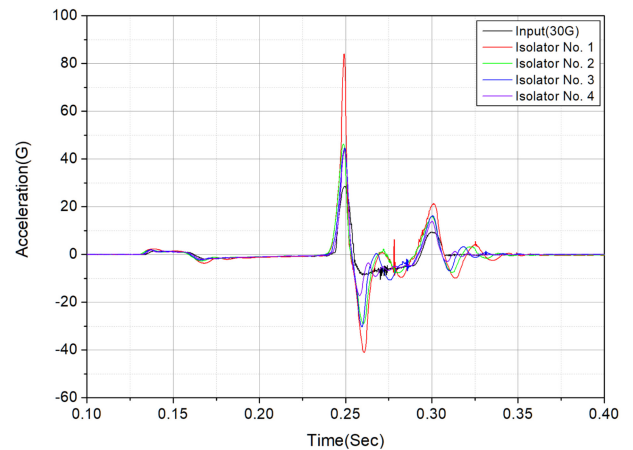
충격시험 결과 1번 방진구를 제외한 2-4번 방진구가 X, Y축 응답이 47 G이하 수준으로 측정되었으며, 1번 방진구는 방진구 사양을 초과하는 시스템의 하중과 충격 입력으로 인해 과도한 증폭 값이 측정된 것을 확인할 수 있다. 이는 실제 제품에 적용 시 카메라 모듈의 파손 및 방진구의 파손이 발생할 수 있음을 나타낸다. 2-4번 방진구가 보인 47 G 이하 충격 거동은 충격에 대한 증폭 결과로 보일 수 있다. 내부 카메라 모듈들의 충격사양(80 G)을 고려할 때, 안전율 1.5 수준을 충족하는 것을 확인할 수 있다. 방진구의 강성에 따른 특성을 보면, 강성이 커질수록 충격전달률은 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 그 크기의 수준이 방진구의 설계치 내에서 3 G 수준으로 유사한 특성을 보인다. 충격사양은 2, 3, 4번 방진구 모두 충족하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3 내구성진동시험 결과

내구성 진동시험은 해당 플랫폼의 평가 규격에 해당하는 미국 국방 표준 규격(MIL-STD-810C)의 지상플랫폼장비 중 궤도차량의



(a) Acceleration response in the X-axis direction



(b) Acceleration response in the Y-axis direction

Fig. 7 Response graph during shock test

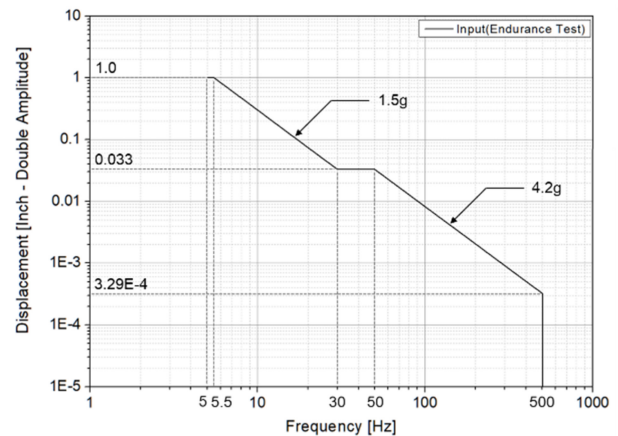


Fig. 8 Endurance test input profile [15] (Adapted from Ref. 15 on the basis of OA)

탐재장비 내구성시험 절차(Method 514.2, Figure 514.2-6)에 제시된 무한궤도 차량 운송 환경의 랜덤 진동 프로파일을 기준으로 수행되었다[15]. 단, 공진점 범위( $f_r \pm 10$  Hz)에서는 0.5 g 가속도로 테일러링(Tailoring)하여 진행하였다.

시험에 수행된 방진구는 사양 선정간 수치분석을 기반으로 설계

Table 4 Shock test results for isolator (maximum shock responses)

Section	Isolator No.			
	1	2	3	4
Axis				
X [G]	82.9	46.3	44.2	43.4
Y [G]	82.1	45.0	44.5	42.6

허용치 내 예측 결과와 운용성능 진동시험과 충격시험을 기반으로 선정한 2번 방진구를 최종모델로 선정하고 시험을 진행하였다. 내구성 시험은 장비의 구체적인 성능과는 별개 절차이지만 극한의 진동환경을 인가하여 방진구의 내구성과 안정성을 검증하는 절차이다. 시험 결과 2번 방진구는 내구성진동시험 후에도 성능저하 및 파손이 없는 것을 확인하였다. 해당 결과는 2번 방진구가 플랫폼에 적용될 경우 운용 과정에서 내구성과 안정성이 확보됨을 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 궤도차량 탑재 다축 안정화 짐벌의 방진 성능에 미치는 엘라스토머 방진구 강성의 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 시험용 모델에 강성이 서로 다른 5종의 방진구를 적용하여 수치분석 기반의 특성 분석을 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 선정한 4종의 방진구에 대해 탑재 플랫폼의 운용 외란을 모사하는 진동 및 충격시험을 수행하여 강성에 따른 특성 분석을 실시하였다.

수치분석 결과, 정적/진동에 의한 변위가 가장 높은 0번 방진구가 0.8 mm 수준으로 그 차이가 적고 설계 간 안정적이었으나, 충격에 대한 변위는 강성이 낮을 경우 제조사의 사양(±3.5 mm)를 초과하는 0, 1번 방진구를 식별할 수 있었다. 방진구의 충격 변위는 기본적인 변위와 강성의 상관관계에 따른 결과임과 함께 방진구가 주파수에 의존한 감쇠 특성을 갖기 때문에 강성이 높은 등급일수록 충격 순간에 반발력이 더 빠르게 증가하고 높은 강성에 의한 높은 고유진동수가 에너지의 소산을 키워 충격 변위를 줄이는 것으로 보여진다.

수치분석 결과, 고유진동수는 시험용 모델이 갖는 고유진동수(190 Hz)에 영향을 주지 않는 방진구의 선별을 위해 진행되었으며, 0-3번 방진구가 최소 1.77배 이상의 주파수비를 확보하는 것으로 확인했다. 만약 시스템의 고유진동수에 영향을 주는 대역 내 설계가 이루어질 경우, 모드 커플링 현상을 보여 제어 불능의 거동을 가져가 기기의 결함, 파손을 야기할 수 있기 때문이다.

운용성능진동시험 결과, 방진구 강성은 낮을수록 진동에 대한 방진효율은 증가하고 충격에 대한 전달률은 커지는 것을 확인할 수 있었으며, 진동에 의한 방진 효율은 방진구간 성능차가 X축 35%, Y축 25%의 방진 효율 차이를 보였다.

충격시험 결과, 충격성능은 1번 방진구는 과도하게 높은 충격

전달특성을 확인하였는데 이는 강성 대비 과도하게 높은 충격이 인가되며 카메라 모듈들의 충격사양(80 G)를 초과하는 응답과 더불어 방진구의 파손으로 이어진 것으로 확인되었다. 충격성능에서 2, 3, 4번 방진구 모두 충족하는 것을 확인할 수 있었다.

방진구 분석 결과, 2번 방진구가 시스템 고유진동수 대비 주파수비가 2.5 이상으로 나타났으며, 운용 성능 진동에 대해 83%의 감쇠 효율을 보였다. 또한 30 G 충격 조건에서 1.54의 증폭비를 갖고 카메라 모듈의 충격 사양 대비 1.72 수준의 안전율을 확보하여 진동 및 충격 성능에서 가장 우수한 특성을 나타내었다. 마지막으로 내구성 시험을 수행하여, 해당 방진구가 플랫폼에 적용 및 실제 운용 시에도 문제가 없는 수준의 내구성과 안정성을 확보하였음을 확인하였다.

본 연구의 결과는 강성에 따른 방진구가 직접적으로 제품에 줄 수 있는 영향과 그 경향성을 보여준다. 실 제품에 적용 전 방진구의 초기 선정부터 성능시험까지 절차와 기준을 제시하는 만큼 유사한 방진구조를 갖는 제품의 설계 시 활용이 가능하며 최적화된 방진구 선정 방법론으로서 활용 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Hwang, S. P., Park, J. H., Hong, S. K., (2012), Control system design for a UAV-mounted camera gimbal subject to coulomb friction, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 18(7), 680-687.
- Cha, J. H., Shin, M. J., Jeon, H. I., (2022), A study on quality improvement of EOTS shock test for 30 mm wheel type air defense system, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 23(11), 492-497.
- Song, A. Y., Yim, S. H., Kwon, B. O., Han, D. H., Jung, H. J., (2021), Structural design through test and analysis of structure equipped with vibration isolator system, *Journal of Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 31(6), 589-596.
- Kim, S. W., (2020), A study on dynamic parameters identification of elastomeric isolator in the aerial EO equipment with multi-axis gimbal, Ph.D. Thesis, KAIST.
- Kim, K. S., (2021), Shock displacement analysis and test of the elastomer isolator for electro-optical tracking system, *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, 1944-1947.
- Choi, J. W., (2021), A Study on the structural stabilization design for vibration attenuation of ultra-light EOTS platform, M.Sc. Thesis, Hanseo University.
- Kang, C. W., Park, H. S., Kwag, D. G., (2023), Study on rubber damping characteristics of vibration reduction mounts for UAVs, *Journal of the Convergence on Culture Technology*, 9(6), 927-933.

8. Cho, H. C., Kwag, D. G., Sim, H. J., (2019), A study on the stabilization of gimbal considering the position of gyro sensor, Proceedings of the Society for Aerospace System Engineering Fall Conference, 355-356.
9. Yeo, S. M., (2018), Gyro drift compensation based on Kalman filter and disturbance torque feedforward compensation control for 2-axes gimbal structured line-of-sight stabilization system, M.Sc. Thesis, Gachon University.
10. Kim, H. W., Han, S. I., Jang, J. W., Song, K. B., (2023), LOS stabilization controller design of EOTS and performance prediction using disturbance model, Journal of the Korean Military Science and Technology Society, 26(1), 72-82.
11. Lord Corporation, (2011), Aerospace & defense isolator catalog. <https://ph.parker.com/us/en/product-list/lord-am-005-series-low-profile-avionics-mount>
12. Steinberg, D. S., (2000), Vibration Analysis for Electronic Equipment, John Wiley & Sons.
13. An, B. G., Jeon, Y. G., (2023), Dynamic analysis of EOTS equipped with vibration-proof assembly, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 24(11), 726-732.
14. MIL-STD-810G, (2008), Department of defense test method standard: environmental engineering considerations and laboratory tests.
15. MIL-STD-810C, (1975), Environmental test methods.



**Jong In Bae**

Chief Engineer in HW1 Team, Hanwha Systems Co., LTD. His research interest is design and material engineering.  
E-mail: jongin.bae@hanwha.com



**Hoon Hyuk Park**

Senior Engineer in HW1 Team, Hanwha Systems Co., LTD. His research interest is design and material engineering.  
E-mail: hoonhyuk.park@hanwha.com



**Jae Wook Choi**

Engineer in HW1 Team, Hanwha Systems Co., LTD. His research interest is design and material engineering.  
E-mail: jwchoi@hanwha.com

# 딥러닝 기반 간편 체형 분석 기술 검증

## Accuracy and Reliability of Deep Learning-based 2D Posture Analysis

표성건<sup>1</sup>, 박창언<sup>1</sup>, 이승희<sup>1</sup>, 김정윤<sup>2</sup>, 배은경<sup>2</sup>, 김영호<sup>1,#</sup>  
Seonggeon Pyo<sup>1</sup>, Changeon Park<sup>1</sup>, Seunghee Lee<sup>1</sup>, Jungyoon Kim<sup>2</sup>, Eunkyung Bae<sup>2</sup>, and Youngho Kim<sup>1,#</sup>

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

<sup>2</sup> 주식회사 리모 (REMO Inc.)

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

ORCID: 0000-0001-7531-802X

KEYWORDS: Posture analysis (체형분석), Deep learning (딥러닝), 2D image (2차원 사진), 3D human pose estimation (3차원 인체 자세추정), 3D motion capture (3차원 동작분석)

*This study assessed the accuracy and reliability of a 2D image-based deep learning algorithm for posture analysis by comparing it with a 3D motion capture system. Twenty healthy adult males participated, and nine balance parameters were measured using both methods: body tilt (ML/AP), shoulder tilt, pelvis tilt (ML/AP), knee tilt, left/right varus/valgus, and forward head posture. We evaluated agreement and reliability using root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), Pearson correlation coefficients, and intraclass correlation coefficients (ICC). Most parameters exhibited RMSE and MAE within 3°, while forward head posture, pelvis tilt (AP), and varus/valgus had errors below 10°. High correlations were found for shoulder tilt ( $r = 0.886$ ) and forward head posture ( $r = 0.681$ ), whereas knee tilt and left varus/valgus showed lower correlations due to methodological differences. Both methods demonstrated high repeatability (3D:  $ICC > 0.90$ , 2D:  $ICC > 0.80$ ), with moderate-to-high agreement between methods ( $ICC \geq 0.5$  for most parameters). Shoulder tilt ( $ICC = 0.919$ ) and forward head posture ( $ICC = 0.799$ ) showed particularly high agreement. These findings indicate that 2D image-based posture analysis can provide accurate and reliable assessments comparable to 3D motion capture, presenting a more accessible and cost-effective alternative for posture evaluation in clinical and research contexts.*

Manuscript received: August 20, 2025 / Revised: November 19, 2025 / Accepted: November 24, 2025

### 1. 서론

COVID-19 팬데믹으로 인한 비대면 활동의 증가로 디지털 기기의 사용 시간이 급격히 늘어났다[1]. 이에 따라 장시간 컴퓨터 및 스마트폰 등 디지털 기기를 사용하는 인구가 증가하였으며, 이로 인해 VDT 증후군(Visual Display Terminal Syndrome)이 중요한 건강 문제로 대두되고 있다. VDT 증후군은 거북목 증후군, 목 디스크, 손목터널 증후군 등을 포함하는 근골격계 및 신경학적 이상을 유발하는 질환군으로 정의된다[2]. 건강보험심사평가원의 보고에 따르면, 2019년 기준 근골격계 질환자는 1,761만 명으로, 2009년 대비 7.9%p 증가한 수치이다[3].

근골격계 질환의 증가는 예방 및 치료의 필요성을 더욱 강조하고 있으며, 이에 따라 근골격계 질환의 평가 방법의 중요성

또한 부각되고 있다. 박정식 등[4]은 근골격계 질환의 진단 과정에서 촉진 평가 및 자세 평가가 필수적이라고 보고하였다. 이러한 근골격계 질환의 증가로 인해 정확하고 접근성 높은 체형 분석 도구의 필요성이 증가하고 있다. 최근에는 스마트폰과 같은 개인 디지털 기기를 활용한 건강 관리 솔루션이 주목받고 있으며, 체형 분석 분야에서도 이러한 기술을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. Hong [5]은 포스트 팬데믹 시대의 모바일 헬스 발전을 분석하면서, 스마트폰과 웨어러블 기기의 기술적 융합이 지속적인 건강 모니터링의 새로운 가능성을 열고 있다고 보고하였다. 또한 He 등[6]의 문헌계량학적 분석에 따르면, mHealth 관련 연구는 2003년 3편에서 2022년 130편으로 증가하였으며, 특히 2020년 이후 COVID-19의 영향으로 연간 100편 이상의 논문이 발표되는 등 급속한 성장세를 보이고 있다. 이러한 디지털

헬스케어 시장 전체도 지속적으로 성장하고 있으며, Statista의 보고에 따르면 글로벌 디지털 헬스케어 시장은 2029년까지 약 258.3억 달러 규모로 확대될 것으로 전망된다[7].

기존의 체형 분석 방법으로는 전문가가 수행하는 측진 평가 방법[8-10]과 3차원 동작 분석 시스템을 활용한 방법이 있다 [11-14]. 그러나 전문가의 측진 평가 방식은 검사자의 숙련도와 주관성에 영향을 받을 수 있으며, 3차원 동작 분석 시스템은 높은 정확도를 제공하지만, 실험실 환경에서만 사용이 가능하고 마커 부착이 필요하며, 높은 비용과 피부 움직임에 따른 오차가 발생할 수 있다는 한계를 가진다[15]. 이러한 한계를 보완하기 위해 깊이 카메라(Depth Camera)를 활용한 체형 분석 연구가 진행되었다[16,17]. 깊이 카메라는 마커 없이도 3차원 정보를 획득할 수 있는 장점이 있으나, 조명 환경에 민감하고 텍스처가 부족한 영역에서 정확도가 떨어지며, 다중 카메라 사용 시 간섭 문제 등의 기술적 한계를 가진다[18].

반면, 휴대폰 카메라를 활용한 체형 분석은 기존의 장비보다 접근성이 높으며 장소에 구애받지 않고 사용할 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 2D 이미지 기반 체형 분석 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. Stamm 등[19]은 스마트폰으로 촬영한 2D 이미지를 2D 자세 추정 알고리즘(Lindera-v2)에 적용하여 각 관절의 각도를 추정하고, 3차원 동작 분석 시스템 PanopticStudio Toolbox (Carnegie Mellon University, USA)와 비교 분석하였다. 연구 결과, Lindera-v2의 ICC = 0.950-0.997로 매우 높은 일치도를 보였으며, 골반 관절과 오른쪽 어깨 관절의 평균 오차(MAE)는 각각 1.40°, 6.48°로 나타났다. 이나경 등[20]은 SCHP (Self-Correction for Human Parsing [21]) 모델을 활용하여 신체 부위를 세분화하고 체형 변화를 정량적으로 분석하였다. 해당 연구에서는 LIP [22], ATR [23], Pascal-Person-Part [24] 데이터셋을 학습하여 모델 성능을 개선하였으며, 실험 결과 평균 IoU 값 83.70을 기록하며 기존 모델 대비 우수한 성능을 보였다.

본 연구에서는 휴대폰 카메라로 촬영한 2D 이미지를 기반으로 9개의 신체 균형 지표(전신 좌우 기울기, 어깨 기울기, 골반 좌우 기울기, 무릎 기울기, 내반슬 및 외반슬, 거북목 각도, 전신 앞뒤 기울기, 골반 앞뒤 기울기)를 측정하고, 이를 3D 동작 분석 시스템의 결과와 정량적으로 비교하였다. 특히 RMSE [25], MAE [25], 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient) [26], 급내상관계수(ICC) [27]를 종합적으로 활용하여 두 방법 간의 정확도, 상관성, 일치도 및 반복 측정 신뢰도를 체계적으로 평가함으로써, 2D 이미지 기반 체형 분석의 실용성을 검증하고자 하였다.

## 2. 방법

### 2.1 실험 대상

본 연구에는 근골격계 질환이 없는 건강한 성인 남성 20명

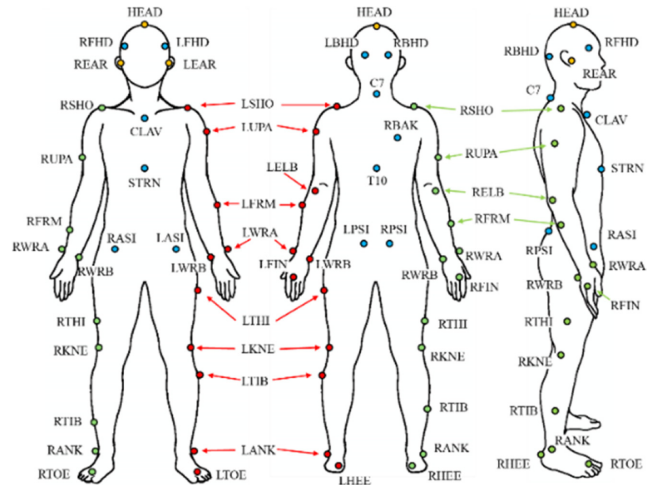


Fig. 1 Experimental marker set

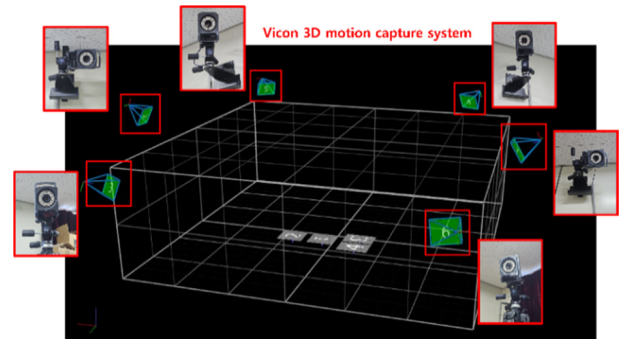


Fig. 2 Experimental setup

(172.9 ± 5.2 cm, 73.3 ± 9.4 kg, 24.4 ± 1.4세)이 참여하였다. 모든 참여자는 실험 시작 전에 사진 촬영 및 연구 참여에 대한 서면 동의를 제출하였으며, 연세대학교 미래캠퍼스 생명윤리심의위원회의 승인을 받았다(승인번호: 10418419-202412-BM-250-01).

## 2.2 실험 장비

### 2.2.1 3D 동작 분석

3D 동작 분석 시스템(Vicon Motion System Ltd, UK)을 사용하여 피험자에게 부착된 반사 마커의 3차원 공간(x, y, z)의 좌표를 기록한다. Figs. 1과 2는 각각 피험자에게 부착된 42개의 반사 마커 위치와 6대의 카메라의 위치 및 실험환경을 보여준다. 반사 마커는 Plug-in Gait Marker Set [28,29] 기반으로 부착되었으며, 3개의 마커가 피험자의 양쪽 귀, 신체에 가장 높은 지점에 추가로 부착되었다.

### 2.2.2 2D 이미지 기반 딥러닝 알고리즘

2D 이미지 촬영은 휴대폰 카메라(Galaxy S23 Ultra, Samsung, Korea)를 사용하였으며, 3,000 × 4,000 픽셀의 JPG 형식으로

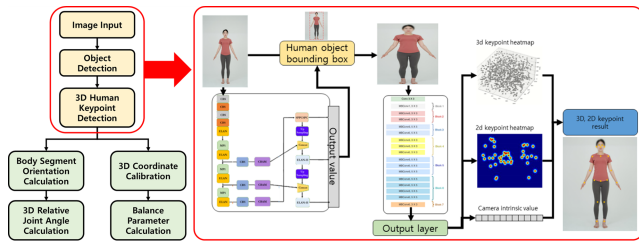


Fig. 3 3D estimation from 2D image (REMO)

저장되었다. 단일 RGB 이미지로부터 3차원 관절 위치를 추정하기 위해 SMPL 기반의 인체 모델[30]을 사용하였다. 3D 관절 추정에는 METRABS[31] 기반의 사전 학습된(Pretrained) 모델을 사용하였으며, Human3.6M, COCO 등 공개 데이터셋으로 학습된 공식 파라미터를 그대로 적용하였다. Inference 과정은 입력 이미지를 기반으로 2D Keypoint Heatmap을 생성한 뒤, 모델이 추정한 SMPL 파라미터를 이용해 3차원 관절 좌표를 복원하는 방식으로 이루어진다. 복원된 3D 관절 좌표를 이용하여 본 연구의 9가지 신체 균형 지표를 계산하였다 (Fig. 3).

2.3 실험

2.3.1 신체 균형 지표(Balance Parameter)

본 연구에서 사용한 9가지 신체 균형 지표는 임상 자세평가 및 생체역학 연구에서 널리 활용되는 해부학적 기준과 선행 연구를 기반으로 선정하였다. 이들 지표는 촬영 방향에 따라 정면 이미지와 측면 이미지에서 각각 분석되었다.

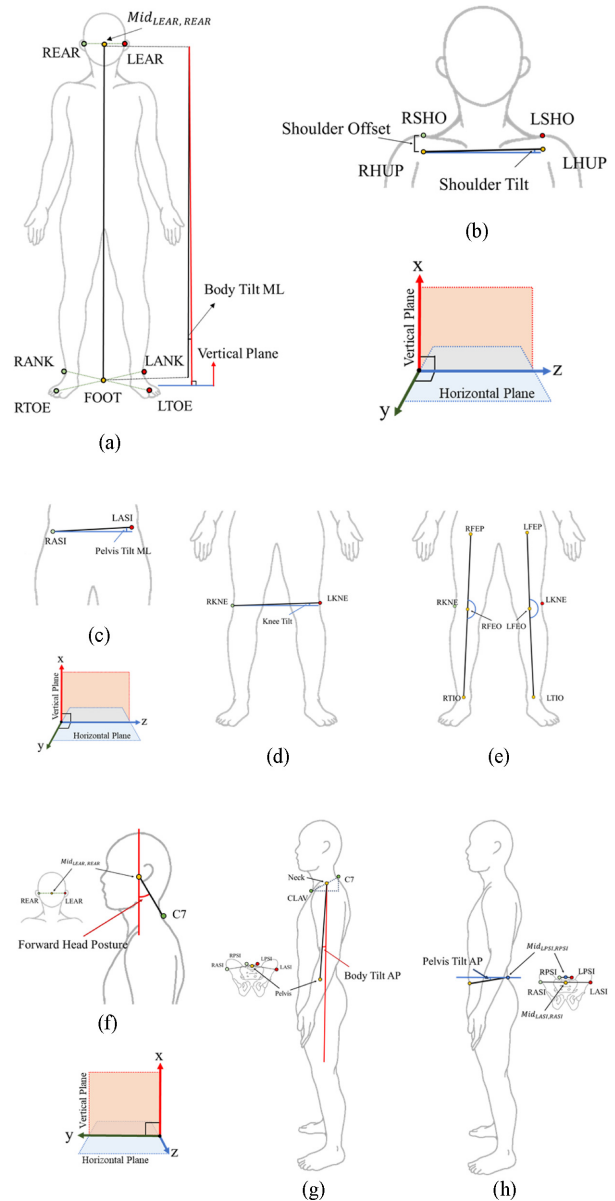


Fig. 4 Calculation method of balance parameters. (a) Body tilt ML, (b) Shoulder tilt, (c) Pelvis tilt ML, (d) Knee tilt, (e) Knee varus/valgus, (f) Forward head posture, (g) Body tilt AP, and (h) Pelvis tilt AP

정면 이미지 분석 지표(Frontal view/ML):

- 전신 좌우 기울기(Body Tilt ML, Fig. 4(a)): 양측 귀 중점과 양측 발 중점을 연결한 선과 수직선에 대한 각도, 전신 좌우 대칭성 평가에 사용되는 기본 정렬 지표[32,33]
  - 어깨 기울기(Shoulder Tilt, Fig. 4(b)): 양측 어깨를 연결한 선의 수평선에 대한 각도, 어깨 비대칭·견갑골 회전 이상과 연관됨[8,9]
  - 골반 좌우 기울기(Pelvis Tilt ML, Fig. 4(c)): 양측 ASIS를 연결한 선의 수평선에 대한 각도 하지 길이차·측만증·골반 비대칭을 반영함[32]
  - 무릎 기울기(Knee Tilt, Fig. 4(d)): 양측 무릎을 연결한 선의 수평선에 대한 각도 하지 정렬 비대칭 및 체중 편향 지표[34,35]
  - 좌측 내/외반슬(L Varus(+)/Valgus(-), Fig. 4(e)): 좌측 대퇴골과 경골이 이루는 각도
  - 우측 내/외반슬(R Varus(+)/Valgus(-), Fig. 4(e)): 우측 대퇴골과 경골이 이루는 각도
- \* 정형외과적 O다리(O-leg: Varus(+)> 6°) / X다리(X-leg: Valgus(-)> 6°) 기준과 동일함[36,37]

측면 이미지 분석 지표 (Sagittal view/AP):

- 거북목(Forward Head Posture (FHP), Fig. 4(f)): 양측 귀 중점과 C7(우추)수직선에 대한 각도 기본 임상 진단방법으로 널리 활용됨[38,39]
- 전신 앞뒤 기울기(Body Tilt AP, Fig. 4(g)): 목과 고관절을 연결한 선의 수직선에 대한 각도 시상면 정렬의 핵심적 대표 지표[40]
- 골반 앞뒤 기울기(Pelvis Tilt AP, Fig. 4(h)): ASIS와 PSIS를 연결한 선의 수평선에 대한 각도 정형·재활 분야에서 표준적으로 사용됨[41]

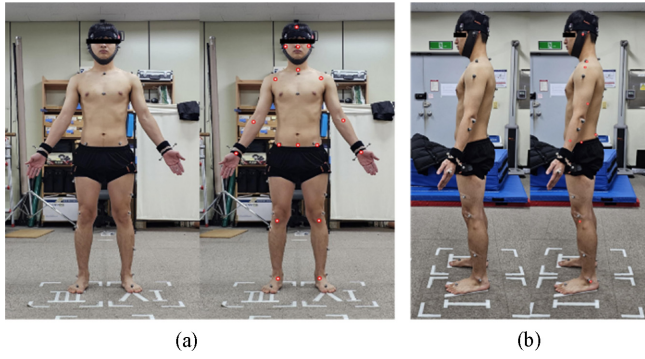


Fig. 5 Experimental procedure. (a) Frontal view, (b) Latcral view

2.3.2 실험 동작

Fig. 5는 실험동작을 보여준다. 실험 피험자는 해부학적 중립 자세를 약 3초간 유지하였으며, 이 동안 3D 동작 분석 시스템과 2D 이미지 촬영을 통해 데이터를 동시에 수집하였다. 정면 및 측면 이미지를 각각 촬영하여 해당 방향에서 측정 가능한 신체 균형 지표를 분석하였다. Fig. 4의 오른쪽 그림은 2D 이미지 분석 결과로, 관절 포인트가 붉은 점으로 표시되었다.

2.3.3 신체 균형 지표 계산 과정

Table 1은 Vicon Nexus 1.8.5 내부 연산에 사용된 피험자의 인체 계측 정보를 보여준다. 반사 마커 부착 후, 각 피험자 계측 정보를 활용해 시스템 연산에 따라 LHUP (Left Humerus Proximal)와 RHUP (Right Humerus Proximal), FEP (Femur Proximal)와 FEO (Femur Origin), FEO와 TIO (Tibia Origin)의 6개의 관절 포인트가 추가로 계산되었다. 수평면은 Horizontal Plane (HP, XY-plane), 수직면은 Vertical Plane (VP, XZ-Plane, YZ-Plane)로 정의한다. 아래와 같은 방식으로 신체 균형 지표를 계산한다[42].

$$angle(P, Q, R) = angle(\vec{PQ}, \vec{QR})$$

- 1) Body tilt ML =  $Angle(Mid_{LEAR, REAR}, Foot, HP)$   
 • Foot =  $Mid_{LANK, RANK, LTOE, RTOE}$
- 2) Shoulder tilt =  $Angle(LHUP, RHUP, HP)$
- 3) Pelvis tilt ML =  $Angle(LASI, RASI, HP)$
- 4) Knee tilt =  $Angle(LKNE, RKNE, HP)$
- 5) Left knee varus/valgus =  
 $180^\circ - Angle(LFEP, LFEO, LTIO)$
- 6) Right knee varus/valgus =  
 $180^\circ - Angle(RFEP, RFEO, RTIO)$
- 7) FHP =  $Angle(Mid_{LEAR, REAR}, C7, VP)$
- 8) Body tilt AP =  $Angle(Neck, Pelvis, VP)$   
 • Pelvis =  $Mid_{LASI, RASI, LPSI, RPSI}$   
 • Neck =  $Mid_{CLAV, C7}$
- 9) Pelvis tilt AP =  $Angle(Mid_{LASI, RASI}, Mid_{LPSI, RPSI}, HP)$

Table 1 Anthropometric data for 3D motion analysis

Anthropometric parameter	Mean ± SD [mm]
Leg length	888.05 ± 42.94
Knee width	115.63 ± 8.66
Ankle width	71.6 ± 3.70
Shoulder offset	82.43 ± 7.81
Elow width	92.83 ± 9.97
Wrist width	36.83 ± 4.47

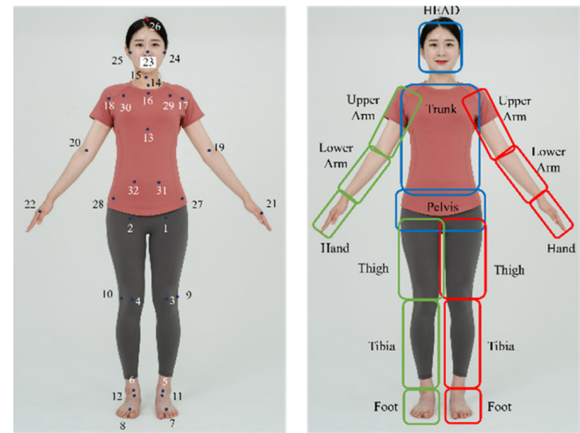


Fig. 6 Joint point and segment analysis from 2D image

- 1) Body tilt ML =  $Angle(23, Mid_{7, 8, 11, 12}, HP)$
- 2) Shoulder tilt =  $Angle(29, 30, HP)$
- 3) Pelvis tilt ML =  $Angle(27, 28, HP)$
- 4) Knee tilt =  $Angle(9, 10, HP)$
- 5) Left knee varus/valgus =  $180^\circ - Angle(1, 3, 5)$
- 6) Right knee varus/valgus =  $180^\circ - Angle(2, 4, 6)$
- 7) FHP =  $Angle(15, 23, VP)$
- 8) Body tilt AP =  $Angle(Mid_{27, 28, 31, 32}, 14, VP)$
- 9) Pelvis tilt AP =  $Angle(Mid_{27, 28}, Mid_{31, 32}, HP)$

Table 2 Joint points used in 2D image analysis

Num	Joint points	Num	Joint points
1	Left hip	17	Left shoulder
2	Right hip	18	Right shoulder
3	Left knee	19	Left elbow
4	Right knee	20	Right elbow
5	Left ankle	21	Left hand
6	Right ankle	22	Right hand
7	Left toe	23	Head center
8	Right toe	24	Left ear
9	Left knee out	25	Right ear
10	Right knee out	26	Head top
11	Left heel	27	Left ASIS
12	Right heel	28	Right ASIS
13	Spine	29	Left shoulder blade top
14	Neck	30	Right shoulder blade top
15	C7	31	Left PSIS
16	Clavicle	32	Right PSIS

Fig. 6과 Table 2는 2D 이미지를 이용해 얻은 관절 포인트 32개와 15개의 신체 분절을 보여준다.

2.4 분석 방법

3D 동작분석 시스템과 반사 마커를 이용한 분석 방법(3D 방법)으로 얻은 신체 균형 지표와 2D 이미지 기반 딥러닝 알고리즘을 이용한 분석 방법(2D 방법)으로 얻은 신체 균형 지표 결과를 아래와 같은 방법으로 비교한다.

2.4.1 Error Analysis

3D와 2D 방법의 결과를 정량적으로 평가하기 위해 평균 제곱근 오차(RMSE)와 평균 절대 오차(MAE)를 계산하였다. RMSE와 MAE 값이 작을수록 두 방법 간 측정 결과가 차이가 작다고 해석한다[25]. 또한, 동일 피험자 내에서 두 방법 간 측정값 차이를 검증하기 위해 대응표본 t-검정(Paired t-test)을 수행하였다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{2}$$

2.4.2 Pearson Correlation Coefficient

두 방법의 측정값 간 상관성을 평가하기 위해 피어슨 상관계수를 계산하였다. 이를 통해 3D 방식과 2D 방식의 측정 결과의 유사성을 분석하였다[26].

2.4.3 Intraclass and Inter Correlation Coefficient

3D 방법과 2D 방법 각각의 신뢰도를 평가하기 위해, 동일한 조건에서 반복 측정된 데이터를 바탕으로 급내 상관계수(ICC)를 산출하였다. 이는 각 방법 내에서의 일관성을 수치적으로 평가하며, ICC 값이 높을수록 해당 방법이 신뢰할 수 있는 측정 수단임을 의미한다. 또한, 서로 다른 두 방법 간 측정값의 일치도를 평가하기 위해 방법 간 ICC를 추가로 산출하였다. 다만, 두 방법은 측정 방식과 처리 절차에 본질적인 차이를 갖고 있기 때문에, 이 비교는 측정 결과의 정량적 유사성을 파악하기 위해 사용되었다[27].

$$ICC(2, k) = \frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k-1)MS_E + \frac{k(MS_C - MS_E)}{n}} \tag{3}$$

2.4.4 Bland-Altman Analysis

3D 방법과 2D 방법 간의 차이를 보완적으로 살펴보기 위해 블랜드-알트만 분석을 적용하였다. 두 방법의 평균 차이(Bias)를 통해 체계적 편향이 있는지를 살펴보고, ±1.96 SD로 설정된 Limits of Agreement (LoA) 안에 측정값이 얼마나 위치하는지를 확인하여 방법 간 일치도를 평가한다. Bias의 95% 신뢰구간에

Table 3 3D and 2D results(unit: °) and RMSE, MAE, p-value

Balance parameter	3D method	2D method	RMSE	MAE	p-value
Body tilt ML	0.78±0.45	0.03±0.80	0.999	0.838	<0.001
Shoulder tilt	0.20±1.89	0.49±1.42	0.951	0.744	0.016
Pelvis tilt ML	-1.04±2.00	0.21±0.97	2.177	1.740	<0.001
Knee tilt	-0.62±1.58	-0.15±0.96	1.727	1.320	0.034
L varus/valgus	5.71±2.20	5.79±1.60	2.753	2.149	0.807
R varus/valgus	5.31±2.48	5.98±1.64	3.448	2.892	0.133
FHP	37.65±4.57	32.01±3.70	5.816	4.915	<0.001
Body tilt AP	2.08±1.55	1.46±2.09	1.788	1.408	0.006
Pelvis tilt AP	12.46±6.06	15.31±2.97	6.028	5.371	<0.001

Table 4 Pearson r, ICC, and 95% CI for 3D and 2D result

Balance parameter	r	ICC(2,k)	95% CI
Body tilt ML	0.544	0.633	[ 0.386, 0.781]
Shoulder tilt	0.886	0.919	[ 0.865, 0.952]
Pelvis tilt ML	0.439	0.523	[ 0.184, 0.709]
Knee tilt	0.199	0.300	[-0.172, 0.582]
L varus/valgus	0.044	0.081	[-0.539, 0.451]
R varus/valgus	0.349	0.486	[ 0.139, 0.693]
FHP	0.681	0.799	[ 0.665, 0.881]
Body tilt AP	0.606	0.734	[ 0.555, 0.841]
Pelvis tilt AP	0.468	0.541	[ 0.232, 0.726]

0을 포함하고 대부분의 점이 LoA 범위 내에 존재할 경우, 3D 방법과 2D 방법은 전반적으로 유사한 측정 경향을 보이는 것으로 해석된다[43,44].

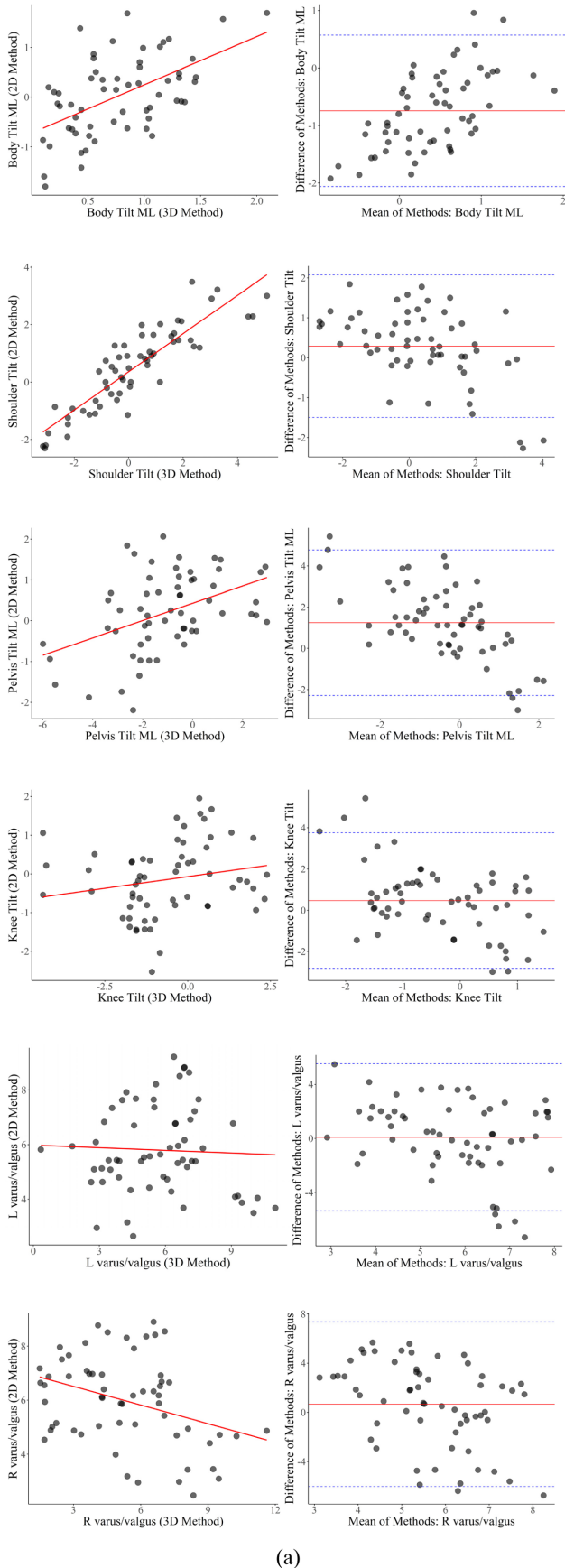
3. 결과

3.1 3D 및 2D 방법의 신체 균형 지표 결과

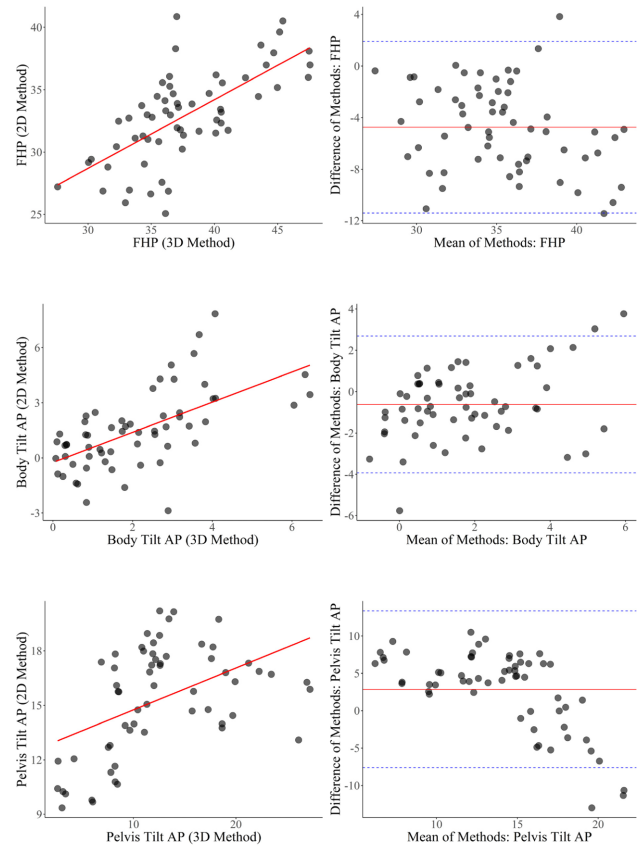
Table 3는 3D 방법과 2D 방법의 평균 및 표준편차, 그리고 각 신체 균형 지표의 RMSE와 MAE 값을 보여준다. Pelvis Tilt AP는 3D 방법에서 피험자간 편차가 크게 나타나는 경향을 보인다. FHP, Pelvis Tilt AP를 제외한 다른 신체 균형지표는 3D 방법과 2D 방법 간 RMSE < 5°의 결과를 보였으며, Shoulder Tilt는 RMSE = 0.951°, MAE = 0.744°로 가장 작은 오차를 보였다. 대부분의 신체 균형 지표에서는 3D 방법과 2D 방법간 대응표본 t-검정에서 유의한 차이를 보인다(p < 0.05). 반면, varus/valgus 지표는 두 방법간 차이가 통계적으로 유의하지 않았다(L varus/valgus: p = 0.807, R varus/valgus: p = 0.133).

