

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 2

FEBRUARY 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
University of Calgory

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 2 / February 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 February 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 / <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

- 123 혼합한 환경에서 에이전트 병합 및 분할을 이용한 다중 에이전트 경로 탐색 개선에 관한 연구
유서현, 임성택, 강효재, 정찬희, 한대회, 강민성
- 133 원심주조 후처리장치의 원주 모따기장치 설계
이규조, 김갑순
- 139 모델 기반 이력특성 및 커플링 보상을 통한 압전형 고속 조준 거울의 정밀 제어 시스템 설계
이호건, 정재우, 정상원, 김재현, 임선빈, 박영진, 임재현, 성기준, 임대회, 강승구, 박노철, 윤준영
- 151 브레이드 슬리브의 포아송비 특성을 활용한 웨어러블 로봇용 가변 결착 메커니즘 개발
서용신, 이재영, 박철훈, 송성혁
- 159 SHPB 실험에서 정렬 불량에 따른 파형 왜곡 분류를 위한 머신러닝 기반 접근법
황효성, 김정
- 167 실시간 운동 오차 측정 및 보정 기능이 통합된 초정밀 에어베어링 스테이지 개발
고은영, 이훈희, 이광일, 양승한
- 175 저에너지 소비를 위한 연성 전자소자의 전극계면 제어 공정 최적화
문서진, 김태현, 박민규, 심현석
- 183 Frameless BLDC 모터와 Stepped 유성기어 감속기를 통합한 로봇 관절용 액츄에이터 및 제어기 개발
박상신
- 189 금속 3D 프린팅 기술 기반 다결정 다이아몬드(PCD) 보링 공구 바디 제작에 관한 연구
손호민, 김동규, 사민우
- 197 CNT 스프레이 코팅 스트레인 센서의 제작 및 특성 분석
염윤지, 박지현, 이상훈,
- 207 체결력 유지 및 조립 응력을 최소화하기 위한 케이블 체인의 형상 최적설계
김민제, 오민성, 황순재, 김도형, 홍석무
- 217 실시간 인스턴스 세그멘테이션 객체 탐지 및 적응형 배치 알고리즘을 활용한 저비용 빈피킹 시스템
김기석, 신현표

CONTENTS

REGULAR

- 123 A Study on Improving Multi-agent Path Finding in Congested Environments Using Agent Merging and Splitting
SeoHyun Yoo, SeongTaek Im, HyoJae Kang, ChanHee Jeong, DaeHee Han, and Min-Sung Kang
- 133 Design of a Circular Chamfering Device for a Centrifugal Casting Post-processing Device
Kyu-Jo Lee and Gab Soon Kim
- 139 Model-based Hysteresis and Cross-coupling Compensation for Precision Control of Piezoelectric Fast Steering Mirror
Hyo Geon Lee, Jae Woo Jung, Sang Won Jung, Jae Hyun Kim, Seonbin Lim, Youngjin Park, Jaehyun Lim, Kijun Seong, Daehee Lee, Seunggu Kang, and No-Cheol Park, and Jun Young Yoon
- 151 Development of a Adjustable fastening Mechanism for Wearable Robots Utilizing the Poisson's Ratio Properties of Braided Sleeves
Yong-Sin Seo, Jae-Young Lee, Cheol Hoon Park, and Sung-Hyuk Song
- 159 A Machine Learning-based Approach for Classifying Waveform Distortion Due to Misalignment in SHPB Experiments
Hyo Sung Hwang and Jeong Kim
- 167 Development of an Ultra-precision Air-bearing Stage Integrated with Real-time Motion Error Measurement and Compensation Functions
Eun Young Ko, Hoon Hee Lee, Kwang Il Lee, and Seung Han Yang
- 175 Optimization of Electrode Interface Control Process of Soft Electronic Devices for Low Energy Consumption
Seojin Moon, Taeheon Kim, Minkyu Park, and Hyunseok Shim
- 183 Development of an Actuator and Controller for Robotic Joints Integrating a Frameless BLDC Motor and a Stepped Planetary Gear Reducer
Sangsin Park
- 189 A Study on Fabrication of PCD Boring Tool Body based on Metal 3D Printing Technology
Ho Min Son, Dong Gyu Kim, and Min-Woo Sa
- 197 Fabrication and Evaluation of CNT Spray Coated Strain Sensor
Yoon Ji Yum, Ji Hyun Park, and Sang Hoon Lee
- 207 Shape Optimization of Cable Chain to Minimize Assembly Stress and Maintained Retention Force under Tensile Loading
Min Je Kim, Min Seong Oh, Soon Jae Hwang, Do Hyoung Kim, and Seok Moo Hong
- 217 Real-time Instance Segmentation-based Object Detection and Adaptive Placing Algorithm for Low Cost Bin-picking System
Ki-Suk Kim and Hyun-Pyo Shin

혼잡한 환경에서 에이전트 병합 및 분할을 이용한 다중 에이전트 경로 탐색 개선에 관한 연구

A Study on Improving Multi-agent Path Finding in Congested Environments Using Agent Merging and Splitting

유서현¹, 임성택¹, 강효재¹, 정찬희², 한대희¹, 강민성^{3,#}
SeoHyun Yoo¹, SeongTaek Im¹, HyoJae Kang¹, ChanHee Jeong², DaeHee Han¹, and Min-Sung Kang^{3,#}

¹ 한양대학교 융합로봇시스템학과 (Department of Interdisciplinary Robot Engineering Systems, Hanyang University)

² 한양대학교 로봇공학과 (Department of Robot Engineering, Hanyang University)

³ 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)

The rising demand for robots in warehouses has highlighted the need for efficient multi-robot algorithms. In response, researchers have focused on Multi-Agent Path Finding (MAPF), which enables multiple agents to calculate conflict-free paths to their individual goals. However, the computation time of conflict-based MAPF algorithms significantly increases as the number of conflicts rises, a common challenge in warehouse environments with narrow passages or corridors. To tackle this issue, this study introduces a new type of conflict called "Overlap Conflict." Overlap Conflicts occur when an agent stops, causing chain conflicts among subsequent agents traveling in the same direction. When an Overlap Conflict arises, the affected agents are dynamically merged into a single group, shifting the conflicts from an individual level to a group level. If the merged agents find themselves with unreachable goals, they are split back into individual agents to continue calculating paths to their respective destinations. This approach effectively reduces computation time in congested environments, particularly in narrow corridors where alternative routes exist.