3.2 3D 및 2D 방법의 상관 계수와 일치도 분석

Table 4는 3D 방법과 2D 방법 간의 피어슨 상관계수(r), ICC



(a)



(b)

Fig. 7 Continued

(2,k), 95% 신뢰구간을 보여준다. 대부분의 신체 균형 지표에서 두 방법 간  $r > 0.3$  이상의 상관관계를 보였으며, Body Tilt ML, Shoulder Tilt, FHP에서는  $r > 0.5$ 로 뚜렷한 선형 상관성이 나타났다. 특히 L varus/valgus의 경우  $r = 0.044$ 로 매우 낮은 상관관계를 보였다. ICC(2,k) 결과, Shoulder Tilt, FHP, Body Tilt에서  $ICC > 0.7$ 로 높은 일치도를 보였으며, L varus/valgus, Knee Tilt를 제외한 나머지 지표들에서도  $ICC > 0.5$ 로 보통 이상의 일치도가 확인되었다.

Figs. 7(a)와 7(b)는 3D 방법과 2D 방법 간의 선형 적합 그래프와 블랜드-알트만 그래프를 보여준다. Figs. 6(a)는 정면 이미지에서 측정한 6개 지표(Body Tilt ML, Shoulder Tilt, Pelvis Tilt ML, Knee Tilt, L/R varus/valgus)의 결과를, 6(b)는 측면 이미지에서 측정한 3개 지표(FHP, Body Tilt AP, Pelvis Tilt AP)의 결과를 나타낸다. 블랜드-알트만 그래프에서 대부분의 측정값이  $\pm 1.96$  SD 범위 내에 분포하며, 2D 방법과 3D 방법간 평균 차이는  $\pm 1-3^\circ$  범위로 작게 나타났다. 평균차의 95% 신뢰구간이 0을 포함하기에, 대부분의 신체 균형 지표에서 2D 방법과 3D 방법이 양호한 일치도를 보인다. 다만, FHP는 2D 방법이 3D 방법 대비 약  $4-5^\circ$  정도 일관되게 작게 계산하는 양상을 보이며, Pelvis Tilt AP는 2D 방법이  $2^\circ$  더 크게 계산되는 결과를 보였다.

Fig. 7 (a) Linear fit and bland-altman plot (frontal view), (b) Linear fit and bland-altman plot (sagittal view)

Table 5 Bias and limits of agreement from bland-altman plot

Balance parameter	Bias	LoA
Body tilt ML	-0.745	[-2.063, 0.573]
Shoulder tilt	0.291	[-1.498, 2.080]
Pelvis tilt ML	1.245	[-2.287, 4.776]
Knee tilt	0.469	[-2.817, 3.755]
L varus/valgus	0.088	[-5.351, 5.526]
R varus/valgus	0.671	[-6.015, 7.357]
FHP	-4.741	[-11.40, 1.919]
Body tilt AP	-0.62	[-3.935, 2.695]
Pelvis tilt AP	2.86	[-7.629, 13.34]

Table 6 Repeated-measures ICC(2,k) for the 3D method

Balance parameter	ICC(2,k)	95% CI
Body tilt ML	0.907	[0.805, 0.960]
Shoulder tilt	0.985	[0.968, 0.994]
Pelvis tilt ML	0.994	[0.987, 0.997]
Knee tilt	0.996	[0.992, 0.998]
L varus/valgus	0.964	[0.923, 0.984]
R varus/valgus	0.959	[0.914, 0.983]
FHP	0.971	[0.939, 0.988]
Body tilt AP	0.968	[0.932, 0.986]
Pelvis tilt AP	0.992	[0.983, 0.997]

Table 7 Repeated-measures ICC(2,k) for the 2D method

Balance parameter	ICC(2,k)	95% CI
Body tilt ML	0.811	[0.602, 0.919]
Shoulder tilt	0.900	[0.789, 0.957]
Pelvis tilt ML	0.845	[0.673, 0.934]
Knee tilt	0.816	[0.612, 0.921]
L varus/valgus	0.991	[0.982, 0.996]
R varus/valgus	0.981	[0.961, 0.992]
FHP	0.962	[0.920, 0.984]
Body tilt AP	0.950	[0.895, 0.979]
Pelvis tilt AP	0.953	[0.900, 0.980]

3.3 3D 및 2D 방법 반복 측정 신뢰도

Table 6와 7는 3D 및 2D 방법 각각의 반복 측정 신뢰도 ICC(2,k)와 95% 신뢰구간을 보여준다. 3D 방법은 모든 지표에서 ICC(2,k) > 0.90으로 매우 높은 신뢰도를 보였으며, 2D 방법 또한 대부분의 지표에서 ICC > 0.80을 기록하며 양호한 수준의 신뢰도를 나타냈다. 특히 Pelvis Tilt AP, FHP 등 일부 지표에서는 2D 방법 역시 0.90 이상의 높은 ICC 값을 보여 3D 방법과 유사한 수준의 일관성을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 2D 분석 방법의 반복 측정 안정성을 보여준다.

4. 토의

본 연구에서는 2D 이미지 기반 딥러닝 알고리즘을 활용하여 산출된 신체 균형 지표를 3D 동작 분석 시스템을 통해 측정된 결과와 정량적으로 평가하였다. 기존 체형 분석 방식은 전문 측정 장비와 전문가의 개입 및 환경적 제약이 요구되는 반면, 본 실험에 적용된 2D 분석 방법은 휴대폰 사진과 같은 일반 사진만으로도 간편하게 체형 분석이 가능하다는 장점을 가진다.

20명의 건강한 성인 남성을 대상으로 한 실험에서, Pelvis Tilt AP를 제외한 대부분의 지표에서 2D 분석 방법의 측정값은 3D 분석 방법보다 작게 나타났다. 3D 분석 방법과 2D 분석 방법에 따른 신체 균형 지표결과 Body Tilt ML, Shoulder Tilt, Pelvis Tilt ML, Knee Tilt, Body Tilt AP, L varus/valgus는 RMSE와 MAE 둘 다 3° 이하의 오차를 보였으며, 3D 분석 방법과 2D 분석 방법에 따른 신체 균형 지표 결과가 근사함을 보여준다. FHP, Pelvis Tilt AP, R varus/valgus에서는 오차가 10° 미만으로 나타났다. 또한 2D 방법과 3D 방법 간 측정 결과의 차이는 3D 방법에서 측정되는 관절 좌표와 2D 방법에서 측정되는 관절좌표가 유사한 위치지만 정확히 같은 포인트를 지칭하고 있지 않은 점에서 나타나는 것으로 보인다. 하지만, 대응표본 t-검정을 수행한 결과, 대부분의 신체 균형 지표는 좌표계 오차로 인해 계산 방법 간 차이를 보이지만 varus/valgus는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 varus/valgus는 3D 방법과 2D 방법이 유사한 방식으로 계산되었음을 의미한다.

같은 피험자를 대상으로 3D 방법과 2D 방법을 3회씩 측정하였기에, ICC(2,k)를 통해 실험간 반복 측정 신뢰도를 계산했다. 3D 방법의 경우 모든 신체 균형 지표가 ICC > 0.9의 반복 측정 신뢰도를 보였으며, 2D 방법 또한 ICC > 0.8의 반복 측정 신뢰도를 보였다. 신체 균형 지표 계산에서 3D 방법과 마찬가지로, 2D 방법 역시 높은 수준의 반복 측정 신뢰도를 보였다.

또한, 3D 방법과 2D 방법 간 일치도를 분석하기 위해 피어슨 상관계수(r)와 방법 간 ICC(2,k)를 계산하였다. Knee Tilt와 Left vargus/valgus를 제외한 대부분의 지표에서 r > 0.3 이상의 뚜렷한 양의 상관관계가 나타났다. 특히 Shoulder Tilt (r = 0.886)와 FHP (r = 0.681)는 높은 상관성을 보였으며, 이는 두 방법 간 결과가 선형적 관계임을 보여준다.

Knee Tilt와 vargus/valgus 등 일부 신체 균형 지표에서 보인 낮은 상관계수와 ICC는 3D 방법과 2D 방법 간 무릎 위치 계산 방식의 차이에서 비롯된 것으로 해석된다. 3D 방법은 반사마커 위치와 신체 치수를 활용하는 반면, 2D 방법은 단일 이미지에서 무릎 위치를 추정하는 과정에서 오차가 발생할 가능성이 크다. 특히 3D 방법의 경우, Szczerbik 등[15] Fonseca 등[45]에서 보고된 바와 같이 반사 마커 위치 오차가 신체 균형 지표에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 신체에 반사 마커를 부착할 때, 피부와 골격 사이의 움직임이 최소화된 관절 포인트에 부착한다 [34,46,47]. 하지만, 어깨와 무릎과 같이 복합적인 구조로 된

골격과 신체 내부에 위치한 골반의 경우, 해부학적 특징을 잡는 방법은 까다롭다. 이는 선행연구[48,49]에서도 보고된 바와 같이, 반사 마커의 위치는 신체 각도 연산에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 특히 kadaba 등[34]은 무릎 각도는 큰 분산을 보이기 때문에 신중히 각도 연산을 해야 한다고 보고했다. 간단한 예시로, 3D 분석에서 FHP를 연산할 때 사용하는 C7 반사 마커는 실제 해부학적 위치보다 피부 표면에서 약 2 cm 정도 돌출된 지점에 부착되기 때문에, 이로 인한 각도 편차가 발생한다. 이러한 점을 고려할 때, 본 연구의 각도 오차에도 해당 영향이 반영되었을 가능성이 있다.

그럼에도, Figs. 7(a)와 7(b)의 블랜드-알트만 분석 결과, 정면 및 측면 이미지 모두에서 대부분의 측정값이  $\pm 1.96$  SD 범위 내에 분포하여 두 방법 간 체계적 편향은 없으며, 신뢰구간에서 0을 포함하여 3D 방법과 2D 방법간 양호한 일치도를 보였다. 단, FHP와 Pelvis Tilt AP는 일부 편향성이 확인되었다. FHP는 일관적으로 2D 방법이 3D 방법 대비 약 4-5° 정도 일관되게 작게 계산하는 양상을 보였으며, Pelvis Tilt AP는 3D 방법이 2° 정도 크게 계산되는 결과를 보였다. 이는 두 방법 간 일정한 편향을 보이기에, 보정치를 적용하면 충분히 개선 여지가 있다.

또한, 3D 방법과 2D 방법 간 일치도를 나타내는 ICC(2, k) 분석에서는 Knee Tilt와 Left vargus/valgus를 제외한 대부분의 지표가 ICC  $\geq 0.5$ 로 '보통' 이상 수준을 보였으며, Shoulder Tilt (ICC = 0.919)와 FHP (ICC = 0.799)는 높은 일치도를 보였다. 이러한 결과는 제한된 환경에서 반사 마커를 부착해 얻은 3D 분석 결과와 휴대폰으로 얻은 2D 이미지 분석 결과가 ICC  $\geq 0.5$ 의 일치도를 보였다는 점에서, 2D 이미지를 활용한 간편한 체형 분석의 실용성을 시사한다.

특히 정면 이미지에서 측정한 지표들은 양측의 대칭성을 평가하는 데 유용하며, 측면 이미지에서 측정한 지표들은 시상면에서의 자세 정렬을 평가하는 데 중요한 정보를 제공한다. 이는 2D 방법이 다양한 평면에서의 체형 분석에 활용될 수 있음을 시사한다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 첫째, 20명이라는 제한된 표본 크기로 인해 통계적 검정력이 충분하지 않을 수 있다. 둘째, 건강한 성인 남성만을 대상으로 하여 여성이나 근골격계 질환자에서의 적용 가능성을 확인하지 못했다. 셋째, 정적 자세만을 평가하여 동적 움직임에서의 정확도는 검증하지 못했다.

향후 연구에서는 더 큰 표본과 다양한 인구 집단을 포함한 검증이 필요하며, 신체 균형이 어긋난 상태에서도 측정하여 어긋난 정도를 정확하게 반영하는지 확인할 필요성이 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 2D 이미지 기반 체형 분석이 특정 신체 균형 지표 평가에서 3D 동작 분석 시스템을 대체할 수 있는 가능성을 보여주었다. 특히 어깨 기울기, 거북목, 전신 기울기 등의 평가에서는 충분한 정확도를 보여, 원격 의료, 대규모 스크리닝, 일상적인 자세 모니터링 등에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 2D 이미지 기반 체형 분석 알고리즘과 3D 동작 분석 시스템을 비교 분석하여, 2D 방법의 정확도와 활용 가능성을 평가하였다. 기존 3D 동작 분석 시스템을 활용한 체형 분석은 높은 정확도를 제공하지만, 비용이 높고 실험실 환경에서만 사용 가능하다는 한계가 있다. 반면, 2D 이미지 기반 체형 분석은 접근성이 뛰어나고, 별도의 마커 없이 일반적인 스마트폰 카메라로 분석이 가능하다는 장점이 있다.

실험 결과, 2D 이미지 기반 분석 방법은 신체 균형 지표를 측정하는 데 있어 3D 방법과 유의미한 상관관계를 보였다. 또한 두 방법간 신뢰도 결과가 ICC  $> 0.5$ 로 보통 수준 이상의 일치도를 보였으며, 특히 어깨 기울기와 거북목 분석 결과는 높은 수준의 일치도(ICC = 0.919, 0.799)가 확인되었다. 이를 통해 본 연구에 사용된 2D 분석 방법이 3D 분석 방법과 근사한 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

본 연구는 2D 이미지 기반 체형분석 딥러닝 알고리즘의 성능을 3D 동작 분석 시스템과 비교하여 검증한 연구로, 2D 이미지 기반 체형 분석 기술의 실용성과 한계를 평가하였다. 향후 보다 정밀한 데이터 보정을 통해 2D 이미지 기반 체형 분석 딥러닝 알고리즘의 분석 정확도를 개선하고 다양한 환경에서 검증이 이루어진다면, 보다 정밀하고 신뢰할 수 있는 체형 분석 도구로 발전할 것이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

The reserach was supported by 'Digital Innovation Company Global Growth Voucher (S-Voucher)', through the Ministry of Science, ICT and Future Planning (Grant Number) and the Technology development Program (No. 2420023201) funded by the Ministry of SMEs and Startups (MSS, Korea).

## REFERENCES

- Kim, H. S., Lee, H. K., (2022), The deepening of colonization of leisure by smartphones before and after COVID-19: Focusing on the national leisure activity survey and the korean media panel survey, *Culture and Convergence*, 44(5), 139-163.
- Parihar, J. K. S., Jain, V. K., Chaturvedi, P., Kaushik, J., Jain, G., Parihar, A. K., (2016), Computer and visual display terminals (VDT) vision syndrome (CVDTs), *Medical Journal Armed Forces India*, 72(3), 270-276.
- Health Insurance Review & Assessment Service, One out of three people in Korea receives treatment for musculoskeletal disorders. <https://www.hira.or.kr/bbsDummy.do?pgmid=HIRAA020041000100&brdScnBltno=4&brdBltno=10167>

4. Park, J. S., Park, C. H., Song, Y. K., (2015), Research of body parameters characteristics from posture analysis of musculoskeletal problem patient, *Journal of Korea CHUNA Manual Medicine for Spine and Nerves*, 10(1), 47-61.
5. Hong, W., (2024), Advances and opportunities of mobile health in the postpandemic era: Smartphonization of wearable devices and wearable deviceization of smartphones, *JMIR mHealth and uHealth*, 12, e48803.
6. He, Y., Xie, Z., Li, J., Meng, Z., Xue, D., Hao, C., (2024), Global trends in mHealth and medical education research: Bibliometrics and knowledge graph analysis, *JMIR Medical Education*, 10, e52461.
7. Statista Market Insights, (2023), Digital health. <https://www.statista.com/outlook/hmo/digital-health/worldwide>
8. Magarey, M. E., Jones, M. A., (2003), Dynamic evaluation and early management of altered motor control around the shoulder complex, *Manual Therapy*, 8(4), 195-206.
9. Magarey, M. E., Jones, M. A., (2003), Specific evaluation of the function of force couples relevant for stabilization of the glenohumeral joint, *Manual Therapy*, 8(4), 247-253.
10. Hindle, K. B., Whitcomb, T. J., Briggs, W. O., Hong, J., (2012), Proprioceptive neuromuscular facilitation (PNF): Its mechanisms and effects on range of motion and muscular function, *Journal of Human Kinetics*, 31, 105-113.
11. Smith, B., Ashton, K. M., Bohl, D., Clark, R. C., Metheny, J. B., Klassen, S., (2006), Influence of carrying a backpack on pelvic tilt, rotation, and obliquity in female college students, *Gait & Posture*, 23(3), 263-267.
12. Shingai, M., Nijjima, R., Kobayashi, Y., Murayama, A., Miyadera, R., Mukai, S., (2020), Quantitative evaluation of subjective posture recognition by physiotherapists using a 3D motion capture, *Journal of Physical Therapy Science*, 32(8), 510-515.
13. Brink, Y., Louw, Q., Grimmer, K., Schreve, K., Van der Westhuizen, G., Jordaan, E., (2013), Development of a cost effective three-dimensional posture analysis tool: Validity and reliability, *BMC Musculoskeletal Disorders*, 14(1), 335.
14. Longo, U. G., De Salvatore, S., Carnevale, A., Tecce, S. M., Bandini, B., Lalli, A., Denaro, V., (2022), Optical motion capture systems for 3D kinematic analysis in patients with shoulder disorders, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12033.
15. Szczerbik, E., Kalinowska, M., (2011), The influence of knee marker placement error on evaluation of gait kinematic parameters, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 13(3), 43-46.
16. Plagemann, C., Ganapathi, V., Koller, D., Thrun, S., (2010), Real-time identification and localization of body parts from depth images, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3108-3113.
17. Jin, H., He, X., Wang, L., Zhu, Y., Jiang, W., Zhou, X., (2025), SitPose: Real-time detection of sitting posture and sedentary behavior using ensemble learning with depth sensor, *IEEE Sensors Journal*, 25(7), 12444-12454.
18. Pece, F., Kautz, J., Weyrich, T., (2011), Three depth-camera technologies compared, *Proceedings of the First BEAMING Workshop*.
19. Stamm, O., Heimann-Steinert, A., (2020), Accuracy of monocular two-dimensional pose estimation compared with a reference standard for kinematic multiview analysis: Validation study, *JMIR mHealth and uHealth*, 8(12), e19608.
20. Lee, N., Choi, Y., Park, S., Son, J., (2021), A body shape change tracking service using deep learning-based human part segmentation technology, *Proceedings of the Korea IT Service Society Conference*, 701-704.
21. Li, P., Xu, Y., Wei, Y., Yang, Y., (2020), Self-correction for human parsing, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(6), 3260-3271.
22. Liang, X., Gong, K., Shen, X., Lin, L., (2018), Look into person: Joint body parsing and pose estimation network and a new benchmark, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41(4), 871-885.
23. Liang, X., Liu, S., Shen, X., Yang, J., Liu, L., Dong, J., Lin, L., Qiao, Y., Yan, S., (2015), Deep human parsing with active template regression, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(12), 2402-2414.
24. Chen, X., Mottaghi, R., Liu, X., Fidler, S., Urtasun, R., Yuille, A., (2014), Detect what you can: Detecting and representing objects using holistic models and body parts, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1971-1978.
25. Hodson, T. O., (2022), Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not, *Geoscientific Model Development Discussions*, 15(14), 15481-5488.
26. Cohen, I., Huang, Y., Chen, J., Benesty, J., (2009), *Noise reduction in speech processing*, Springer.
27. Koo, T. K., Li, M. Y., (2016), A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research, *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155-163.
28. Davis, R. B. III, Ounpuu, S., Tyburski, D., Gage, J. R., (1991), A gait analysis data collection and reduction technique, *Human Movement Science*, 10(5), 575-587.
29. Vicon Motion System Ltd., (2024), Plug-in gait reference guide. <https://help.vicon.com/space/Nexus216/11607059>
30. Loper, M., Mahmood, N., Romero, J., Pons-Moll, G., Black, M. J., (2023), SMPL: A skinned multi-person linear model, *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries*, 2, 851-866.
31. Sárándi, I., Linder, T., Arras, K. O., Leibe, B., (2020), Metrabs: Metric-scale truncation-robust heatmaps for absolute 3D human

- pose estimation, *IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science*, 3(1), 16-30.
32. Smith, B., Ashton, K. M., Bohl, D., Clark, R. C., Metheny, J. B., Klassen, S., (2006), Influence of carrying a backpack on pelvic tilt, rotation, and obliquity in female college students, *Gait & Posture*, 23(3), 263-267.
  33. Brink, Y., Louw, Q., Grimmer, K., Schreve, K., Van der Westhuizen, G., Jordaan, E., (2013), Development of a cost effective three-dimensional posture analysis tool: Validity and reliability, *BMC Musculoskeletal Disorders*, 14, 335.
  34. Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E., (1990), Measurement of lower extremity kinematics during level walking, *Journal of Orthopaedic Research*, 8(3), 383-392.
  35. Leardini, A., Sawacha, Z., Paolini, G., Ingrosso, S., Nativo, R., Benedetti, M. G., (2007), A new anatomically based protocol for gait analysis in children, *Gait & Posture*, 26(4), 560-571.
  36. Cooke, D., Scudamore, A., Li, J., Wyss, U., Bryant, T., Costigan, P., (1997), Axial lower-limb alignment: Comparison of knee geometry in normal volunteers and osteoarthritis patients, *Osteoarthritis and Cartilage*, 5(1) 39-47.
  37. Bellemans, J., Colyn, W., Vandenuecker, H., Victor, J., (2012), The Chitranjan Ranawat Award: Is neutral mechanical alignment normal for all patients?: The concept of constitutional varus, *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 470(1), 45-53.
  38. Sawyer, Q. L., (2006), Effects of forward head rounded shoulder posture on shoulder girdle flexibility, range of motion, and strength, M.Sc. Thesis, The University of North Carolina at Chapel Hill.
  39. Migliarese, S., White, E., (2019), Review of forward-head posture and vestibular deficits in older adults, *Current Geriatrics Reports*, 8(3), 194-201.
  40. Shingai, M., Nijijima, R., Kobayashi, Y., Murayama, A., Miyadera, R., Mukai, S., (2020), Quantitative evaluation of subjective posture recognition by physiotherapists using a 3D motion capture, *Journal of Physical Therapy Science*, 32(8), 510-515.
  41. Neumann, D. A., (2009), *Kinesiology of the musculoskeletal system: Foundations for rehabilitation*, 2nd Edition, Mosby Elsevier.
  42. Van Crombrugge, I., Sels, S., Ribbens, B., Steenackers, G., Penne, R., Vanlanduit, S., (2022), Accuracy assessment of joint angles estimated from 2D and 3D camera measurements, *Sensors*, 22(5), 1729.
  43. Bunce, C., (2009), Correlation, agreement, and Bland-Altman analysis: Statistical analysis of method comparison studies, *American Journal of Ophthalmology*, 148(1), 4-6.
  44. Giavarina, D., (2015), Understanding Bland-Altman analysis, *Biochemia Medica*, 25(2), 141-151.
  45. Fonseca, M., Bergere, M., Candido, J., Leboeuf, F., Dumas, R., Armand, S., (2022), The conventional gait model's sensitivity to lower-limb marker placement, *Scientific Reports*, 12(1), 14207.
  46. Cappozzo, A., Della Croce, U., Leardini, A., Chiari, L., (2005), Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 1: Theoretical background, *Gait & Posture*, 21(2), 186-196.
  47. Chiari, L., Della Croce, U., Leardini, A., Cappozzo, A., (2005), Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 2: Instrumental errors, *Gait & Posture*, 21(2), 197-211.
  48. Leardini, A., Sawacha, Z., Paolini, G., Ingrosso, S., Nativo, R., Benedetti, M. G., (2007), A new anatomically based protocol for gait analysis in children, *Gait & Posture*, 26(4), 560-571.
  49. Wang, J. P., Wang, S. H., Wang, Y. Q., Hu, H., Yu, J. W., Zhao, X., Ding, X., Li, Y., (2021), A data process of human knee joint kinematics obtained by motion-capture measurement, *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 21(1), 121.



**Seonggeon Pyo**

B.Sc. in the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University. His research interests are biomechanics, pain prediction, and cognitive science.

E-mail: psgzzing@yonsei.ac.kr



**Gildong Choi**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University. His research interest is biomechanics.

E-mail: cepark915@yonsei.ac.kr



**Seunghee Lee**

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

E-mail: fhrm502@yonsei.ac.kr



**Youngho Kim**

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

E-mail: younghokim@yonsei.ac.kr



**Jungyoon Kim**

CTO at REMO Inc. His research interests include 2D image AI, deep learning-based posture analysis and motion analysis.  
E-mail: [astasdf@gmail.com](mailto:astasdf@gmail.com)



**Eunkyung Bae**

CEO at REMO Inc. Her research interests include deep learning-based 2D posture analysis and digital healthcare.  
E-mail: [ekbae8765@remo.re.kr](mailto:ekbae8765@remo.re.kr)



# 스마트폰 카메라용 액추에이터 볼구름면 마찰 측정 시스템 설계 및 검증

## Design and Verification of a Tribo-system for Measuring Ball-raceway Rolling Friction in Smartphone Camera Actuators

박주호<sup>1</sup>, 홍정하<sup>1</sup>, 민상준<sup>1</sup>, 이규선<sup>1,#</sup>

Ju Ho Park<sup>1</sup>, Jung Ha Hong<sup>1</sup>, Sang Jun Min<sup>1</sup>, and Gyu Sun Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> LGO|노텍 광학솔루션 연구소 (Optics Solution Research Center, LG Innotek)  
# Corresponding Author / E-mail: gslee@iginnotek.com  
ORCID: 0009-0004-2545-7020

KEYWORDS: Rolling friction (구름마찰), Ball guide actuator (볼가이드 액추에이터), Displacement-Friction force graph (변위-마찰력 선도), Ball-raceway (볼구름면), Rolling friction tribo-system (구름마찰 트라이보시스템)

*This study presents a rolling tribometer designed to quantitatively assess ball-raceway friction in ball-guided bearings, which is critical for applications such as smartphone camera actuators, where friction impacts power consumption. Following ASTM G133 standards, the tribometer was validated using LCP and PC materials under both short-cycle (10K cycles) and long-cycle (1M cycles) tests. Under short-cycle conditions, LCP exhibited an average coefficient of friction (COF) of 0.011, while PC demonstrated a COF of 0.009, both showing low variability at 2.7% and 4.4%, respectively. In long-cycle testing, LCP maintained stable friction coefficients, whereas PC experienced a significant COF increase around 200K cycles due to wear. Confocal microscopy revealed that the wear volume of PC was approximately 10 times greater than that of LCP after 1M cycles. Displacement-friction force analysis indicated increased energy dissipation in PC, attributed to wear-induced surface asperities. This rolling tribometer provides a reliable method for evaluating friction coefficients and long-term durability, yielding valuable data for optimizing actuator design and enhancing efficiency and lifespan in ball-guided mechanisms. The quantitative friction data generated can significantly improve the performance of ball-guided systems.*

Manuscript received: August 27, 2025 / Revised: September 25, 2025 / Accepted: November 24, 2025

### NOMENCLATURE

COF = Coefficient of Friction  
LCP = Liquid Crystal Polymer  
PC = Polycarbonate

### 1. 서론

회전하는 축에 가해지는 하중을 안정적으로 지지하여 동력을 효율적으로 전달하기 위해 일반적으로 베어링을 사용한다.

볼베어링을 이용한 볼 구름 베어링은 구름(Rolling) 접촉을 통해 마찰과 마모를 저감시켜 기계의 효율을 높이고 수명을 늘리는데 필수적이다[1-3].

볼 구름 베어링의 마찰, 마모 특성은 볼 및 볼구름면의 재질, 표면 거칠기, 윤활의 종류 등 다양한 요소들에 의해 결정된다. 그러므로 이런 요소들의 변화에 따른 볼 구름 베어링의 수명과 마찰 특성을 이해하는 것이 중요하다. 이를 평가하기 위한 실험 장비 역시 베어링 제조 기술의 발전에 따라 다양하게 개발되어 왔다. 베어링의 특성을 파악하기 위한 대표적인 실험 방법으로 동력 원인 모터의 축에 베어링을 장착하고 일정 하중을 부여하여 발생하는 토크를 측정함으로써 마찰 특성을 파악한다[4,5]. 또한

장수명 실험을 진행함으로 표면에 발생하는 마모를 분석하여 이를 저감할 수 있는 최적의 재료 조합과 구조를 선정하고, 수명을 평가한다[6,7].

전통적인 볼 구름 방식의 베어링 이외에도 볼 구름 방식을 활용한 예는 다양하다. 그 중 스마트폰 카메라용 액추에이터에서 볼 구름 베어링 방식을 활용하는데, AF (Auto Focus)와 OIS (Optical Image Stabilization) 기능을 구현하기 위해 Ball Guide Actuator 구조가 적용되었다.

스마트폰의 카메라 모듈은 미세 구조 내에서 최대한의 성능을 발휘해야 한다. 적은 전류로 AF, OIS 기능을 구현하기 위해 그간 VCM (Voice Coil Motor) 기반의 구동력을 Spring & Wire 방식으로 제어하여 전달하여 왔다. 하지만 소비자들의 고사양 스마트폰 카메라에 대한 수요로 인해 렌즈 무게가 늘어나고, 렌즈를 이송하기 위해 사용하는 전류 소모량이 증가하였다. 전류 소모는 곧 스마트폰 전력 사용과 직결되므로 스마트폰의 효율을 높이기 위해 Ball Guide 구조를 활용하여 제어하는 기술이 도입되었다[8].

Ball Guide Actuator는 이동체간 적은 마찰을 구현하여 사용 전류를 최소화할 수 있지만, 형상이 복잡하고 볼이 구르는 구름면 형상이 마찰 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 이에 대한 설계와 가공이 중요하다. 일반적으로 볼 재질로 세라믹 볼을 사용하고 있으며, 볼구름면은 치수 정밀도를 높이기 위해 사출품을 사용한다. 세라믹과 사출품이 맞닿은 구조로서 경도 차이가 크기 때문에 외부 충격에 의한 볼 덴트(Ball Dent)가 쉽게 발생하여 구름면 재질의 표면 경도를 높이는 것이 중요하며, 볼 구름 저항성을 낮추는 조합의 선정이 중요하다. 하지만 볼과 구름면 간 구름 저항을 직접적으로 측정하는 방법은 존재하지 않으며, 액추에이터 단품으로부터 Input 대비 사용된 Output 전류를 비교하여 마찰계수를 추정할 뿐이다. 기구 설계자 관점에서는 볼-구름면 간 구름 마찰계수를 설계 과정에 적용하여야 하기 때문에 정량적으로 평가하는 것이 중요하다.

이러한 필요에 따라 본 연구에서는 볼-구름면 간 구름 마찰을 측정할 수 있는 시스템을 개발하고, 본 시스템을 검증하기 위해 몇 가지 실험을 수행하여 시험기의 적정성을 판단하였다. 시험기의 기본적인 특성은 ASTM G133에 기반하여 제작되었다[9,10]. 기존의 시험기는 미끄럼 접촉(Sliding Contact) 기반의 실험 용도로만 사용되었는데 본 연구에서는 상하에 구름면 시편을 고정시키고 시편 사이에 볼을 위치함으로써 볼-구름면 간 구름접촉을 재현할 수 있도록 설계하였다.

## 2. 실험 장비

### 2.1 Rolling Tribometer 설계 및 제작

구름 마찰 실험을 하기 위한 전용 장비로서 ASTM G133에 기반하여 시험기를 자체 제작하였다. 구동을 위한 모터는 INA Oriental 社의 Stepping Motor를 사용하였다. 마찰력과 수직하중을

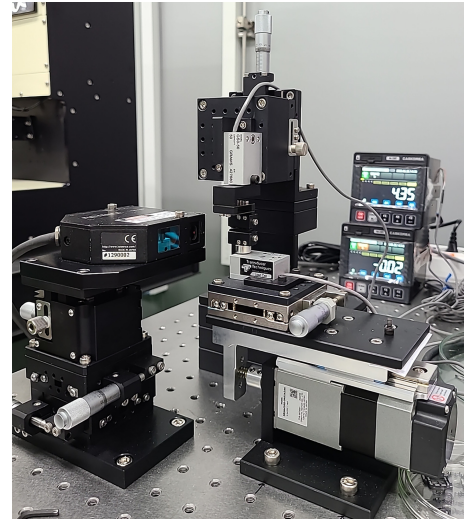


Fig. 1 Rolling tribometer for measuring ball-raceway rolling friction

관찰하기 위해 각각 Loadcell을 장착하였고, 데이터 취득을 위해 DAQ를 사용하였다. 시편의 정확한 접촉을 구현하기 위해 하단 시편에 Y방향 Stage를 장착하였고, 하중은 Z방향 Stage로 부여한다. 접촉이 잘 이뤄지는지를 관찰하기 위해 X방향과 Y방향에 카메라를 장착하였고, Ball 접촉상태를 실시간으로 확인 가능하다. 시편의 X방향 변위를 관찰하기 위해 X방향으로 변위 센서를 장착하였다. Fig. 1은 실제 시험기 사진이며, Fig. 2(b)는 볼과 상하 구름면간 접촉 형태를 나타내는 모식도이다.

### 2.2 시편 제작

볼 구름면 시편을 모사하기 위해 2점 접촉을 할 수 있도록 45도 각도를 가진 V-shape(45) Raceway와 1점 접촉을 하도록 넓은 구름면을 가진 U-shape (flat) Raceway 시편을 금형으로 제작 및 사출하였다. 이는 실제 부품의 접촉면을 기반으로 유사한 형태로 제작한 것이다.

Fig. 2(a)는 볼 구름면 시편의 형상을 나타낸다. 시편의 소재는 LCP (Liquid Crystal Polymer), PC (Polycarbonate) 이며 상대재는 0.9Φ 세라믹 볼이다.

### 2.3 실험 조건

시험기의 적정성을 확인하기 위해 2종의 레진을 사출하여 2가지 실험을 계획하였다. 첫번째는 마찰 계수의 시험간 편차를 확인하기 위한 Long Stroke (800 μm)/ Short Cycle (10K cycles)/ 2 Hz (3.2 mm/s) 실험이다. 본 실험을 통해 반복 실험 시 동일한 수준의 평가 결과가 재현되는지 관찰한다. 10K cycles동안 마찰계수는 400 cycles마다 20초간 실시간으로 획득하였다. (초당 500개 데이터 획득) 두번째는 본 시험기의 장수명 평가 적정성을 확인하기 위해 Short Stroke (400 μm)/ Long Cycle (1M cycles)/ 4 Hz (3.2 mm/s) 실험을 진행하였다. 장수명 실험은 10K cycles마다 10초간 마찰계수를 측정하였다. (초당 500개 데이터 획득) Long Cycle실험 시, 마찰계수의 변화와 마모 발생 여부를 통해 시험

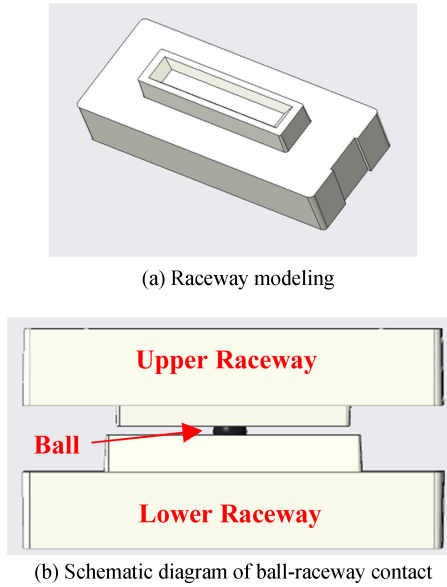


Fig. 2 The schematic diagram of ball-raceway contact

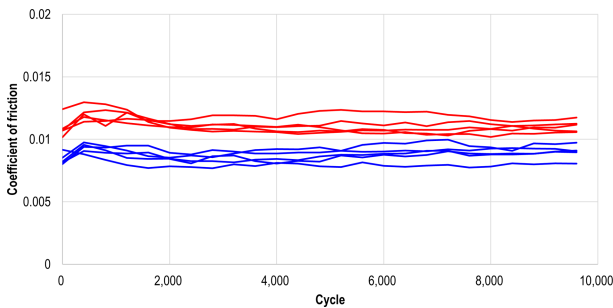


Fig. 3 COF (Coefficient of friction) of LCP (Red) and PC (Blue) for 10K cycles

기와 실험의 유효성을 관찰한다.

수직하중은 실제 접촉 환경에 기반하여 230 mN 부여, 상온에서 실험을 수행하였다. 실제 액추에이터의 볼-구름면에서 일반적으로 Grease를 사용하기 때문에 본 실험에서도 표면에 Grease를 도포하였다(주도: 310, 25°C/60W, KS M ISO 2137). Grease 도포는 U Raceway에는 1점, V Raceway에는 각 경사면에 1점씩 도포하였으며 도포량은 한 점당 0.04–0.08 mg이다. 각 실험은 7회 실험 후, 최솟값과 최댓값을 제외하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 Long Stroke / Short Cycle 구름 마찰 실험

마찰계수를 구하는 방법은 다음과 같다. 초당 500개의 마찰계수를 획득하여 각 Cycle당 상위 20%에 해당하는 값들의 평균을 계산하여 산출하였다. 그 결과, LCP와 PC의 평균마찰계수는 각각 0.011, 0.009로 LCP가 PC에 비해 약 0.002 높다. 10K cycles까지 두 소재 모두 마찰계수 변화는 없으며,

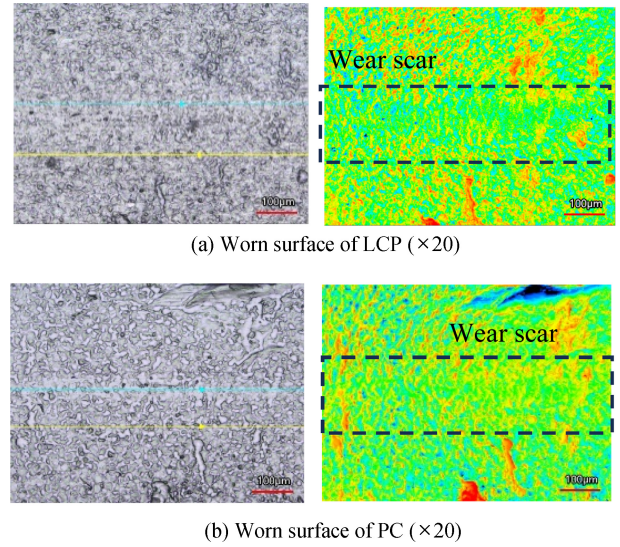


Fig. 4 Confocal images of worn surfaces after 10K cycles (x20)

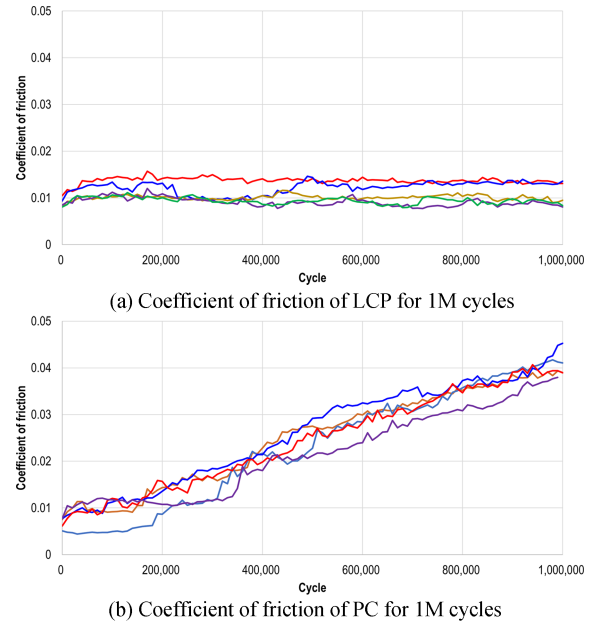


Fig. 5 COF of LCP and PC for 1M cycles

시료간 편차는 있으나 각각 표준편차 0.0003, 0.0004로 반복성에 문제없는 수준이다(Fig. 3). 표준편차 대비 평균으로 정의되는 상대표준편차(데이터가 평균으로부터 얼마나 흩어져 있는지에 관한 척도)는 각각 2.7%, 4.4%로 5% 이내의 실험 반복성을 나타내고 있다.

10K cycles 이후 표면에서 발생하는 마모를 관찰하기 위해 Keyence 社의 Confocal Laser Microscope를 사용하였다. Fig. 4는 본 장비를 사용하여 LCP, PC 표면을 각각 촬영한 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 표면 돌기(Asperities)가 평탄화되는 정도인 길들이기(Run-in) 과정을 거치고 있음을 알 수 있다. 길들이기 과정에서는 정량적인 마모량 측정이 어렵기 때문에 두 재질간 마모량 비교는 어렵다.

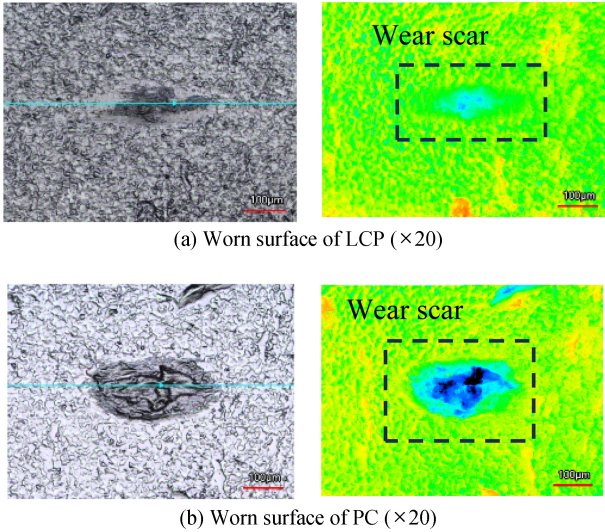


Fig. 6 Confocal images of worn surfaces after 1M cycles (x20)

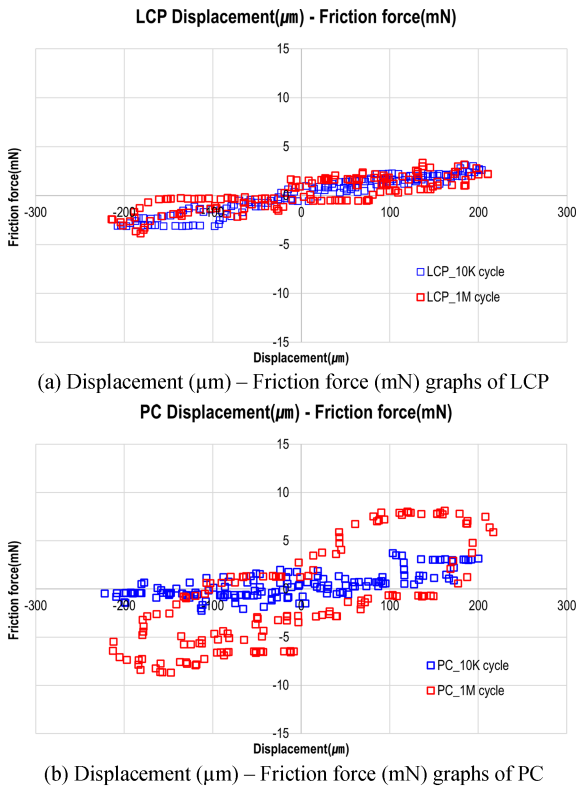


Fig. 7 Comparison of displacement (μm) – Friction force (mN) graphs for LCP and PC at 10K and 1M cycles

3.2 Short Stroke / Long Cycle 구름 마찰 실험

Fig. 5는 1M cycles동안 실험한 마찰계수 그래프이다. 10K까지 실험한 결과와 달리 1M cycles 실험 시에는 각 재료의 특성이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. LCP는 실험 초반부터 1M cycles까지 마찰계수의 큰 변화가 없다. 반면, PC는 약 200K cycles을 기점으로 마찰계수가 상승하는 경향을 보인다. 마찰계수의 상승은 일반적으로 표면의 변화, 즉 마모와 관련이 깊다. 이를 관찰하기 위해 1M cycles 실험 후 표면을 관찰하였고,

이는 Fig. 6과 같다. LCP 표면은 마모량이 적었고 일부 시편은 마모량 측정이 불가능했다. 반면, PC 표면은 마모가 상당히 발생하였으며, LCP에 비해 평균 10배 이상의 마모량(LCP: 9,285 μm<sup>3</sup>, PC: 142,565 μm<sup>3</sup>)을 가진다.

3.3 변위-마찰력 선도

Fig. 7은 LCP, PC에 대한 변위-마찰력 선도이다. 변위-마찰력 선도는 변위에 따른 마찰력을 관찰하여 정지-운동 마찰 이력을 확인하는데 유용하다[11,12]. 일반적으로 미끄럼 마찰(Sliding Friction) 환경에서 분석되며, 마찰 이력 곡선을 통해 시스템의 마찰 거동을 유추하거나, 마찰 에너지 소산(Dissipation Energy)을 계산하기도 한다[13].

본 논문에서 개발한 시험기는 구름 마찰 환경이기 때문에 마찰력이 매우 작아 거동을 분석하기는 어렵지만, Cycle 증가에 따른 마찰력의 변화를 변위-마찰력 선도를 통해 분석하면 보다 직관적이고, 마찰 에너지의 크기를 명료하게 비교 가능하다.

Fig. 7은 10K cycles 및 1M cycles에서 발췌한 LCP와 PC의 변위-마찰력 선도이다. LCP의 경우, 10K cycles에서나 1M cycles에서 마찰력 차이가 없다. 즉 마모로 인한 표면 변화 혹은 반복 접촉에 의한 표면전이층 등이 발생하지 않았음을 의미한다. 반면, PC의 경우 10K와 1M cycles일 때 마찰력의 차이가 크다. 앞서 살펴본 바와 같이 일정 cycles 이후 표면에 발생한 마모로 인해 구름면에서 Ball이 요철을 극복하며 움직일 때 받는 마찰이 증가한다. 이 마찰에너지의 양은 변위-마찰력 선도가 나타내는 면적으로 구할 수 있다.

4. 결론

볼과 구름면에서 발생하는 마찰계수를 측정하고, 트라이볼로지 특성을 관찰하기 위한 구름마찰 시험기를 개발하였고 이를 검증한 결과는 아래와 같다.

Short Cycle 실험을 통해 볼 구름 마찰계수를 측정하였고, 세라믹 볼에 대한 LCP, PC의 평균마찰계수는 각각 0.011, 0.009이다. 각 시료 군 내에서 데이터가 평균으로부터 흩어진 정도를 파악할 수 있는 상대표준편차는 각각 2.7%, 4.4% 로 5% 이내의 실험 반복성을 나타낸다.

Long Cycle 실험을 한 결과, LCP는 1M cycles 동안 마찰계수의 큰 변화가 없는 반면, PC는 약 200K cycles 시점부터 마모가 발생하여 마찰계수의 상승을 이끌었다. 반복 Cycle에 따라 재료별 표면 마모 시점이 다르고 마찰계수의 추이도 다른데, 이는 Rolling 시험기의 장수명 평가가 재료간 마모 발생 시점과 마찰계수 추이를 파악하는데 용이하며 Rolling 시험기가 이에 적절한 용도로 개발되었음을 알 수 있다.

변위-마찰력 선도를 통해 볼 구름에 따른 마찰력의 거동을 직관적으로 파악할 수 있다. LCP는 10K cycles이나 1M cycles에서 선도가 유사하나, PC는 10K cycles에 비해 1M cycles에서

면적이 넓어졌다. 이는 PC의 경우, 표면에 마모가 발생하였고, 이로 인한 마찰 증가가 열에너지 소실로 이어졌음을 의미한다.

**REFERENCES**

1. Presilla, R., Wandel, S., Stammer, M., Grebe, M., Poll, G., Glavatskih, S., (2023), Oscillating rolling element bearings: A review of tribotesting and analysis approaches, *Tribology International*, 188, 108805.
2. Gimeno, S., Mescheder, H., Quintana, I., Gasion, A., Arias-Egido, E., Carbonell, A., Mallo, C., Miguel, I., Paredes, J., Zalakain, I., (2023), Effect of different laser texturing patterns on rolling contact surface and its tribological & fatigue life behavior on 100Cr6 bearing steel, *Wear*, 522, 204717.
3. Laithy, M., Wang, L., Harvey, T., Viernusel, B., Correns, M., Blass, T., (2019), Further understanding of rolling contact fatigue in rolling element bearings- A review, *Tribology International*, 140, 105849.
4. Peterson, W., Russel, T., Sadeghi, F., Berhan, M.T., (2021), Experimental and analytical investigation of fluid drag losses in rolling element bearings, *Tribology International*, 161, 107106.
5. Presilla, R., Calderon-Salmeron, G., Leckner, J., Kitamura, R., Sato, K., Sasaki, S., Glavatskih, S., (2025), Lubricant design for oscillating rolling bearings: Greases, ionic liquids, and friction torque, *Tribology International*, 210, 110721.
6. Xia, Z., Wu, D., Zhang, X., Wang, J., Han, E., (2024), Rolling contact fatigue failure mechanism of bearing steel on different surface roughness levels under heavy load, *International Journal of Fatigue*, 179, 108042
7. Deshwal, D., Belgamwar, S. U., Bekinal, S. I., (2025), Assessment of polytetrafluoroethylene composites for deep groove ball bearing applications through free run and rolling contact fatigue tests, *Scientific Reports*, 15(1), 10088.
8. Kim, C., Song, M.-G., Kim, Y., Park, N.-C., Park, K.-S., Park, Y.-P., Shin, K. S., Kim, J. G., Lee, G. S., (2013), Design of an auto-focusing actuator with a flexure-based compliant mechanism for mobile imaging devices, *Microsystem Technologies*, 19(9), 1633-1644.
9. Bae, J., Chung, K. H., (2018), Degradation progression of polyurethane hydraulic reciprocating seal, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(7), 701-706.
10. Park, T.L., Yang, Y.M., Shin, D.G., Kim, D.E., (2018), A study on frictional characteristics of PDMS under various conditions, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(8), 803-807.
11. Bazrafshan, M., de Rooij, M.B., Schipper, D.J., (2019), The effect of adhesion and roughness on friction hysteresis loops, *International Journal of Mechanical Sciences*, 155, 9-18.
12. Biswas, S., Chatterjee, A., (2015), A two-state hysteresis model from high-dimensional friction, *Royal Society Open Science*, 2(7), 150188.

13. Li, Y., Zhao, T., Li, Y., Chen, Y., (2022), A five-parameter constitutive model for hysteresis shearing and energy dissipation of rock joints, *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(4), 737-746.



**Ju Ho Park**

Ph.D., Senior researcher of Actuator Technology Development team, LG Innotek. His research interest is Tribology.  
E-mail: jpark318@lginnotek.com



**Jung Ha Hong**

M.S., Head of Optic Solution Business Research Center, LG Innotek. His research interest is Camera & sensing module optical technologies for mobile, robotics, mobility.  
E-mail: jhhonga@lginnotek.com



**Sang Jun Min**

M.S., Leader of Actuator Technology Development team, LG Innotek. His research interest is Compact precision actuator technologies for mobile, robotics and mobility.  
E-mail: sjmina@lginnotek.com



**Gyu Sun Lee**

Ph.D., Professional researcher of Actuator Technology Development team, LG Innotek. His research interest is Tribology.  
E-mail: glee@lginnotek.com



# 입구 유속 변화가 사이클론 분리기 내 기체-입자 유동에 미치는 영향에 대한 수치적 연구

## A Numerical Study on the Effects of Inlet Velocity Variation on Gas-particle Flow in a Cyclone Separator

김건호<sup>1,2</sup>, 김덕형<sup>1,2</sup>, 이성빈<sup>1,2</sup>, 박희성<sup>2,#</sup>  
Geonho Kim<sup>1,2</sup>, Deokhyeong Kim<sup>1,2</sup>, Sungbin Lee<sup>1,2</sup>, and Heesung Park<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 국립창원대학교 스마트제조융합협동과정 (Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University)

<sup>2</sup> 국립창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)

# Corresponding Author / E-mail: heesungpark@changwon.ac.kr, TEL: +82-55-213-3609

ORCID: 0000-0003-4586-7794

KEYWORDS: Cyclone separator (사이클론 분리기), Particle separation (입자 분리), Particle separation efficiency (입자 분리 효율), Velocity distribution (속도 분포)

*This study investigated the influence of inlet velocity on the internal flow characteristics and particle separation performance of a cyclone separator. Computational Fluid Dynamics (CFD) coupled with the Discrete Phase Model (DPM) was used to predict particle trajectories and separation efficiencies under different velocity conditions. The results show that increasing the inlet velocity intensifies the swirling flow and strengthens the centrifugal force within the cyclone. As a result, the axial velocity distribution becomes more pronounced, with stronger downward flow near the wall and intensified upward reverse flow at the center. In the bottom outlet region ( $Z = 4.5D$ ), clear flow asymmetry associated with the Precessing Vortex Core (PVC) effect is observed, and this phenomenon becomes more pronounced as the inlet velocity increases. Particle trajectory analysis indicates that higher velocities shorten particle residence time and promote rapid migration toward the wall, forming compact helical paths and improving separation efficiency. Analysis using an inverse weighted-sum performance index indicates that an inlet velocity of 15 m/s provides the most favorable balance among the evaluated performance parameters and represents the optimal operating condition for cyclone separator performance.*

Manuscript received: August 27, 2025 / Revised: November 18, 2025 / Accepted: November 19, 2025

### 1. 서론

사이클론 분리기는 내부의 회전하는 공기 흐름에 의해 발생하는 원심력을 이용하여 입자를 분리하는 간단한 기체-입자 분리 장치이다[1]. 다른 분리 장치와 비교할 때, 사이클론 분리기는 단순한 구조, 낮은 설치 비용 및 유지 보수 비용, 고온 고압 환경에서도 운영이 가능한 명확한 장점들 때문에 분진 제거, 미세 입자 포집 등 다양한 산업 분야에 널리 활용되고 있다. Fig. 1에 사이클론 분리기의 기본 구조와 내부 유동 패턴을 나타내었다. 사이클론 분리기의 구조는 입구, 원통부(Cylindrical Body), 선회류 출구(Vortex Finder), 원뿔부(Cone Section), 하단

배출구(Spigot)로 구성된다. 사이클론 분리기는 단순한 구조에도 불구하고, 내부 유동은 주 유동(Primary Flow)과 이차 유동(Secondary Flow)이 상호 작용하는 복잡한 유체 거동 특성을 나타낸다. 사이클론 분리기 입구로 유입된 입자가 포함된 유체는 접선방향으로 주입되며, 내부에서 강한 이중 회전 유동을 형성한다. 유입된 유체는 원통부를 따라 하강하면서 외부 회전류(Outer Vortex)를 형성하고, 이 과정에서 입자는 원심력에 의해 벽면으로 밀려나며 입자의 크기와 밀도에 따라 분리된다. 원뿔부에 도달한 유동은 점차 중심부로 수렴하며 하단에서 방향이 전환되어 내부 회전류(Inner Vortex)를 따라 상승하며 선회류 출구를 통해 배출된다. 사이클론 하단부에서 입자의 분리가

이루어지며 상대적으로 작은 미세 입자는 내부 회전을 따라 사이클론 상단부에 위치한 선회류 출구를 통해 배출된다[2]. 내부에는 주 유동 외에도 이차 유동이 발생하며, 이는 입자 분리 성능에 영향을 미친다. 대표적으로 이차 유동에는 일부가 충분한 분리 과정을 거치지 않고 선회류 출구로 직접 유입되는 단락 유동(Short-circuit Flow), 원통부 상단에서 일부 유체가 역류하여 정체된 층을 형성하는 재순환 유동(Recirculation Flow), 원뿔부 하단에서 발생하는 비대칭 교차 유동인 편심 환류(Eccentric Circumfluence)가 있다[3]. 이러한 이차 유동은 입자의 재비산과 혼합을 유발하여 분리 효율을 저하시키므로 입구 속도, 선회류 출구 형상, 원뿔부 각도 및 하단 직경 등의 기하학적 설계 변수와 운전 조건을 최적화하여 그 영향을 최소화하는 것이 중요하다.

사이클론 분리기의 성능을 향상시키기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. Yang 등은 미세 탄산칼슘 분말을 효과적으로 분리하기 위해 선회류 출구 길이 및 선회류 출구 직경에 따른 성능평가를 진행하였다. 선회류 출구의 길이가 길어짐에 따라 속도 분포가 정렬되고 분리 성능이 증가하는 경향이 나타났고, 이때 최적 분리 성능은 S/D 값이 0.7에서 발생한다는 것을 확인하였다. 선회류 출구의 직경이 증가함에 따라 외부 회전의 강도가 감소하면서 원심력이 약해지고 분리 성능이 저하되는 경향이 나타났으며, 이때  $D_c/D$  값이 0.4에서 우수한 분리 성능이 발생한다고 규명하였다[4]. Xiang 등은 폴리스티렌 라텍스 입자에 대해서 원뿔부 하단 직경( $B/D = 0.625, 0.5, 0.375$ )이 분리 성능에 미치는 영향을 실험 분석하였다. 원뿔부 하단 직경이 감소함에 따라 접선 속도가 증가하여 분리 성능이 증가한다고 주장하였다[5]. Elsayed 등은 고체 입자( $\rho_p = 860 \text{ kg/m}^3$ )에 대해서 입구 너비와 높이에 따른 분리 성능 평가를 수행하였다. 입구의 너비와 높이가 증가할수록 압력 손실과 최대 접선 속도가 감소하여 분리 성능이 저하된다고 규명하였다[6].

본 연구에서는 구조가 단순하고 설치 및 유지 보수 비용이 낮아 다양한 분체 처리 공정에 활용되는 사이클론 분리기를 대상으로 입자 크기별 분리 효율 특성을 평가하였다. 기존 연구들은 주로 절단 입경( $d_{p,50}$ , Cut-point Diameter)과 압력 강하를 중심으로 사이클론 분리기의 성능을 평가하였으나, 실제 분체 공정에서 제품의 품질은 특정 기준에 부합하는 입자 크기 분포 확보에 의해 결정된다. 특히, 임계 입경( $d_{max}$ ) 영역에서의 미세 분 잔류나 과립 혼입은 품질 저하의 주요 요인으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 절단 입경뿐만 아니라 분리 경계의 선명도를 정량화하는 분리 정밀도(Sharpness of Classification,  $\kappa$ )를 함께 고려하여 보다 실질적인 분리 성능 평가 지표를 제시하고자 한다. 이러한 접근은 기존 단일 지표 중심의 연구와 차별화되며, 실제 분체 처리 공정에서의 최적 운전 조건 도출에 기여한다. 본 연구에서는 이러한 목적 달성을 위해, 직경 100 mm의 원뿔형 Stairmand형 사이클론 분리기를 대상으로 입구 유속 변화가 유동 패턴과 분리 성능에 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다.

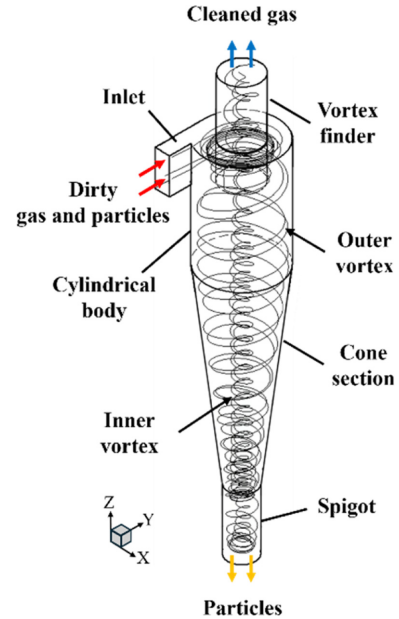


Fig. 1 Schematic diagram of cyclone separator flow

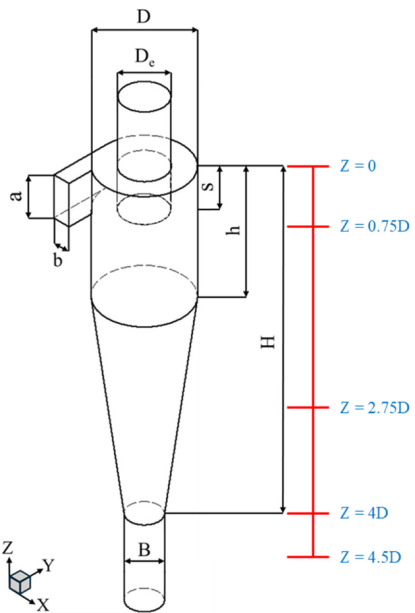


Fig. 2 3D geometry of a cyclone separator

## 2. 수치 해석

### 2.1 사이클론 분리기 모델

본 연구에서 적용된 사이클론 분리기는 입구, 원통부, 원뿔부, 하단 배출구, 선회류 출구로 구성되며, Fig. 2에 사이클론 분리기의 형상 개략도를 제시하였다. 해당 장치는 고효율 Stairmand 모델 설계 지침을 기반으로 설계하였으며, 원통부 높이(h)와 선회류 출구의 길이(S)는 각각 분체 직경의 1.5배와 0.5배로

Table 1 Geometric design parameters of a cyclone separator ( $D_c = 100 \text{ mm}$ )

Parameters	Values
$D_c/D$	0.5
$a/D$	0.5
$b/D$	0.2
$S/D$	0.5
$h/D$	1.5
$H/D$	4
$B/D$	0.38

설정하였다[7]. 상세한 기하학적 비율은 Table 1에 정리하였다.

본 연구에서는 Ansys Fluent V24.1 상용 수치 해석 코드를 이용하여 사이클론 분리기에 대한 3차원 수치 해석을 수행하였다. 계산 효율성과 수치적 안정성을 확보하기 위하여 해석 절차를 두 단계로 구분하였다. 1단계에서는 정상 상태 해석을 수행하여 속도장과 압력장이 수렴된 유동장을 확보하였다. 이 단계는 사이클론 내부의 강한 회전류와 급격한 압력 구배 조건에서 비정상 해석 수행 시 발생할 수 있는 수치적 발산을 방지하기 위한 것이다. 난류 해석에는 강한 회전 유동의 비등방성을 고려하기 위해 레이놀즈 응력 수송 모델(Reynolds Stress Model, RSM)을 적용하였다. 2단계에서는 1단계에서 수렴된 정상 상태 유동장을 기반으로, 다양한 입경 조건에 대해 라그랑지 이산상 모델(Discrete Phase Model, DPM)을 적용하였다. 입자 거동은 시간 의존적 라그랑지 입자 추적법(Lagrangian Particle Tracking, LPT)을 통해 계산되었으며, 각 입경 조건별로 1,000개의 입자를 주입하여 입자의 이동, 충돌 및 체류 거동을 해석하였다. 이러한 단계적 접근은 전체 계산 비용을 절감하고, 유동장과 입자 거동의 수치적 안정성을 확보하기 위한 것이다.

### 2.2 수치 해석 방법

사이클론 분리기 내부의 유동은 강한 와류와 높은 난류 강도를 동반하는 복잡한 특성을 나타내므로 정확한 유동 해석을 위해 적절한 난류 모델의 선택이 필수적이다. 이러한 회전 유동에 적합한 난류 모델의 선택에 대하여 여러 선행 연구가 수행되어 왔다. Standard  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$  그리고 Realizable  $k-\epsilon$  모델은 등방성 난류 점성 계수에 기반하며, 사이클론 분리기 내에서 발생하는 강한 회전 유동을 등방성 난류로 가정한다. 따라서 실제와 같이 강한 이방성을 가지는 유동장에 대해서는 정확한 예측이 어렵고 해당 모델들은 최적화되어 있지 않다[8-11]. 반면, 본 연구에서 사용된 RSM 난류 모델은 각 난류 응력 성분에 대한 수송 방정식을 독립적으로 계산한다. 이 모델은 이방성이 강하게 나타나는 유동장에 적합하며, 회전 유동 구조, 축 방향 속도, 접선 속도, 절단 입경, 압력 강하 등 사이클론 내 주요 유동 특성을 정확하게 예측할 수 있다[12,13].

본 연구에서는 Eulerian-Lagrangian 접근법 기반의 이산상

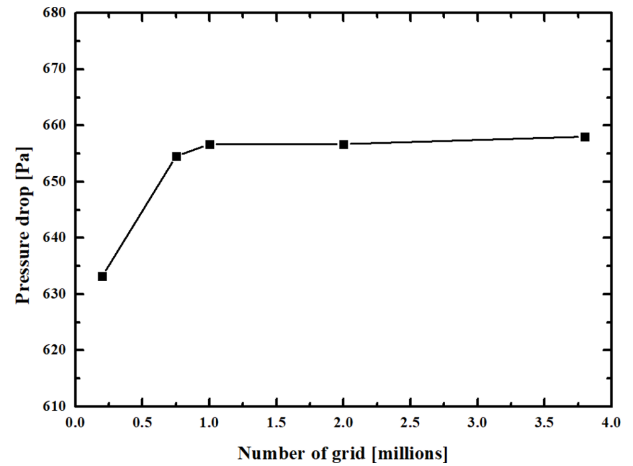


Fig. 3 Grid independence study of cyclone separator

모델을 적용하였다. 연속상(Fluid Phase)은 시간 평균된 Navier-Stokes 방정식을 통해 연속체로 해석되며, 분산상(Dispersed Phase)은 계산된 유동장을 바탕으로 각 입자의 궤적을 개별적으로 추적함으로써 계산된다. 분산상은 연속상과 운동량, 질량, 에너지를 교환할 수 있다. DPM은 분산상의 체적분율이 매우 낮다는 가정을 기반으로 하며, 일반적으로 입자의 체적분율( $\alpha_p$ )이 전체 유체 부피 대비 10-12% 미만일 경우 적용 가능하다[14]. Khaleel 등은 입자 체적분율에 따라 연속상과 분산상 간 결합 수준이 달라지며  $\alpha_p < 10^{-6}$  조건에서 단방향 결합(One-way Coupling)이 타당하다고 제시하였다[15]. 본 연구에서 계산된 입자 체적분율은  $1.77 \times 10^{-8}$ 로, 상기 기준보다 현저히 낮아 입자의 존재가 유동장에 미치는 영향을 무시할 수 있다. 따라서 본 해석에서는 Eulerian-Lagrangian 접근법과 단방향 결합 가정 하에서 입자의 운동을 계산하였다. 입자의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{du_{p,i}}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D Re_p}{24} (u_i - u_{p,i}) + g_i \cdot \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (1)$$

$$\frac{dx_{p,i}}{dt} = u_{p,i} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 와  $\mu$ 는 각각 기체의 밀도와 동점성 계수,  $\rho_p$ 와  $d_p$ 는 각각 입자의 밀도와 지름을 나타낸다.  $C_D$ 는 항력 계수,  $u_i$ ,  $u_{p,i}$ 는 각각 유체와 입자의  $i$ 방향 속도,  $g_i$ 는  $i$ 방향 중력 가속도,  $Re_p$ 는 상대 레이놀즈 수를 의미한다. 상대 레이놀즈 수는 식(3)과 같이 정의된다.

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (3)$$

구형 입자의 항력 계수  $C_D$ 를 상대 레이놀즈 수  $Re_p$ 의 함수로 나타낸 Morsi와 Alexander의 상관식을 사용하여 계산되었다[16]. 입자의 운동 방정식은 개별 입자 궤적을 따라 수치적으로

적분된다. 입자 분리 효율(Particle Separation Efficiency)은 다분산 입자를 주입한 후, 출구로 탈출하는 입자 수를 추적하여 계산되었다. 입자와 사이클론 벽 사이의 충돌은 부분 탄성 충돌로 가정되었으며, 반발 계수는 0.8로 설정하였다.

사이클론 분리기 내 평균 체류 시간은 사이클론의 기하학적 형상과 가스 유량에 기반하여 결정된다. 체류 시간( $t_{res}$ )은 식(4)와 같이 정의된다.

$$t_{res} = \frac{V}{Q_{in}} \quad (4)$$

여기서  $Q_{in}$ 은 가스 유량,  $V$ 는 사이클론 내부 체적을 의미한다. 타임 스텝 크기는 체류 시간의 5배를 100등분한 값으로 설정하였다. 각 타임 스텝마다 최대 50회의 반복 계산을 수행하였다 [17].

사이클론 분리기 내부에는 높은 압력 구배와 이중 와류 구조가 존재하므로, 압력 계산을 위한 효율적인 알고리즘이 요구된다. 압력-속도 결합을 위해 SIMPLEC Scheme을 적용하였으며, 압력 방정식은 PRESTO 압력 보간 기법을 설정하였다. 운동량 방정식은 QUICK을 설정하였으며, 난류 에너지 소산률은 2차 정확도 Scheme을 설정하였다. 레이놀즈 응력은 1차 정확도 Scheme을 설정하였으며, 모든 수렴 기준은  $10^{-6}$ 으로 설정하였다.

### 2.3 경계 조건 및 격자 독립성 검증

사이클론 입구에는 속도 입구 경계 조건(Velocity Inlet Boundary Condition)이 적용하였으며, 입구 유속은 5, 10, 15, 20 m/s 4가지 경우로 설정하였다. 출구에는 압력 출구 경계 조건(Pressure Outlet)을 적용하였고, 그 외 모든 벽면에는 점착 조건(No-slip Boundary Condition)이 적용되었다. 공기의 밀도는  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , 동점성 계수는  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  그리고 난류 강도는 5%이다. 입자 직경 범위는  $0.5\text{-}20 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 본 범위는 사이클론 분리기의 대표적 절단 입경 구간( $3.9\text{-}17.1 \mu\text{m}$ )을 포함하며, 실제 대기 오염 규제 샘플링에서 사용되는  $\text{PM}_{10}$  ( $10 \mu\text{m}$ ) 및  $\text{PM}_{2.5}$  ( $2.5 \mu\text{m}$ ) 규격 사이클론의 표준 기준과도 부합한다[18,19].

격자 생성은 Poly-hexcore 격자를 적용하여 설계하였으며, 벽면 근처 유동 해석의 정확도를 확보하기 위해 첫 번째 셀 중심이  $y^+ \approx 1$  범위에 위치하도록 초기 격자 높이를 설정하였다. 10개 경계층 레이어가 벽면에서부터 점진적으로 1.2배 증가하도록 설정하였다. 최대 Skewness는 0.71 미만으로 계산 안정성을 확보할 수 있는 수준으로 나타났다.

Fig. 3은 격자 수에 따른 해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위한 격자 독립성 검증을 나타낸다. 격자 수는 20만 개에서 380만 개까지의 범위에서 5가지 격자 수에 대한 입출구 압력 강하를 비교하였다. 75만 개 이상일 때, 입출구 압력 강하의 최대 상대 오차는 1.6% 미만이다. 수치 해석의 신뢰성 확보와 계산 효율성을 위해 75만 개의 격자를 사용하였다.

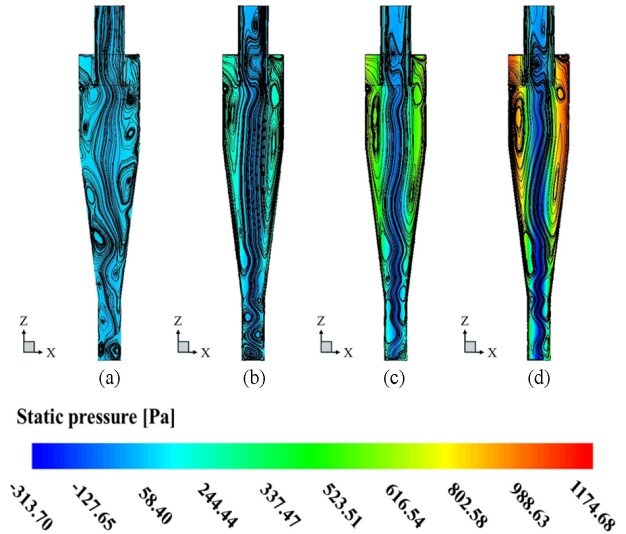


Fig. 4 Static pressure contours and streamlines for different inlet velocities: (a) 5, (b) 10, (c) 15, and (d) 20 m/s

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 사이클론 분리기 내 유동장

Fig. 4는 입구 유속 변화에 따른 사이클론 분리기 내부의 유동 구조와 정압 분포를 나타낸다. 내부에서는 복잡한 회전 유동이 형성되며, 입구 유속이 낮을수록 다양한 크기의 불규칙한 회전 구조가 나타난다. 반면, 입구 유속이 증가함에 따라 유동은 중심축을 따라 정렬되며, 불규칙한 회전 구조의 빈도는 감소하는 경향을 보인다. 벽면을 따라 하강한 유체는 중심부에서 직선이 아닌 굽이치는 형태로 상승하는 흐름 특성을 나타낸다. 전체적으로는 벽면에서 중심부로 향하는 방향으로 정압이 급격히 감소하는 압력 구배가 형성되며, 이는 회전 유동에 의해 발생하는 원심력의 결과이다. 이러한 압력 분포는 입구 유속이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 5는 입구 유속 변화에 따른 사이클론 분리기 내부의 난류 운동 에너지 분포를 나타낸다. 입구 유속이 증가함에 따라 선회류 출구 인근과 내벽 부근에서 난류 강도가 현저히 증가하며, 특히 20 m/s 조건에서 내벽을 따라 난류 에너지 영역이 확장되어 유동의 안정성이 저하된다. 이러한 난류 강도의 증가는 입자에 작용하는 와류력 및 전단응력의 변동성을 증폭시켜, 입자의 재비산 및 혼합 현상을 유발할 수 있다.

Figs. 6과 7은 입구 유속 변화에 따른 접선 방향 속도 분포 및 사이클론 분리기 상단부로부터 0.75D 아래 위치에서의 반경 방향 접선 속도 분포 곡선을 각각 나타낸다. 전체 유동장은 중심부의 강제 회전류(Forced Vortex)와 외측의 자유 회전류(Free Vortex)로 구성되며, 전형적인 Rankine형 와류 구조에 근사하는 유동 특성을 보인다. 접선 속도의 최댓값은 내·외부 회전류의 경계면에서 형성되며, 입구 유속 증가함에 따라 절대값이 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 접선 속도의 증가는 선회

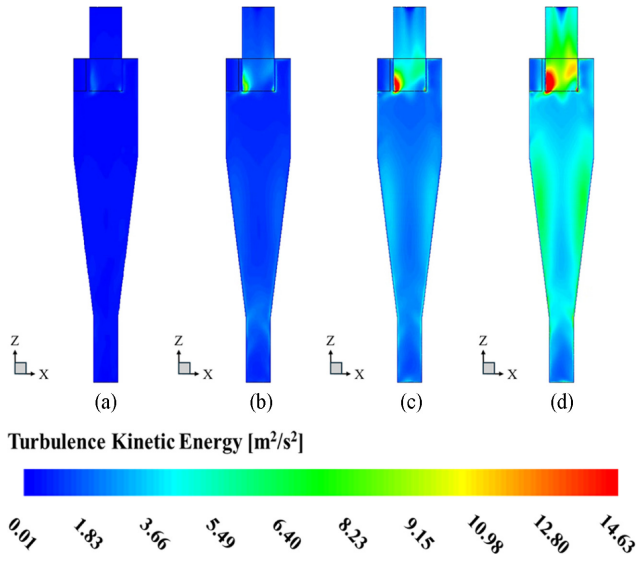


Fig. 5 Contours of turbulence kinetic energy distribution for different inlet velocities: (a) 5, (b) 10, (c) 15, and (d) 20 m/s

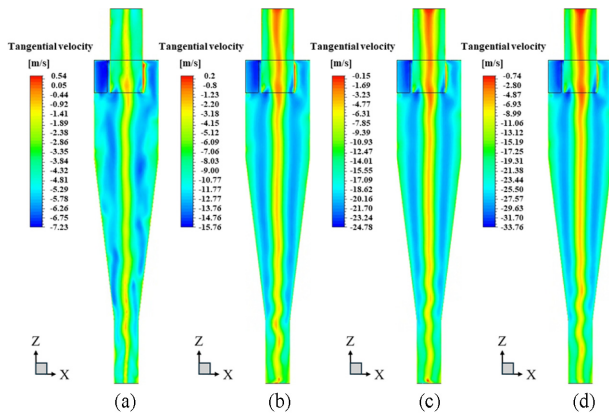


Fig. 6 Contours of tangential velocity distribution for different inlet velocities: (a) 5, (b) 10, (c) 15, and (d) 20 m/s

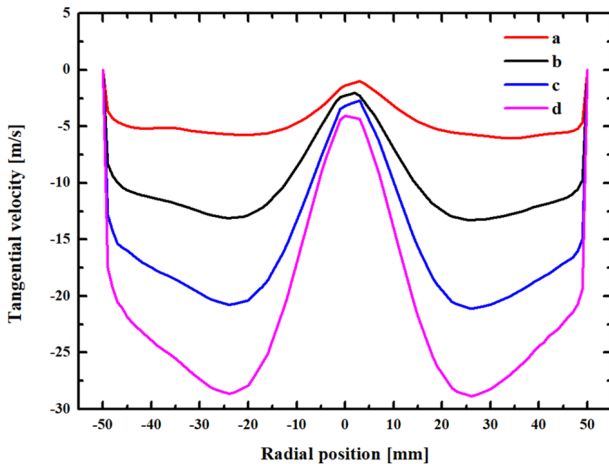


Fig. 7 Radial distribution of tangential velocity at  $z = 0.75D$  for different inlet velocities

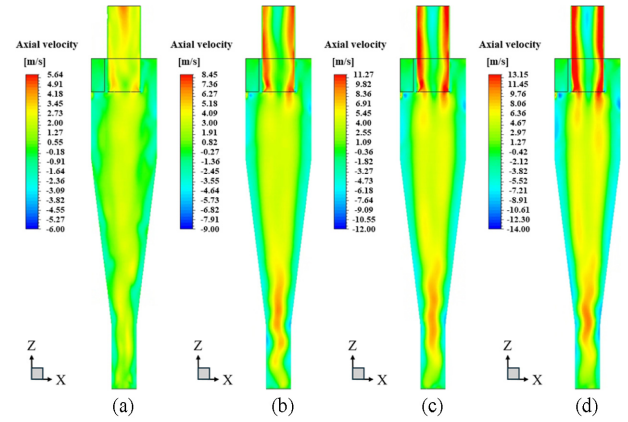


Fig. 8 Contours of axial velocity distribution for different inlet velocities: (a) 5, (b) 10, (c) 15, and (d) 20 m/s

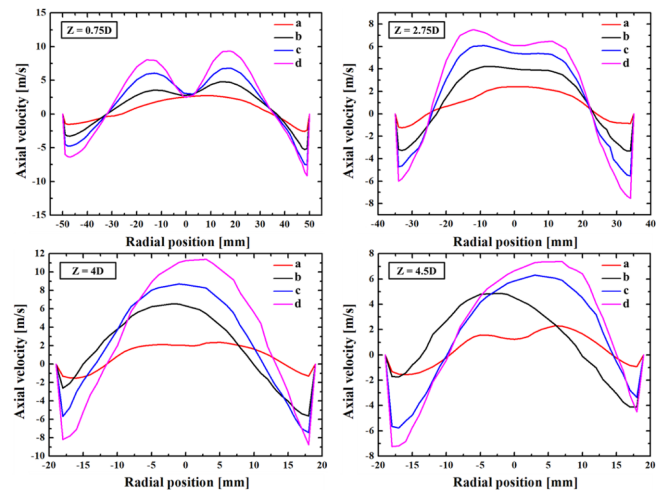


Fig. 9 Radial distribution of axial velocity at various axial positions under different inlet velocities

강도와 원심력의 강화로 이어지며, 이는 입자 분리 성능 향상에 기여하는 주요 인자 중 하나로 작용한다. 특히, Fig. 5(a)에서는 낮은 입구 유속으로 인해 벽면과 중심부 사이의 압력 구배가 완만하고, 중심부 내부 회전류가 불안정한 형태로 분포하여 내·외부 회전류 간의 경계면이 뚜렷하지 않게 나타난다. 이는 접선 속도가 충분히 발달하지 않아 원심력이 약하게 형성된 결과로 해석된다.

Fig. 8은 입구 유속 변화에 따른 축 방향 속도 분포를 나타낸다. 유동장은 벽면 근처에서 음의 축 방향 속도, 중심부에서는 양의 축 방향 속도를 보이며, 이는 사이클론 분리의 전형적인 이중 회전 유동 구조를 의미한다. 입구 유속이 증가함에 따라 벽면에서의 음의 축 방향 속도의 절댓값이 증가하는 경향을 보인다. 이는 원뿔부 하단 및 하단 배출구 중심부에서 상승하는 역류 현상이 강해짐을 의미한다. 또한 중심부의 내부 회전류가 선회류 출구로 진입할 때, 단면적이 축소됨에 따라 접선 속도의 크기는 증가한다. 그 결과, 벽면 마찰에 의한 에너지 손실이 증가하여 선회류 출구 내에서의 선회 감쇠율이 증가한다. 이는

중심축을 따라 축 방향 역 압력 구배를 유발하여 정체 구간 및 축 방향 역류 현상의 발생으로 이어진다.