Manuscript received: March 24, 2025 / Revised: October 23, 2025 / Accepted: October 30, 2025

This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2024

1. Introduction

As global robot supply chains become increasingly complex and consumer demand diversifies, relying solely on traditional multi-agent distribution methods are no longer sufficient to guarantee the efficiency of logistics operations. In response, the adoption of robot-assisted warehouses, as shown in Fig. 1, is gaining importance. In line with this trend, research of Multi-Agent Path Finding (MAPF) is being vigorously conducted. This algorithm aims to find non-conflicting paths for multiple agents to reach their respective

destinations within shared environments.

MAPF has been actively studied from various perspectives. Algorithms that merge agents [1,2] or assign priorities among agents [3-5] have attempted to reduce computation time. However, assigning priorities to agents has the drawback of not guaranteeing the optimality of the solution. Other algorithms have aimed to find an optimal solution by resolving conflicts between agents, but the computation time swells exponentially as the number of conflicts grows [6-9]. To address this, some algorithms have defined additional conflict types or proposed new constraints to reduce

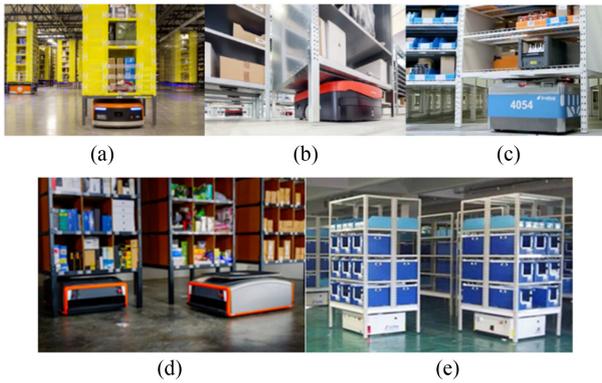


Fig. 1 Logistics companies using robots [10] (a) Amazon Robotics, (b) Swisslog, (c) Scallong, (d) Grey Orange, and (e) Hitachi (Adapted from Ref. 10 on the basis of OA)

computation time and explore suboptimal solutions [11-15]. However, even these approaches have not sufficiently mitigated the exponential increase in computation time caused by conflicts in congested environments.

In warehouses, corridors or passageways are often designed to be narrow to maximize space utilization, which frequently forces multiple agents to share the same route. When a leading agent unexpectedly stops in such restricted spaces, it can trigger a chain of conflicts among following agents. These chain conflicts are considerably more complex than isolated conflicts, leading to significant delays in re-planning routes, particularly in congested environments. To address this challenge, we propose a new algorithm, OverlapCBS, which introduces a new type of conflict, termed the Overlap Conflict, specifically designed to handle these chain conflicts. OverlapCBS reduces computation time by dynamically merging and splitting agents based on their paths when conflicts occur, thereby efficiently resolving conflicts in such environments. This approach aims to overcome the limitations of previous methods and improve overall efficiency in warehouse logistics.

2. Theoretical Background

2.1 Problem Definition

This study refines the Conflict-Based Search (CBS) algorithm [6] as its fundamental framework. The MAPF problem [16,17] is represented by a graph $G = (V, E)$ and a set of k agents. V represents locations, each of which can be exclusively occupied by a single agent and E stated the connections between two vertices. Each agent is assigned a *Task*, defined as a tuple $\{start_i, goal_i\}$ consisting of a unique start state and goal state, where an agent a_i has start $start_i \in V$ and $goal_i \in V$. Time is assumed to be discretized, and at each timestep, an agent can take a single action: either *moving* or

waiting. The solution to the MAPF problem consists of a set of conflict-free paths, denoted as $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k\}$, where k means the number of agents and π_k denotes the path of a_k . Each path is associated with a sequence of tuples $\{vertex, timestep\}$. In the MAPF problem, there are two types of conflicts: *vertex conflicts* and *edge conflicts*. *Vertex conflicts* occur when two agents a_i and a_j occupy the same vertex v simultaneously, which is formally defined as $\{a_i, a_j, v, t\}$. *Edge conflicts* occur when two agents a_i and a_j swap vertices through the same edge, at the same time t , which is denoted as $\{a_i, a_j, v_i, v_j, t\}$. All paths satisfy the following conditions: 1. every agent starts at its predefined initial state and reaches its goal state, 2. no *vertex conflicts* or *edge conflicts* exist among the paths. In this study, we utilize the sum of costs as the objective function to evaluate solutions and aim to minimize it.

2.2 Conflict Based Search Algorithm (CBS)

CBS searches for paths for each agent and detects conflicts between agents' paths. When a conflict occurs, it generates constraints to resolve the conflict and modifies the paths accordingly. A *vertex constraint* prohibits agent a_i from occupying vertex v at time t , denoted as $\{a_i, v, t\}$. An *edge constraint* prohibits agent a_i from moving from vertex v_i to v_j at time t , denoted as $\{a_i, v_i, v_j, t\}$. CBS operates on two search levels. The high-level is responsible for identifying and resolving conflicts between agents by comparing their individual paths. This process is managed using a binary tree structure known as the Constraint Tree (CT), in which each node consists of three key components.

1) $N.constraints$

A set of constraints, each of which illustrates constraints for a single agent.

2) $N.solution$

A set of paths, each consisting of the individual agent's path that complies with the constraints applied to that node.

3) $N.cost$

The total cost is calculated using an objective function. The high-level search utilizes this cost as a metric to prioritize nodes, aiming to find a solution that minimizes the chosen cost while avoiding conflicts.

The root node of the CT starts with an empty set of constraints. When a conflict is detected in the $N.solution$, the high-level search generates a new constraint and two child nodes, each inheriting the constraints of its parent and incorporating the newly generated constraint, respectively. These child nodes resolve the conflict by enforcing different constraints on each agent involved. The low-level search computes paths for individual agents while adhering to the given constraints. In this study, we apply the A^* algorithm as the fundamental search method for the low-level search. The CBS

algorithm continues this process until a conflict-free N . solution is found, resulting in a goal node in the CT that contains a valid set of paths for all agents.