Fig. 9는 각 위치( $Z = 0.75D, 2.75D, 4D, 4.5D$ )에서의 반경 방향 축 방향 속도 분포를 나타낸다. 하단 배출구 영역( $Z = 4.5D$ )에서는 선회 와류 코어(Precessing Vortex Core, PVC)의 영향으로 축 방향 속도 분포의 비대칭성이 저하되며, 입구 유속이 증가함에 따라 최대 속도점이 기하학적 축으로부터 편향되는 경향이 나타난다. 특히 20 m/s 조건에서 편향의 정도가 최대이며, 이는 PVC의 강도 및 유동 불안정성이 증가한 결과로 분석된다. 원뿔부 하단( $Z = 4D$ )에서는 유동 단면적의 축소로 인해 하강하는 외부 회전류와 상승하는 내부 회전류 간의 상호 작용이 강화되며, 이에 따라 축 방향 속도의 절댓값이 전반적으로 증가한다. 이 구간에서 15 m/s 조건은 최대 속도점이 기하학적 축을 중심으로 재정렬되나, 20 m/s 조건에서는 높은 난류 강도에 기인한 내부 선회류의 비대칭성이 지속되어 축심 편향이 유지된다. 이러한 축 방향 속도 분포의 비대칭성은 입자에 작용하는 힘을 지속적으로 변화시켜, 벽면 인근에서 포집될 입자가 상승류로 재유입되는 현상을 야기하며, 결과적으로 분리 정밀도의 저하로 이어진다. 선회류 출구 하단( $Z = 0.75D$ )에서는 중심축 부근에 정체 영역이 형성되며, 반경 방향으로 M자형 축 방향 속도 분포가 나타난다. 입구 유속이 증가할수록 중심부의 정체 및 역류 현상이 강화되어 M자형 분포의 기울기가 증가하며, 이러한 유동 특성은 원뿔부 중간 위치( $Z = 2.75D$ )까지 확장되는 양상을 보인다.

### 3.2 사이클론 분리기의 입자 거동 및 성능 평가

Fig. 10은 각 입구 유속 조건에 따른 입자 궤적의 시간 변화를 나타낸다. 입구 유속이 낮은 경우, 0.5-4  $\mu\text{m}$  범위의 작은 직경 입자들은 사이클론 분리기 내부에서 장시간 부유하며 체류 시간이 증가한다. 반면, 입구 유속이 높은 경우에는 강한 원심력에 의해 입자들이 빠르게 벽면으로 밀려나며 상대적으로 체류 시간이 단축되고 하단 배출구로 효율적으로 분리된다. 또한 입구 유속이 증가할수록 입자의 궤적 간격은 감소한다. 이는 유입되는 유동의 각운동량이 증대됨에 따라 외부 회전류가 더욱 빠르고 강력한 나선형 유동을 형성하기 때문이다.

Fig. 11은 입자의 직경에 따른 입구 유속별 입자 분리 효율을 보여준다. 입자 분리 효율은 식(5)로부터 계산된다.

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{N_{\text{escape}}}{N_{\text{inject}}} \quad (5)$$

모든 곡선은 전형적인 S자 형태를 보이며, 입자 직경이 증가할수록 분리 효율이 상승하는 사이클론 분리기의 일반적인 특성이 나타난다. 또한, 동일한 입자 직경에 대해 입구 유속이 증가할수록 분리 효율이 높아지는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 11으로부터 절단 입경과 분리 정밀도를 도출할 수 있으며, 이는 분리 성능을 정량적으로 평가하는 핵심 지표이다. 분리 정밀도는 식(6)과 같이 정의된다.

$$\kappa = \frac{d_{p,75}}{d_{p,25}} \quad (6)$$

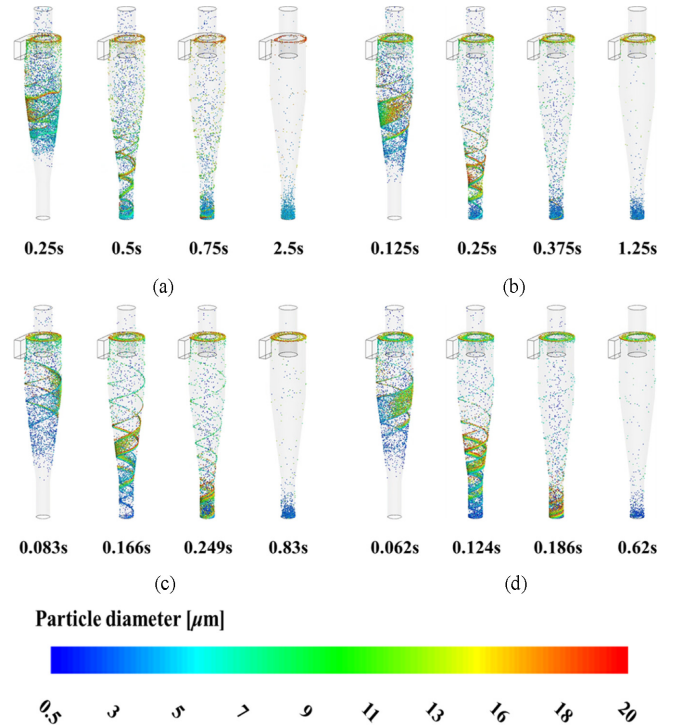


Fig. 10 Time-resolved particle trajectories at different inlet velocities: (a) 5, (b) 10, (c) 15, and (d) 20 m/s

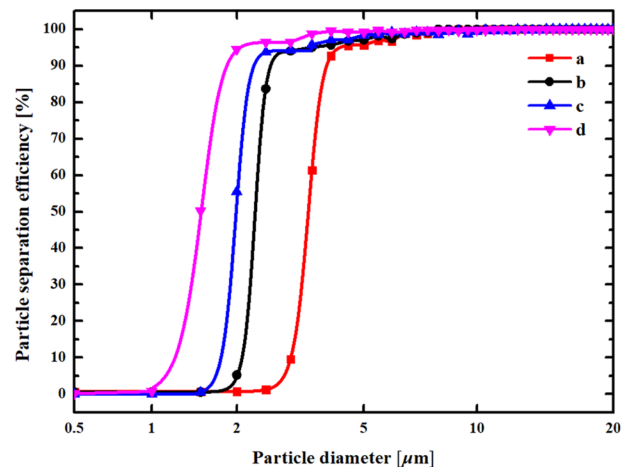


Fig. 11 Particle separation efficiency of particles at different inlet velocities

여기서  $d_{p,75}$ 와  $d_{p,25}$ 는 각각 분리 효율이 75%와 25%에 해당하는 입자 직경이다. 이상적인 경우  $\kappa = 1$ 이며,  $\kappa$  값이 작을수록 분리 정확도가 높은 것을 의미한다. 입구 유속이 증가하면 원심력이 증대되어 미세한 입자까지 분리할 수 있게 되므로,  $d_{p,50}$  값이 감소하며 입자 분리 효율이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 반면, 입구 유속 20 m/s에서는 난류 강도가 현저히 증대되고 유동 불안정성이 심화되어 입자의 재비산 가능성이 증가함으로써 분리

Table 2 Summary of the cyclone separator performance indexes at different inlet velocities

$V_{in}$ [m/s]	5	10	15	20
Pressure drop [Pa]	57.14	267.04	654.52	1213.49
$d_{p,25}$ [ $\mu\text{m}$ ]	3.2	2.1	1.8	1.3
$d_{p,50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	3.4	2.3	1.9	1.5
$d_{p,75}$ [ $\mu\text{m}$ ]	3.8	2.4	2	1.6
$\kappa$	1.19	1.14	1.11	1.23
$P_{WSM}^{-1}$	1.33	1.04	1.02	1.09

정확성이 저하된다. 결과적으로, 가장 작은  $\kappa$  값은 입구 유속이 15 m/s 조건에서 나타난다.

Table 2는 입구 유속 변화에 따른 분리 성능 지표를 정리한 결과를 나타낸다. 입구 유속 증가에 따라 절단 입경은 감소하고 압력 강하는 증가하는 상충 관계(Trade-off)가 나타나며, 이러한 특성을 종합적으로 평가하기 위해 역가중합 성능 지표(Inverse Weight Sum Performance Index,  $P_{WSM}^{-1}$ )를 적용하였다[20]. 본 지표는 절단 입경, 압력 강하, 분리 정밀도를 통합적으로 반영하여 운전 조건에 따른 종합 성능을 정량적으로 비교하는 데 활용되며, 식(7)과 같이 정의된다.

$$P_{WSM}^{-1} = \varpi_{d_{p,50}} n_{d_{p,50}} + \varpi_{\Delta P} n_{\Delta P} + \varpi_{\kappa} n_{\kappa} \quad (7)$$

여기서  $n_{d_{p,50}}$ ,  $n_{\Delta P}$ ,  $n_{\kappa}$ 는 절단 입경, 압력 강하, 분리 정밀도의 정규화 값이며, 본 연구에서는 절단 입경의 상대적 중요도를 고려하여 차등 가중치( $n_{d_{p,50}} = 0.6$ ,  $\varpi_{\Delta P} = 0.2$ ,  $\varpi_{\kappa} = 0.2$ )를 적용하였다.  $P_{WSM}^{-1}$  값이 낮을수록 성능 인자 간의 균형이 우수함을 의미한다. Table 2에서 확인되듯이, 20 m/s에서는 압력 강하의 급증과 분리 정확성 저하로 인해 종합 성능 지표가 증가한다. 반면,  $P_{WSM}^{-1}$ 의 최소값은 15 m/s에서 나타난다. 이는 절단 입경 감소 효과가 확보되면서도 압력 강하 및 분리 정밀도의 저하가 최소화되는 조건으로, 세 성능 인자 간의 상충 관계가 균형을 이루는 운전 구간이다. 따라서 15 m/s는 사이클론 분리기의 종합 성능 관점에서 적합한 유속 조건으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 입구 유속을 독립 변수로 설정하여, 유속 변화가 사이클론 분리기 내 기체-입자 유동 특성 및 분리 성능에 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다.

입구 유속 증가에 따라 입-출구 간 압력 강하는 지수적으로 증가하였으며, 이는 에너지 소비 측면에서 고려가 필요함을 시사한다. 또한, 회전 유동 강도와 원심력이 증대되며, 접선 및 축방향 속도가 모두 증가하는 경향을 보였다. 특히 원뿔부 하단과 하단 배출구 영역에서는 PVC의 영향으로 유동 불안정성과

비대칭성이 심화되며, 이는 과도한 난류 및 입자의 재비산 가능성을 유발할 수 있다.

입자 분리 성능 측면에서 입구 유속은 주요 인자로 작용하며, 입구 유속 증가에 따라 절단 입경이 감소하고 전체 분리 효율이 향상된다. 이는 미세 입자 분리에 효과적임을 나타낸다. 사이클론 분리기의 종합 성능을 평가하기 위해 역가중합 성능 지표 분석 결과, 15 m/s는 세 성능 인자 간의 상충 관계가 균형을 이루는 운전 구간으로 평가되어 종합 성능 관점에서 가장 우수한 최적 유속으로 판단된다.

향후 연구에서는 선회류 출구 길이, 원뿔부 각도, 하단 직경 등 기하학적 설계 인자를 추가 변수로 고려하여 사이클론 분리기의 성능 최적화에 대한 후속 연구를 진행할 예정이다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

논문은 2025년도 교육부 및 경상남도의 재원으로 경상남도 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(No. 2025-RISE-16-002).

#### REFERENCES

- Song, C., Pei, B., Jiang, M., Wang, B., Xu, D., Chen, Y., (2016), Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators, Powder Technology, 294, 437-448.
- Park, S., Kwon, J. S., (2020), Numerical performance evaluation of an ultra-small Lapple cyclone separator, Journal of the Korean Society of Visualization, 18(3), 90-95.
- Wang, C., Ma, Y., Sui, W., (2023), The secondary flows in a cyclone separator: a review, Processes, 11(10), 2935.
- Yang, X., Yang, J., Wang, S., Zhao, Y., (2022), Effects of operational and geometrical parameters on velocity distribution and micron mineral powders classification in cyclone separators, Powder Technology, 407, 117609.
- Xiang, R., Park, S. H., Lee, K. W., (2001), Effects of cone dimension on cyclone performance, Journal of Aerosol Science, 32(4), 549-561.
- Elsayed, K., Lacor, C., (2011), The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance, Applied Mathematical Modelling, 35(4), 1952-1968.
- Safikhani, H., Akhavan-Behabadi, M. A., Shams, M., Rahimyan, M. H., (2010), Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators, Advanced Powder Technology, 21(4), 435-442.
- Griffiths, W. D., Boysan, F., (1996), Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers, Journal of Aerosol Science, 27(2), 281-304.

9. Chuah, T. G., Gim bun, J., Choong, T. S. Y., (2006), A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics, *Powder Technology*, 162(2), 126-132.
10. Wan, G., Sun, G., Xue, X., Shi, M., (2008), Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator, *Powder Technology*, 183(1), 94-104.
11. Sommerfeld, M., Ho, C. A., (2003), Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows, *Powder Technology*, 131(1), 1-6.
12. Bernardo, S., Mori, M., Peres, A. P., Dionisio, R. P., (2006), 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles, *Powder Technology*, 162(3), 190-200.
13. Zhao, B., Su, Y., Zhang, J., (2006), Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration, *Chemical Engineering Research and Design*, 84(12), 1158-1165.
14. Elsayed, K., Lacor, C., (2010), Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations, *Chemical Engineering Science*, 65(22), 6048-6058.
15. Morsi, S. A. J., Alexander, A. J., (1972), An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, *Journal of Fluid Mechanics*, 55(2), 193-208.
16. Khaleel, Faysal A., Al-Gburi, Fahad S., Ding, Yulong, Stafford, Jason, (2025), Modelling three-phase Taylor flows using a combined MPPIC-VoF approach, *International Journal of Multiphase Flow*, 184, 105117.
17. Haig, C. W., Hursthouse, A., Sykes, D., Mcilwain, S., (2016), The rapid development of small scale cyclones—numerical modelling versus empirical models, *Applied Mathematical Modelling*, 40(11-12), 6082-6104.
18. Moore, M. E., McFarland, A. R., (1996), Design methodology for multiple inlet cyclones, *Environmental Science & Technology*, 30(1), 271-276.
19. Youn, J.-S., Han, S., Yi, J.-S., Kang, D.-I., Jang, K.-W., Jung, Y.-W., Park, Y.-K., Jeon, K.-J., (2021), Development of pm10 and PM2.5 cyclones for small sampling ports at stationary sources: Numerical and experimental study, *Environmental Research*, 193, 110507.
20. Le, D. K., Yoon, J. Y., (2020), Numerical investigation on the performance and flow pattern of two novel innovative designs of four-inlet cyclone separator, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 150, 107867.



#### **Geonho Kim**

M.S. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is optimized design and performance analysis in application area of gas turbine.  
E-mail: 20247103@gs.cwnu.ac.kr



#### **Deokhyeong Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is optimized design and performance analysis in application area of gas turbine.  
E-mail: ejrgud28@changwon.ac.kr



#### **Sungbin Lee**

M.S. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is thermal fluid.  
E-mail: 20195070@gs.cwnu.ac.kr



#### **Heesung Park**

Professor in the Department of Industrial and Mechanical Engineering, Changwon National University. His research interest is thermos fluidic devices for sustainable energy systems.  
E-mail: heesungpark@changwon.ac.kr

# 다중 파장 분석을 통한 비침습적 알코올 농도 측정

## Multi-wavelength Optical Approach for Non-invasive Alcohol Detection

조예찬<sup>1</sup>, 박민석<sup>1</sup>, 정민석<sup>1</sup>, 전재훈<sup>1,2,#</sup>

Ye Chan Cho<sup>1</sup>, Min Seok Park<sup>1</sup>, Min Seok Jeong<sup>2</sup>, and Jae-Hoon Jun<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 건국대학교 의공학부 (Department of Biomedical Engineering, Konkuk University)

<sup>2</sup> 건국대학교 의공학실용기술 연구소 (Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University)

# Corresponding Author / E-mail: [jjun81@kku.ac.kr](mailto:jjun81@kku.ac.kr), TEL: +82-043-840-3515

ORCID: 0000-0002-7557-4039

KEYWORDS: Non-invasive sensing (비침습적 센싱), Alcohol concentration (알코올 농도), Multi-wavelength (다중파장), Measurement (측정)

*Alcohol acts as a central nervous system depressant and is classified as a psychoactive drug that impairs cognitive alertness and motor coordination. Driving after alcohol consumption slows reaction time in emergency situations and increases the risk of collisions. Although various technologies have been developed to measure alcohol concentration, many suffer from limitations such as sensitivity to environmental factors (e.g., temperature and humidity), hygiene concerns, and the need for periodic calibration. This study proposes an optical method for measuring alcohol concentration using near-infrared (NIR) spectroscopy. Statistical analyses were conducted across multiple wavelength regions to identify wavelengths with significant correlations to alcohol concentration. As a preliminary step, single alcohol solution samples were prepared using distilled water and ethanol. The optical properties of the samples were analyzed in the NIR wavelength range, and statistical indicators including the coefficient of determination ( $R^2$ ), p-value, and coefficient of variation (CV) were evaluated. The results identified specific wavelengths with statistical significance, and the application of mathematical modeling at these wavelengths enabled accurate estimation of alcohol concentration. This approach demonstrates the potential for non-invasive alcohol concentration measurement while minimizing hygiene and infection-related concerns for users.*

Manuscript received: August 29, 2025 / Revised: November 7, 2025 / Accepted: November 21, 2025  
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2025

### 1. 서론

알코올은 중추신경계를 억제하여 인지 기능, 반사 신경, 근육 협응 능력을 저하하는 물질 중 하나이다[1,2]. 또한 이에 따라 교통, 산업, 항공, 군사, 의료 등 다양한 분야에서 심각한 안전사고를 유발할 수 있다[3-11]. 실제로 음주로 인한 사고는 교통사고뿐만 아니라 산업재해, 작업장 부상, 의료사고 등 다수의 분야에서 높은 비중을 차지하며, 이는 인명 피해만 아니라 생산성 저하와 막대한 사회·경제적 손실로 이어진다. 따라서 특정 상황 이후의 사후 측정이 아닌, 위험 작업이나 운전, 기계 조작 전 단계에서 신속하고 정확한 비침습적인 알코올 측정 기술이 요구되어진다.

기존의 호기 측정, 공기 감지, 채혈 측정 기술은 위생 문제, 외부 요인 민감성, 즉시성 부족 등으로 인해 다양한 산업 환경에

적용하는 데 한계가 있다[12-14]. 또한 기존 알코올 농도 측정 연구도 정확성과 민감도가 외부 요인의 영향을 받거나, 주기적인 보정이나 교체가 필요한 등의 문제점들이 존재한다[15-18].

이에 본 연구는 근적외선(NIR) 파장 영역의 광학 측정 기법을 활용하여 생체에서 반사된 광신호를 분석함으로써 실시간·비침습·위생적인 알코올 측정 기술을 개발하고자 한다. 다중 통계 지표를 이용한 최적 파장 도출과 수학적 모델링을 통해 정확성과 신뢰성을 향상시키며, 이를 폭 넓게 다양한 산업 분야에 적용할 수 있는 기반 기술로 발전시키는 것을 목표로 한다. 본 연구에서는 NIR 파장 영역에서 정확도 높은 혈중알코올 농도 측정 기술을 개발하고자 하며, 다중 통계 지표를 활용한 최적 파장 선정 방법을 제안하여 측정의 정확성과 신뢰성을 향상시키고자 한다. 이를 통해 음주로 인하여 발생 가능한 사고를

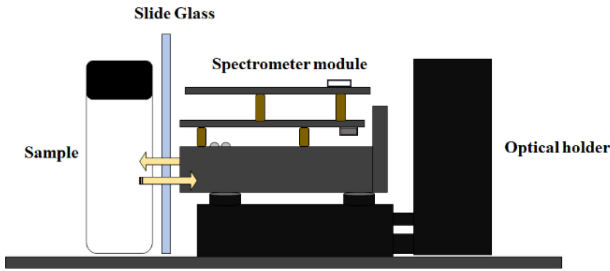


Fig. 1 Spectrometer setup schematic

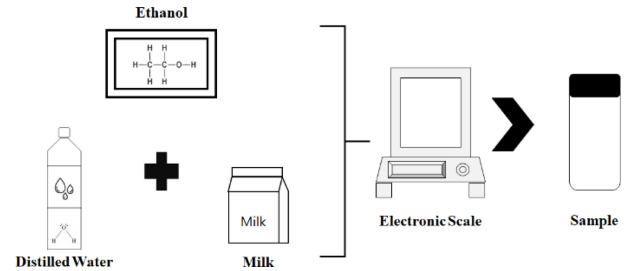


Fig. 2 Schematic diagram of the sample preparation method

사전 방지함으로써 사회적 피해를 감소시키고, 직접적인 혈중 알코올농도를 더 간편하고 정확성 높은 측정 기술에 적용하고자 한다.

## 2. 실험 셋업 및 방법

### 2.1 생체물질의 광학적 측정 원리

빛이 생체에 조사되면 생체 물질의 광학적 특성에 따라 흡수, 산란, 반사, 투과 등과 같은 광학 현상이 발생함. 이러한 광학 현상인 흡수, 산란, 반사, 투과 등에 의해 생체 조직에서의 빛 에너지 분포가 특정 지어지게 되며, 이 현상을 이용하면 질병진단, 압/중양 유무, 생체물질의 농도, 종류 등을 분석할 수 있다.

### 2.2 분광기 셋업

본 연구에서 수행된 비침습적 알코올 농도 측정을 위한 실험 구성도를 나타낸다. 측정 샘플의 움직임을 방지하기 위해 광학 테이블 위에 고정할 수 있도록 광학 홀더 및 기구를 사용하여 셋업을 설계하였다. 근적외선 분광기 모듈(DLP NIRscan Nano EVM, Texas Instruments, USA)의 윈도우는 측정 샘플의 중심에 위치하도록 배치하여, 연속 샘플링 중 발생할 수 있는 오류를 최소화하였다. 또한, 샘플과 분광기 모듈 윈도우에 흠집이 생기는 것을 방지하고, 모듈과 샘플 사이의 일정한 간격(1 mm)을 유지하기 위해 슬라이드 글라스(1 mm 두께)를 삽입하였다.

### 2.3 분광기 측정 과정

근적외선 분광기 모듈 내에서 측정샘플을 통과하는 빛의 에너지 전달 과정은 다음과 같다. 사용된 분광기 모듈은 900~1,700 nm 범위의 근적외선 파장대에서 동작한다. 광원은 두 개의 광대역 텅스텐 필라멘트 램프로 구성되어 있으며, 이 NIR 광원은 윈도우를 통해 샘플에 조사된다. 샘플에서 반사된 빛은 다시 윈도우를 통해 들어와 슬릿을 통과하고, 회절(Diffraction) 과정을 거치며 광 분산이 일어난다. 분산된 빛은 첫 번째 집광 렌즈(Collimating Lens)를 통해 평행광으로 변환되며, 이후 885 nm 파장통과필터(Wavepass Filter)를 통해 근적외선 이상의 빛만 통과시킨다. 통과된 빛은 회절 격자에 의해 파장에 따라 분산된다. 이 빛은 마이크로 미러에 반사된 후, 두 번째 집광 렌즈를 통과하여

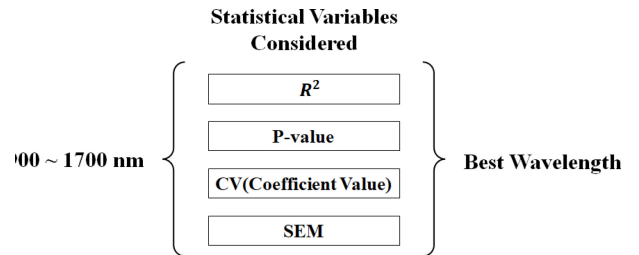


Fig. 3 Data processing schematic for optimal wavelength selection using statistical variables

InGaAs 검출기(Detector)에서 광학 신호로 감지된다. 이때 InGaAs 디텍터의 물리적 특성에 의해 최대 측정 가능한 파장은 약 1,700 nm 정도로 제한되며, 따라서 근적외선 영역의 광신호 값이 검출된다.

### 2.4 샘플 제작

알코올 농도 측정을 위해 제작된 샘플은 0%에서 40%까지 10% 간격으로 총 5개의 혼합 용액을 제조하였다. 각 측정 샘플은 에탄올과 증류수(Deionized Water)를 전자 저울을 사용하여 정밀하게 측정하면서 제작하였다. 또한, 생체조직은 높은 산란 특성을 가지고 있다. 생체 환경을 모사하기 위해 일반적으로 널리 쓰이는 산란체로써 우유를 첨가하여 샘플을 제작하였다[19-22].

## 3. 데이터 분석 방법

### 3.1 데이터 분석을 위한 특정 변수 및 파장 선정

NIR 파장 범위를 이용하여 비침습적으로 혈중 알코올 농도를 측정하기 위해 기초 연구로서 단일 에탄올 용액 샘플을 측정하여 파장에 따른 흡수도 변화(Wavelength vs. Abs)를 도출하였다. 근적외선 파장 영역에서 샘플의 알코올 농도를 도출하기 위해 적합한 특정 파장을 도출하기 위해 다양한 변수의 가중치를 부과하여 최적의 파장 순위를 도출한다.

분광분석에서 최적 파장 선정을 위해 네 가지 핵심 평가 지표를 활용하였다. 결정계수( $R^2$ )는 농도와 광 신호 간의 선형 관계를 나타내며, 1에 가까울수록 정확한 농도 예측이 가능하다. 유의확률(P-value)은 회귀 모델의 통계적 유의성을 검정하는

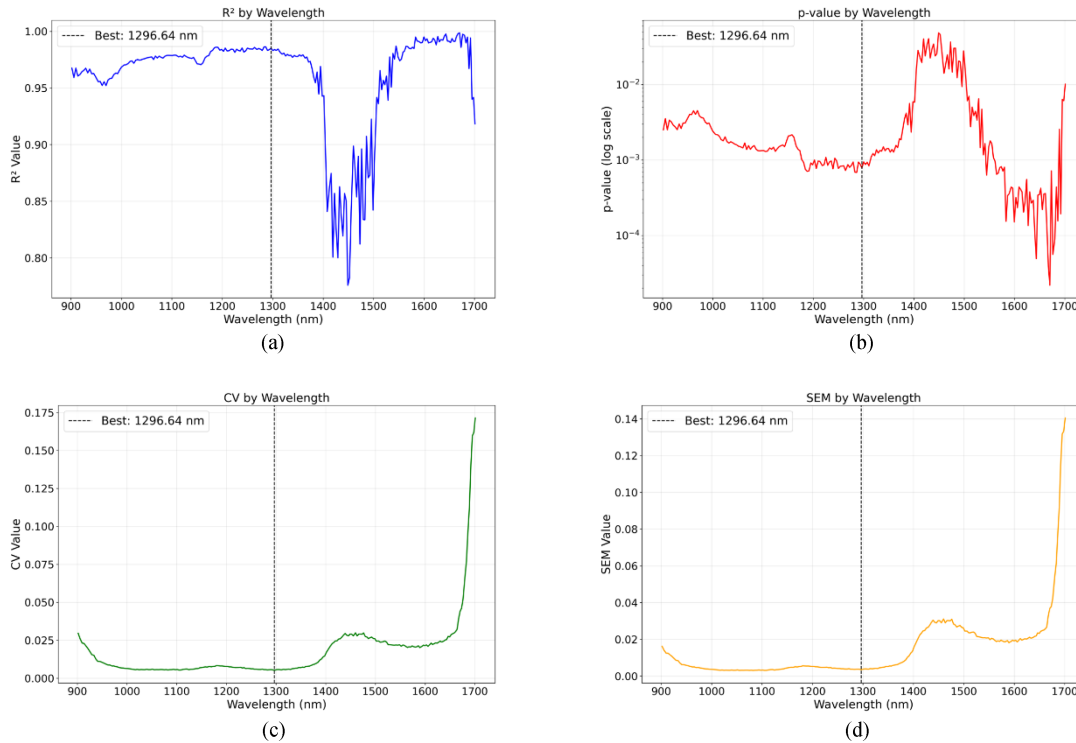


Fig. 4 Changes in statistical performance indicators with respect to wavelength and optimal wavelength selection: (a) R<sup>2</sup> values, (b) P-values, (c) Coefficient of variation (CV), and (d) Standard error of the mean (SEM)

지표로, 0.05 이하일 때 농도-광 신호 관계가 통계적으로 유의함을 의미한다. 변동계수(CV)는 측정값의 상대적 변동성을 나타내며, 낮을수록 측정 정밀도가 높아 동일 농도에서의 반복 측정 일관성을 보장한다. SEM은 표본평균의 표준오차로, 동일 농도에서 반복 측정된 데이터 평균의 신뢰성을 나타내는 지표이며, 값이 낮을수록 재현성이 우수함을 의미한다.

3.2 다중 파장 데이터 처리 및 통계 분석

본 연구에서는 알코올 농도별 흡수도 데이터의 정량적 분석을 위해 Python 기반의 데이터 처리 및 통계 분석을 수행하였다. 우선, 실험 데이터 파일을 농도별로 분류·수집한 뒤, 전처리 과정에서 무한대 값(inf)과 결측값(NaN)을 해당 농도의 평균값으로 대체하였다. 이후 각 파장에 대해 농도별 흡수도의 평균, 표준편차, CV, SEM을 산출하였다. 농도와 흡수도 간의 선형성을 검증하기 위해 선형 회귀 분석을 수행하였으며, 이로부터 결정계수(R<sup>2</sup>)와 유의확률(P-value)을 계산하였다.

최적 파장 선정은 네 가지 통계 지표(R<sup>2</sup>, P-value, CV, SEM)를 기반으로 종합 점수를 산출하여 수행하였다. 전체 파장 중 종합 점수가 가장 높은 파장을 1순위로 선정하고, 이후 상위 3개 파장을 우선순위로 선정하였다. R<sup>2</sup>은 농도 예측 정확성을 평가하는 핵심 지표이며, P-value는 통계적 유의성을, CV는 측정 정밀도를, SEM은 측정 재현성을 각각 반영하는 보완 지표로 활용하였다. 모든 평가지표는 비교 가능성을 확보하기 위해 0-1 범위로 정규화하여 적용하였다.

4. 결과 및 토론

본 연구에서는 알코올 농도별 광 신호 데이터(Absorbance)를 분석하여 통계적 변수를 통한 전체 파장에서의 값 변화 확인 및 다변수를 통한 종합평가를 통해 최적의 파장을 선정하고, 해당 파장에서의 분석 성능을 평가하였다.

파장별 성능 분석을 통해 특정 파장대의 특성을 파악하였다. Fig. 4(a)의 R<sup>2</sup> 분포를 통해 900-1,350 nm 구간에서는 R<sup>2</sup> 값이 0.95 이상으로 안정적으로 높은 성능을 보였으며, 1,550-1,700 nm 구간에서도 0.95-1.00의 매우 높은 설명력을 나타내었음을 확인할 수 있다. 반면, 1,350-1,550 nm 구간에서는 R<sup>2</sup> 값이 급격히 하락하여 0.77까지 모델 성능이 현저히 저하되는 것을 확인하였다.

Fig. 4(b)의 P-value 분포는 R<sup>2</sup> 경향과 유사하게 1350-1,550 nm 구간에서 유의성이 크게 감소하여 10<sup>-2</sup>수준까지 증가함을 보여 주었다. 측정 정밀도 측면에서 1,296.64 nm 파장은 CV 값이 0.004로 매우 낮아 높은 측정 정밀도를 보였으며, Fig. 4(c)의 CV 분포를 통해 1,600 nm 이후의 높은 파장대에서는 CV 값이 급격히 증가하여 측정 신뢰도가 크게 저하되는 것을 확인하였다. 또한, Fig. 4(d)의 SEM 분포는 1,296.64 nm에서 매우 낮은 값을 보여 안정적인 측정 재현성을 확인하였으나, 1,350 nm 이상 파장 영역에서는 안정성이 크게 저하되는 경향을 보였다.

Table 1에서는 해당 상위 3개 랭크 파장별로 결정계수(R<sup>2</sup>), P-value, CV, SEM 등의 통계 지표를 정량적으로 비교하여

Table 1 Statistical performance indicators by top wavelengths

Rank	1	2	3
Wavelength	1296.64	1282.67	1286.17
R <sup>2</sup>	0.9850	0.9862	0.9863
P-value	0.00078	0.00068	0.00068
CV	0.0052	0.0055	0.0056
SEM	0.0035	0.0037	0.0037

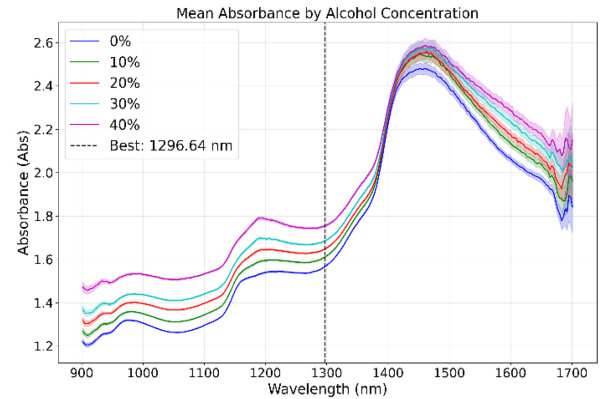
나타내었다. 상위 랭크 파장들의 통계적 성능 지표를 비교 분석한 결과, 1,296.64 nm 파장이 종합적으로 가장 우수한 성능을 보였다. 이 파장은 R<sup>2</sup> = 0.9850, P-value = 7.85 × 10<sup>-4</sup>, CV = 0.0052, SEM = 0.0035를 나타내어 높은 선형성과 통계적 유의성, 우수한 측정 정밀도 및 안정성을 종합적으로 보여주었다. 2위 1,282.67 nm (R<sup>2</sup>: 0.9862, P-value: 6.89 × 10<sup>-4</sup>, CV: 0.0055, SEM: 0.0037)과 3위 1,286.17 nm (R<sup>2</sup>: 0.9863, P-value: 6.85 × 10<sup>-4</sup>, CV: 0.0056, SEM: 0.0037) 파장도 유사한 수준의 높은 성능을 보였으나, 1,296.64 nm 파장이 종합점수 0.9788로 가장 우수한 값을 나타내었다.

결론적으로, 1,296.64 nm 파장은 알코올 농도 정량 분석을 위한 최적 파장으로 선정되었으며, 이 파장에서 높은 선형성(R<sup>2</sup> = 0.9850), 우수한 측정 정밀도(CV = 0.0052), 그리고 안정적인 측정 재현성(SEM = 0.0035)을 보여주었다.

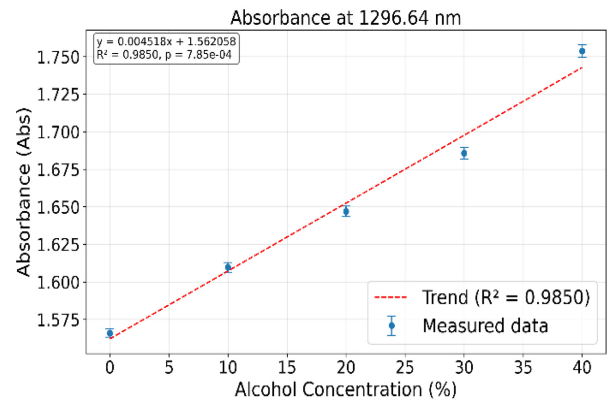
Table 1에서 나타난 바와 같이 1,296.64 nm 파장에서의 통계적 평가 결과는 R<sup>2</sup> = 0.9850, P-value = 0.0008, CV = 0.0052, SEM = 0.0035로, 각각 매우 우수한 선형성, 통계적 유의성, 측정 정밀도 및 재현성을 보였다. 따라서 1,296.64 nm 파장은 본 연구의 알코올 농도 정량 분석에 가장 적합한 최적 파장임을 알 수 있다.

전체 파장 범위(900–1,700 nm)에서 알코올 농도 증가에 따른 흡수도 증가의 선형적 관계를 확인하였다. Fig. 5(a)는 0%에서 40%까지의 다양한 알코올 농도에 따른 파장별 평균 흡수도 스펙트럼을 보여준다. 모든 농도에서 파장에 따른 흡수도 변화 패턴이 일관되게 나타났으며, 알코올 농도가 증가할수록 흡수도 값이 전반적으로 증가하여 농도별 스펙트럼이 명확하게 구분됨을 확인할 수 있다. 특히, 최적 파장으로 선정된 1,296.64 nm 지점에서는 농도별 흡수도가 더욱 명확하게 구분되며, 0%에서 40%까지의 농도 범위에서 흡수도 값이 약 1.57에서 약 1.76로 꾸준히 증가하는 선형적인 경향을 보였다.

Fig. 5(b)는 최적 파장(1,296.64 nm)에서의 알코올 농도와 흡수도 간의 관계 및 결정계수를 나타낸다. 이 파장에서의 R<sup>2</sup>는 0.9850으로 매우 높은 선형성을 나타내었으며, P-value는 7.85 × 10<sup>-4</sup>로 통계적으로 유의한 결과를 보였다. 최적 파장에서 도출된 1차 선형 회귀 방정식은  $y = 0.004518x + 1.562058$  이다. 파장별 성능 평가 결과, 1,296.64 nm가 최적 파장으로 선정되었다.



(a)



(b)

Fig. 5 Changes in optical signal with respect to wavelength: (a) Mean absorbance spectrum (0–40% alcohol concentration), (b) Absorbance-concentration relationship at 1,296.64 nm

## 5. 결론

본 연구는 광학 방법을 통한 알코올 농도 측정의 가능성을 탐색하기 위해 넓은 농도 범위에 걸쳐 광신호(Absorbance)의 변화를 측정하였다. 실제 알코올 측정 상황에 적용하기 위해서는 신호 안정성을 확보할 수 있는 효과적인 시동 버튼 디자인 등 구조적 개선, AI 기반 보정 알고리즘 등 환경 변수에 의한 오차를 줄일 수 있는 알고리즘적 개선을 통해 신호 안정성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서 도출된 최적의 파장은 다른 생체 조건(개인-인종 간 피부 두께, 색상, 수분함량 등)에서는 다른 결과가 나타날 수 있다. 따라서 개인별 생체 특성에 따른 변수를 고려하기 위해 다양한 생체조건에서의 광범위한 데이터 베이스 구축 및 유효성 검증을 위한 추가 연구가 요구되어진다. 또한, 법적 기준 농도 범위 내에서의 연구가 추가로 필요 되며, 따라서 향후 연구에서는 생체 관련 물질, 동물 실험, 인체 대상 실험 등을 통해 법적 알코올 농도 수준을 고려한 검증을 진행할 예정이다. 이후 제안된 연구가 동물 실험을 통해 검증된다면, 이는 인체의 혈중 알코올 농도 측정에 활용될 수 있으며, 음주운전 방지 시스템에 실질적으로 통합될 수 있을 것으로 기대되어진다.

## REFERENCES

1. Wolfe, M., Menon, A., Oto, M., Fullerton, N. E., Leach, J.-P., (2023), Alcohol and the central nervous system, *Practical Neurology*, 23(4), 273-285.
2. Mukherjee, S., (2013), Alcoholism and its effects on the central nervous system, *Current Neurovascular Research*, 10(3), 256-262.
3. Bragazzi, N. L., Dini, G., Toletone, A., Rahmani, A., Montecucco, A., Massa, E., Manca, A., Guglielmi, O., Garbarino, S., Debarbieri, N., (2018), Patterns of harmful alcohol consumption among truck drivers: Implications for occupational health and work safety from a systematic review and meta-analysis, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), 1121.
4. Ogden, E. J. D., Moskowitz, H., (2004), Effects of alcohol and other drugs on driver performance, *Traffic Injury Prevention*, 5(3), 185-198.
5. Bjornstig, U., Forsberg, R., (2016), Transportation disasters, In: Koenig and Schultz's disaster medicine: comprehensive principles and practices, Cambridge University Press.
6. Borrelli, I., Gualano, M. R., Rossi, M. F., Capitanelli, I., Dolgetta, V., Santoro, P. E., Moscato, U., (2023), Alcohol consumption in healthcare workers and risk of workplace injury: A case-control study, *Discover Sustainability*, 4(1), 22.
7. Sawicki, M., Szóstak, M., (2020), Impact of alcohol on occupational health and safety in the construction industry at workplaces with scaffolding, *Applied Sciences*, 10(19), 6690-6705.
8. Woodruff, S. I., Hurtado, S. L., Simon-Armdt, C. M., Lawrenz, J., (2018), An exploratory case study of environmental factors related to military alcohol misuse, *BMC Public Health*, 18(1), 902.
9. Thiebaud, P.-C., Martin, C., Naouri, D., Le Joncour, A., Truchot, J., Yordanov, Y., (2021), Alcohol consumption among french physicians: A cross-sectional study, *Drug and Alcohol Dependence*, 218, 108356.
10. Sendler, D. J., (2018), Physicians working under the influence of alcohol: An analysis of past disciplinary proceedings and their outcomes, *Forensic Science International*, 285, 29-37.
11. Afework, A., Tamene, A., Gashaw, M., (2025), Magnitude of self-reported non-fatal work-related injuries and associated factors among construction workers in Aleta Wondo, Sidama, Ethiopia, *Scientific Reports*, 15(1), 4339-4352.
12. Jones, A. W., (2019), Alcohol, its analysis in blood and breath for forensic purposes, impairment effects, and acute toxicity, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*, 1(6), e1353.
13. Jones, A. W., (2020), The analysis of ethanol in blood and breath for legal purposes: A historical review, In: *Alcohol, drugs, and impaired driving*, 1st Edition, CRC Press.
14. Lindberg, L., Jones, A. W., (2022), The advantages of standardizing exhaled breath-alcohol concentration to a reference respiratory gas—water vapor, *Journal of Breath Research*, 17(1), 014002.
15. Jalal, A. H., Alam, F., Roychoudhury, S., Umasankar, Y., Pala, N., Bhansali, S., (2018), Prospects and challenges of volatile organic compound sensors in human healthcare, *Acs Sensors*, 3(7), 1246-1263.
16. Cabarcos, P., Álvarez, I., Tabernero, M. J., Bermejo, A. M., (2015), Determination of direct alcohol markers: A review, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 407(17), 4907-4925.
17. Gamella, M., Campuzano, S., Manso, J., de Rivera, G. G., López-Colino, F., Reviejo, A., Pingarrón, J., (2014), A novel non-invasive electrochemical biosensing device for in situ determination of the alcohol content in blood by monitoring ethanol in sweat, *Analytica Chimica Acta*, 806, 1-7.
18. Kabir, A., (2018), Alcohol sensing through photonic crystal fiber at different temperature, *Optics and Photonics Journal*, 8(2), 45-52.
19. Albor-Ramírez, E., Reyes-Alberto, M., Vidal-Flores, L. M., Gutierrez-Herrera, E., Padilla-Castañeda, M. A., (2023), Agarose gel characterization for the fabrication of brain tissue phantoms for infrared multispectral vision systems, *Gels*, 9(12), 944.
20. Vaz, P. G., Humeau-Heurtier, A., Figueiras, E., Correia, C., Cardoso, J., (2018), Effect of static scatterers in laser speckle contrast imaging: An experimental study on correlation and contrast, *Physics in Medicine & Biology*, 63(1), 015024.
21. Nemati, M., Presura, C., Urbach, H., Bhattacharya, N., (2014), Dynamic light scattering from pulsatile flow in the presence of induced motion artifacts, *Biomedical Optics Express*, 5(7), 2145-2156.
22. Waterworth, M., Tarte, B., Joblin, A., Van Doorn, T., Niesler, H., (1995), Optical transmission properties of homogenised milk used as a phantom material in visible wavelength imaging, *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 18(1), 39-44.