3. Methodology

3.1 Overlap Conflict Definition

To effectively address scenarios in congested environments, this paper proposes a new type of conflict, termed the Overlap Conflict. This concept enables the efficient handling of chain conflicts that occur when multiple agents move through the same narrow corridors in the same direction. The traditional vertex conflict is further categorized into Single Vertex Conflict and Overlap Conflict, based on whether the paths of two agents continue to overlap following an initial conflict. This study introduces three types of conflicts: Single Vertex Conflict, Overlap Conflict, and Edge Conflict. The Edge Conflict is defined based on CBS, while the definitions of Single Vertex Conflict and Overlap Conflict are provided below.

1) Single Vertex Conflict

A Single Vertex Conflict is defined as a tuple $\{a_i, a_j, v, t, S\}$. It represents a conflict that occurs when agents a_i and a_j occupy vertex v at the same time t . S is a boolean variable used to distinguish it from an Overlap Conflict. For instance, Fig. 2(a) illustrates a Single Vertex Conflict where agents a_1 and a_2 occupy vertex $B2$ at the same time t_0 . It is represented as the tuple $\{a_1, a_2, B2, t_0, False\}$.

2) Overlap Conflict

An Overlap Conflict is defined as a tuple $\{a_i, a_j, v, t, O\}$. It represents a conflict that occurs when agents a_i and a_j occupy vertex v at the same time t_0 . O is a boolean variable used to distinguish it from a Single Vertex Conflict. For instance, Fig. 2(b) illustrates an Overlap conflict that occurs when agents a_1 and a_2 successively occupy vertex $B2$ at times t_0 . It is represented as the tuple $\{a_1, a_2, B2, t_0, True\}$.

3.2 Overlap Constraint Definition

To resolve conflicts between agents, appropriate constraints for each conflict type are required. The Single Vertex Constraint and Edge Constraint follow the same definitions as those in CBS. The Overlap Constraint is defined as a tuple $\{a_i, a_j, t\}$ where a_i is designated as the head agent, a_j as the tail agent, treating the two agents as a single merged agent set starting from time t . A merged agent set moves together while maintaining a one-timestep distance, where timestep distance refers to the minimum number of timesteps required for an agent to move from its current vertex to

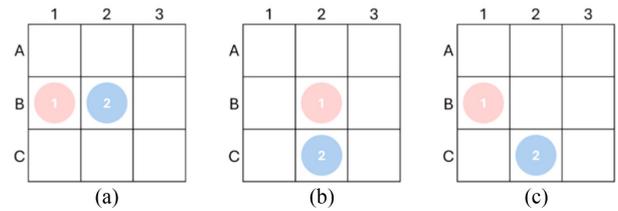


Fig. 2 Types of conflicts utilized in this paper. (a) Single Vertex Conflict: A conflict occurs at a single vertex, specifically at vertex $B2$ and (b) Overlap Conflict: A conflict spans multiple vertices. In this example, the two agents occupy vertex $B2$ and $B3$ simultaneously

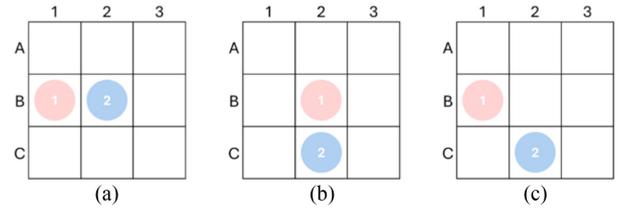


Fig. 3 Types of conflicts utilized in this paper. (a) Single Vertex Conflict: A conflict occurs at a single vertex, specifically at vertex $B2$ and (b) Overlap Conflict: A conflict spans multiple vertices. In this example, the two agents occupy vertex $B2$ and $B3$ simultaneously

another agent's vertex. For instance, as illustrated in Figs. 3(a) and 3(b), if two agents are located in adjacent vertices, they have a one-timestep distance. In contrast, as shown in Fig. 3(b), the agents have a 2-timestep distance, as agent 1 takes two-timesteps to reach the vertex where Agent 2 is located.

Each agent can have at most one head agent and at most one tail agent. For instance, consider a merged set of three agents, as depicted in Fig. 3(a). Assuming that Agent 1 is positioned at the front in the direction of movement, Agent 1 has no head agent and designates Agent 2 as its tail agent. Agent 2 has Agent 1 as its head agent and Agent 3 as its tail agent, while Agent 3 has Agent 2 as its head agent and no tail agent. In contrast, configurations where an agent is associated with more than one head agent (as shown in Fig. 3(b)) or more than one tail agent (as shown in Fig. 3(c)) are not permitted.

3.3 State Definition

A state is defined as a tuple $\{vertex, time, head, tail\}$, where each component represents the current status of an agent and its dependency relationships with other agents. Specifically, $vertex$ denotes the graph vertex at which the agent is located at $time$; $time$ is the discrete timestep corresponding to that state, indicating when the agent occupies the vertex; $head$ represents the head agent that the current agent is following, thereby highlighting the dependency relationship; and $tail$ denotes the tail

agent that is following the current agent, indicating that the current agent acts as a leader. This structure not only captures the agent's current position and time but also explicitly defines the dependency relationships between agents.

3.4 High Level Search of OverlapCBS

Algorithm 1 describes the high-level search process in OverlapCBS. The basic flow of the algorithm follows that of CBS (Lines 1-8). However, OverlapCBS generates two distinct constraints for each left and right nodes, denoted as C_l and (Line 10), to resolve a detected conflict. These constraints are defined for the conflicting agents or agent sets and may incorporate constraints for multiple agents, depending on the situation. Based on the generated C_l and C_r , new CT nodes are created, adding the corresponding constraints to each node (Line 14). Subsequently, the low-level solver recalculates the paths for the individual agents subject to these constraints. Once the paths for all agents in the constraint lists are recalculated, the cost of the solution is computed, and the success of the solution is evaluated (Line 18). If a valid solution is found, the corresponding node is added to the OPEN set (Line 19). This process repeats until a node is retrieved from the OPEN set whose paths are conflict-free. In that case, the algorithm returns the solution (Line 8) and terminates.