**Ye Chan Cho**

Master's student in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interest is biomedical optics.  
E-mail: zhdnrk05@kku.ac.kr

**Min Seok Park**

Master's student in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interest is biomedical optics.  
E-mail: alstjr1693@kku.ac.kr

**Min Seok Jeong**

Undergraduate student in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University.  
E-mail: minseok1155@kku.ac.kr

**Jae-Hoon Jun**

Professor in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interest is biomedical optics.  
E-mail: jjun81@kku.ac.kr

# 웨어러블 센서 성능 저하 양상 및 신호 복원과 자가진단

## Signal Restoration and Self-assessment of Performance Degradation in Wearable Sensors

전주형<sup>1,\*</sup>, 윤가은<sup>1,\*</sup>, 프엉타오레<sup>2</sup>, 이중호<sup>1,3,#</sup>, 황태식<sup>4,#</sup>, 임근배<sup>1,2,#</sup>  
Juhyeong Jeon<sup>1,\*</sup>, Gaeun Yun<sup>1,\*</sup>, Phuong Thao Le<sup>2</sup>, Jungho Lee<sup>1,3,#</sup>, Tae Sik Hwang<sup>4,#</sup>, and Geunbae Lim<sup>1,2,#</sup>

1 POSTECH 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, POSTECH)

2 POSTECH 시스템생명공학부 (Division of Interdisciplinary Bioscience and Bioengineering, POSTECH)

3 충남대학교병원 (College of Medicine, Chungnam National University)

4 성균관대학교 삼성창원병원 응급의학과 (Department of Emergency Medicine, Sungkyunkwan University Samsung Changwon Hospital)

# Corresponding Author / E-mail: limmems@postech.ac.kr, TEL: +82-54-279-2913, ORCID: 0000-0002-7062-3575

# Corresponding Author / E-mail: emhwang1@hanmail.net, ORCID: 0000-0001-8662-7346

# Corresponding Author / E-mail: double.arc@postech.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3040-8800

KEYWORDS: Wearable sensor (웨어러블 센서), Signal restoration (신호 복원), Self-assessment (자가진단), Performance degradation (성능 저하)

*Wearable sensors are susceptible to degradation from physical wear, moisture, and desiccation, which can result in signal attenuation and unreliable data. This pilot study, conducted in a controlled single-participant setting, introduces a framework to quantify and characterize sensor degradation while restoring corrupted electromyography (EMG) signals. Four types of sensors—polyethylene terephthalate film, parylene film, 3M bioelectrode pads, and microneedle patches—were affixed to the left forearm in a three-electrode EMG configuration. Impedance at 100 Hz was monitored as an indicator of sensor aging, while a one-dimensional convolutional autoencoder was employed to reconstruct degraded EMG signals using a loss function that incorporated both time-domain and frequency-domain error terms. The reconstruction loss showed a correlation with impedance changes, providing a practical metric for assessing sensor health. These findings highlight the feasibility of real-time signal recovery and its potential to extend the lifespan of sensors.*

Manuscript received: September 1, 2025 / Accepted: November 20, 2025

This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2025

\*These authors contributed equally to this work.

### 1. Background

Wearable sensors are increasingly used in health monitoring, fitness tracking and environmental sensing. However, routine use exposes them to mechanical abrasion, desiccation, and perspiration, which accelerate performance degradation [1-3]. Such degradation reduces measurement accuracy and attenuates signals, potentially causing misinterpretation of physiological state and undermining clinical decision-making [4,5]. Recent advances in epidermal and stretchable EMG electrodes have enabled conformal and motion-

tolerant recording, yet these studies primarily focus on sensor design or short-term performance, rather than quantitatively tracking progressive degradation or restoring signals [6,7]. To mitigate these risks, we present a technique that simultaneously assesses sensor integrity and corrects signal distortion, thereby preserving data fidelity and extending device lifetime. Four representative electrodes were evaluated: a rigid polyethylene terephthalate (PET) OHP film, an ultrathin parylene film, a 3M commercial hydrogel pad, and a microneedle (MN) patch [6]. Electromyography (EMG) was recorded in a three-electrode

configuration, with working and counter electrodes on the inner forearm and a reference electrode on the wrist. Sensor aging was quantified by measuring skin-electrode impedance at 100 Hz, within the 20-500 Hz EMG band yet outside power-line harmonics [7]. Changes in signal-to-noise ratio (SNR) and spectral content were analyzed using visualization and Fast Fourier Transform (FFT). Unlike prior studies, this framework jointly tracks impedance, SNR, and spectral features under degradation across multiple wearable EMG sensors, while restoring degraded signals and providing a self-assessment metric for sensor health. This framework is designed to support reliable, long-term deployment of wearable sensor technology in both clinical and daily-life applications.

## 2. Research Objectives

This study aims to improve the reliability and lifetime of wearable EMG systems under degradation conditions, particularly when prolonged recording is demanded [8]. For this purpose, four specific goals were defined. The first objective is to quantify the performance degradation of four representative wearable EMG sensors—PET OHP film, 3M commercial bioelectrode pads, parylene film, and MN patches—by tracking impedance at 100 Hz throughout the degradation process [9]. Building on this analysis, the second objective is to characterize the distribution of SNR and degradation patterns across sensors, enabling investigation of sensor-specific aging mechanisms and evaluation of signal restoration feasibility. Third, a one-dimensional convolutional autoencoder model was employed to reconstruct degraded EMG signals [10,11]. Finally, the model's reconstruction loss was used as a lightweight, on-device metric for self-assessment of sensor condition [12-14]. This pilot study is confined to laboratory benchtop aging experiments and signal restoration. Future work will involve real-time embedded deployment and multi-participant validation.

## 3. Materials & Methods

Fig. 1 illustrates the four representative EMG electrode types prepared for this study. The MN patch is a rigid polymer and is composed of 10 by 10 array of conical needles, each 850  $\mu\text{m}$  in height. The entire surface was coated with a 100 nm-thick gold layer to ensure low-impedance signal acquisition [15]. A 600 nm-thick parylene-C membrane, coated with 100 nm of gold, was fabricated to yield a flexible, skin-conformal electrode [16]. A 100  $\mu\text{m}$ -thick commercial PET OHP film was cut and coated with

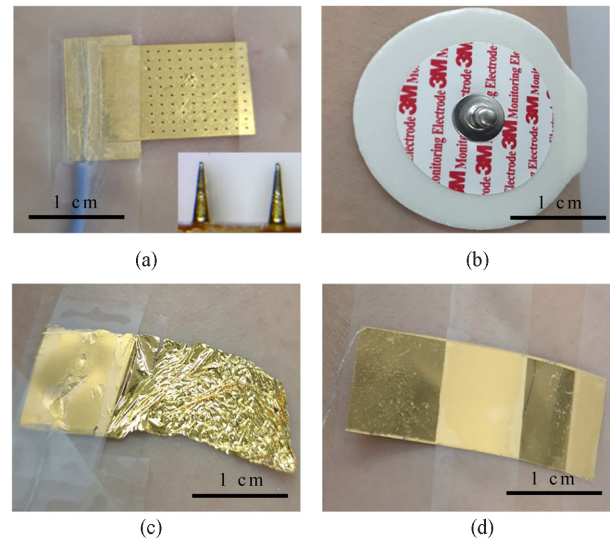
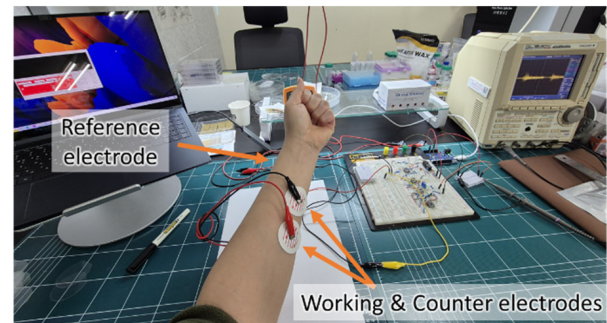
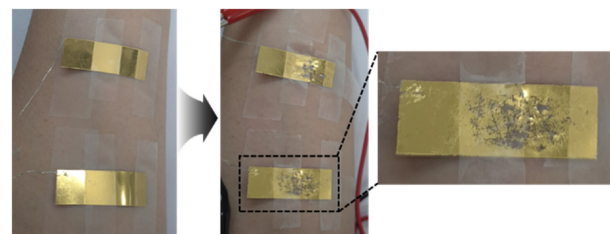


Fig. 1 Four wearable EMG sensors. (a) Microneedle patch comprising a  $10 \times 10$  array of 850  $\mu\text{m}$  tall needles, (b) 3 M commercial monitoring electrode, (c) 600 nm thick flexible parylene-C film, and (d) 100  $\mu\text{m}$  thick rigid PET OHP film electrode



(a) Three-electrode configuration and acquisition system



(b) Intentionally induced sensor degradation

Fig. 2 Experimental setup for degradation testing and EMG acquisition. (a) Three-electrode configuration: working and counter electrodes placed 5 cm apart on the forearm, reference electrode on the wrist, (b) Demonstration of intentional sensor degradation process

gold, producing a rigid electrode. 3M commercial hydrogel bioelectrode pads were used without modification and served as both test electrodes (as working and counter positions) and as the constant reference electrode throughout all trials.

Table 1 The Structure of the 1-D convolutional autoencoder

Stage	Layer	Output shape
Input		$1,000 \times 1$
Encoder	Conv1D (16 filters, kernel = 3, ReLU)	$1,000 \times 16$
	MaxPooling1D	$500 \times 16$
	Conv1D (8 filters, kernel = 3, ReLU)	$500 \times 8$
Decoder	MaxPooling1D	$250 \times 8$
	Conv1D (8 filters, kernel = 3, ReLU)	$250 \times 8$
	UpSampling1D	$500 \times 8$
	Conv1D (16 filters, kernel = 3, ReLU)	$500 \times 16$
	UpSampling1D	$1,000 \times 16$
Output	Conv1D (1 filter, kernel = 3, sigmoid)	$1,000 \times 1$

After fabrication and preparation, a three-electrode layout was adopted. The working and counter electrodes were affixed to the ventral forearm, 5 cm apart for optimal measurement, while the reference electrode was placed on the outer wrist [17]. Each sensor type was tested sequentially on the same location, with the surface cleansed with phosphate-buffered saline and water, followed by rest time to minimize variability.

Electrodes were connected to an EMG signal acquisition breadboard. The output was monitored using a Yokogawa DL1540C oscilloscope and digitized via an Arduino Leonardo with a sampling rate of 1 kHz. Data were streamed via Arduino IDE and processed using a Python script. From each 40-second recording, the central 30 seconds were extracted for analysis to avoid motion artifacts. The subject was instructed to maintain a constant voluntary contraction to produce repeatable EMG bursts of moderate amplitude.

To emulate realistic sensor degradation, each sensor was exposed to a combination of mechanical and environmental stressors, including desiccation, bending, rear-side abrasion, PBS infusion, and mild heating. Sensor aging is quantified with the impedance measurement at the skin-electrode interface. For each degradation level, a corresponding EMG signal was recorded. Since most surface EMG signal energy lies within the 10-250 Hz range, and amplifier bandwidths are typically specified at 10-500 Hz, a minimum sampling rate of 1 kHz was used to prevent information loss in accordance with the Nyquist criterion [18]. Skin-electrode impedance was recorded at 100 Hz using a Keysight U1773C LCR meter, as this frequency lies within the EMG passband while avoiding power-line harmonics [5].

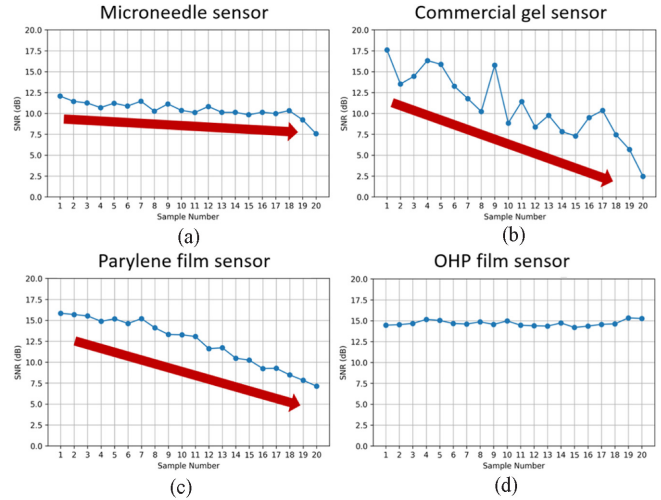


Fig. 3 SNR versus sample number for (a) microneedle, (b) commercial gel, (c) parylene film and (d) PET OHP film sensors. Red arrows indicate overall decaying trend

Raw EMG traces were segmented into 1-second windows, zero-mean normalized, and input into a one-dimensional convolutional autoencoder (1-D CAE) developed using Keras. The model was trained to reconstruct 1-second EMG segments using a composite loss function combining time-domain mean squared error and frequency-domain spectral error. The architecture is summarized in Table 1. The network was trained on segmented signals from the first fifteen high-quality MN recordings and subsequently applied to severely degraded samples for signal restoration.

### 4. Results

As shown in Fig. 3, SNR is plotted against sample number, with samples arranged in order of increasing impedance for each sensor group. The impedance ranges (in kΩ) for the MN, commercial gel, parylene film, and PET OHP film electrodes were 2.64-73.92, 46.04-209, 36.71-156.23, and 19.72-74.08, respectively. The MN, commercial gel, and parylene sensors exhibited a clear monotonic decrease in SNR with increasing impedance. In contrast, the PET OHP electrode maintained a nearly constant SNR despite progressive impedance changes, indicating a weak correlation between interface degradation and signal quality. Fig. 4 compares the MN patch in its pristine state (Sample 1) with a severely degraded state (Sample 20). Visual inspection reveals delamination of the gold layer, surface cracks, and uneven surface. The corresponding raw EMG trace shows a rise in baseline noise, occasional dropout spikes and a reduced peak-to-peak muscle activity.

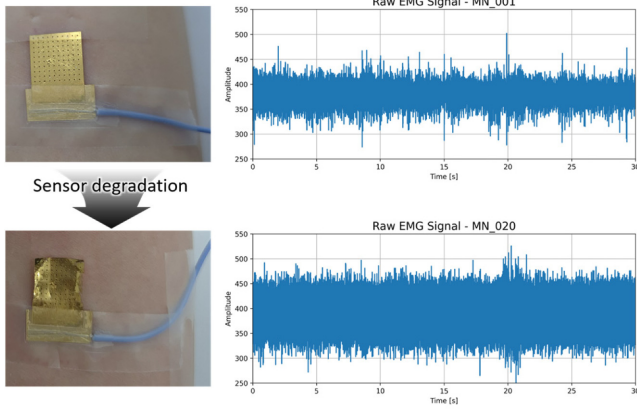


Fig. 4 Microneedle sensor before (top) and after (bottom) degradation, paired with 30 seconds raw EMG signals. Note surface deformation and elevated baseline noise

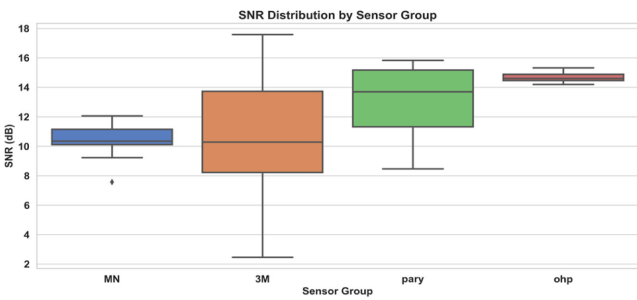


Fig. 5 Boxplot of SNR distribution by sensor groups (n = 20)

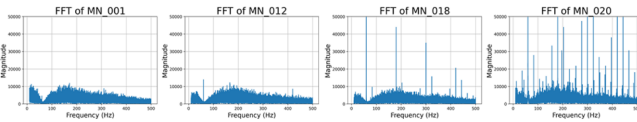


Fig. 6 FFT magnitude spectra of MN recordings, illustrating gradual noise growth and harmonic spikes

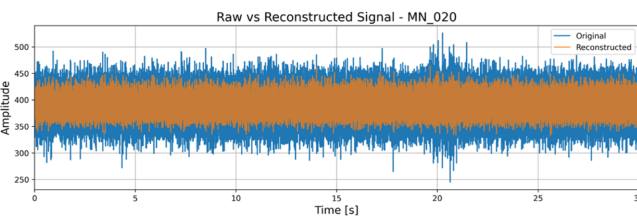


Fig. 7 Time-domain overlay of raw (blue) and autoencoder reconstructed (orange) EMG for degraded MN EMG signal of sample 20. Denoising visibly suppresses baseline noise

Fig. 5 presents a boxplot summarizing 20 recordings for each sensor type. Median SNR values were MN = 10 dB, commercial gel = 10 dB with the widest interquartile range, parylene = 14 dB, and PET OHP = 15 dB. The FFT spectra of four MN samples in Fig. 6 illustrate a progressive increase in broadband noise and the emergence of narrow harmonics with sensor aging. Fig. 7 overlays

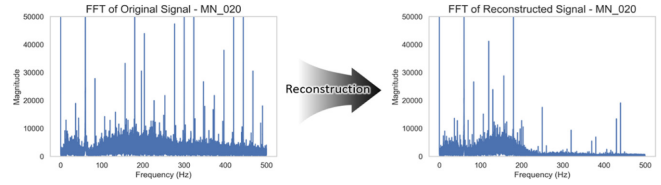


Fig. 8 FFT comparison of the same signal pair. Reconstruction attenuates harmonic noise peaks, while preserving low-frequency muscle energy

the raw and reconstructed EMG signals for a degraded MN sample. Baseline noise is suppressed, while the peak-to-peak amplitude of muscle bursts is preserved. Fig. 8 summarizes the corresponding frequency-domain effects. The model successfully attenuated sharp harmonics introduced during sensor degradation while retaining the primary content of the EMG signal.

### 5. Discussion

The result reveals a strong relationship between skin-electrode impedance at 100 Hz and EMG signal quality. A strong negative correlation between impedance and SNR for the MN, commercial gel, and parylene electrodes confirms impedance as a reliable, sensor agnostic metric of degradation. In contrast, the absence of correlation in the rigid OHP electrodes suggests substrate stiffness can mask electrical deterioration, rendering impedance tracking invalid for degradation monitoring in such devices. Beyond this overall trend, failure modes varied by sensor type. Hydrogel desiccation dominated the degradation process in commercial gel pads, causing rapid impedance increases and a wide spread in SNR values [19]. In parylene films, mechanical wear led to progressive degradation, resulting in a steady decline in SNR. MN patches benefited from partial tissue penetration, which helped stabilize the contact and delayed catastrophic failure [15]. Notably, the flexible parylene membrane maintained the highest median SNR, suggesting that conformal contact mitigates noises until severe surface wear occurs. The 1-D CAE restored SNR and suppressed baseline noise without introducing spectral distortion. Because the model tracks reconstruction loss during forward propagation, it enables a lightweight algorithm to both assess and correct signal degradation.

### 6. Conclusion

Real-time impedance monitoring, coupled with embedded denoising via 1-D CAE, can extend the useful lifetime of wearable sensors, reduce recalibration frequency, and lower both

consumable costs and clinic visits in long-term applications such as prosthetic control or rehabilitation feedback. This pilot study involved a single participant, and larger cohorts are required to confirm the generalizability. Further analysis of degradation patterns in relation to film material properties and thickness will be addressed in future work. These findings can guide the design of durable wearable EMG systems for clinical rehabilitation and long-term home monitoring. Moreover, the proposed framework has potential applications in biosensing fields, such as extending attachment times and improving signal stability in EMG-based muscle fatigue studies, and reducing EMG signal contamination and solving wet-electrode issues in brain-computer interfaces studies, ultimately enhancing the reliability of long-duration recordings [20,21].

## ACKNOWLEDGEMENT

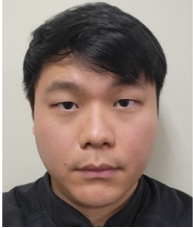
This study was supported by a faculty research grant of Yonsei University College of Medicine (No. 6-2023-0087) and by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. RS-2024-00452785).

## REFERENCES

1. Ates, H. C., Nguyen, P. Q., Gonzalez-Macia, L., Morales-Narváez, E., Güder, F., Collins, J. J., Dincer, C., (2022), End-to-end design of wearable sensors, *Nature Reviews Materials*, 7(11), 887-907.
2. Heikenfeld, J., Jajack, A., Rogers, J., Gutruf, P., Tian, L., Pan, T., Li, R., Khine, M., Kim, J., Wang, J., Kim, J., (2018), Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects, *Lab on a Chip*, 18(2), 217-248.
3. Bariya, M., Nyein, H. Y. Y., Javey, A., (2018), Wearable sweat sensors, *Nature Electronics*, 1(3), 160-171.
4. van Melzen, R., Haveman, M. E., Schuurmann, R. C., van Amsterdam, K., El Moumni, M., Tabak, M., Struys, M. M., de Vries, J.-P. P., (2024), Validity and reliability of wearable sensors for continuous postoperative vital signs monitoring in patients recovering from trauma surgery, *Sensors*, 24(19), 6379.
5. McManus, L., De Vito, G., Lowery, M. M., (2020), Analysis and biophysics of surface EMG for physiotherapists and kinesiologists: Toward a common language with rehabilitation engineers, *Frontiers in Neurology*, 11, 576729.
6. Kim, D.-H., Lu, N., Ma, R., Kim, Y.-S., Kim, R.-H., Wang, S., Wu, J., Won, S. M., Tao, H., Islam, A., (2011), Epidermal electronics, *Science*, 333(6044), 838-843.
7. Yang, S., Cheng, J., Shang, J., Hang, C., Qi, J., Zhong, L., Rao, Q., He, L., Liu, C., Ding, L., (2023), Stretchable surface electromyography electrode array patch for tendon location and muscle injury prevention, *Nature Communications*, 14(1), 6494.
8. Searle, A., Kirkup, L., (2000), A direct comparison of wet, dry and insulating bioelectric recording electrodes, *Physiological Measurement*, 21(2), 271-283.
9. Goyal, K., Borkholder, D. A., Day, S. W., (2022), Dependence of skin-electrode contact impedance on material and skin hydration, *Sensors*, 22(21), 8510.
10. Zou, Y., Cheng, L., Han, L., (2023), Reconstruction of incomplete surface electromyography based on an adversarial autoencoder network, *Biomedical Signal Processing and Control*, 86, 105084.
11. Dinashi, K., Ameri, A., Akhaee, M. A., Englehart, K., Scheme, E., (2022), Compression of EMG signals using deep convolutional autoencoders, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 26(7), 2888-2897.
12. Vincent, P., Larochelle, H., Lajoie, I., Bengio, Y., Manzagol, P.-A., Bottou, L., (2010), Stacked denoising autoencoders: Learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion, *Journal of Machine Learning Research*, 11(110), 3371-3408.
13. Malhotra, P., Ramakrishnan, A., Anand, G., Vig, L., Agarwal, P., Shroff, G., (2016), Lstm-based encoder-decoder for multi-sensor anomaly detection, *arXiv preprint arXiv:1607.00148*.
14. Wu, D., Chen, D., Yu, G., (2024), New health indicator construction and fault detection network for rolling bearings via convolutional auto-encoder and contrast learning, *Machines*, 12(6), 362.
15. Tang, X., Dong, Y., Li, Q., Liu, Z., Yan, N., Li, Y., Liu, B., Jiang, L., Song, R., Wang, Y., (2023), Using microneedle array electrodes for non-invasive electrophysiological signal acquisition and sensory feedback evoking, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1238210.
16. Peng, H.-L., Liu, J.-Q., Dong, Y.-Z., Yang, B., Chen, X., Yang, C.-S., (2016), Parylene-based flexible dry electrode for biopotential recording, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, 1-11.
17. Hermens, H. J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., Rau, G., (2000), Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10(5), 361-374.
18. Konrad, P., (2005), *The ABC of EMG: A practical introduction to kinesiological electromyography (Version 1.0)*, Noraxon U.S.A., Inc.
19. Sousa, A. S., Noites, A., Vilarinho, R., Santos, R., (2023), Long-term electrode-skin impedance variation for electromyographic measurements, *Sensors*, 23(20), 8582.
20. Nam, D., Park, K., (2022), Assessment of muscle fatigue using emg under long duration and high intensity fatigue condition,

Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(6), 433-441.

21. Lee, S., Jang, Y., Lee, H., Tae, K., (2024), Development of an EEG-based gait recognition classification CNN-BiLSTM model for brain-computer interfaces (BCI), Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 41(6), 481-488.



**Juhyeong Jeon**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, POSTECH. His research interest is precision engineering.  
E-mail: jjeon@postech.ac.kr



**Gaeun Yun**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, POSTECH. Her research interest is precision engineering.  
E-mail: gaeunyun@postech.ac.kr



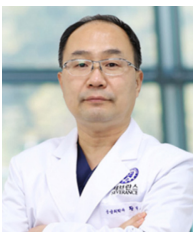
**Phuong Thao Le**

Ph.D. candidate in the Division of Interdisciplinary Bioscience and Bioengineering, POSTECH. Her research interest is biotechnology and bioengineering.  
E-mail: thaolp197@postech.ac.kr



**Jungho Lee**

Affiliate Professor in the Department of Mechanical Engineering, POSTECH. His research interest is biomedical engineering.  
E-mail: double.arc@postech.ac.kr



**Tae Sik Hwang**

Professor in the Department of Emergency Medicine, Sungkyunkwan University Samsung Changwon Hospital. His research interest is biotechnology.  
E-mail: emhwang1@hanmail.net



**Geunbae Lim**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, POSTECH. His research interest is nano and bio-MEMS.  
E-mail: limmems@postech.ac.kr

# 온도 및 체류 시간 제어를 통한 메탄 열분해 수소 및 탄소 생성물 특성 연구

## Hydrogen and Carbon Production via Methane Thermal Decomposition: Effects of Temperature and Residence Time

이문희<sup>1</sup>, 이상지<sup>2</sup>, 김지엽<sup>1</sup>, 주승엽<sup>3</sup>, 김륜근<sup>3</sup>, 남형석<sup>3</sup>, 홍정구<sup>3,#</sup>  
Mun Hee Lee<sup>1</sup>, Sang Ji Lee<sup>2</sup>, Ji Yeop Kim<sup>1</sup>, Seung Yeop Joo<sup>3</sup>, Ryun Geun Kim<sup>3</sup>, Hyungseok Nam<sup>3</sup>, and Jung Goo Hong<sup>3,#</sup>

<sup>1</sup> 경북대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyungpook National University)  
<sup>2</sup> 고등기술연구원 에너지환경 IT융합그룹 (Department of Energy Environment IT Convergence Group, Institute for Advanced Engineering)  
<sup>3</sup> 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)  
# Corresponding Author / E-mail: [jghong70@knu.ac.kr](mailto:jghong70@knu.ac.kr); TEL: +82-53-950-6570  
ORCID: 0000-0002-1286-5728

KEYWORDS: Methane thermal decomposition (메탄 열분해), Hydrogen (수소), Residence time (체류 시간), Conversion rate (전환율), Carbon products (탄소 생성물)

*Methane thermal decomposition is a promising technology for producing CO<sub>2</sub>-free hydrogen. This study experimentally examines how temperature (1,000–1,400°C) and residence time affect methane decomposition in a ceramic tubular reactor. The results show that both the methane conversion rate and hydrogen yield increased with temperature, reaching approximately 95% and 45%, respectively, at 1,400°C. At lower temperatures (1,000–1,200°C), residence time had a significant impact, while at higher temperatures (1,300–1,400°C), temperature became the predominant factor. Additionally, the formation of C<sub>2</sub> hydrocarbons, particularly acetylene (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), increased as residence time decreased, negatively affecting both methane conversion and hydrogen yield. Analysis of the solid carbon by-products identified two distinct forms: amorphous, spherical carbon black particles and a semi-graphitic, crystalline carbon film. These findings provide essential data for optimizing the conditions of methane thermal decomposition.*

Manuscript received: September 5, 2025 / Revised: November 3, 2025 / Accepted: December 3, 2025

### 1. 서론

전 세계적으로 기후변화에 대한 위기의식이 고조되고 있으며, 에너지 전환이 국가적, 산업적으로 가속화되고 있다[1]. 국제에너지기구(IEA), 유럽연합(EU), 한국 등 주요 국가에서는 이산화탄소 배출량을 0이 되도록 하는 Net-zero 목표를 제시하고 있으며, 이에 따라서 기존의 화석연료 기반의 체계에서 새로운 에너지 체계로의 전환이 요구되고 있다[2]. 이 과정에서 수소는 기존의 화석연료를 대체 가능하며, 탈탄소 산업공정으로의 전환, 에너지 저장과 운송 등을 만족할 수 있는 차세대 에너지원으로 각광받고 있다[3].

현재 수소를 생산하는 방법에는 전기를 이용한 수전해, 화석

연료 개질, 열화학적 분해 등이 있으며, 생산하는 방법, 탄소 배출에 따라 회색, 블루, 그린, 청록수소로 나뉘게 된다[4]. 세계에너지회의에서 발표한 자료에 의하면 수소 생산의 96%가 화석연료의 개질을 통해 얻어지는 회색 수소이며, 단 4%만이 수전해를 통해 얻어지는 그린 수소이다[5]. 화석연료의 개질을 통해 얻어지는 회색 수소는 이산화탄소를 배출하기 때문에 장기적으로 활용하기 어렵다는 단점을 가지고 있다[4,5]. 이와 달리 그린 수소는 이산화탄소를 배출하지 않지만, 생산 단가가 높기 때문에 대량의 수소를 생산하기 어렵다는 단점을 가지고 있다[6].

이러한 단점을 보완할 수 있는 기술로서, 메탄 열분해 기술이 각광받고 있다[7]. 메탄 열분해 기술은 고온의 반응기에서 메탄을 분해하여 고체 탄소와 수소로 분해되므로, 이산화탄소를

배출하지 않는다. 고체 탄소는 타이어, 잉크, 전도성 소재 및 촉매 지지체 등에 활용될 수 있기 때문에 공정과정에서 경제성을 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있다[8]. 또한 다른 수소 생산 기술에 비해 수소 에너지 소비 측면에서 장점을 가지고 있다[7,9].

그러나 메탄 열분해는 1,000°C 이상의 고온에서 반응이 시작되며, 고체 탄소로 인한 반응기의 막힘(Clogging)으로 연속적인 운전이 힘들다는 단점을 가지고 있다[10]. 이러한 단점을 해결하기 위해서 금속 촉매를 사용한 메탄 열분해, 유동층 반응기, 용융 금속을 사용한 열분해 등 다양한 연구가 진행되고 있다[11].

A. Abanades 등은 다공성 반응기 및 반응기 재질에 대한 연구를 수행하였으며, 반응기의 재질은 메탄 전환율에 영향을 미치지 않는다고 하였다. 또한 다공성 반응기에서도 탄소의 침착을 방지하지 못한다고 하였다[12]. Lee 등은 반응 온도에 따른 영향을 확인하였으며, 고온에서 수소의 선택도는 증가하지만, 고체 탄소로 인한 반응기 막힘으로 인해 지속시간이 짧아진다고 하였다. 또한 고온에서 메탄 열분해 반응이 모두 수소로 변환되는 것이 아닌 기타 탄화수소 계열로 전환되는 부반응이 동반된다고 하였다[13]. Tsegay Gebrekidan Gebreyohannes 등은 수치해석 기법을 활용하여 메탄 열분해 연구를 수행하였으며, 압력이 증가하면 기타 탄화수소의 탈수소화(Dehydrogenation) 반응이 억제되어 메탄 전환율이 감소한다고 하였다. 또한 온도와 압력이 전환율과 수율에 핵심적인 역할을 한다고 하였다[14]. 그러나 기존 연구들은 수치해석 기법을 활용하거나, 주로 반응기의 구조적 특성이나 단일 변수(온도, 압력)에 초점을 맞추었으며, C<sub>2</sub> 탄화수소 생성이 전환율 및 수소 수율에 미치는 영향에 대해서는 충분히 규명하지 않았다.

본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 관형 반응기에서 반응 온도 및 체류 시간에 대한 C<sub>2</sub> 탄화수소의 생성 거동과 메탄 전환율, 수소 수율간의 상관관계를 실험적으로 확인하고자 한다.

또한, 메탄 열분해 과정에서 생성된 탄소 생성물(Carbon Products)인 카본 블랙(Carbon Black), 카본 필름(Carbon Film)에 대한 성상 및 결정성을 확인하고자 한다. 이는 향후에 메탄 열분해에 공정 설계 및 촉매를 사용한 열분해에 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 메탄 열분해의 실험장치도를 나타낸다. 실험장치는 크게 유체 공급부, 반응부, 계측부로 나뉘어진다. 유체 공급부에서는 질량 유량 조절기(Mass Flow Controller, MFC)를 이용하여 메탄, 질소 가스를 공급하였으며, 반응기 전단에서 혼합된 후 반응기로 공급되었다. 반응부에서는 반응기와 가열장치로 구성되었으며, 반응기는 세라믹 재질로, 내경은 27 mm이며 길이는 1,000 mm이다. 가열장치는 최대 1,500°C까지 승온할 수 있는

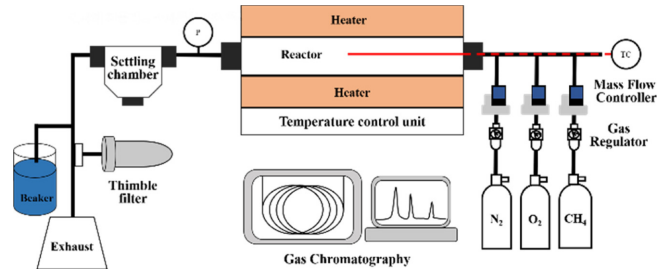


Fig. 1 Schematic diagram of methane thermal decomposition experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Case	Temperature [°C]	CH <sub>4</sub> flowrate [LPM]	N <sub>2</sub> flowrate [LPM]
Case 1		1	1
Case 2	1,000-1,400	2	2
Case 3		3	3

전기 가열로를 사용하였다.

반응기는 전기 가열로에서 고온으로 유지되며, 반응기 중단에 있는 R-type 열전대(R-type Thermocouple)를 사용해서 온도를 확인하였다. 마지막으로 계측부에서는 메탄 열분해 반응으로부터 생성된 탄소 생성물을 포집하기 위해 세틀링 챔버(Settling Chamber)를 사용하였다. 포집된 탄소는 이후 결정구조를 확인하기 위해 X선 회절 분석(X-ray Diffraction Method, XRD)와 탄소의 형태를 확인하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)로 분석하였다. 열분해로부터 생성된 가스는 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC)를 사용하여 분석하였으며, GC에서 분석하기 전에 세틀링 챔버에서 걸러지지 않은 탄소 생성물을 한 번 더 걸러주기 위해 티블 필터(Thimble Filter)를 사용하였다. GC는 열전도도 검출기(Thermal Conductivity Detector, TCD)를 사용하여 수소, 메탄, 질소의 농도를 확인하였으며, 불꽃 이온화 검출기(Flame Ionization Detector, FID)를 사용하여 C<sub>2</sub> 탄화수소를 확인하였다.

### 2.2 실험 조건 및 실험 방법

Table 1은 메탄 열분해에서 온도 및 체류 시간에 대한 영향을 확인하기 위한 실험조건을 나타낸다. 실험에서 설정한 온도는 1,000-1,400°C이다. 반응기에서 공급되는 질소, 메탄의 분율(Fraction)을 고정한 채, Case에 따라 유량을 1-3 L까지 조정하면서 체류 시간에 따른 영향을 확인하였다. 반응기 내에서 유량이 증가함에 따라 체류 시간이 감소하며, 이는 반응기에서 메탄이 반응하는 시간에 영향을 미치기 때문에 변수 조건으로 설정하였다.

반응기에 질소로 퍼지(Purge)하면서 설정한 온도까지 승온시켰다. 이후 설정한 온도에 도달하면 메탄과 질소를 설정한 유량만큼 공급하였다. 메탄 열분해 반응으로 생성된 가스는 GC를

이용해서 실시간으로 분석하였으며, 실험 결과는 총 실험 시간 동안의 값을 평균한 값이다. 또한 반응기 후단의 압력계 및 비커를 통해서 탄소 생성물에 의한 막힘을 확인하였다. 압력계를 통하여 1차적으로 반응기 후단 및 배관의 막힘을 확인하였으며, 비커에서 기포가 발생하지 않으면 반응기가 완전히 막혔다고 판단하였다.

GC를 통해 측정한 데이터를 가지고 다음의 수식을 이용해서 메탄 전환율, 수소 및 C<sub>2</sub> 탄화수소의 수율을 분석하였다. 식(1)은 메탄 전환율을 나타내며, F<sub>CH<sub>4</sub>, in</sub>와 F<sub>CH<sub>4</sub>, out</sub>는 반응 전후의 메탄의 유량을 의미한다. 식(2)와 식(3)은 수소 및 C<sub>2</sub> 탄화수소의 수율을 나타낸 식으로, 공급된 메탄 대비 생성된 수소, 탄화수소 비로 계산되었다.

$$X_{CH_4} = \left( 1 - \frac{F_{CH_4,out}}{F_{CH_4,in}} \right) \times 100 \tag{1}$$

$$Y_{H_2} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{F_{CH_2,out}}{F_{CH_4,in}} \right) \times 100 \tag{2}$$

$$Y_{C_2} = 2 \times \left( \frac{F_{C_2,out}}{F_{CH_4,in}} \right) \times 100 \tag{3}$$

### 3. 실험 결과

#### 3.1 메탄 전환율 및 수소 수율

Fig. 2는 온도 및 Case에 따른 메탄 전환율을 나타낸다. 모든 조건에서 온도가 증가함에 따라 메탄 전환율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 메탄 열분해 반응이 흡열 반응이므로, 고온에서 열분해 반응이 활발하게 일어나며, 반응속도가 증가하기 때문이다.

유량 변화에 따른 메탄 전환율의 차이를 확인하면, 공급 유량이 증가함에 따라 메탄 전환율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 공급 유량이 증가함에 따라 체류 시간이 감소하여 반응이 충분히 일어나지 못하기 때문에 메탄 전환율이 낮아진다. 또한, 반응 온도가 1,000-1,200°C에서는 체류 시간에 대한 영향이 큰 것을 확인할 수 있으며, 1,300-1,400°C에서는 반응 온도에 따른 영향이 지배적이며, 체류 시간에 대한 영향은 적은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3는 수소 수율을 나타낸 그래프로서, 앞선 메탄 전환율 결과와 유사하게 반응 온도가 증가함에 따라 수소 수율도 증가한다. 또한 동일한 온도에서 체류 시간이 길수록 수소 수율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 본 실험의 최고 온도에서 메탄 전환율은 약 94-95%로 확인되었으며, 이 때의 수소 수율은 약 44-45%로 나타내었다. 전환율과 수율만을 기준으로 평가했을 때, 이는 다른 기술에 비해 높은 수준을 나타낸다[11].

또한 메탄 전환율, 수소 수율 그래프를 통해 Lee 등의 연구에서와 동일하게 메탄이 모두 수소로 변환되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 이를 확인하고자 C<sub>2</sub> 탄화수소의 수율을 확인하였다[13].