Algorithm 1: High Level Search of OverlapCBS

Input: MAPF instance

Output: Solution to the MAPF problem

```

1  Root.constraints  $\leftarrow \emptyset$ 
2  Root.solution  $\leftarrow$  find individual paths by the low level( );
3  Root.cost  $\leftarrow$  get_cost(Root.solution);
4  insert Root to OPEN
5  while OPEN is not empty do
6    P  $\leftarrow$  best node from OPEN // lowest solution cost
7    if P has no conflict then
8      return P.solution // P is the goal
9    Cf  $\leftarrow$  get_first_conflict(P);
10   Cl, Cr  $\leftarrow$  create_constraints_from_conflict(Cf);
11   foreach constraints list Ci in {Cl, Cr} do
12     A  $\leftarrow$  new node;
13     foreach agent ai in Ci do
14       A.constraints  $\leftarrow$  P.constraints + Ci {ai};
15     A.solution  $\leftarrow$  P.solution;
16     Update A.solution (invoking low level(ai));
17     A.cost  $\leftarrow$  get_cost(A.solution);
18     if A.cost  $< \infty$  then
19       Insert A to OPEN;
```

3.4.1 Find First Conflict

It is necessary to first generate a path for a single agent and then compare the paths between agents to identify conflicts. Algorithm 2, *get_first_conflict*(), identifies and returns a conflict from a CT node solution by comparing two agents' paths. For each timestep t from 0 to max_t , the algorithm checks the agent's positions, where cv (current vertex) is the vertex at t and nv (next vertex) is the adjacent vertex the agent moves to (Lines 5-8).

Algorithm 2: *get_first_conflict*()

Input: CT node N

Output: Conflict

```

1  maxt = find_max_time(N.solution);
2  foreach agent ai, aj do
3    t = 1;
4    while t < maxt do
5      cvi  $\leftarrow$  get_current_vertex(ai, t);
6      cvj  $\leftarrow$  get_current_vertex(aj, t);
7      nvi  $\leftarrow$  get_next_vertex(ai, t);
8      nvj  $\leftarrow$  get_next_vertex(aj, t);
9      if cvi == cvj and nvi != nvj then
10       return {ai, aj, cvi, t, 0} // single vertex conflict
11     else if cvi == cvj and nvi = nvj then
12       return {ai, aj, cvi, t, 1} // overlap conflict
13     else if cvi == nvj and nvi = cvj then
14       return {ai, aj, cvi, nvi, t} // edge conflict
15   t++
```

3.4.2 Create Constraint from Conflict

Once conflicts among agents are identified, appropriate constraints must be generated to resolve them. For single-agent pair conflicts, constraints are generated as in CBS. However, in OverlapCBS, conflicts may occur between merged agent sets (e.g., Fig. 4), requiring constraints for the entire set without disconnecting its agents. All of the examples in Fig. 4 are designated the pink agent set as agent-set 1 and the blue agent set as agent-set 2.

1) Single Vertex Conflict between head agents

Fig. 4(a) illustrates a scenario in which a single vertex conflict occurs between the agent-set 1 and the agent-set 2 at timestep 0. In this situation, constraints are generated without breaking the internal connections within the agent sets. When constraints are applied to agent-set 1, two constraints, {1, C_4 , 1}, and {4, C_4 , 2}, are imposed on agent 4, leading to the movement pattern shown in Fig. 5(b).

2) Overlap Conflict between head agents

Fig. 4(b) illustrates a scenario where an overlap conflict

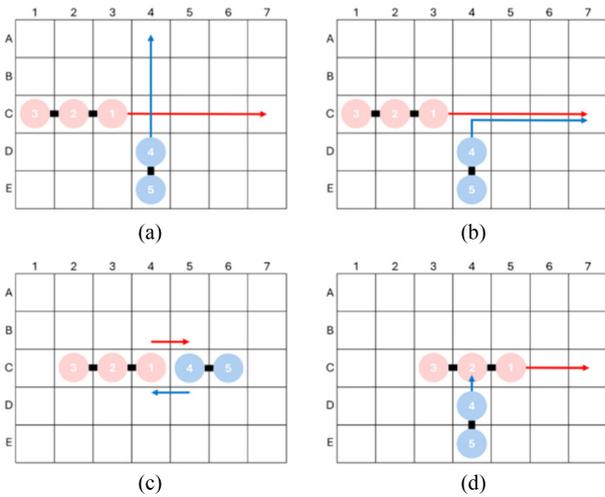


Fig. 4 Examples of conflict scenarios between agent sets: (a) Single vertex conflict, (b) Overlap conflict, (c) Edge conflict, and (d) single vertex conflict between a head agent and a middle agent

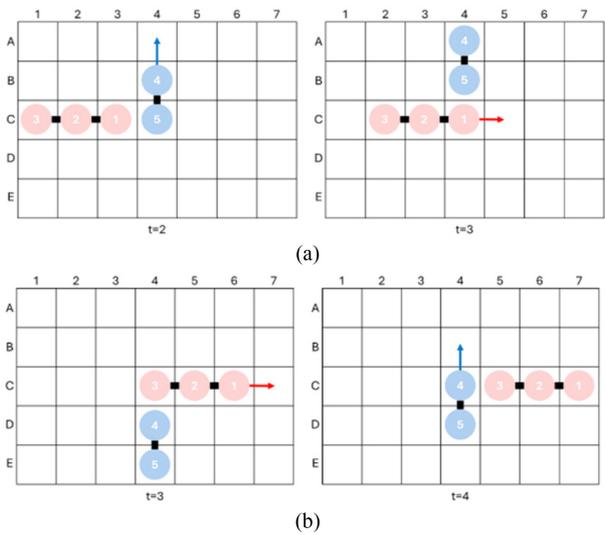


Fig. 5 Movement patterns resulting from single vertex conflict resolution. (a) When constraints are applied to agent-set 1 and (b) When constraints are applied to agent-set 2

occurs between the agent-set 1 and the agent-set 2. In this situation, constraints are generated without breaking the internal connections within the agent sets. When constraints are applied to agent-set 1, two single vertex constraints, $\{1, C_4, 1\}$ and $\{1, C_4, 2\}$, along with one overlap constraints, $\{4, C_4, 1\}$, $\{4, C_4, 2\}$, and $\{4, C_4, 3\}$, along with one overlap constraint, $\{3, 4, 3\}$, are imposed on agent 4, resulting in the movement pattern shown in Fig. 6(b).

3) Edge Conflict between head agents

Fig. 4(c) illustrates a scenario where an edge conflict occurs between the agent-set 1 and the agent-set 2. In this case, constraints are also generated without breaking the connections

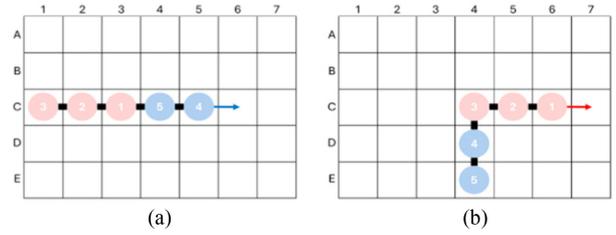


Fig. 6 Movement patterns resulting from overlap conflict resolution: (a) Constraints applied to agent-set 1. (b) Constraints applied to agent-set 2

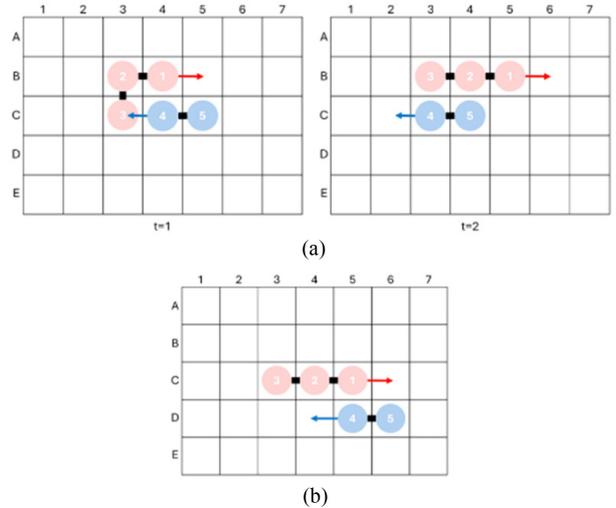


Fig. 7 Movement patterns resulting from edge conflict resolution. (a) Constraints on agent-set 1 and (b) Constraints on agent-set 2

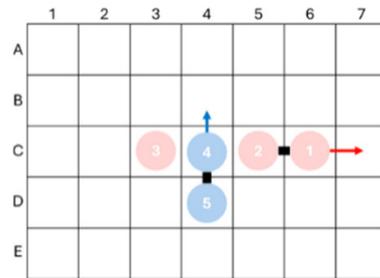


Fig. 8 A scenario where applying constraints to agent-set 1 breaks the internal connection of the agent-set 1, making it an invalid solution

within the agent sets. When constraints are applied to agent-set 1, and a vertex constraint $\{2, C_4, 1\}$ is imposed on agent 2. This process involves sequentially inspecting conflicts for each agent in the agent set and generating constraints for each detected conflict. Applying such constraints to agent-set 1 results in the movement pattern shown in Fig. 7(a). Conversely, when constraints are applied to agent-set 2, and edge constraint $\{4, C_5, C_4, 1\}$ is imposed on agent 4, and a vertex constraint $\{5, C_5, 1\}$ is imposed on agent 5, resulting in the movement pattern shown in Fig. 7(b).

4) Single Vertex Conflict between head agent and middle agent
As shown in Fig. 4(d), a conflict can occur between the middle agent of the pink agent set (agent-set 1) and the head agent of the blue agent set (agent-set 2). In this case, to avoid breaking the connections within the agent sets, constraints are applied only to agent-set 2. When constraints are applied to agent-set 2, a single vertex constraint $\{4, C_4, 1\}$ is imposed on agent 4, resulting in a movement pattern similar to that shown in Fig. 5(b). However, if constraints are applied to agent-set 1, it would break the connections within agent-set 1, as shown in Fig. 8. Therefore, no constraints are generated for agent-set 1 in this scenario.

3.5 Low Level Search for OverlapCBS

The algorithm 3 represents a modified low-level search process for CBS, incorporating the ability to follow a designated head agent whenever applicable. If no head agent exists to follow, the algorithm operates identically to the standard CBS low-level

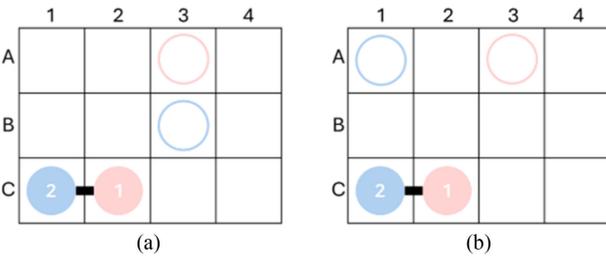


Fig. 9 Example scenarios in which agents within the same agent set move towards their respective goal locations

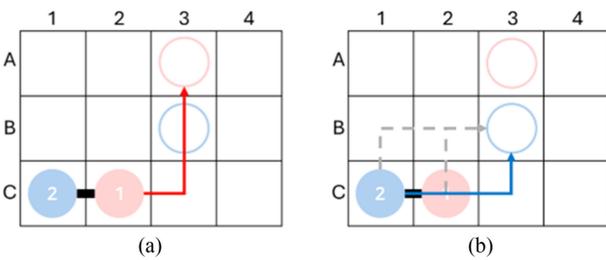


Fig. 10 Path planning process for a merged agent set. (a) The head agent plans its path to the goal first, (b) The tail agent plans its path to follow the head agent as closely as possible

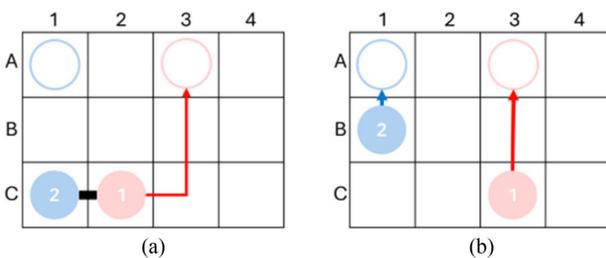


Fig. 11 Agent-set splitting due to increased cost for the tail agent

search. However, if a head agent is present, the agent prioritizes staying directly behind the head agent. If following directly is not possible, the agent attempts to move adjacent to the head agent. If neither of these options is feasible, the algorithm disconnects the head-tail relationship, effectively splitting the agent set.