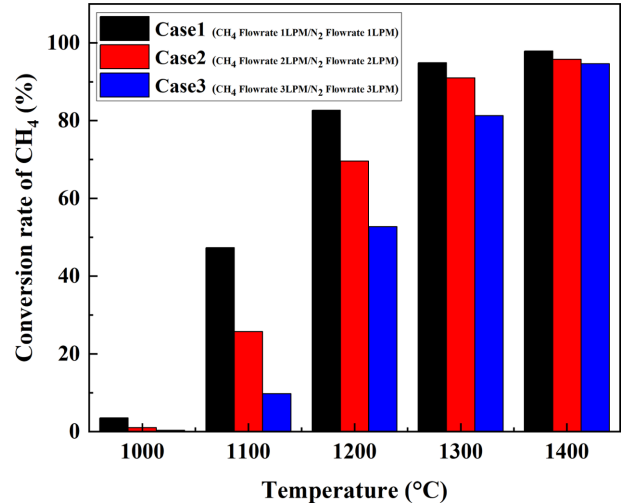


Fig. 2 Conversion rate of CH<sub>4</sub> to temperature & case

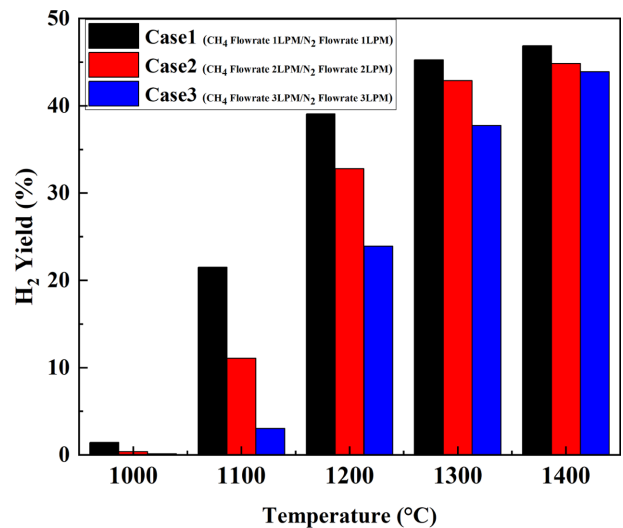


Fig. 3 Hydrogen yield to temperature & case

#### 3.2 C<sub>2</sub> 탄화수소 수율

Fig. 4는 C<sub>2</sub> 탄화수소 아세틸렌(Acetylene, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), 에틸렌(Ethylene, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), 에탄(Ethane, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)의 수율을 확인한 결과이다. 모든 조건에서 반응 온도가 증가함에 따라 아세틸렌, 에틸렌은 증가하는 경향을 보였다. 그러나 에탄의 경우 모든 조건에서 수율이 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한 공급 유량이 증가할수록, 즉 체류 시간이 짧아질수록 에탄, 에틸렌의 경우는 큰 차이가 없었으나 아세틸렌의 수율이 증가하는 것을 확인하였다.

이는 초기 메탄 열분해 반응에서 CH<sub>4</sub> → CH<sub>3</sub>·+H·로 분해되어 CH<sub>3</sub>·, H· 라디칼(Radical)을 형성하게 되고, 라디칼의 재중합으로 인해 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>가 생성된다. 이에 따라 제일 초기에 형성되는 에탄이 먼저 분해되어 모든 조건에서 수율이 0에 수렴하는 것으로 판단된다. 이후 반응과정에서 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> → C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>로 전환되는 분해 과정을 거치게 되며, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> → C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> +H<sub>2</sub>로 분해되는 과정을 거치게 된다. 이후 아세틸렌은 추가적인 반응을 통해

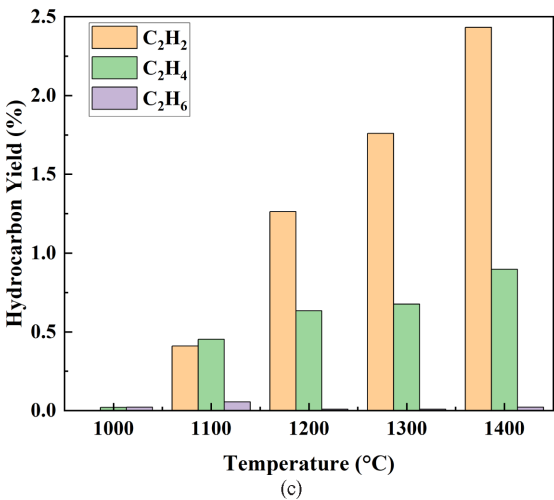
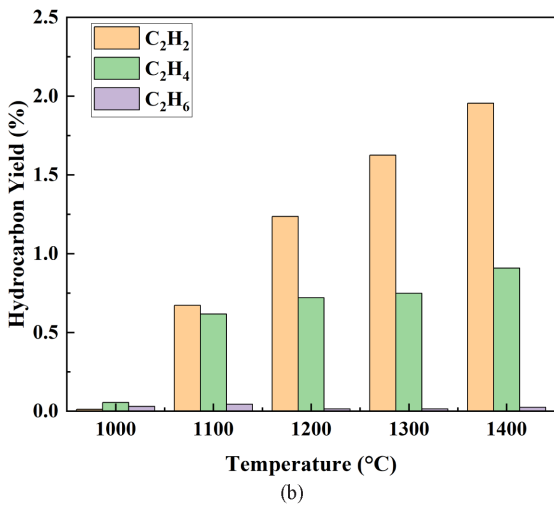
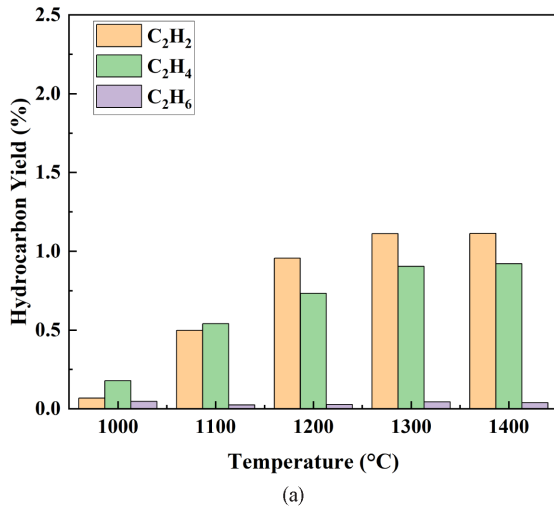


Fig. 4 C<sub>2</sub> hydrocarbon yield to temperature & case

기타 탄화수소와 수소를 형성하게 된다. 체류 시간이 감소함에 따라 아세틸렌이 추가적인 반응이 일어나지 않아 Case 3에서 아세틸렌의 수율이 증가하는 것으로 판단되며, 이런 영향으로 체류 시간이 감소함에 따라 메탄 전환율 및 수소 수율이 감소하는

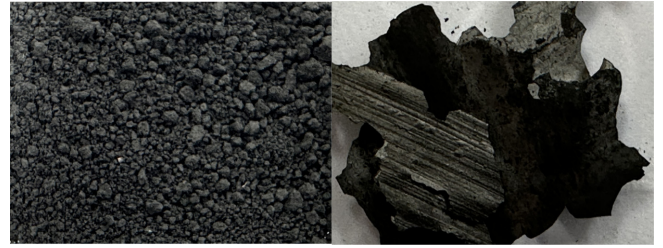


Fig. 5 Carbon black (Left) & carbon film (Right)

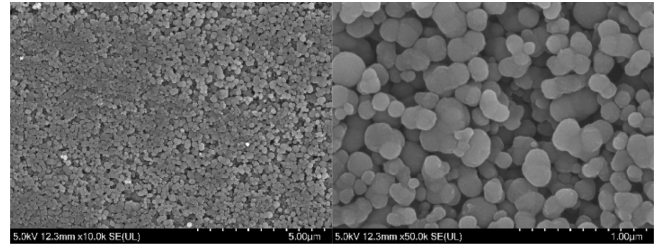


Fig. 6 SEM image of carbon black

것으로 확인된다. Lee 등의 수치해석을 통한 메탄 열분해에서도 이와 같이 체류 시간이 짧을 때 비교적 저분자 탄화수소의 합성이 증가하여, 아세틸렌, 에틸렌 등이 증가한다고 하였으며, 이와 부합하는 결과이다[15]. 이를 통하여 실험적으로 C<sub>2</sub> 탄화수소가 전환율 및 수율에 미치는 영향에 대해 실험적으로 확인하였다.

### 3.3 카본블랙 및 카본필름 분석

메탄 열분해를 통해 생성된 탄소 생성물은 세틀링 챔버에서 획득하였으며, 카본 블랙(Carbon Black), 카본 필름(Carbon Film) 두 가지의 탄소 생성물을 획득하였다. Fig. 5는 카본 블랙 및 카본 필름의 원시 이미지(Raw Image)를 나타낸다. 탄소 생성물들의 형태 및 결정성을 확인하기 위하여 SEM, XRD 분석을 수행하였다.

Fig. 6는 카본 블랙의 SEM 이미지이다. SEM 이미지를 통하여 카본 블랙은 비교적 균일한 크기의 구형 입자들로 확인된다. 또한 카본 블랙의 직경은 대략 수십-수백 nm로 확인되었다. 또한 고배율에서 찍은 이미지를 통하여 카본 블랙 입자들이 서로 응집(Aggregate)되어 하나의 덩어리로 형성되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 카본 필름의 SEM 이미지로서, 표면 중앙에 카본 블랙이 응집되어 덩어리가 형성되어 있는 구조를 확인할 수 있다. 카본 블랙이 응집되어 있는 곳과 표면을 확인한 결과, nm 크기의 카본 블랙이 응집되어 형성되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 표면에서는 거칠고 불균일한 표면이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

이를 통해서 먼저 형성된 카본 블랙이 반응기 표면에 침착(Deposition)되어 하나의 필름을 형성하고 필름의 표면 위의 카본 블랙이 응집되는 것으로 판단된다.

탄소 생성물의 결정성은 XRD 패턴을 통해서 확인하였으며,

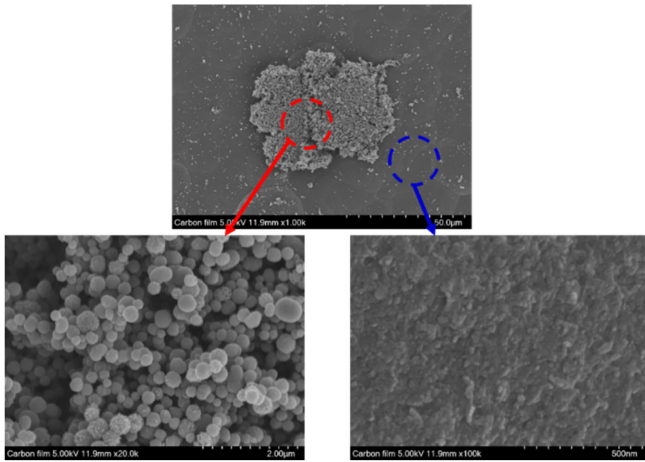


Fig. 7 SEM image of carbon film

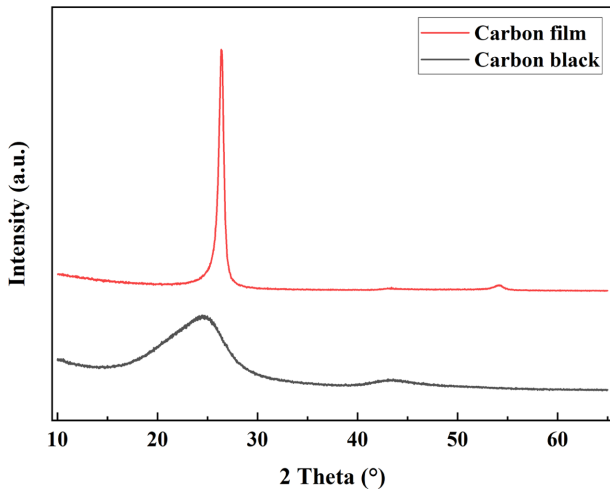


Fig. 8 XRD spectra of the carbon black, carbon film

Fig. 8은 탄소 생성물들의 XRD 패턴을 나타낸다. 먼저 카본 블랙의 경우 넓고 완만한 패턴이 확인되며, 피크가 뚜렷하지 않은 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 비정질(Amorphous) 구조를 가지고 있는 카본 블랙임을 확인할 수 있다. 이와 달리, 카본 필름의 XRD 패턴에서는, 약 26°에서 특징적인 피크가 확인되며 결정성을 갖고 있는 것으로 판단된다. Mehran Dadsetan 등의 연구에서 카본 필름에 대한 분석을 수행하였으며, 반흑연 구조(Semi-graphitic Structure)를 가지고 있으며, 전도성이 높다고 하였다[16,17]. 탄소 생성물의 결정성과 형상을 확인함으로써, 메탄 열분해 과정에서 생성된 탄소 생성물들을 타이어, 잉크, 전도성 소재 등과 같은 산업에서 활용할 수 있는 기초 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결론

본 연구에서는 메탄 열분해 실험을 수행하여 반응 온도 및

체류 시간이 메탄 전환율, 수소 수율에 미치는 영향에 대해 확인하였으며, 탄소 생성물의 성상 및 결정성을 확인하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

메탄 전환율과 수소 수율에 대한 온도와 체류 시간의 영향이 온도 구간에 따라 다르게 작용함을 확인하였다. 1,300°C 이상의 고온 영역에서는 온도가 반응을 지배하는 핵심 인자였으나, 1,200°C 이하의 저온 영역에서는 체류 시간의 영향이 지배적으로 나타났다. 이는 고효율 공정 설계 시 에너지 투입과 반응기 크기 등 운전 조건을 최적화하기 위해 온도 구간별로 주요 제어 변수를 다르게 설정해야 함을 시사한다.

C<sub>2</sub> 탄화수소를 부산물이 수소 수율을 저해하는 핵심 요인을 실험적으로 확인하였다. 체류 시간이 짧아질수록 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)과 같은 2차 반응물의 생성이 증가하며, 이것이 메탄의 완전한 분해 반응을 저해하여 전체 수소 수율을 감소시키는 주요 원인으로 작용함을 확인하였다.

메탄 열분해로부터 생성된 탄소 생성물은 카본 필름, 카본 블랙 두 가지의 형태로 확인되었으며, 카본 블랙은 구형 입자가 응집된 형태로 확인되었다. 카본 필름은 표면이 불균일한 형태를 가지며 카본 블랙이 응집된 영역이 확인되었다. 또한 XRD 분석을 통해 카본 필름은 결정성을 가지고 있는 것을 확인하였다.

REFERENCES

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, (2023), Climate change 2021 - The physical science basis: Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press.
2. International Energy Agency, (2021), Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. <https://trid.trb.org/View/1856381>
3. The Royal Society, (2020), Ammonia: Zero-carbon fertiliser, fuel and energy store. <https://royalsociety.org/news-resources/projects/low-carbon-energy-programme/green-ammonia/>
4. Nikolaidis, P., Poullikkas, A., (2017), A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, 597-611.
5. International Energy Agency, (2019), The future of hydrogen: seizing today's opportunities. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
6. Glenk, G., Reichelstein, S., (2019), Economics of converting renewable power to hydrogen, Nature Energy, 4(3), 216-222.
7. Abánades, A., Rubbia, C., Salmieri, D., (2013), Thermal cracking of methane into hydrogen for a CO<sub>2</sub>-free utilization of natural gas, International Journal of Hydrogen Energy, 38(20), 8491-8496.
8. Ashik, U., Daud, W. W., Abbas, H. F., (2015), Production of greenhouse gas free hydrogen by thermocatalytic decomposition of methane—a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, 221-256.

9. Keipi, T., Li, T., Løvås, T., Tolvanen, H., Kontinen, J., (2017), Methane thermal decomposition in regenerative heat exchanger reactor: Experimental and modeling study, *Energy*, 135, 823-832.
10. Muradov, N. Z., Veziroğlu, T. N., (2008), "Green" path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(23), 6804-6839.
11. Fan, Z., Weng, W., Zhou, J., Gu, D., Xiao, W., (2021), Catalytic decomposition of methane to produce hydrogen: A review, *Journal of Energy Chemistry*, 58, 415-430.
12. Abánades, A., Ruiz, E., Ferruelo, E., Hernández, F., Cabanillas, A., Martínez-Val, J., Rubio, J., López, C., Gavela, R., Barrera, G., (2011), Experimental analysis of direct thermal methane cracking, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), 12877-12886.
13. Lee, D., Kim, Y., Ahn, K., (2022), Analysis of methane conversion rate and selectivity of methane pyrolysis reaction in ceramic tube according to temperature and reaction time, *Journal of Hydrogen and New Energy*, 33(1), 1-7.
14. Gebreyohannes, T. G., Lee, S. W., Han, S. J., Kim, Y. T., Kim, S. K., (2023), Unveiling the complexity of non-oxidative coupling of methane: A simplified kinetics approach, *Chemical Engineering Journal*, 470, 144216.
15. Lee, S., Im, S., Lee, Y., (2025), Numerical validation and prediction of conversion rate and hydrogen production by thermal decomposition of methane, *Journal of Hydrogen and New Energy*, 36(1), 52-63.
16. Dadsetan, M., Latham, K. G., Khan, M. F., Zaher, M. H., Manzoor, S., Bobicki, E. R., Titirici, M. M., Thomson, M. J., (2023), Characterization of carbon products from microwave-driven methane pyrolysis, *Carbon Trends*, 12, 100277.
17. Dadsetan, M., Latham, K. G., Kumral, B., Khan, M. F., Scott, M., Mitra, T., Naseri, A., Manzoor, S., Bobicki, E. R., Filleter, T., (2023), Carbon film produced from microwave-driven methane pyrolysis, *Carbon Trends*, 12, 100283.



#### **Mun Hee Lee**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is thermal decomposition.

E-mail: lmhlkh1322@knu.ac.kr



#### **Sang Ji Lee**

Senior researcher in the Department of Energy Environment IT Convergence Group, Institute for Advanced Engineering. His research interest is bio-char/torrefaction and biomass plant demonstration

E-mail: lsj12@iae.re.kr



#### **Ji Yeop Kim**

Ph.D. in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is electrospray.

E-mail: monst91@knu.ac.kr



#### **Seung Yeop Joo**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is thermal decomposition.

E-mail: jsy1780@naver.com



#### **Ryun Geun Kim**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is thermal decomposition.

E-mail: kimrq3052@naver.com



**Hyungseok Nam**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is carbon neutral energy conversion, CO<sub>2</sub> capture/utilization and thermal fluid system.

E-mail: namhs219@knu.ac.kr



**Jung Goo Hong**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is combustion engineering, atomization and spray.

E-mail: jghong70@knu.ac.kr

# Ansys APDL과 Point Cloud Meshing기반 반도체 Probe Card의 향상된 열구조 연성 해석

## Advanced Thermal-structural Coupling Analysis of Semiconductor Probe Card based on Ansys APDL and Point Cloud Meshing

김성훈<sup>1</sup>, 오민성<sup>2</sup>, 김지은<sup>3</sup>, 이경훈<sup>3</sup>, 홍석무<sup>4,5,#</sup>  
Seong Hoon Kim<sup>1</sup>, Min Seong Oh<sup>2</sup>, Ji Eun Kim<sup>3</sup>, Kyeong Hoon Lee<sup>3</sup>, and Seok Moo Hong<sup>4,5,#</sup>

<sup>1</sup> 국립공주대학교 대학원 스마트모빌리티공학과 (Department of Smart Mobility Engineering, Graduate School, Kongju National University)

<sup>2</sup> 국립공주대학교 대학원 미래융합공학과 (Department of Future Automotive Engineering, Graduate School, Kongju National University)

<sup>3</sup> TSE주식회사 (TSE Corp)

<sup>4</sup> 국립공주대학교 미래자동차공학과(Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University)

<sup>5</sup> 국립공주대학교 그린카 기술 연구소(Institute of Green Car Technology, Kongju National University)

# Corresponding Author / E-mail: smhong@kongju.ac.kr, TEL: +82-41-521-9114

ORCID: 0000-0001-5569-6285

KEYWORDS: Ansys parametric design language (APDL), Point cloud (포인트 클라우드), Probe card (프로브 카드), Finite element analysis (유한요소해석), Thermal-structural coupling analysis (열구조 연성 해석)

*The semiconductor industry is experiencing significant growth in production scale and investment, driven by rising demand for generative AI, high-performance computing (HPC), high-bandwidth memory (HBM), and high-performance/high-density chips. As a result, precision inspection and yield management at the wafer stage have become critical challenges. Probe cards, essential for verifying a chip's electrical performance, play a vital role in yield management. However, during repetitive inspection processes, probe cards absorb heat from the underlying chuck, leading to probe tip-pad alignment errors that degrade contact reliability and measurement accuracy. This situation necessitates a quantitative evaluation system based on thermo-structural coupled analysis. Additionally, the modeling process for multiple interposers and interposer housings, along with the preprocessing of contact conditions, adds complexity due to the increasing number of contact surfaces. This complexity can result in convergence issues and reduced accuracy. To address these challenges, this study employs Ansys Parametric Design Language (APDL) to enhance interposer and housing modeling, as well as contact problem resolution. It introduces a novel meshing method that positions nodes at target coordinates using point clouds, providing an effective analysis approach applicable to large, high-density probe cards and thermo-structural problems involving numerous contacts.*

Manuscript received: September 15, 2025 / Revised: November 27, 2025 / Accepted: December 4, 2025

### 1. 서론

최근 생성형 AI, 고성능 컴퓨팅(High-performance Computing, HPC), 고대역폭 메모리(High-bandwidth Memory, HBM)의 수요가 급증하면서 반도체 산업의 규모와 투자가 빠르게 확대되고 있다[1]. 이에 따라 반도체 장치의 고집적화가 가속되면서 미세 공정 구축 및 수율 확보에 대한 경쟁이 심화되고 있으며, 특히

웨이퍼(Wafer) 단계에서 양품/불량을 조기 식별하는 EDS (Electric Die Sorting)공정은 수율 확보 경쟁의 핵심과정으로, 다음 공정인 패키징에서 발생할 수 있는 불필요한 패키징 비용과 시간 손실을 최소화한다[2,3]. 이러한 EDS 공정은 웨이퍼 테스트 시스템(Wafer Test System, WTS)을 통해 수행되며, WTS는 프로버 (prober)의 척(chuck) 위에 웨이퍼를 올려놓은 뒤, 프로브 카드(probe card)와 기계적으로 반복적으로 접촉하는 과정을

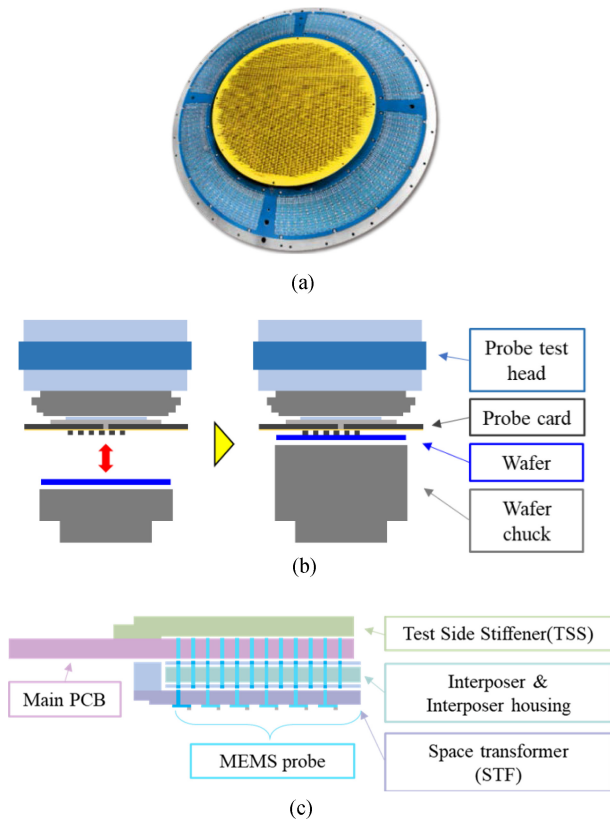


Fig. 1 (a) Actual MEMS probe card, (b) Schematic diagram of WTS, and (c) Schematic diagram of probe card

통해 전기를 흘리는 과정을 통해 웨이퍼의 수율 검사를 수행한다 [3]. WTS와 프로브 카드의 구조는 Fig. 1에 간략히 제시하였다. Figs. 1(a)는 실제 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 프로브 카드, 1(b)는 WTS의 개략도, 1(c)는 프로브 카드의 개략도를 나타내었다.

프로브 카드는 웨이퍼 상태에서 집적회로의 기능을 전기적으로 검증하는 핵심 장치로서 일반적으로 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB), STF (Space Transformer), 인터포저 (Interposer), 그리고 프로브 팁(Probe Tip)으로 구성되어 있다 [4,5]. 프로브 카드는 EDS공정이 반복될수록 웨이퍼와 반복해서 접촉하게 되는데 이때 지속적인 접촉하중에 의한 기계적 변형이 발생하며, 하부 척에서 전달되는 열은 프로브 카드의 열변형을 유도한다[6,7]. 하중에 의한 기계적 변형과 척에 의한 열변형은 프로브 팁의 영향을 끼치고 정밀한 위치 조작에 오차를 유발하며 접촉 신뢰성 및 측정 정확도를 저하시킬 수 있다. 그러므로 열-구조 변형을 동시에 고려하는 연성 해석을 통한 신뢰성 평가는 필수적이다[8-10]. 선행 연구에서는 신뢰성 평가를 진행하기 위하여 다음과 같은 방법을 제시하였다. Hyun. D.등은 프로브 카드용 세라믹 기판을 제조/특성화하여 열변형을 낮추는 근거를 제시하며 안정성을 측정했다[9]. Wong. J.등은 구조해석을 기반으로 프로빙/와이어본딩 하중에 따른 Circuit Under Pad (CUP)영역 응력/변형을 해석하여 프로빙조건이 회로 신뢰성에 미치는 영향을 측정했으며[10], Choa. S.등은 열-전기-구조 연성

해석으로 프로브 팁-패드 접촉 응력/변형, 전류용량-유발 온도 상승이 신뢰성에 미치는 영향을 측정했다[11]. 이처럼 대부분의 선행 연구에서는 해석을 통하여 프로브 카드의 신뢰성을 평가하였다.

본 논문에서는 전체 모델링에 마찰 접촉(Frictional Contact)을 부여하여 실제 거동과 유사한 결과를 얻고자 열-구조 연성 해석을 수행하였으나, 2만 개 이상의 인터포저에 의해 접촉면이 과도하게 증가하여 해석이 수렴하지 않고 오류가 발생하였다. 이에 따라 인터포저 대신 박스 형태의 인터포저 하우징으로 모델링 변경하고, 접촉 조건을 마찰 접촉에서 완전 접촉(Bonded Contact)으로 대체하여 수렴성을 확보하였으나, 실제 접촉 거동과 차이가 발생하게 되었다. 이러한 접촉문제를 해결하기 위해 과도 접촉면이 발생하는 인터포저를 대신하여 가상 스프링을 생성하여 해석을 진행하고자 하였으며, Ansys Mechanical과 상호작용하며 사용되는 스크립팅(Scripting)언어인 APDL (Ansys Parametric Design Language)을 사용함으로써 2만 개의 가상 스프링을 생성/대체할 수 있었다. 또한, Point Cloud를 활용하여 정확한 목표 좌표에 노드를 배치하여 메시를 생성하는 새로운 Point Cloud Meshing기법을 제시하고, 해당 메시 기법과 함께 APDL 기반 가상 스프링이 적용된 해석 결과에 대하여 접촉조건에 안정성, 해석 효율성을 비교/분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 APDL

APDL은 Ansys 제품군에서 사용되는 매개변수적 설계 스크립팅 언어로, Ansys Mechanical 등의 환경에서 사용자가 GUI 기반 조작 없이도 프로그래밍 언어를 통해 해석을 구성/제어할 수 있게 한다. 이로 인해 APDL을 사용한 해석은 몇 가지 장점을 갖는다. 단순반복작업을 자동화할 수 있으며, 반복 작업 중 발생하는 오류를 없앨 수 있다. 또한 문제 특성에 맞춘 맞춤형 워크플로우/모델을 구축할 수 있으며, 모델의 좌표, 치수, 재료특성 등 모델 매개변수를 정의하여 모델을 쉽게 수정할 수 있다는 장점을 갖는다. 이로 인해 APDL 사용자는 서로 다른 해석 파이프라인(Pipeline)을 코드로 결합하여 실행할 수 있으며, 이러한 특성은 복잡한 해석을 일관되게 재현하고, 설계 변경 시 단순한 코드 수정만으로도 신속히 변경할 수 있다는 장점이 있다[12].

### 2.2 Point Cloud

Point Cloud는 LiDAR (Light Detecting And Ranging), RGB-D, 3D 스캐너 등의 센서를 통해 수집되는 3차원 점(Point) 데이터들의 집합체로, 각 점들은 X, Y, Z 좌표 데이터를 갖고 가상 공간에서 모델의 형상을 구현한다. 일반적으로 표면 재구성(Surface Reconstruction)을 통해 다각형 메시, NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 모델 [13], 또는 CAD (Computer Aided Design)모델로 변환되기도 한다[14].

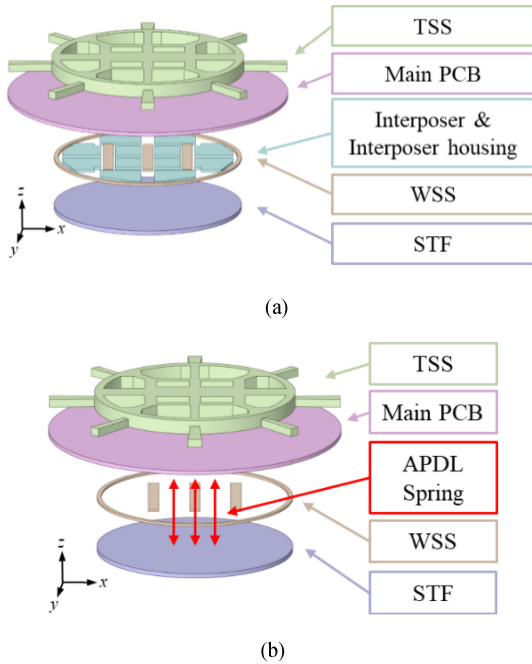


Fig. 2 Finite element model of the probe card assembly. (a) Base model, with interposer & interposer housing, (b) Model 1&2, without interposer & interposer housing

본 논문에서는 기존 센서를 통해 Point Cloud를 생성하는 방법이 아닌 이미 생성된 CAD모델에서 노드 좌표를 추출하고 추출한 노드들을 Point Cloud로써 활용하였다. 또한, 목표 좌표에 포인트가 일치하도록 노드를 추가/재배치하는 방법을 제시하여, 모델의 형상 정확도를 확보하면서, 변환 과정에서의 오차를 제거했다. 해당 접근을 통해 해석 모델과 데이터 간 일관성을 유지하고, 열-구조 연성해석에서 경계/접촉 조건의 정의를 단순화할 수 있었다.

### 3. 프로브 카드 기초 설계 및 해석

#### 3.1 모델링

프로브 카드는 앞선 설명과 같이 TSS, Main PCB, 인터포저/하우징, STF, 그리고 프로브 팁으로 구성된다. 다만, 프로브 팁의 경우, 모델링의 크기가 상대적으로 매우 작으며, 그 수가 많아 본 해석에 포함시켰을 때 계산비용이 높아지는 문제가 발생하며, 또한 본 논문에서는 프로브 팁을 자세히 다루지 않기 때문에 프로브 팁을 제외한 TSS, Main PCB, 인터포저/하우징, 그리고 STF만을 모델링하였다.

본 논문에서 사용된 모델은 조건에 따라 3가지로 나뉘며, Fig. 2에서 각 모델을 확인할 수 있다. Base Model은 Fig. 2(a)와 같이 인터포저/하우징을 포함한 TSS, Main PCB, 그리고 STF를 모두 모델링 하였으며 인터포저/하우징의 접촉조건은 Bonded의 강제 접촉을 입력하였다. 다음으로, Model 1은 인터포저/하우징을 제거하고 그 역할을 대체하기 위해 APDL 기반의 가상

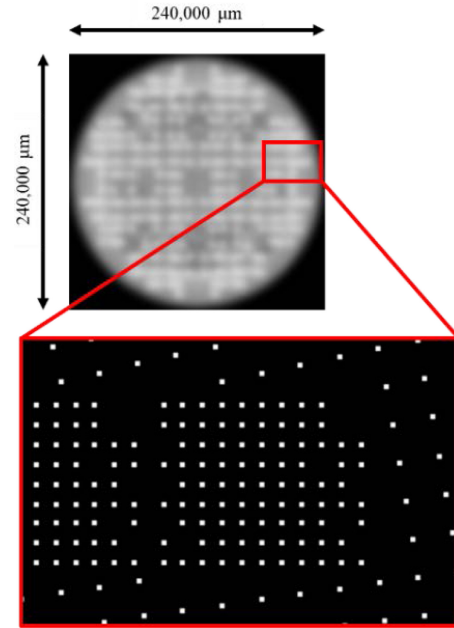


Fig. 3 Generated nodes using point cloud meshing

스프링을 생성하여 적용했으며, 메시 생성은 Ansys Mechanical의 자동 메시(Auto Meshing)를 사용하였다. 마지막으로 Model 2는 Model 1과 동일하게 인터포저/하우징을 생략하고 APDL 가상 스프링을 적용하되, 자동 메시 대신 Point Cloud 기반 Meshing기법을 사용하였다.

Point Cloud 기반 Meshing 기법은 CAD 모델의 메시에서 추출한 노드 좌표로 Point Cloud를 구성한 뒤 Python 코드를 사용해 목표 좌표에 정렬/재배치하고, 이를 활용하여 인터포저와 동일한 좌표에 메시지를 생성 생성하는 방법으로, Fig. 3에 Point Cloud Meshing기법을 활용해 생성된 Model 2의 노드 일부를 나타내었다. Fig. 3에서 목표 좌표에 재배치된 노드를 확인할 수 있다. Figs. 4(a)는 기존 자동 메시로 생성된 Model 1 - Main PCB의 메시지를, 4(b)는 Point Cloud Meshing기법을 활용하여 생성된 Model 2 - Main PCB의 메시지를 비교하여 보여주며, 4에서 볼 수 있듯 Point Cloud Meshing기법을 활용하여 스프링 생성부의 위치(X, Y, Z 좌표) 정확도를 높였음을 알 수 있다.

해석에 사용된 메시의 신뢰성은 주로 Mesh Quality와 Aspect Ratio로 평가된다. 선행 연구에 따르면 Trotta. A.등은 Element Quality가 최소 0.7 이상이면 해석에 활용하기에 신뢰할 수 있다고 보도했으며[15], Jemaa. H.등은 모델의 Element 95%가 Aspect Ratio < 3을 만족할 때 고품질 메시로 간주하였다[16].

본 논문에서 사용된 모델의 Element Quality는 Base Model과 Model 1에서 평균 0.92, Model 2에서 평균 0.79를 보였고, Aspect Ratio는 Base Model에서 1.48, Model 1에서 1.49, 그리고 Model 2에서 2.03의 평균값을 보였으며, 해당 내용은 Table 1에 정리하였다. 따라서 본 논문에 사용된 3가지 모델은 메시 품질 관점에서 신뢰성을 확보한 것으로 판단된다.

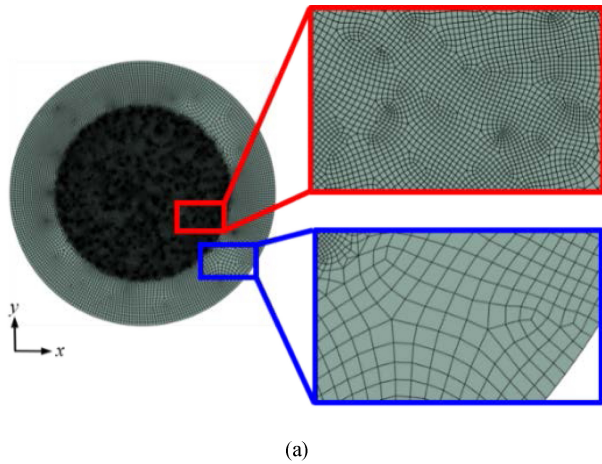


Fig. 4 Mesh of Main PCB (a) Model 1: using auto meshing, (b) Model 2: using point cloud meshing

Table 1 Comparison of element quality and aspect ratio

	Base model	Model 1	Model 2
Avg. element quality [-]	0.92	0.92	0.79
Avg. aspect ratio [-]	1.48	1.49	2.03

### 3.2 열-구조 연성 해석 경계조건

#### 3.2.1 열해석 경계조건

Fig. 5(a)는 EDS 공정 중 웨이퍼 척에서 전달되는 열 조건을 반영하여 설정된 경계조건을 나타내었다. 프로브 카드 일부는 웨이퍼 검사 과정에서 진공환경에 놓이게 되는데, Main PCB의 하단 면을 포함한 그 하부(WSS, 인터포저/하우징, STF)는 WTS 장비 내부에서 진공환경에 놓이며, Main PCB 상부와 TSS는 상압의 실온 공기에 노출된다. 이에따라 상압환경의 상부 노출면에는 단순화된 대류 경계조건(Air, Simplified, 22°C)을 부여하였으며, 척으로부터 열을 직접 전달받는 STF 전체에는 열을 모사하기 위해 100°C의 온도 조건을 적용하였다. 열해석의 결과는 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있다. 해석 결과, 최대 100°C에서 최소 21.995°C까지의 온도 분포를 확인하였으며, 3가지 모델

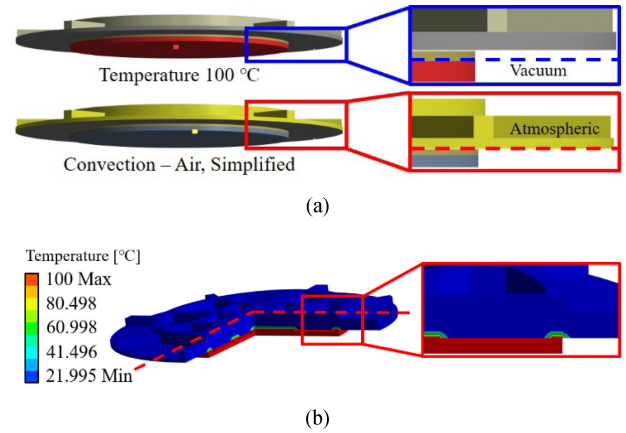


Fig. 5 Temperature distribution from FE simulation. (a) Thermal conditions, and (b) Result of thermal analysis

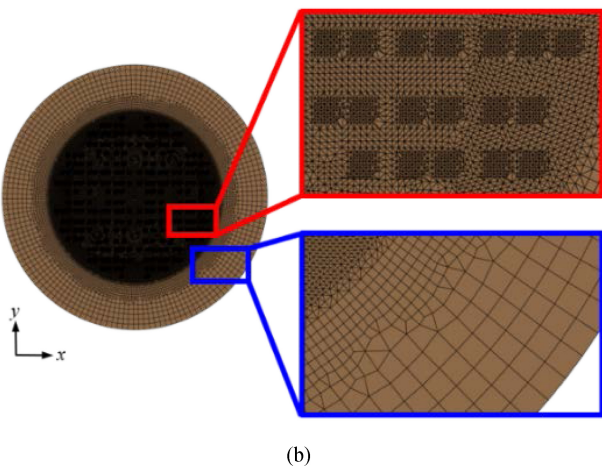


Fig. 6 Boundary conditions for FE analysis of probe card

모두 유사한 결과가 나타났다. 이후, 계산된 열의 데이터는 구조해석으로 전달되어 열-구조 연성 해석이 진행된다.

#### 3.2.2 구조해석 경계조건

Fig. 6은 구조해석의 경계조건을 나타내었다. 최상단부의 TSS는 보강재로서 변형을 무시하여 TSS와 Main PCB의 접촉면(TSS 하부)에 Fixed Support를 입력하였다. STF의 하부 면에는 검사 중 프로브 핀이 웨이퍼에 접촉되며 가압될 때 발생하는 반력을 증가면하중으로 입력하였다.

접촉조건인 경우, Base Model에서 인터포저/하우징에 접촉하는 모든 접촉면에 실제와 같은 접촉조건을 입력하게 되면 해석이 수렴하지 않아, 실제 거동과 유사한 값을 얻을 수 있는 Bonded의 접촉조건으로 해석이 진행하였다. Model 1은 인터포저/하우징을 제거하고 APDL기반 가상 스프링으로 이를 대체하여 노드/접촉면의 수를 줄였다. 그러나 자동 메시로 생성된 노드의 좌표가 목 표 좌표와 일치하지 않아 스프링을 정확한 위치에 배치할 수 없었기에 추가과정이 필요하였는데, (i) Fig. 7에 표시된 것처럼 스프링을 배치할 면(Face 1)과 마주 보는 면(Face 2)의 노드를 추출하고, (ii) Face 1, Face 2에서 추출한 노드 중, 목표 좌표와 최근접 대응 노드를 탐색한 뒤 쌍을 이루고, (iii) 매칭된

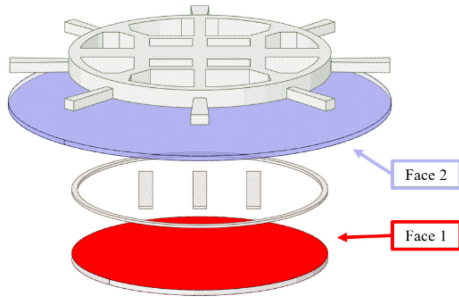


Fig. 7 Spring connection Face 1, Face 2 pair for Model 1

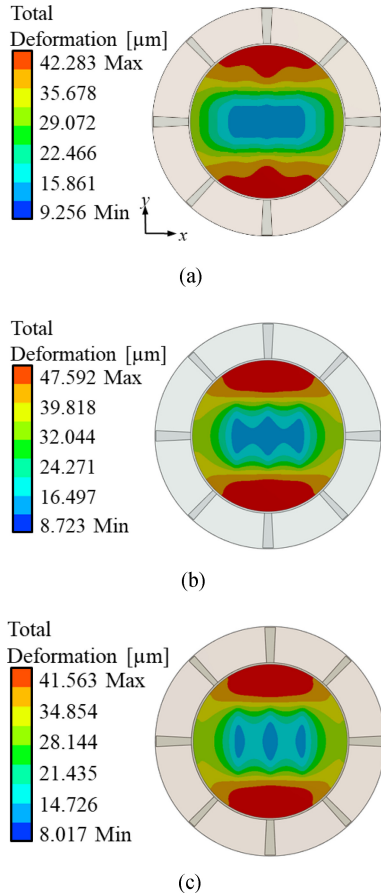


Fig. 8 Comparison of total deformation among three models. (a) Base model, (b) Model 1, and (c) Model 2

노드쌍 사이에 스프링 요소를 생성/연결하는 추가과정이 필요하였다. Model 2는 Model 1과 동일하게 인터포저/하우징을 APDL기반 가상 스프링으로 대체하였으며, 스프링 생성과정 중 목표 좌표에 노드를 생성하기 위해 Point Cloud Meshing기법을 추가로 용하였다.