To determine the path of a merged agent set, the pathfinding process must proceed sequentially, starting with the head agent

Algorithm 3: Low Level Search Algorithm

Input: start vertex S , goal vertex G , constraints $Cons$, solution Sol

Output: Path from S to G or failure

```

1   $open \leftarrow \{(S, 0 + heuristic(S))\};$ 
2   $closed \leftarrow \phi$ 
3   $g[S] \leftarrow 0;$ 
4   $head = -1;$ 
5  initialize  $bh, nh;$ 
6  while  $OPEN$  is not empty do
7    if  $bh$  is not null then
8       $current \leftarrow bh;$ 
9    elseif  $nh$  is not null then
10      $current \leftarrow nh;$ 
11   else  $bh$  is not null then
12      $current \leftarrow$  node in  $open$  with the lowest  $f$ -score;
13      $head = -1;$ 
14   if  $current == G$  then
15     return Path from  $S$  to  $G;$ 
16   Remove  $current$  from  $open$  and add  $current$  to  $closed;$ 
17    $head = update\_head\_form\_constraint(Cons)$ 
18    $neighbor\_list \leftarrow get\_neighbors(current)$ 
19   foreach state  $n$  in  $neighbor\_list$  do
20     if  $n$  in  $closed$  then
21       Continue;
22      $tentative\_g \leftarrow g[current] + cost(current, n)$ 
23     if not in  $open$  or  $tentative\_g < g[n]$  then
24        $g[n] \leftarrow tentative\_g;$ 
25        $f[n] \leftarrow g[n] + heuristic(n);$ 
26        $parent[n] \leftarrow current;$ 
27       if  $n$  not in  $open$  then
28         Add  $n$  to  $open;$ 
29        $vertex_h = get\_current\_vertex(head, current.time)$ 
30       if  $n.vertex == vertex_h$  then
31          $bh = n$ 
32       else if  $dist(n.vertex, vertex_h) == 1$  then
33          $nh = n$ 
34   return failure; // No valid path exists

```

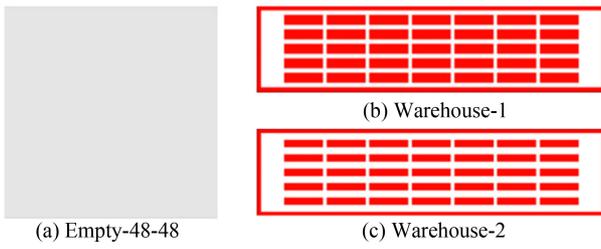


Fig. 12 Grid map for evaluation

then moving to the tail agent. This can be illustrated using the scenario in Fig. 9(a). In the figure, agent 1 is the head agent, and agent 2 is the tail agent. First, the path for the head agent is calculated, as shown in Fig. 10(a). Next, the path for the tail agent is planned to follow the head agent’s path as closely as possible, as depicted in Fig. 10(b). However, as shown in Fig. 9(b), there are cases where the tail agent cannot reach its goal location if it continues to follow the head agent. In such situations, as illustrated in Fig. 11, the agent set is split at the point where the tail agent’s cost increases due to following the head agent. From that point onward, the tail agent independently plans its path as a single agent.

4. Experiments

4.1 Evaluation Setup

To evaluate the performance of the proposed algorithm, we conducted comparative experiments with the CBS algorithm using the three maps shown in Fig. 12. In each environment, 25 scenarios were generated by randomly assigning start and goal positions to the agents, and the experiments were conducted while progressively increasing the number of agents. The specific characteristics of each environment are as follows:

- 1) Empty-48-48

This is a 48×48 grid map with no obstacles, representing an open space. Overlap conflicts are expected to occur infrequently, making it suitable for evaluating the algorithm under general conditions.
- 2) Warehouse-1

This is a 90×18 warehouse map with a single narrow corridor. Due to its narrow pathways, Overlap conflicts are expected to occur frequently. It evaluates the algorithm in environments with frequent conflicts and no alternative routes.
- 3) Warehouse-2

This is a 90×24 warehouse map with double corridors. Similar to Warehouse-1, Overlap conflicts are expected to

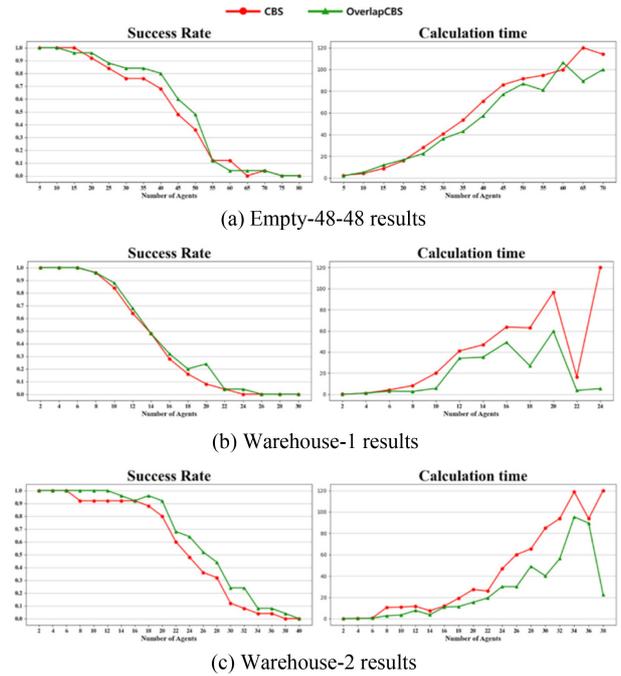


Fig. 13 Evaluation results. (a) Empty-48-48, (b) Warehouse-1, and (c) Warehouse-2

occur frequently, but alternative routes are available, allowing evaluation under such conditions.

The algorithm’s performance is evaluated using two metrics: Success rate and Calculation time. Success rate represents the percentage of scenarios where pathfinding is completed within 120 seconds. Calculation time is the average time taken for scenarios where either the CBS or OverlapCBS algorithm succeeds, with failed cases assigned 120 seconds.

4.2 Evaluation Results and Analysis

Experimental results clearly show that OverlapCBS significantly outperforms traditional CBS. In the Empty-48-48 map (Fig. 12(a)), OverlapCBS achieves similar success rates as CBS when fewer than 30 agents are used; however, when the number of agents exceeds 30, OverlapCBS achieves a higher success rate and, with more than 40 agents, it computes solutions approximately 20% faster than CBS. In the Warehouse-1 map (Fig. 12(b)), which features a single narrow corridor, OverlapCBS exhibits a success rate that is 15% higher than that of CBS with 20 agents and maintains more stable computation times. In the Warehouse-2 map (Fig. 12(c)), characterized by double corridors, OverlapCBS achieves up to 30% higher success rates and completes computations about 33% faster than CBS in scenarios with 20 or more agents. These numerical improvements confirm that OverlapCBS is a superior solution for Multi-Agent Path Finding in congested environments.