4. 열-구조 연성 해석 결과

Figs. 8은 STF의 Total Deformation을 비교한 결과로, 8(a)는 Base Model로 최대 42.283  $\mu\text{m}$ , 8(b)는 Model 1로 최대 47.592  $\mu\text{m}$ ,

Table 2 Summary of interpretation result by model

	Base model	Model 1	Model 2
Number of node [-]	865,871	802,859	669,235
Number of element [-]	756,334	713,485	1,036,172
Number of contact surfaces [-]	33	9	9
Maximum total deformation [ $\mu\text{m}$ ]	42.28	47.59	41.56
CP time [sec]	5485.25	1818.91	837.03

Fig. 8(c)는 Model 2로, 최대 41.563  $\mu\text{m}$  변형을 보이며 세 모델은 모두 비슷한 최대변형량을 보였다. 해당 결과와 함께 각 모델들의 정보를 Table 2에 표로 정리하였다. Base Model은 인터포저/하우징을 포함한 전체를 모델링해서 노드와 접촉면 수가 33개로 많은 접촉면을 보유하였으며, 그 결과 접촉조건에 의해 수렴성 저하의 문제가 발생했다. Model 1의 경우 앞서 언급한 과정을 통해 최근접 노드쌍을 확보하였으나, 자동 메시의 한계로 생성된 노드의 좌표가 목표 좌표와 정확히 일치하지 않아 해석 목표와 차이가 있을 것으로 보이는 반면, Model 2은 Model 1과 동일하게 인터포저/하우징의 모델링을 APDL 기반 가상 스프링으로 대체하되, 본 논문에서 제시한 Point Cloud Meshing기법을 활용하여 목표좌표에 정확히 노드를 위치시켰다. 그 결과, 스프링 연 결의 정확도를 확보할 수 있었으며, 실제 접촉 거동과 가장 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결론

본 논문은 반도체 웨이퍼 검사용 프로브 카드의 열-구조 연성 해석에서 발생하는 접촉조건 문제를 해결하기 위해, APDL을 활용한 가상 스프링과 Point Cloud Meshing 방식을 사용한 해석방법을 제안하고 분석하였다. 비교 대상은 직접접촉 방식을 사용한 모델(Base Model), 자동 메시로 생성된 노드에 가상 스프링을 적용한 모델(Model 1), Point Cloud Meshing기법을 활용하여 원하는 좌표에 노드를 생성하여 가상의 스프링을 적용한 모델(Model 2) 이다. 그 결과는 다음과 같이 정리된다.

인터포저/하우징과 접촉한 다른 접촉면에 대한 해석에서 안정성을 확보할 수 있었다. Base Model에서 다수의 접촉면을 Bonded로 강제 접촉시키면서 발생한 실제 거동과의 차이는 Model 1, 2에서 인터포저/하우징의 모델링을 APDL기반의 가상 스프링으로 치환함으로써 해결하였다.

가상 스프링으로 접촉을 치환함으로써, 해석의 수렴성과 안정성을 확보하였다. 또한 Model 2는 Point Cloud Meshing기법을 활용하여 실제 거동과 가장 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

해석 효율성이 증가하였다. APDL을 활용한 가상 스프링을 생성/적용한 모델(Model 1, 2)은 인터포저/하우징 모델링을 제거하여 노드/접촉면 수를 줄일 수 있었다. 특히 Model 2는 Point

Cloud Meshing기법으로 필요 위치에만 노드를 생성함으로써 해석의 정확도를 높였으며, 해석 시간도 줄일 수 있었다.

본 논문에서 제안한 Point Cloud Meshing기법을 적용한 Model 2는 인터포저 수가 많은 대형/고밀도 프로브 카드에도 적용이 용이하며, 프로브 카드뿐만 아닌 다른 열-구조 연성 문제에서 접촉 대체 모델링에도 실용적인 대안이 될 수 있다.

본 논문에서는 유한요소 해석을 통해 프로브 카드의 열-구조 연성 해석에서 발생하는 접촉 문제 해결을 위한 새로운 방법을 제시하였다.

다만, 본 논문은 전산 모사를 중심으로 진행된 연구로, 해석 결과와 실제 실험치와 비교를 통한 검증이 필요하다. 향후 연구에서는 실험/검증을 통해 프로브 카드의 열-구조 연성 해석 신뢰성을 확보하고자 한다.

**ACKNOWLEDGEMENT**

이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국산업기술진흥원초기취업형 계약학과 선도대학(원) 육성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

**REFERENCES**

1. Sun, L., Bai, C., Sarkis, J., (2024), Environmental and social performance relationships to firm efficiency: Evidence from the semiconductor industry, *International Journal of Production Economics*, 278, 109410.
2. Foscale, T., Bernardi, P., (2025), A cost-benefit analysis of multi-site wafer testing, *Electronics*, 14(12), 2450.
3. Yoon, H. J., Chae, J., (2019), Simulation study for semiconductor manufacturing system: Dispatching policies for a wafer test facility, *Sustainability*, 11(4), 1119.
4. Kim, M., Hong, W. S., Kim, M.-S., (2022), Laser soldering process optimization of mems probe of probe card for semiconductor wafer test, *Journal of Welding and Joining*, 40(3), 271-277.
5. Kang, S., Nah, W., (2023), Research on design technology to minimize signal distortion of probe card with many branches, *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 60(9), 13-23.
6. Chang, Y.-H., Yin, J.-J., Suh, Y.-S., (2010), Optimization of thermal deformation in probe card, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 11(11), 4121-4128.
7. Park, J., (2021), Study on the improvement of thermal deformation in probe card, M.Sc. Thesis, Seoul National University of Science and Technology.
8. Kwon, H.-J., Lee, J., Shin, B., Jeon, S., Han, C. S., Im, C. M., (2014), Geometry design of vertical probe needle using mechanical

- testing and finite element analysis, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(11), 2335-2342.
9. Hyun, D.-E., Jeon, J.-B., Lee, Y.-S., Kim, Y.-N., Kim, M., Ko, S., Koo, S.-M., Shin, W. H., Park, C., Lee, D.-W., (2022), Fabrication of large-area mullite-cordierite composite substrates for semiconductor probe cards and enhancement of their reliability, *Materials*, 15(12), 4283.
10. Wong, J. C., Soon, K. H., Kim, H. C., Kho, D. C. T., Chan, C. Y. W., (2023), Modeling of the impact of mechanical stress resulted from wafer probing and wire bonding on circuit under pad, *Microelectronics Reliability*, 151, 115240.
11. Le, X. L., Choa, S.-H., (2021), Design of new au-nico mems vertical probe for fine-pitch wafer-level probing, *Crystals*, 11(5), 485.
12. Ansys Inc, APDL: The language of simulation. <https://www.ansys.com/blog/what-is-apdl>
13. Yoo, D.-J., (2006), Automatic nurbs surface generation from unorganized point cloud data, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 23(9), 200-207.
14. Castellazzi, G., Presti, N. L., D’Altri, A. M., De Miranda, S., (2022), Cloud2fem: A finite element mesh generator based on point clouds of existing/historical structures, *SoftwareX*, 18, 101099.
15. Trotta, A., Clark, J. M., McGoldrick, A., Gilchrist, M. D., Annaidh, A. N., (2020), Biofidelic finite element modelling of brain trauma: Importance of the scalp in simulating head impact, *International Journal of Mechanical Sciences*, 173, 105448.
16. Jemaa, H., Eisenburger, M., Greuling, A., (2024), Semi-automated generation of bone loss defects around dental implants and its application in finite element analysis, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 27(13), 1756-1767.



**Seong Hoon Kim**

M. S. candidate in the Department of Smart Mobility Engineering, Kongju National University. His research interest is FEA. E-mail: 201901565@smail.kongju.ac.kr



**Min Seong Oh**

Ph. D. candidate in the Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University. His research interest is FEA. E-mail: dhalstjd13@smail.kongju.ac.kr



**Ji Eun Kim**

Sr. Manager of TSE Group Strategy Planning\_Technology Strategy.  
E-mail: wl3136@tse21.com



**Kyeong Hoon Lee**

Staff Engineer of TSE Group Strategy Planning\_Technology Strategy.  
E-mail: lkh21@tse21.com



**Seok Moo Hong**

Professor in the Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University. His research interest is Metal Sheet Forming and Forging, FEA, Optimizing.  
E-mail: smhong@kongju.ac.kr

# 가변 광학 배율을 이용한 마스크 투영 리소그래피로 제작된 하이드로겔 스캐폴드의 기공 크기 정밀 제어

## Precise Control of Pore Size in Hydrogel Scaffolds Fabricated by Mask Projection Lithography with Variable Optical Magnification

이상선<sup>1</sup>, 박재철<sup>2,#</sup>

Sang Seon Lee<sup>1</sup> and Jae Cheol Park<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 에너지나노그룹 (Energy & Nano Technology Group, Korea Institute of Industrial Technology)

<sup>2</sup> 한국생산기술연구원 목적기반모빌리티그룹 (Purpose Built Mobility Group, Korea Institute of Industrial Technology)

# Corresponding Author / E-mail: [jerwual@kitech.re.kr](mailto:jerwual@kitech.re.kr), TEL: +82-62-600-6182

ORCID: 0000-0003-3615-3933

KEYWORDS: Mask projection lithography (마스크 투영 리소그래피), Hydrogel scaffold (하이드로겔 스캐폴드), Variable magnification (가변 배율), Pore size control (기공 크기 제어), Tissue engineering (조직 공학)

*The field of tissue engineering requires versatile scaffold fabrication technologies capable of inducing cell proliferation and differentiation to promote functional tissue regeneration. Traditional fabrication methods face inherent trade-offs among production speed, resolution, and cost, which hinder their ability to replicate the intricate hierarchical structures of biological tissues. To address these challenges, we developed a mask projection photolithography system with variable optical magnification. This system allows for precise control of the microscale feature size in the final product using a single mask, by adjusting the optical magnification with interchangeable objective lenses and a relay lens. With this system, we successfully fabricated porous scaffolds with reproducible pore sizes ranging from 25 to 100  $\mu\text{m}$ , exposing a Poly (ethylene glycol) diacrylate (PEGDA,  $M_n = 700$ ) hydrogel precursor solution through a honeycomb-patterned mask for durations of just 3 to 10 seconds. The mask projection system presented in this study offers a powerful and efficient platform for creating the microstructures essential for various advanced biomedical applications, including tissue engineering, drug delivery, and organoid-on-a-chip, thanks to its unique combination of speed, precision, and cost-effectiveness.*

Manuscript received: October 2, 2025 / Revised: November 6, 2025 / Accepted: November 20, 2025

### NOMENCLATURE

$f_1$  = Focal Length of the Relay/Collimation Lens  
 $f_2$  = Focal Length of the Objective Lens  
NA = Numerical Aperture

### 1. Introduction

Tissue engineering is an interdisciplinary field that utilizes three key elements such as cells, growth factors, and scaffolds to restore, maintain, or improve the function of damaged tissues or organs [1]. Among these, the scaffold plays a crucial role beyond providing a mere physical support base; it provides a three-dimensional microenvironment that orchestrates a series of biological processes such as cell attachment, proliferation, and differentiation [2,3].

Therefore, fabricating scaffolds that can precisely mimic the complex hierarchical structure of natural tissues is a decisive factor in determining the success of tissue regeneration [4]. Over the past few decades, various scaffold fabrication techniques have been developed, yet each has shown distinct limitations due to a fundamental trade-off among four key performance indicators: speed, resolution, flexibility, and cost [5,6]. Traditional techniques like salt leaching are inexpensive and simple but lack the precision to control pore size, shape, and interconnectivity, resulting in low reproducibility [7]. Electrospinning can produce nanofibrous structures similar to the extracellular matrix (ECM), but the dense fiber network impedes deep cell penetration and nutrient transport [8,9].

Additive manufacturing technologies, such as 3D printing, have opened up possibilities for fabricating complex 3D structures with high precision based on computer-aided design (CAD) models [10]. However, extrusion-based printing has limited resolution in the hundreds of micrometers and slow processing speeds. Conversely, projection technologies based on Digital Light Processing (DLP) using digital micromirror devices (DMDs) can achieve both high resolution at the micrometer scale and rapid fabrication speeds [11-13]. This technology, however, requires expensive DMD chips and precision optics, leading to high system setup costs. Furthermore, there is an inverse relationship between the resolution of the projected image and the total build area, which constrains the fabrication of fine patterns over large areas [14]. Consequently, the field of biofabrication urgently requires a new manufacturing platform that is cost-effective while maintaining high precision and reproducibility, offering rapid production speed, and providing the flexibility to create diverse structures. In response to this technological demand, this study proposes a novel concept of a mask projection photolithography system that actively controls optical magnification by combining a physical mask with interchangeable objective lenses. The key advantage of this technology lies in its ability to optically control the size of the final structure derived from the fixed pattern of a single mask. This allows for the fabrication of various micro-scale structures without an expensive DMD, maximizing cost-effectiveness, while retaining the high-throughput advantage of projection methods that expose the entire area at once. The ultimate goal of this study is to rapidly fabricate PEGDA hydrogel microstructures with periodic porous networks using this innovative system and to validate its performance, thereby presenting its potential as a versatile platform for advanced biofabrication.

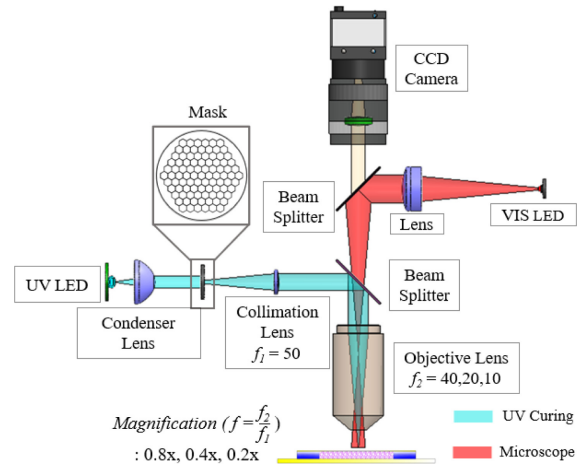


Fig. 1 Schematic diagram of the mask projection photolithography system with variable optical magnification, integrating a UV curing module (cyan) and a microscopic observation module (red)

## 2. Experimental Methods

Fig. 1 illustrates the optical system used in this study. The system was designed based on an infinity-corrected platform that integrates a photopolymerization module and a real-time observation module.

An infinity-corrected configuration provides the advantage of modularity, allowing additional components such as a relay lens and a beam splitter to be inserted into the parallel optical path without introducing significant distortion [15,16]. The photopolymerization module employed a UV LED (M365L3, Thorlabs; central wavelength 365 nm, bandwidth 9 nm) as the excitation source, which matches the absorption spectrum of the photoinitiator Irgacure 2959 [17]. The divergent light emitted from the LED was collected and transformed into a near-collimated uniform beam by a condenser lens, providing homogeneous illumination at the mask plane [18]. Fig. 2 shows the honeycomb-patterned physical mask placed at this mask plane, together with a schematic illustration of the PEGDA photopolymerization process. The patterned light transmitted through the mask was relayed by a 50-mm focal-length relay/collimation lens (Thorlabs; UV AR-coated), which transferred the mask image toward the entrance pupil of the objective lens. The interchangeable infinity-corrected objective lenses (5 $\times$ , 10 $\times$ , 20 $\times$ ) then determined the final optical reduction magnifications (0.8 $\times$ , 0.4 $\times$ , 0.2 $\times$ , respectively) and projected the pattern onto the hydrogel precursor surface, enabling rapid single-shot fabrication of 2D microstructures over a large area. To clarify the focusing tolerance and reproducibility of the projection module, CFI LU Plan Fluor BD objective lenses

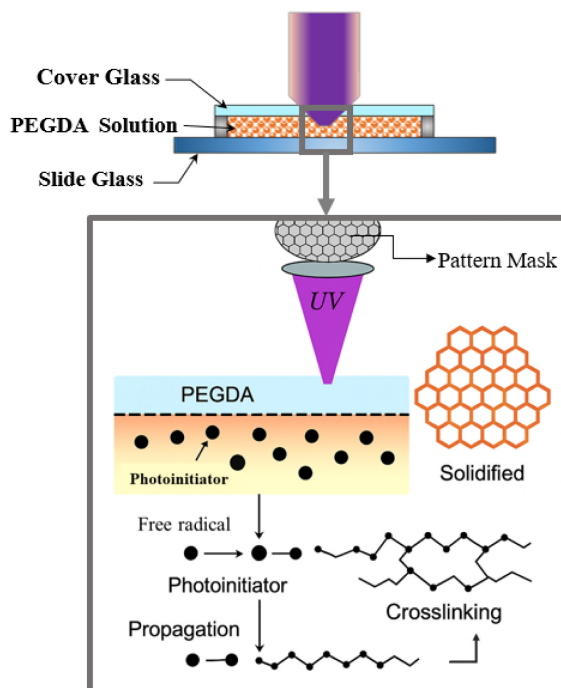


Fig. 2 The photopolymerization mechanism of PEGDA, including photoinitiation, radical propagation, and final crosslinking under patterned UV light

(Nikon; 5 $\times$ , 10 $\times$ , 20 $\times$ ) were used, having numerical apertures (NA) of 0.15, 0.30, and 0.45 and working distances of 18, 15, and 4.5 mm, respectively. The corresponding depth of focus (DOF) was estimated using the Rayleigh approximation  $DOF \approx \lambda/NA^2$  at 365 nm, yielding approximately 16.2 (5 $\times$ ), 4.1 (10 $\times$ ), and 1.8  $\mu$ m (20 $\times$ ). It is worth noting that the Rayleigh-estimated DOF represents the theoretical diffraction-limited focusing tolerance, while the manufacturer-reported DOF corresponds to a practical contrast-based focusing criterion; however, both consistently indicate that higher NA results in a shallower focusing range. These quantitative optical specifications ensure that the projected pattern remains well-focused during exposure, supporting reliable pore size reproduction across the magnification conditions. Figure 3 displays the precision 3-axis motorized stage integrated into the system. It provides micrometer-level repeat precision and was used for accurate focus control (Z-axis) and sample positioning (X-Y axis).

Poly(ethylene glycol) diacrylate (PEGDA,  $M_n = 700$ ), known for its excellent biocompatibility, was used as the photocurable polymer. The PEGDA monomer was dissolved in ethanol at a 1:4 (v/v) ratio to reduce its viscosity and improve handling. Subsequently, the photoinitiator Irgacure 2959 was added to a concentration of 0.5 wt% of the total solution and completely dissolved using a magnetic stirrer in a dark environment to prepare

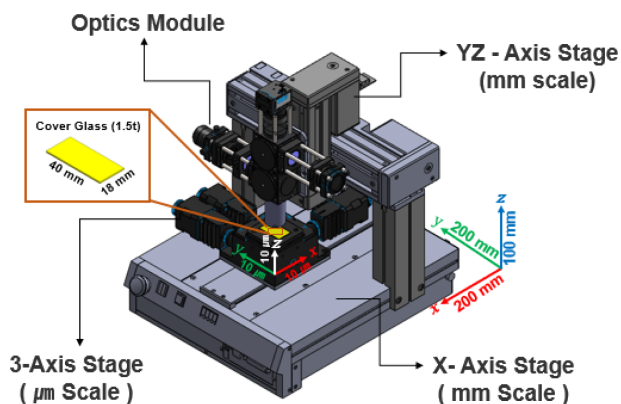


Fig. 3 Configuration of the motorized stage system for sample positioning and optical focusing

the precursor solution. The principle of this process relies on the decomposition of Irgacure 2959 upon UV exposure to generate free radicals, which initiate chain polymerization of the terminal acrylate groups of PEGDA, forming a 3D crosslinked hydrogel network. The micropatterning process began by dispensing a specific amount of the PEGDA precursor solution onto a glass slide. The Z-axis stage was then adjusted to focus the objective lens on the solution surface. With the honeycomb mask in place, the UV LED was turned on to expose the pattern for a duration optimized for each objective lens's magnification and light intensity. Specifically, the exposure times were 10 seconds for the 5 $\times$  objective lens (0.8 $\times$  reduction), 6 seconds for the 10 $\times$  objective lens (0.4 $\times$  reduction), and 3 seconds for the 20 $\times$  objective lens (0.2 $\times$  reduction). After patterning, the unreacted precursor solution was removed by washing the sample several times with ethanol. The samples were then dried, and the geometry and dimensions of the fabricated hydrogel structures were observed and measured using an optical microscope.

### 3. Results and Discussion

The optical performance of the system was validated prior to the experiments through optical simulations (Zemax OpticStudio).

Fig. 4 presents the spot diagram simulation results for the imaging optical module at each reduction magnification. From these results, it can be confirmed that the geometric radius of the spot formed on the image plane systematically decreases as the optical reduction magnification increases from 0.8 $\times$  to 0.2 $\times$ . A spot diagram illustrates how finely light is focused into a point on the image plane after passing through an optical system; a smaller and denser spot indicates higher resolution. The simulation results demonstrate that the designed optical system has sufficient

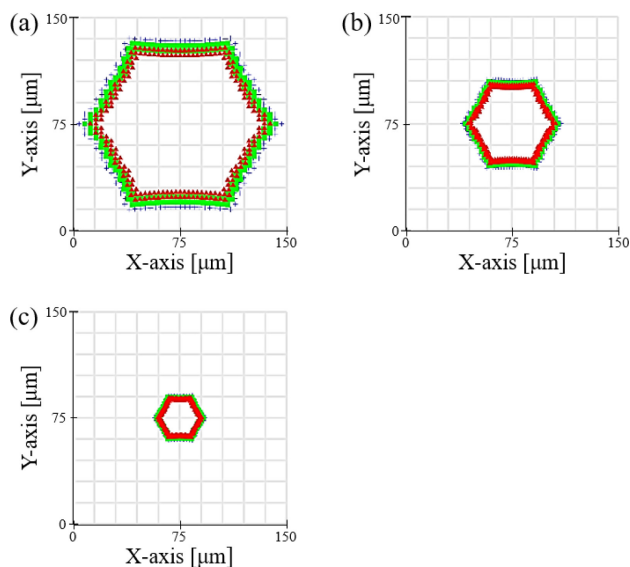


Fig. 4 Spot diagram simulations of the imaging optical module showing chromatic performance at different reduction magnifications: (a) 0.8 $\times$ , (b) 0.4 $\times$ , and (c) 0.2 $\times$ . The wavelengths simulated are 370 (red), 365 (green), and 360 (blue)

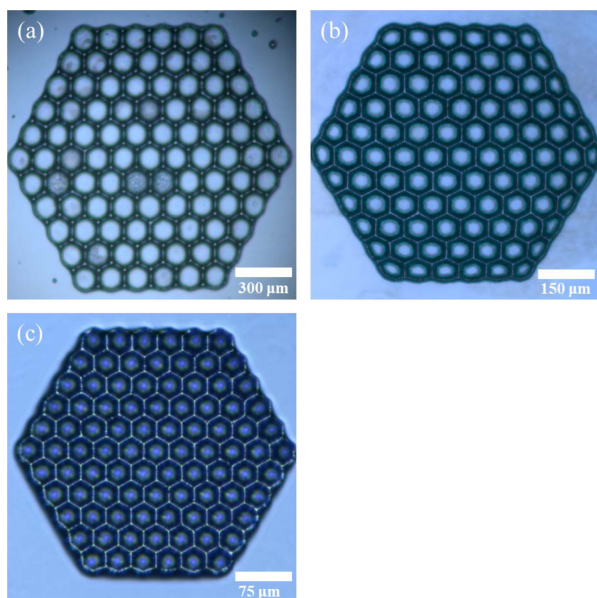


Fig. 5 Optical microscope images of hexagonal hydrogel scaffolds fabricated at reduction magnifications of (a) 0.8 $\times$ , (b) 0.4 $\times$ , and (c) 0.2 $\times$

performance to theoretically form high-resolution patterns at each magnification, providing a crucial basis for validating the feasibility of the actual system fabrication.

Fig. 5 shows the actual patterning results from the system fabricated based on the simulation results. It is evident that the honeycomb pattern was transferred into the hydrogel with very

high fidelity under all conditions. The fabricated structures formed a uniform and perfectly interconnected porous network, which is an essential characteristic for cell migration and nutrient supply within the scaffold. Table 1 summarizes the average pore diameters measured at each magnification. To ensure reproducible pore size evaluation, the optical microscope images in Figs. 5(a)-5(c) were analyzed using an image-based measurement procedure. The pixel-to-micrometer conversion factor was calibrated using the scale bar in each image, and the pore boundaries were segmented to extract the pore area  $A$ . Although the pore geometry follows a hexagonal lattice, the pore size was represented using the equivalent circular diameter  $D_{eq} = 2\sqrt{A/\pi}$ , which is a standard descriptor for comparing non-circular pore structures based on area. In the overlaid images, the red crosses indicate the centroid of each pore, while the green circles represent uniform-radius overlays corresponding to the mean  $D_{eq}$  for each magnification condition. This confirmed that more than 95% of the pores across the patterned region were consistently detected, demonstrating high uniformity in pore size across the scaffold. Results of  $100.5 \pm 4.2 \mu\text{m}$  with the 5 $\times$  objective lens (0.8 $\times$  reduction),  $51.2 \pm 2.8 \mu\text{m}$  with the 10 $\times$  objective lens (0.4 $\times$  reduction), and  $25.8 \pm 1.9 \mu\text{m}$  with the 20 $\times$  objective lens (0.2 $\times$  reduction) were obtained. The very small standard deviation in the measured values experimentally demonstrates the high precision and reproducibility of this system. Notably, these results were achieved with a rapid, single exposure process lasting only 3 to 10 seconds, which clearly shows the high-throughput capability of the system. This phenomenon of pore size control can be explained by the optical property that the Numerical Aperture (NA) increases as the magnification of the objective lens increases. According to the Rayleigh criterion, the resolution of an optical system is inversely proportional to the NA; thus, a 20 $\times$  objective lens with a high NA can create finer pores. The key significance of this research is that it presents a cost-effective and practical method for precisely controlling the feature size of the final structure in the range of tens of micrometers simply by changing the objective lens, without the need for expensive DMDs or complex laser scanning equipment. The ability of this system to precisely control pore sizes in the range of 25 to 100  $\mu\text{m}$  is of great importance from a tissue engineering perspective. The 'optimal' pore size for a scaffold varies depending on the type of tissue to be regenerated. For instance, in cartilage regeneration (chondrogenesis), smaller pores of 25-50  $\mu\text{m}$  are advantageous for promoting initial cell attachment and enhancing cell-to-cell signaling by providing a high specific surface area. In contrast, for bone regeneration (osteogenesis), larger pores of 100  $\mu\text{m}$  or more are essential for securing space for vascularization and osteocyte infiltration. Achieving a uniform and interconnected porous network with

Table 1 Experimental parameters and resulting pore diameters for fabricated hydrogel scaffolds

Mode	Objective lens	Optical reduction mag.	Exposure time [s]	Pore dia. [ $\mu\text{m}$ ]
Projected mask	5×	0.8×	10	100.5 $\pm$ 4.2
	10×	0.4×	6	51.2 $\pm$ 2.8
	20×	0.2×	3	25.8 $\pm$ 1.9

precise pore size control (ranging from 25 to 100  $\mu\text{m}$ ) establishes the morphological foundation for the scaffold's structural stability. Moreover, these structural characteristics play a critical role in mimicking the extracellular matrix (ECM) microenvironment of specific target tissues, such as the aforementioned cartilage or bone. Therefore, the wide range of pore size control offered by this system provides a powerful experimental platform not just for creating structures, but for systematically studying and optimizing the scaffold microenvironment to match specific cell types and regeneration goals (e.g., cartilage vs. bone), which constitutes its academic significance. The potential biological applicability of this system could be further expanded if future studies incorporate the optimization of mechanical properties, such as compressive modulus, by adjusting the PEGDA concentration.

#### 4. Conclusion

In this study to overcome the technical limitations of scaffold fabrication for tissue engineering, a new mask projection photolithography system capable of optical magnification control was successfully designed, fabricated, and validated. The developed system was demonstrated to provide an excellent combination of high throughput, high resolution, and process flexibility. The main achievements are as follows. First, the ability to rapidly fabricate porous hydrogel scaffolds with precisely controlled pore sizes within the biologically significant range of 25-100  $\mu\text{m}$  in a matter of seconds using a projection mode was confirmed. Second, it was shown that the micro-dimensions of the final structure could be effectively controlled simply by changing the objective lens, enabling the fabrication of customized scaffolds for various tissue engineering needs. In conclusion, this research expands the horizons of biofabrication technology through an efficient approach of mask projection patterning and lays a solid foundation for its development as a core tool for understanding and reconstructing complex biological systems in the future.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. RS-2024-00400653).

#### REFERENCES

- Langer, R., Vacanti, J. P., (1993), Tissue engineering, *Science*, 260(5110), 920-926.
- Hutmacher, D. W., (2000), Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage, *Biomaterials*, 21(24), 2529-2543.
- Tibbitt, M. W., Anseth, K. S., (2009), Hydrogels as extracellular matrix mimics for 3D cell culture, *Biotechnology and Bioengineering*, 103(4), 655-663.
- Hollister, S. J., (2005), Porous scaffold design for tissue engineering, *Nature Materials*, 4(7), 518-524.
- O'Brien, F. J., (2011), Biomaterials & scaffolds for tissue engineering, *Materials Today*, 14(3), 88-95.
- Place, E. S., George, J. H., Williams, C. K., Stevens, M. M., (2009), Synthetic polymer scaffolds for tissue engineering, *Chemical Society Reviews*, 38(4), 1139-1151.
- Hutmacher, D. W., Schantz, J. T., Lam, C. X., Tan, K. C., Lim, T. C., (2007), State of the art and future directions of scaffold-based bone engineering from a biomaterials perspective, *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 1(4), 245-260.
- Li, W. J., Laurencin, C. T., Caterson, E. J., Tuan, R. S., Ko, F. K., (2002), Electrospun nanofibrous structure: a novel scaffold for tissue engineering, *Journal of Biomedical Materials Research*, 60(4), 613-621.
- Li, D., Xia, Y., (2004), Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?, *Advanced Materials*, 16(14), 1151-1170.
- Murphy, S. V., Atala, A., (2014), 3D bioprinting of tissues and organs, *Nature Biotechnology*, 32(8), 773-785.
- Melchels, F. P. W., Domingos, M. A. N., Klein, T. J., Malda, J., Bartolo, P. J., Hutmacher, D. W., (2012), Additive manufacturing of tissues and organs, *Progress in Polymer Science*, 37(8), 1079-1104.
- Derby, B., (2012), Printing and prototyping of tissues and scaffolds, *Science*, 338(6109), 921-926.
- Malda, J., Visser, J., Melchels, F. P., Jüngst, T., Hennink, W. E., Dhert, W. J. A., Groll, J., Hutmacher, D. W., (2013), 25th anniversary article: Engineering hydrogels for biofabrication, *Advanced Materials*, 25(36), 5011-5028.
- Cui, X., Breitenkamp, K., Finn, M. G., Lotz, M., D'Lima, D. D., (2012), Direct human cartilage repair using three-dimensional

- bioprinting technology, *Tissue Engineering Part A*, 18(11-12), 1304-1312.
15. Wang, C., Chen, X., Hong, J., Meng, L., Cheng, W., Zhu, X., Li, P., (2020), Extendable, large-field multi-modal optical imaging system for measuring tissue hemodynamics, *Biomedical Optics Express*, 11(5), 2339-2351.
  16. Greb, C., Ferraro, P., (2016), Infinity optical systems, *Optik & Photonik*, 11(1), 34-37.
  17. Bryant, S. J., Nuttelman, C. R., Anseth, K. S., (2000), Cytocompatibility of uv and visible light photoinitiating systems on cultured NIH/3T3 fibroblasts in vitro, *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 11(5), 439-457.
  18. Ostmann, S., Kähler, C. J., (2022), A simple projection photolithography method for low-cost rapid prototyping of microfluidic chips, *Microfluidics and Nanofluidics*, 26(3), 24.



**Sang Seon Lee**

Ph.D. candidate in the Energy & Nano Technology Group, Korea Institute of Industrial Technology.

E-mail: seon79kr@kitech.re.kr



**Jae Cheol Park**

Ph.D. in the Purpose Built Mobility Group, Korea Institute of Industrial Technology.

E-mail: jerwual@kitech.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 각종 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://www.editorialmanager.com/jkspe/>

한국정밀공학회지 저널: <https://jkspe.or.kr/>

# 한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

## 논문투고 및 게재규정

### 제1조 (목적)

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

### 제2조 (투고자)

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

### 제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

### 제4조 (연구범위)

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

### 제5조 (투고 구분)

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

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

### 제6조 (접수)

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

### 제7조 (심사 및 게재 결정)

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

### 제8조 (저작권)

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

### 제9조 (자료공개)

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

### 제10조 (원고작성요령)

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

### 제11조(게재료)

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

## 논문집필요령

1. 논문원고를 투고할 때는 한국정밀공학회지 양식에 맞춰 <https://www.editorialmanager.com/jkspe/>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: <https://jkspe.or.kr/policy/ethics.php>
- 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 이 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 학회와 관련된 학술활동과 논문 및 발표 등에서 행하여진 위조·변조·표절·부당한 논문저자 표시 행위·이중게재 등을 말하며 다음 각 호와 같다.

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

## 제 2 장 저자

### 제4조(저자의 정직성)

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

### 제5조(저자의 기준)

논문의 저자가 되기 위해서는 아래 4개의 기준을 모두 충족하여야 한다.

이 기준은 제1저자, 교신저자를 포함한 모든 종류의 저자를 대상으로 한다.

- ① 연구 논문의 구상, 설계, 데이터의 획득과 분석, 해석에 실제로 기여한 자.
- ② 논문의 초안을 작성하거나 논문의 중요한 내용을 학술적으로 개선한 자.
- ③ 출판될 최종 원고를 승인한 자.
- ④ 논문 내용의 정확성과 진실성에 대한 의문이 있을 경우 적절히 대응하는 것에 대한 책임이 있음을 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 학회 발행 학술지에 이중으로 투고하는 행위는 부정행위로서 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 부정행위가 확인된 저자에게는 위원회 결정에 따라 부정행위의 경중을 고려하여 다음의 제재를 선택하여 가할 수 있다.
  1. 해당 발표연구물에 대한 학회 간행물에 게재취소
  2. 5년간 학회 발행 학술지에 투고금지
  3. 5년간 학회 학술대회 발표금지
  4. 해당 논문이 이미 출판된 경우에는 해당 학술지에 게재 취소를 공지하고, 부정행위자 소속기관에 부정행위 내용 통보
  5. 학회 회원자격 박탈
- ② 제보자가 고의로 허위제보를 하였을 경우 위원회의 결정에 따라 연구 부정행위자 수준과 동일한 제재를 가할 수 있다.

### 제14조(피조사자 권리 보호)

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

### 제15조(조사의 기록과 정보의 공개)

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

### 제16조(조사결과의 보고)

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

# 한국정밀공학회지(JKSPE) 연구윤리 및 저작권 동의서

논문 제목(국문):

논문 제목(영문):

저자명(전체):

소속:

\*책임저자 ORCID:

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

- 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
- 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판 물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 받았습니니다.
- 저자(들)는 위 논문의 작성과 연구에 실질적인 기여를 하였으며, 위 논문의 작성과 내용에 대한 책임이 있습니다.
- 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.
- 저자(들)는 위 논문이 과거에 어떠한 학술지에도 출판된 적이 없으며, 현재 다른 학술지에 게재를 목적으로 제출되었거나 제출할 계획이 없습니다.
- 저자(들)는 한국정밀공학회의 윤리규정에 있는 한국정밀공학회의 학술활동 윤리규정을 준수합니다. 또한, 중복 출판이나 표절 예방을 위해 CrossRef 확인에 동의합니다.
- 책임저자는 위 논문의 공동저자들이 1항-6항의 사실들을 인식하고 있으며, 위 6가지 사항들에 대하여 동의합니다.
- 한국정밀공학회는 저자(들)가 위 7가지 사항에 동의하지 않았을 경우, 위 논문의 출판을 지연시키거나 중지시킬 수 있는 권리를 가집니다.
- 전체 저자들은 위 논문의 저작권과 일체 권리 양도에 관한 권한을 책임저자에게 일임하며, 책임저자는 전체 저자들을 대표하여 저작권을 양도합니다.

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

성명 \_\_\_\_\_

서명 \_\_\_\_\_

날짜 \_\_\_\_\_

전자 문서에 디지털 서명을 하시면 자필 서명과 동일한 효력이 인정됩니다. 자필 또는 디지털 서명 중 원하시는 방식으로 서명해주시기 바랍니다.

본 연구윤리 및 저작권 동의서에 서명하여 한국정밀공학회에 제출하지 않는 경우, 해당 논문은 출판될 수 없습니다.

# (사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

## 설립목적

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

## 회원(사) 구성

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

## 관련정부기관과의 관계

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

## 주요활동현황

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

## 발간자료

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

## 발행규정

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

## 부문위원회 활동

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

## 특별회원사 가입

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

# (사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

## 한국정밀공학회상

### 정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

### 학술상

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

### 생산기술상, 정밀기술상

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

### 공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

### Best Editor Award

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

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

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

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

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

### KSPE Young Researcher Award

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

## 특별상

### 가헌학술상

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

### 현송공학상

- 현송교육문화재단의 지원으로 현송공학상을 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://www.editorialmanager.com/jkspe/>  
Search for Journal of Korean Society for Precision Engineering: <https://jkspe.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://www.editorialmanager.com/jkspe/>).
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: <https://jkspe.or.kr/policy/ethics.php>
- 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.

# JKSPE Copyright Transfer Agreement

---

**Manuscript Title (KOR):**

**Manuscript Title (ENG):**

**Manuscript Authors (all):**

**Affiliation:**

**Corresponding author's ORCID:**

---

**Please read this form carefully before signing:**

1. The submitting/corresponding authors (hereafter referred to as "authors") warrant that the copyright shall be transferred to the Korean Society for Precision Engineering (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. Authors also agree to CrossRef verification of the manuscript for prevention of duplicate publication and plagiarism.
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.

**Name** \_\_\_\_\_

**Signature** \_\_\_\_\_

**Date** \_\_\_\_\_

A digital signature affixed on an electronic document shall have the same effect as a handwritten signature by the Korean Digital Signature Act. Please select a preferred method to sign this agreement.

This article will not be published unless Copyright Transfer Agreement has been signed and received by KSPE.