5. Conclusion

The experimental results indicate that the proposed OverlapCBS algorithm outperforms traditional CBS in terms of both success rate and computation time, particularly in environments with narrow corridors and alternative routes. This improvement is primarily attributed to OverlapCBS's ability to effectively handle overlap conflicts by merging conflicting agents into unified sets. By shifting conflict detection from the individual agent level to the group level, OverlapCBS efficiently addresses chain conflicts and overcomes the limitations of previous methods in congested environments, thereby offering a robust solution for Multi-Agent Path Finding (MAPF) in complex scenarios such as warehouses. However, the algorithm shows relatively less improvement in settings without alternative routes (e.g., single narrow corridors) compared to environments such as Warehouse-2, where alternative paths are available. This limitation likely stems from the current inability to effectively resolve conflicts caused by agents moving in opposite directions under such conditions. Additionally, in open environments where overlap conflicts are infrequent, the potential impact of OverlapCBS is diminished.

To address these challenges, future work should focus on adapting additional conflict types, as defined in prior research [13], into the OverlapCBS framework. This integration aims to improve the algorithm's adaptability and performance across a broader range of scenarios, ultimately enhancing its robustness and real-world applicability for MAPF applications.

REFERENCES

- Sharon, G., Stern, R., Felner, A., Sturtevant, N., (2012), Meta-agent conflict-based search for optimal multi-agent path finding, *Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search*, 97-104.
- Pei, M.-S., Liu, C.-L., (2023), Multi-agent path planning based on meta-agent conflict merge search algorithm, *Proceedings of the 5th International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation*, 87-90.
- Ma, H., Harabor, D., Stuckey, P. J., Li, J., Koenig, S., (2019), Searching with consistent prioritization for multi-agent path finding, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 7643-7650.
- Kasaura, K., Nishimura, M., Yonetani, R., (2022), Prioritized safe interval path planning for multi-agent pathfinding with continuous time on 2D roadmaps, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4), 10494-10501.
- Okumura, K., Machida, M., Défago, X., Tamura, Y., (2022), Priority inheritance with backtracking for iterative multi-agent path finding, *Artificial Intelligence*, 310, 103752.
- Sharon, G., Stern, R., Felner, A., Sturtevant, N. R., (2015), Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding, *Artificial Intelligence*, 219, 40-66.
- Andreychuk, A., Yakovlev, K., Surynek, P., Atzmon, D., Stern, R., (2022), Multi-agent pathfinding with continuous time, *Artificial Intelligence*, 305, 103662.
- Felner, A., Li, J., Boyarski, E., Ma, H., Cohen, L., Kumar, T. S., Koenig, S., (2018), Adding heuristics to conflict-based search for multi-agent path finding, *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 83-87.
- Li, J., Felner, A., Boyarski, E., Ma, H., Koenig, S., (2019), Improved heuristics for multi-agent path finding with conflict-based search, *IJCAI*, 442-449.
- Xie, L., Li, H., Thieme, N., (2018), From simulation to real-world robotic mobile fulfillment systems, *arXiv preprint arXiv:1810.03643*.
- Li, J., Harabor, D., Stuckey, P. J., Ma, H., Koenig, S., (2019), Symmetry-breaking constraints for grid-based multi-agent path finding, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 6087-6095.
- 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.
- 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*, 279-283.
- Boyarski, E., Felner, A., Sharon, G., Stern, R., (2015), Don't split, try to work it out: Bypassing conflicts in multi-agent pathfinding, *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 47-51.
- Li, J., Ruml, W., Koenig, S., (2021), Eecbs: A bounded-suboptimal search for multi-agent path finding, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 12353-12362.
- Salzman, O., Stern, R., (2020), Research challenges and opportunities in multi-agent path finding and multi-agent pickup and delivery problems, *Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, 1711-1715.
- Stern, R., Sturtevant, N., Felner, A., Koenig, S., Ma, H., Walker, T., Li, J., Atzmon, D., Cohen, L., Kumar, T., (2019), Multi-agent pathfinding: Definitions, variants, and benchmarks, *Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search*, 151-158.



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



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: qhrejddlvtm@hanyang.ac.kr



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



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, reinforcement learning.

E-mail: hdh1645@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, entertainment robotics.

E-mail: majae5@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

원심주조 후처리장치의 원주 모따기장치 설계

Design of a Circular Chamfering Device for a Centrifugal Casting Post-processing Device

이규조^{1,2}, 김갑순^{3,#}
Kyu-Jo Lee^{1,2} and Gab Soon Kim^{3,#}

1 경상국립대학교 융합기계공학과 (Department of Mechanical Convergence Engineering, Gyeongsang National University)
2 에이치디에이치 (HDH Co., Ltd.)
3 경상국립대학교 제어로봇공학과 (Department of Control & Robot Engineering(ERI), Gyeongsang National University)
Corresponding Author / E-mail: gskim@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1745
ORCID 0000-0002-1753-3319

KEYWORDS: Circular chamfering device (원주 모따기장치), Centrifugal cast pipe (원심주조파이프), Centrifugal casting (원심주조), Forward/backward transport device (전후이송장치)

This paper presents the design of an automatic circumferential chamfering device that processes the inner and outer diameter corners of centrifugal cast pipes after cutting. These large, heavy pipes (dimensions: 389 mm x 5700 mm x 36 mm; weight: 1,200 kg) are produced using the centrifugal casting method. Following manufacturing, the pipes undergo several post-processing operations, including washing, grinding, cutting, and chamfering. Traditionally, circumferential chamfering has been performed manually by workers using grinders. In this study, we conceptualized an automatic circumferential chamfering device specifically designed to chamfer the corners of large centrifugal cast pipes. A structural analysis was conducted to ensure the design's safety, yielding a safety factor greater than two. Based on these design outcomes, we manufactured the chamfering device and conducted characteristic experiments on a large centrifugal cast pipe. The results confirmed that the cylindrical chamfering device can safely and effectively chamfer the inner and outer diameters of large centrifugal cast pipes.

Manuscript received: May 29, 2025 / Revised: August 31, 2025 / Accepted: September 22, 2025
This paper was presented at KSPE SpringConference in 2025

1. 서론

발전소에서 석탄재를 적재장소까지 멀리 보내기 위해서는 대형 원심주조 파이프(크기: 389 mm × 5700 mm × 36 mm, 무게: 1,200 kg)를 길게 연결한 후 강한 공기압으로 이송시킨다. 이 대형 파이프는 주로 원심주조법으로 제작하고, 이것은 회전하는 금형에 쇳물을 주입하여 파이프를 제작한다. 이 원심주조 파이프를 제작한 후에는 파이프의 외부 표면에 도포되어 있는 도형제 세척, 파이프 외부원주 표면 그라인딩, 길이 절단, 절단면 원주 모따기 등의 원심주조 파이프 후처리를 실시해야 한다. 4가지 후처리 작업은 현재 모두 작업자가 수동으로 처리하고 있고,

이것들은 매우 어려운 작업으로 작업자를 채용하기 어려우므로 각각의 자동화장치 개발이 필요하다. 본 논문에서는 4가지 작업 중 절단면 원주 모따기장치를 설계하고자 하며, 관련된 연구는 다음과 같다.

Asakawa [1]는 산업용 로봇을 사용하여 자유곡면에 뿔린 구멍의 자동 모따기를 CAD 데이터 기반으로 수행하였고, 이것은 로봇팔에 전기모터로 구성된 모따기 도구를 장착하였으며, 실험결과, 구멍 가장자리를 따라 모따기를 효과적으로 수행함을 확인하였다. Kana [2]는 인간-로봇-협력 엣지 모따기 및 연마 작업을 수행하는 프로그램을 작성하였고, 로봇의 말단에 톨을 설치하여 직선 모따기와 원주모따기를 실시하였고, 실험결과

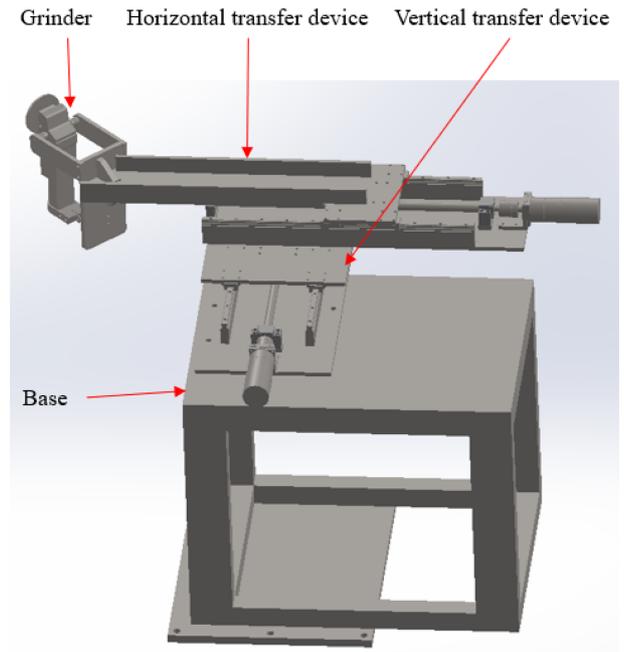
정확하게 모따기가 이루어 짐을 확인하였다. Lee [3]는 유리 모서리를 모따기하는 방법을 연구하였고, 모따기 후 평면을 광학 현미경, 공초점 LSM 및 복굴절 측정 시스템을 사용하여 평가했으며, 평가결과는 절단 모서리가 200 μm 의 두께로 균일하게 가공됨을 확인하였다. Amersdorfer [4]는 센서 기반 기하학적 접근 방식으로 곡선 자유형 표면을 추적하기 위한 로봇 프로그램을 개발하였고, 로봇 도구와 공작물 사이의 최소 거리 측정을 통해 표면에 대한 원하는 거리와 방향을 유지할 수 있도록 하였으며, 실험결과 곡선 표면을 정확하게 추적하여 연마함을 확인하였다.

Solanes [5]는 연마, 버 제거 등과 같은 표면 처리 작업을 인간과 로봇이 협업할 수 있도록 협력 솔루션을 개발하였고, 이것은 매니플레이터 말단과 도구에 부착된 두 개의 힘 센서로 구성되어 있다. 그중 하나는 표면 처리 작업을 수행하는 데 사용되고, 다른 하나는 작업자가 로봇 도구를 안내하는 데 사용되며, 실험결과 우수하게 동작됨을 확인하였다. Tian [6]은 로봇 자동 곡면 연마의 품질을 향상시키기 위하여 연마 과정에서 일정한 연마 압력을 보장하기 위한 연마 플랫폼을 구축하고 연마 공정을 연구했으며, 실험결과 일정한 압력으로 연마됨을 확인하였다. Gaz [7]는 복잡한 기하학적 형태를 가진 부품의 연마를 위해 로봇 손목에 F/T 센서를 장착하였고, 이것으로 로봇 관절 토크를 온라인으로 추정할 수 있었으며, 실험결과 복잡한 형상의 표면을 연마할 수 있었다. Yin [8]은 부품의 측면 모따기를 위해 새로운 연마 가능한 텍스처인 ‘V’자 모양 텍스처(VST)를 제시하였고, 스테인리스 스틸 소재의 모따기 실험을 실시한 결과, 절단 표면거칠기는 매우 작았고 공구 마모가 적었다.

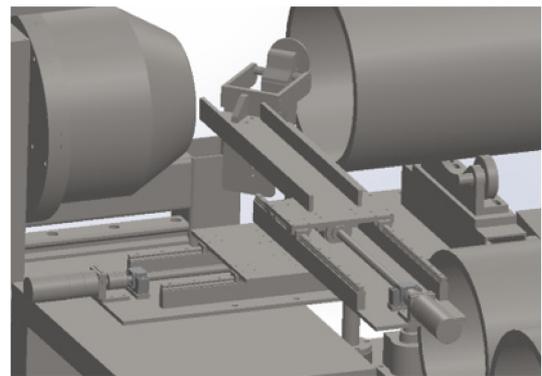
Fang [9]은 모따기 도구와 연마된 도구를 사용한 기계 가공의 유사점과 차이점을 비교하였고, 모따기