---

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE) Editorial Office  
12F, SKY1004 bldg., 50-1, Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul 04508, Republic of Korea  
Fax: +82-2-518-2937; Phone: +82-2-518-2928; E-mail: paper@kspe.or.kr

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 27 · Number 4 · April 2026

## REGULAR PAPERS

### Investigation of Optimal Heat Treatment Conditions for Enhancing the Magnetorheological Finishing Processability of Electroless Nickel Plating Layers

J.G. Kang · H.C. Lee · S.H. Park · M. Jeon · J.K. Ham · B. Jeong · H.H. Maeng · J.Y. Heo · H.R. Jang · Y.H. Kim · G.-H. Kim · W. Lee 1335

### Development of Property Prediction Algorithms for WC-Based Alloy Tool Materials According to Process Conditions

C.-W. Lee · S. Woo · J. Kim 1353

### Hydrophobicity and Tribological Property of Femtosecond Laser Induced Periodic Surface Structures on 7075 Aluminum Alloy

S. Li · K. Zhang · W. Liu · X. Jiang · H. Wang · J. Wang · S. Chen 1365

### Prediction of Milling Temperature for Nickel-based Superalloy GH4169 Using the RIME-BP-NN Model

G. Zhu 1387

### Hybrid Bubble Removal for High-Efficiency Underwater Pulse Laser Machining: Effects of Water Flow and Vibration

J.H. Kim · S. Yoon · B.S. Kim · J. Kim · S.-H. Cho 1403

### Critical Straightness-Error Threshold Governing Lateral Thickness Uniformity in Doctor-Blade Coating

Y. Yan · T. He · Y. Li · Z. Fang · J. Wan · H. Li 1419

### Online Discrimination of Diamond Grinding Wheel Shaping Conditions Using Acoustic Emission Signal

Y. Tian · S. Wang · J. Wang · X. Hu · G. Wang · J. Wang · Z. Ding 1437

### An Improved Geometric Calibration Method for Accurate Phase Measuring Deflectometry

M.T. Nguyen · H.-G. Rhee · Y.-S. Ghim 1453

### AssembleNet: End-to-End Deep Learning Modelling of Robot Trajectories for Virtual Commissioning of Automotive Assembly

S. Wang · Y. Li · X. Zhang · Y. Liu 1463

### Modeling of Ball Bearings for Accurate Force and Torque Transmission in Dynamic Robotic Systems

J. Kim · K. Kong 1485

### Tool Wear State Identification and Prediction in Gyroscopic Milling of CFRP/Ti-6Al-4V Laminated Material

L. Liu · W. Kang · Q. Fu 1497

### A Novel Composite Nonsingular Terminal Sliding Mode Control with Lumped Uncertainties Observer for Robot Manipulator: From Theory to Experiment

A.-D. Pham · N.T. Vo 1517

### Path Planning Method for Titanium Alloy Ingot Grinding Robots Based on 3D Reconstruction

K. Chen · J. Fan · Z. Wang · Y. Guo · R. Pan 1533

### Graph Attention Network-Based Surrogate Model for Acceleration and Generalization of Injection Molding Simulations

K. Lee · J. Lee · J. Kim · G. Noh 1547

### Vibration-Based Identification of Unbalanced Masses in Front-Loading Washing Machines Via Multibody Dynamics Simulation and Artificial Neural Networks

D.-G. Lim · M.-H. Pak 1567

### Electrically Assisted Pressure Joining and Forging of Dissimilar Aluminum Alloys

T.T. Do · T.-A. Bui-Thi · V.C. Phan · S. Basak · Y.-H. Lee · J.H. Bae · M.-J. Kim · S.-T. Hong 1583

### Phase-engineered Tin Sulfides Heterojunction Photodiode Via a Single-step Plasma Process

J.H. Kim 1595

### Textile-Based Three-Electrode Microbial Electrochemical Cell-Based Biosensor for Toxicant Detection in Water

T.H. Kim · I. Song · S.H. Lee · Y. Ahn · H. Liu 1601

### Optimization of Aerosol Printing Parameters Via Experiments of Balancing Conductivity and Geometric Fidelity in Flexible Electronics

P. Li · S. Liu · H. Zhang 1611

### Microstructural Evolution and Strengthening Mechanisms of SiC-Reinforced FeCoNiCrAl Coatings by Laser Directed Energy Deposition

W. Wang · K. Zhang · T. Ye · W. Liu · W. Xi · Z. Hou · H. Wang 1621

**Micro Mechanical Machining of 3D Printed Ceramic Structures**

J.H. Lee · J.-S. Im · M.-S. Park · B.H. Kim 1657

**Prediction of Mechanical Properties in Micro-hammer Forging Assisted Laser Additive Manufacturing Using WOA-SVR**

J. Wang · M. Liu · Y. Mao · L. Feng · J. Wang · D. Lu · J. Xu · K. Li · T. Xie · R. Gu 1673

**Dry Sliding Wear and Microstructural Evolution of Hogonas + 50% WC Cladding Over SS410 Steel**

V. Singh · S. Kaur · A. Bansal · D.K. Goyal · S. Singh 1691

REVIEW PAPERS

**On a Stable Forming Condition of Spinning Bending Process For Manufacturing Big-Tapered Profiled Ring Disk**

S. Zou · X. Li · F. Li · T. Pan · X. Li 1703

**Insights Into the Industrial Applications and Future Directions of Bulk Metallic Glasses Via Additive Manufacturing**

S.J. Park · S. Cho · P.H.N. Ng · J. Lee · J. Kim · S. Jeon · M.T. Khan · L. Chen · Q. Wu · S.K. Moon 1731

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 13 · Number 2 · March 2026

## REGULAR PAPERS

### A Dual-Target Optimization Method for MCF Polishing Process of Optical Components

H. Ye · Z. Li · Z. Wang · C. Jiang · G. Zhou · L. Sun 359

### Deep Learning-Driven Models for Analyzing Numerical Control Power Signals and Surface Characteristics in Sustainable Milling of Additively Manufactured Al-Si Alloys

M.K. Gupta · N.S. Ross · C.S. Shibi · R. Chudy · P. Nieslony · M.E. Korkmaz · J.B. Krolczyk · G.M. Krolczyk 373

### Optimization of Machine Tool Spindle Cooling for Enhancement of Thermal Prediction Accuracy and Energy Efficiency

C.-K. Huang · T.-C. Chen · K.-Y. Li · Y.-H. Tsai · S.N. Maurya 393

### Evaluation of Mono and Hybrid Nanofluids in MQL Milling of Ti-6Al-4V: Machining Performance, Surface Integrity and Sustainability

A. Aydın · Ö.F. Sağdıç · M. Yücel · Y.F. Yapan · H.Z. Kızılkaya · A. Uysal 413

### A Novel Approach to High-Density Ceramic 3D Printing Using Selective Reaction Hardening of Alumina Slurry

Y.S. Joo · S.-H. Park · J.W. Ko 435

### Optimal Design of TPMS-Based Non-Pneumatic Tire Spoke with Adaptive Directional Stiffness

S. Kim · K. Lee · S.-H. Oh · J.-W. Choi · K. Park 453

### Intermittent Laser Selective Sintering of Aluminum Particles for Cost-Effective One-Step Manufacturing of Alternative Micro-Conductors

S. Back · H. Park · B. Kang 469

### Progressive Development of n-poly-Si Contacts and Stencil Refinement for High-Efficiency p-TOPCon Solar Cells

M.Q. Khokhar · H. Yousuf · Alamgeer · M. Chu · R.U. Rahman · M.N. Aida · J.A. Jony · J. Yi 483

### Nano-structure Engineering With an Ultrasonic-assisted DHBT Technique to Improve the Hydrogen Evolution Reactions in Alkaline Water Electrolysis

H. Lee · E. Hong · H. Lee · S. Eun · C. Lee · M. Kwak · M. Choi 495

### Development of a Micro w-EDM Pulse Generator with Energy-Optimized Boost Effect for Study on High-Precision Machining of Silicon Carbide Microstructures

S.-T. Chen · Y.-Y. Cai 505

### Development of an Electrochemical Cell-Based Oxygen Partial Pressure Control System for Food Storage

J.H. Lee · D.E. Kim · J.Y. Lee · J.W. Shim · D. Kim · Y. Ko · K. Lee · J.H. Shim 521

### Theoretical Investigations on the Effect of Rib Width-to-Channel Width Ratio of a CNT-Reinforced Graphite Composite Bipolar Plate on the Performance of PEMFCs

D.M. Yasin · D. Lee 529

### Simultaneous Fabrication of $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\delta}$ Nanoparticle-Infiltrated Layers and Electrodes using Electrostatic Spray Deposition and Flashlight Sintering for Solid Oxide Fuel Cells

H. Lee · J. Park · J. Yoon · Y.-B. Kim 555

### Modular Mechanism Design Optimization in Large-Scale Systems with Manufacturing Cost Considerations

S. Lee · N. Kang 565

### Elastomeric Sensor Array for Displacement Measurement in Pneumatic Rolling Rubber for Automotive Dampening Applications

M.J. Hossain · S.T. Mouna · S.S. Kamath · J.M. Park · H.-S. Oh · Y.-S. Kim · J.-W. Choi 591

### A Comparative Study of Supervised Learning and Reinforcement Learning Techniques for Power-Split Hybrid Electric Vehicle Controllers

J. Gim · C. Ahn 605

### Hybrid Framework for Evaluating and Selecting Sustainable Materials in Product Development

C.-W. Chen 627

### Investigation of the Effects of the Strut Diameter of Non-Stochastic Cells on Flow Characteristics

G.S. Mduma · D.-G. Ahn · Y.D. Jeong 659

### Visible LED Light-Driven Dry Phase Photodegradation of Gaseous Toluene Using Cu-doped $\text{TiO}_2$

P.J. Chengula · H. Charles · J.Y. Seo · C.S. Lee 671

**Temperature Dependent Mechanical Properties of End-of-Life Carbon Fiber Reinforced Plastics**

S. Jeon · J. Kim · S.J. Park · J.Y. Kim · S.K. Moon · D. Yang 685

**Efficient Ultrasonic Energy Transmission Through Flexible Waveguide for Minimally Invasive Surgery**

G. Yao · M. Wu · J. Lai · Y. Zou · L. Zheng · C. Wang 703

REVIEW PAPERS

**A Review on Circular Economy Approaches for Pre-impregnated Carbon Composites Mould Remanufacturing**

A. Masetti Placci · L. Bernini · P. Albertelli · C. Cimino · F. Perotti · M. Monno 715

**A Systematic Review of Machine Vision Applications in Factory and Manufacturing Processes: From Quality Control to Predictive Diagnostics**

S. Kim · T.P. Nguyen · J. Yoon 745

**Miniaturized Microbial Fuel Cells for Smart Devices: Application and Power Generation**

Y.M. Mao · K. Ramya · S. Goel 777

**Superlubricity for Sustainable Technology: A Review**

Y. Liu · K. Le · S.-M. Bae · W. Song · Y.-H. Hwang · S. Xu · D.-E. Kim 797

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

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

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

# **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology**

**Volume 4 · Number 1 · January 2026**

## REGULAR PAPERS

**A Sensor Location-based Diagnosis Method for Temperature  
Uniformity of Hotplate with Convolution Neural Network**

Jinwoo Lee · Daeil Kwon 1

## REVIEW

**Inclusive AI and Low-cost Robotics for Sustainable Smart  
Systems: Bridging the Global Technological Divide**

Hyunsu Lee · Sung-Hoon Ahn 11

**Defect Detection and Optimization for Additive Manufacturing  
Powered by Artificial Intelligence: A Review**

Noah Miller · TaeHeon Sung · Haseung Chung 27

# 2026년 제3차 이사회 회의록

◎ 일 자 : 2026년 3월 13일(금)

◎ 장 소 : 학회 회의실

◎ 참석자 : 이상원, 김규만, 안형준, 곽문규, 김남근, 김보현, 문두환, 김양진, 김태곤, 이창우, 강현욱, 김산하, 김석민, 김영진, 박인규, 손정우, 주백석, 이봉기, 이현욱, 이동윤, 이주연, 김영범, 김창주, 송지현, 송시한, 조정대, 최영재, 김해진, 윤희택, 이광일, 이현택, 윤주성, 이문구, 이지혜, 이현섭, 임지석, 장진아, 정재일, 주기남, 한민우, 허세곤, 남정수, 노준석, 박형욱, 이동진, 전용호, 조영태, 차석원, 김건희, 이강재, 이재열, 장원석, 이동원, 오정석, 김호찬, 천두만, 김종백, 김현준, 박석희, 박근, 신현정, 안상훈, 최정욱, 김동성, 권석진, 조영환, 한국현, 현승민  
재적 110명 중 68명(위임 14명) 참석

## I. 주요보고사항

- 2026년 부문위원회 및 위원회 위촉장 → 학회 홈페이지 [회원활동내역]에서 온라인 발급 (3/24부터)
- 과기부-과천과학관: 2025년 사업실적 및 2026년 사업계획서 제출 완료(2026.2.28)
- 한국기계단체총연합회(기총) 제1차 정기회의 참석 보고 (2026.2.26(목)16:00, 참석자: 이상원)  
- 주요안건: 2026 기계의 날 일정 확정(26.10.29(목)), 올해의 10대 기계기술 선정운영위원(안) 승인
- 회원현황: 총 회원수: 3,348명 / 정회원: 2,195명, 학생회원 1,153명, 특별회원사 51개 업체
- 2026년 2월말 수입 지출 현황 보고
- IJPEM Special Issue 2027년 9월 주제 논의
- IJPEM-GT Special Issue 2027년 5월 주제 논의
- 국제학술지 2027년 OUP-OA 전환 TF 제2차 회의 결과 보고
- 2026 춘계학술대회(2026.5.13-15, 제주 신화월드) 현황 보고
- PRESM 2025 제3차 조직위원회 (2026.6.28-7.3, Marina Bay Sands EXPO, Singapore) 회의 결과보고
- 부문위원회 및 위원회
  - 10개 부문위원회 구성(안) 보고
  - 부문위원회 연간 부문활동 계획(안) 보고
  - 산학협력위원회 활동 보고
  - 초정밀 위치결정연구회 활동보고

## II. 승인 및 의결사항

- 신입회원 인준(안)  
- 종신회원 박명주(LG전자 생산기술원), 정회원 최종성(한국뉴욕주립대) 외 22명, 학생회원 임경준(서울과기대) 외 6명
- [로봇제어자동화] 부문위원회 산하 연구회 설립(안)
  - 1) 연구회 명칭: 제조공정 AI 로봇융합기술 연구
  - 2) 위원장: 이재선(한국생산기술연구원 팀장)
  - 3) 주요활동: 포커스 세션 참여, 저널 특집호
- [정밀측정] 부문위원회 제9차 정밀측정 워크숍 개최(안)
  - 1) 일자 및 장소: 8/19-21, 부산 부경대학교 장보고관
  - 2) 주제: 정밀측정 부문위원회 제9차 정밀측정 워크숍
  - 3) 프로그램: 연구주제 발표 약 8~12편 예상
- [교육위원회] 제11차 창의경진대회 개최(안) 개최(안)
  - 1) 일자 및 장소: 2026년 12월 4일(금), 창원컨벤션센터 (CECO)
  - 2) 주제: 생성형 AI 시대의 창의적 Smart & Green 정밀공학

# 신입회원인준명단

•정회원•

회원번호	이름	소속	회원번호	이름	소속
202611295	최종성	한국뉴욕주립대학교	202611278	Ravinder Reddy	경희대학교
202611289	허준혁	(주)화인솔루션	202611281	이윤주	대구기계부품연구원
202611291	이동욱	오알오(주)	202611270	김형구	한화시스템(주)
202611288	박병규	공주대학교	202611268	박강문	국립한국교통대학교
202611287	김경업	티에스이	202611266	이정우	경북대학교
202611286	윤동혁	KAIST	202611265	김영덕	POSTECH
202611284	조현우	대구기계부품연구원	202611276	김동민	(재)대구기계부품연구원
202611283	김은수	한국전자기술연구원	202611264	한성연	경북대학교
202611277	정구열	서울대학교	202611281	이윤주	대구기계부품연구원
202611275	편도현	서울대학교	202611270	김형구	한화시스템(주)
202611274	박재일	아주대학교	202611268	박강문	국립한국교통대학교
202611272	김시형	한국생산기술연구원	202611266	이정우	경북대학교
202611293	이혁진	한국전자기술연구원	202611265	김영덕	POSTECH
202611271	안정구	한화시스템(주)	202611276	김동민	(재)대구기계부품연구원
202611269	최태영	원광대학교	202611264	한성연	경북대학교

• 학생회원 •

회원 번호	이름	소속	회원 번호	이름	소속
202611290	임경준	경상국립대학교	202611279	Mahendra Nuthalapati	경희대학교
202611294	이도근	경상국립대학교			
202611285	신승호	서울과학기술대학교	202611282	윤요한	서울대학교
202611280	김태현	서울대학교	202611273	김민서	한국생산기술연구원

• 종신회원 •

회원 번호	이름	소속
202611267	박명주	LG 전자 생산기술원

# 2026년 사단법인 한국정밀공학회 임원

## 회장

이상원(성균관대학교)

## 수석부회장

오정석(한국기계연구원)

## 부회장

김규만(경북대학교)  
성대운(현대자동차(주))

안형준(숭실대학교)  
이영수(삼성전자)

김호찬(국립경국대학교)  
이인환(충북대학교)

류상문(주)DN솔루션즈  
최영재(한국생산기술연구원)

박상후(부산대학교)

## 감사

이동원(전남대학교)

현승민(한국기계연구원)

## 총무이사

곽문규(경북대학교)

김남근(서강대학교)

김보현(숭실대학교)

문두환(고려대학교)

## 재무이사

고승환(서울대학교)

김양진(부산대학교)

김태곤(한국생산기술연구원)

이창우(건국대학교)

## 편집이사

강봉철(국민대학교)  
김영진(KAIST)  
박인규(KAIST)  
윤현준(숭실대학교)  
이현택(인하대학교)  
진종한(주)미터랩)

강현욱(UNIST)  
김해진(연세대학교)  
손정우(국립금오공과대학교)  
윤희택(KAIST)  
이호원(서울대학교)  
천두만(울산대학교)

김동립(한양대학교)  
김효영(한국공학대학교)  
안지환(POSTECH)  
이광일(경일대학교)  
정구현(울산대학교)  
추원식(경상국립대학교)

김산하(KAIST)  
박근(서울과학기술대학교)  
오기용(한양대학교)  
이동훈(숭실대학교)  
정훈의(UNIST)

김석민(중앙대학교)  
박영민(UNIST)  
윤준영(연세대학교)  
이윤석(서울대학교)  
주백석(국립금오공과대학교)

## 사업이사

강윤정(제주대학교)  
김진호(영남대학교)  
박준(한국광기술원)  
윤주성(경남대학교)  
이현섭(동아대학교)  
정재일(국민대학교)

강태준(인하대학교)  
김충수(Eloi Materials (EML))  
서진호(국립부경대학교)  
이문구(아주대학교)  
이현욱(한국철도기술연구원)  
조영삼(원광대학교)

권지연(동국대학교)  
김현준(경북대학교)  
송용남(고려대학교)  
이봉기(전남대학교)  
임지석(영남대학교)  
주기남(조선대학교)

김무림(한국로봇융합연구원)  
박석희(부산대학교)  
신현정(KAIST)  
이원균(충남대학교)  
장진아(POSTECH)  
최정욱(중앙대학교)

김종백(연세대학교)  
박용재(강원대학교)  
안상훈(한국기계연구원)  
이지혜(한국기계연구원)  
정영훈(경북대학교)  
한민우(동국대학교)

## 기획홍보이사

류시형(전북대학교)

이동윤(한국생산기술연구원)

이주연(서울과학기술대학교)

허세곤(한국기계연구원)

김동성(POSTECH)

## 국제이사

김미소(KAIST)  
맹상진(홍익대학교)  
조영태(국립창원대학교)

김영범(한양대학교)  
박형욱(UNIST)  
차석원(서울대학교)

김창주(한국기계연구원)  
송지현(단국대학교)  
홍성태(울산대학교)

남정수(한국생산기술연구원)  
이동진(건국대학교)

노준석(POSTECH)  
전용호(아주대학교)

## 대의협력이사

권석진(한국철도기술연구원) 김건희(국립한밭대학교)  
심창섭(한국산업기술기획연구원) 이강재(주)DN솔루션즈  
조정대(한국기계연구원) 최정오(LG전자)

김민찬(주)DN솔루션즈  
이재열(한국로봇융합연구원)  
한국현(주)삼영기계)

김종혁(위아공작기계(주))  
장원석(한국기계연구원)

송시한(주)와이지-원)  
조영환(LIG넥스원(주))

## 특별회원사

### 다이아몬드

신도리코(주)  
(주)이수페타시스

(주)DN솔루션즈  
(주)케이씨텍

LIG디펜스&에어로스페이스 (주)스맥  
한국화낙(주) 현대자동차(주)

위아공작기계(주)  
화천기공(주)

### 골드

(주)마리알로  
(주)프로토텍

(주)어드벤처코리아  
핵사곤

(주)에이스나노캠

(주)엔도로보틱스

지앤피테크놀로지(주)

### 실버

(주)심팩

(주)와이지-원

(주)웨이퍼펍

(주)하이솔라

한국공작기계산업협회

### 패밀리

LPKF Korea  
라운엑스솔루션즈(주)  
(주)미디어스트리트  
(주)아이엠에스코리아  
(주)위즈윌텍스  
(주)큐빅테크  
(주)하스피

QED Technologies  
라이트런(주)  
(주)벡터바이오  
(주)앨리텍  
(주)유니오텍  
(주)크렐로  
(주)한국대베소프트

(주)넥스페이스  
리파인(주)  
브루커코리아(주)  
에이비씨무역  
(주)인사이드테크  
(주)테스트원

더싸인  
(주)매이드  
세움트로닉스  
(주)에이엠코리아  
(주)제이엔텍  
(주)티앤알바이오팜

디케이에스에이(주)코리아(주)  
맥스트레이딩  
(주)스팀솔루션  
(주)에임즈  
참테크  
하비스탕스(주)

## Editor-in-Chief

김보현  
송실대학교  
bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

<b>강봉철</b> 국민대학교	<b>강성목</b> 대구가톨릭대학교	<b>강현욱</b> UNIST	<b>고승환</b> 서울대학교
<b>곽문규</b> 경북대학교	<b>김남근</b> 서강대학교	<b>김동성</b> POSTECH	<b>김무림</b> 한국로봇융합연구원
<b>김산하</b> KAIST	<b>김양진</b> 부산대학교	<b>김창주</b> 한국기계연구원	<b>김효영</b> 한국공학대학교
<b>문두환</b> 고려대학교	<b>박민수</b> 서울과학기술대학교	<b>박정재</b> (주)미터랩	<b>박형욱</b> UNIST
<b>손정우</b> 국립금오공과대학교	<b>안지환</b> POSTECH	<b>이광일</b> 경일대학교	<b>이창우</b> 건국대학교
<b>이창환</b> 서울과학기술대학교	<b>이현섭</b> 동아대학교	<b>이현욱</b> 한국철도기술연구원	<b>전용호</b> 아주대학교
<b>정구현</b> 울산대학교	<b>조영학</b> 서울과학기술대학교	<b>주백석</b> 국립금오공과대학교	<b>진종한</b> (주)미터랩
<b>천두만</b> 울산대학교	<b>추원식</b> 경상국립대학교	<b>황지홍</b> 서울과학기술대학교	

## Members of Editorial Board

<b>맹상진</b> 홍익대학교	<b>박석희</b> 부산대학교	<b>안다훈</b> 서울과학기술대학교	<b>안상훈</b> 한국기계연구원
<b>윤해성</b> 한국항공대학교	<b>윤헌준</b> 송실대학교	<b>이봉기</b> 전남대학교	<b>이원균</b> 충남대학교
<b>이현택</b> 인하대학교	<b>이호원</b> 서울대학교	<b>장진아</b> POSTECH	<b>주기남</b> 조선대학교
<b>최동휘</b> 경희대학교	<b>최영만</b> 아주대학교	<b>최정욱</b> 중앙대학교	<b>최진승</b> 건국대학교
<b>한민우</b> 동국대학교	<b>허세곤</b> 한국기계연구원	<b>김갑용</b> Iowa State University	<b>김범준</b> University of Tokyo
<b>김우균</b> University of Cincinnati	<b>민상기</b> University of Wisconsin-Madison	<b>Simon Park</b> VinUniversity	<b>Patrick Kwon</b> San Diego State University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

**VOLUME 43, NUMBER 4/ April 2026**

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

월간 · 제43권 제4호 [통권 제421호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2026년 3월 25일

발행일 2026년 4월 1일

발행인 이상원

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

[04508] 서울 중구 종림로 50-1(만리동 1가 51-1 SKY1004빌딩) 12층 / FAX (02)518-2937 / http://www.kspe.or.kr

사무국장 김영심 / (02)518-0722 / kspe@kspe.or.kr

JKSPE(한국정밀공학회), IJPEM-ST 김소진 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpep.st@kspe.or.kr

IJPEM(GT) 정혜림 / (02)518-0723 / ijpep@kspe.or.kr

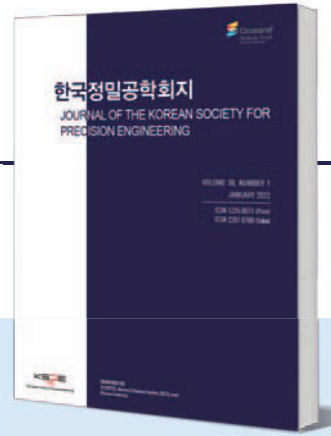
국내학술대회(춘·추계) / (02)393-0725 / conf@kspe.or.kr

국제학술대회(PRESM) 김영심 / (02)6925-0710 / presm@kspe.or.kr

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

# 한국정밀공학회지(JKSPE)

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING



## Indexed in SCOPUS, KCI

SCOPUS 등재지(2017~), KCI 등재지(2001~)  
1984년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행  
ISSN 1225-9071(Print) / 2287-8769(Online)

### INTRODUCTION

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

### PUBLICATION FEE

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

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

### ADVERTISEMENT

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

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

### TOPICAL ISSUE

TOPIC	
2023:	스마트/디지털 헬스케어 기술
2024:	가공된 기능성 재료 기술
2025:	레이저를 이용한 가공 기술
2026:	AI 융합 제조로봇 조작 및 자동화 기술

# IJPEM-ST

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-SMARTTECHNOLOGY



## 2023 New Journal

2023년 창간, 연간 2회, 1월·7월 1일 발행  
ISSN 2951-4614(Print) / 2951-6382(Online)

### INTRODUCTION

1. Full Open Access
2. Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

### AIMS AND SCOPE

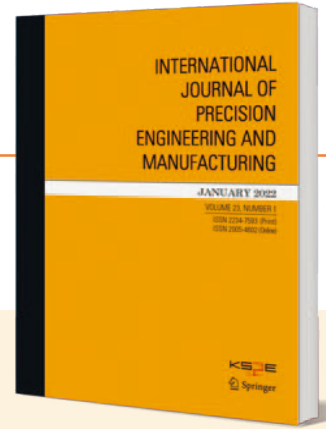
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality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

### WEBSITE

www.ijpem-st.org

# IJPEM

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



2024 Impact Factor: 3.6

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지  
2000년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행  
ISSN 2234-7593(Print) / 2005-4602(Online)

## INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

## AIMS AND SCOPE

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

## SPECIAL ISSUE

- TOPIC**
- 2023: Robots for Manufacturing Processes and Systems
  - 2024: Semi Conductor Manufacturing
  - 2025: IJPEM 25th Anniversary Special Issue
  - 2026: Humanoid Robots and Physical AI and for Manufacturing

# IJPEM-GT

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY



2024 Impact Factor: 5.6

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지  
2014년 창간, 연간 6회, 홀수월 1일 발행  
ISSN 2288-6206(Print) / 2198-0810(Online)

## INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

## AIMS AND SCOPE

- Energy Saving and Waste Reduction in Manufacturing Processes
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- Design and Manufacturing of Green Products
- Materials for Green Manufacturing
- Management and Policy for Sustainable Manufacturing

## SPECIAL ISSUE

- TOPIC**
- 2016: Hybrid Manufacturing
  - 2017: 4D Printing
  - 2018: Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution
  - 2019: Energy Harvesting
  - 2020: Green Smart Manufacturing
  - 2021: Soft and Green Manufacturing and Applications
  - 2022: Green Manufacturing Coping with Climate Change and Pandemics
  - 2023: NetZero, Achievable by Manufacturing?
  - 2024: Advanced Manufacturing for ESG
  - 2025: Autonomous Manufacturing with Green Technology
  - 2026: Autonomous Manufacturing for Sustainable Industry

# INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY

Impact Factor: **5.6** by JCR in 2024

## About IJPEM-GT

IJPEM-GT is co-published by the Korean Society for Precision Engineering and Springer Nature. The journal is published bimonthly, and JCR 2024 impact factor is 5.6, which ranks it top 12% (22/182) journal in the category of Engineering-Mechanical and top 22.5% (16/71) journal in the category of Engineering-Manufacturing.



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

## Autonomous Manufacturing for Sustainable Industry

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

- Cyber-Physical Production Systems for Sustainable Manufacturing
- Green Robotics and Intelligent Control in Smart Manufacturing
- Sensing, Monitoring and Diagnostics for Green Manufacturing
- Integration of AI in Manufacturing

## I Guest editors:

Prof. **Martin B.-G. Jun**  
(Purdue University, USA)

Prof. **Young Tae Cho**  
(Changwon National University, Korea)

Prof. **Sanha Kim**  
(KAIST, Korea)

Prof. **Seok Kim**  
(Yonsei University, Korea)

## I Submission Procedures

Deadline for Submission Date:  
**November 30, 2025**

Publication Date:  
**May 1, 2026**

Volume, Number:  
**Vol. 13, No. 3**

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

## SMART TECHNOLOGY



IJPEM-Smart Technology (hereinafter 'IJPEM-ST') is a new-launched academic journal which will be published by the Korean Society for Precision Engineering (KSPE).

Submit an IJPEM-ST  
<http://submit.ijpem-st.org>

## Aims and Scope

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

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

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

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

#### • Publication Date (Scheduled)

**Vol. 4 No. 1 January 1, 2026**  
**Vol. 4 No. 2 July 1, 2026**

#### • Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

**Sang Won Lee** / Sungkyunkwan University, Korea

### Co-Editors-in-Chief

**Jay Lee** / University of Maryland, USA

**Jun Ni** / University of Michigan, USA / Shanghai Jiao Tong University, China

### Senior Editor

**Dong Yoon Lee** / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

### 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

**Yangjin Kim** / Pusan National University, 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

**Baeksuk Chu** / Kumoh National Institute of Technology, Korea

**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

**Jihyun Lee** / University of Calgary, Canada

**Wonkyun Lee** / Chungnam National University, Korea

**Kyoungmin Min** / Yonsei University, Korea

**David Rosen** / Agency for Science, Technology and Research, Singapore

**Jung Woo Sohn** / Kumoh National Institute of Technology, Korea

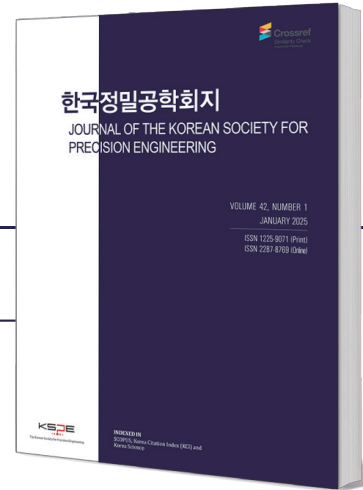
**Joo-Sung Yoon** / Kyungnam University, Korea

# Introducing the New JKSP E Submission System

Journal of the Korean Society for Precision Engineering

Indexed in SCOPUS, KCI

em



Editor-in-Chief: Bo Hyun Kim

Frequency: Monthly

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

Submission to JKSP E: <https://www.editorialmanager.com/jkspe/>

Search for JKSP E articles: <https://jkspe.or.kr/>

## Introduction of Journal

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSP E) 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 JKSP E are enhanced reliability, better motion precision, higher measurement accuracy, and sufficient reliability of precision systems.

## 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

## Award

- JKSP E Award
- Best Editor Award
- Contribution Award

The article processing charge (APC) will be waived for full papers presented at the conference that are written in English and do not include acknowledgment statements.

Email: [paper@kspe.or.kr](mailto:paper@kspe.or.kr) | Tel: +82-2-518-2928



## (사)한국정밀공학회 상 훈 안 내

사단법인 한국정밀공학회에서는 매년 정밀공학분야에 탁월한 업적을 이루고 학문과 기술의 발전에 크게 공헌한 회원 및 관련 연구자, 기업 등을 대상으로 다음과 같이 한국정밀공학회상과 외부상을 시상하고 있습니다.

### 한국정밀공학회상

정밀공학대상, 학술상, 유정백합학술상, 백암논문상, 생산기술상, 정밀기술상, 공로상, Journals' Awards (Best Paper Awards, Contribution Awards, Journal Awards), KSPE Young Researcher Awards

### 외부상

가헌학술상, 현송공학상(기계부문), Springer Award (Most Cited Paper, Most Downloaded Paper)

후보자 추천 **매년 9월까지** 수상자 발표 **매년 10월 중순 전후** 시상 **정기총회**(추계학술대회 중 함께 시상)

관심있으신 분들의 많은 참여와 수상이 있기를 바랍니다. 감사합니다.

(사)한국정밀공학회 포상위원회

# ENDO ROBOTICS

A compatible platform  
for commercial diagnostic endoscopy.



ENDOROBOTICS CO., LTD

## RoSE Platform Design

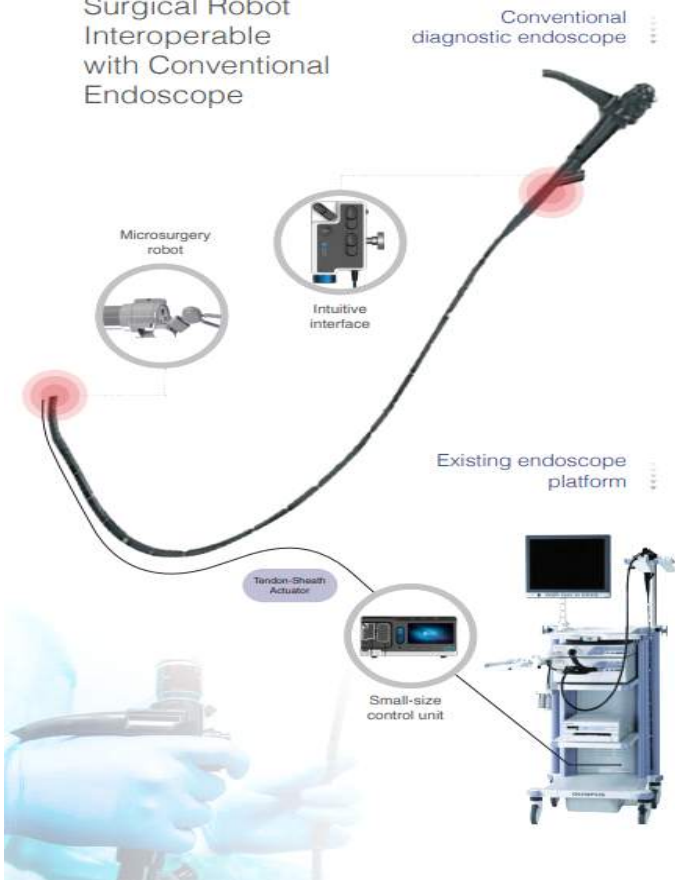


- Ⓐ Controller A for main operator
- Ⓑ Controller B for assistant operator
- Ⓒ Slot to insert the cartridge
- Ⓓ 8-inch touchscreen displaying information on the product and the procedure and enabling manipulation of the control unit.



### RoSE Platform

Endoscopic  
Surgical Robot  
Interoperable  
with Conventional  
Endoscope



### RoSE Platform

Components  
Prototype



#### 01 Forceps unit

- Attachable and removable on conventional endoscope
- Expected manufacturing cost: approx. KWD 100,000(\$85)
- Disposable after each operation
- World's smallest in diameter



#### 02 Connecting unit

- Replaceable cartridge type
- Disposable for single-use
- Easily attachable and removable on control unit
- World's best flexibility



#### 03 Actuation console

- Low acquisition cost
- Replaceable cartridge type
- Easily movable structure
- Manufacturing cost estimated at KWD 15 mi(\$12,700)
- Minimum space requirement



#### 04 Controller

- Attachable and removable on conventional endoscope
- Intuitive manipulation device
- Allowing single-person handling (same as before)
- Same degree of freedom as end effector



LIG넥스원의 새 이름

# LIG Defense & Aerospace

‘대한민국을 수호하는 것’  
이것은 우리의 타고난 DNA

지키고 싶은 게 많은 만큼  
지켜야 할 게 넓어진 만큼

우리의 DNA는  
또 한 번 진화합니다


보이지 않는 곳부터 가보지 못한 곳까지  
대한민국을 넘어 우주로



# 2026 한국정밀공학회 춘계학술대회

## KSPE 2026 SPRING CONFERENCE


2026. 5. 14. Wed. - 5. 16. Fri.  
제주 신화월드 (제주 서귀포시)



200단어 초록 마감  
2026. 3. 10.  
Mon

초록채택 통지  
2026. 3. 21.  
Fri

사전등록마감  
2026. 3. 31.  
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

# PRESM 2026

June 28 Sun – July 3 Fri, 2026  
Marina Bay Sands EXPO, Singapore

## Topics & Scope

1. Manufacturing Processes
2. Machine Tools & Systems
3. Automation, Measurement & Control
4. Materials & Design
5. Micro/Nano Technology
6. Bio & Health
7. New and Renewable Energy
8. Sustainable Technology

## Important Dates

Deadline for Abstract Submission of Regular Session:  
**February 2 (Mon), 2026**

Deadline for Acceptance Notification: (Mail from the PRESM Secretariat)  
**March 31 (Tue), 2026**

Deadline for Early Registration/ Presenter Registration:  
**May 1 (Fri), 2026**

Full Paper Submission (Optional):  
**May 1 (Fri), 2026**

## Participating Journals

- 1 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing (IJPEM)  
\*SCIE, SCOPUS / Impact Factor 3.6 (2024), Q1
- 2 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology (IJPEM-GT)  
\*SCIE, SCOPUS / Impact Factor 5.6 (2024), Q1
- 3 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)
- 4 Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE)  
\*SCOPUS



### Organizer

 Korean Society for Precision Engineering (KSPE, Korea)

### Co-Organizers

 The Japan Society for Precision Engineering (JSPE, Japan)

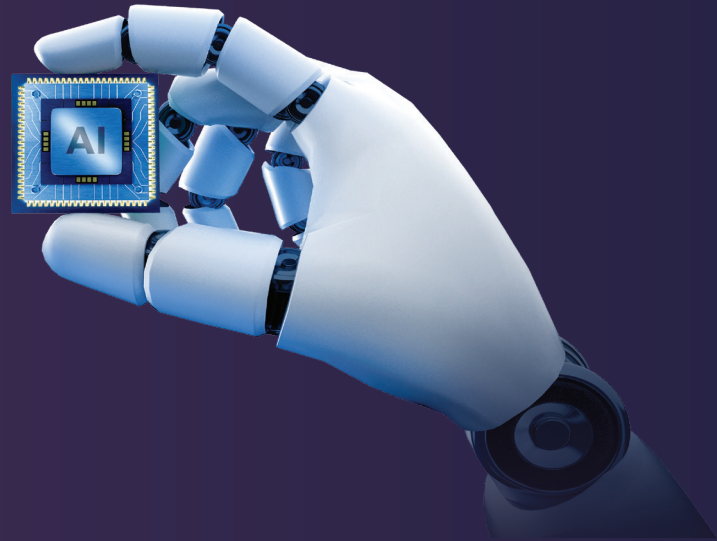
 Taiwan Society for Precision Engineering (TSPE, Taiwan)

### Supported by

 Singapore Exhibition & Convention Bureau



# 제11회 정밀공학 창의경진대회



The 11<sup>th</sup> Precision Engineering  
Creativity Competition

공모주제

## 생성형 AI 시대의 창의적 Smart & Green 정밀공학

(첨단모빌리티(무인자동차, 드론, 친환경자동차), 자율시스템(빅데이터, 인공지능), 메타버스(로보틱스, 사물인터넷), 첨단제조(3D프린팅, 디지털트윈, 탄소저감), 첨단바이오(나노-바이오, 디지털헬스) 등 정밀공학 전 분야)

접수기간

**2026. 7. 1.수 - 7. 24.금**

최종 발표 및 시상

**2026. 12. 4.금 / 창원 CECO**

주요 일정 안내

- 아이디어 제안서 접수: 2026. 7. 1.(수)~7. 24.(금)
- 중간보고서 접수: 2026. 7. 27.(월)~8. 21.(금)
- 본선 진출팀 통보: 2026. 9. 4.(금)
- 최종보고서 접수: 2026. 9. 28.(월)~10. 23.(금)
- 최종발표 및 평가/시상: 2026. 12. 4.(금) 창원 CECO

- ※ 최종보고서 제출 및 발표는 본선 진출팀만 해당됩니다.
- ※ 위 일정은 사정에 따라 변경될 수 있습니다.
- ※ 각종 양식 및 세부 안내 사항은 학회 홈페이지(www.kspe.or.kr)를 참조해주시기 바랍니다.

참가자격

- 전국 대학(원)생(2~4년제 포함, 대학원생은 팀원으로 참여 가능하나 전체팀원의 1/3을 넘어서는 안됨)
- 2~6인 이하의 대학(원)생과 1인의 지도교수로 구성된 팀
- 단, 교외 경진대회에서 이미 입상한 주제에 대하여는 경연 자격이 부여되지 않음을 원칙으로 함(개량·보완된 것은 심사 후 결과에 따라 허용 가능함)
- 연구아이디어 제안서 접수 이후 타 경진대회 등에서 동일 주제로 수상을 할 경우 즉시 학회에 해당사실을 통보하여야 하며, 이를 위반할 경우 상훈이 취소될 수 있음

시상내역

상훈	수상팀	시상내용	훈격
대상	1팀	상장, 상금 300만원	한국정밀공학회장상
최우수상	3팀	상장, 상금 50만원	한국기계연구원장상 한국생산기술연구원장상 한국공작기계산업협회장상
우수상	4팀	상장, 상금 25만원	특별회원기업 대표이사장상
장려상	8팀	상장, 상금 10만원	한국정밀공학회장상

- ※ 위 상목 내역은 대회 준비 및 사정에 따라 변경될 수 있습니다.
- ※ 수상 이후라도 기존 연구와의 표절 및 중복의 사유가 발생할 경우 수상을 취소할 수 있습니다.

• 문의 **한국정밀공학회 사무국**  
Tel. 02-518-2928  
E-mail. contest@kspe.or.kr  
Homepage. www.kspe.or.kr

• 주최 **KSPR** 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

• 주관 **한국정밀공학회 교육위원회**

• 후원 **KIMM** 한국기계연구원 **KITECH** 한국생산기술연구원 **Komma** 한국공작기계산업협회 **DN SOLUTIONS**

**Sindoh** LIG넥스원 **FANUC** 한국팬뉴시스

한국정밀공학회

Korean Society for Precision Engineering

# 2026년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

**2026** KSPE 2026  
Spring  
Conference  
**춘계학술대회**

2026. 5.13(수)-15(금)  
제주 신화월드 (제주특별자치도 서귀포시)

KSPE 신한 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

*International Conference on  
PR*recision *EN*gineering and *SU*stainable *MA*nufacturing  
**PRESM 2026**

June 28 Sun – July 3 Fri, 2026  
Marina Bay Sands EXPO, Singapore

KSPE 신한 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회

**2026** KSPE 2026  
Autumn  
Conference  
**추계학술대회**

2026. 12.2(수)-4(금)  
창원 CECO (경상남도 창원시)

KSPE 신한 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering



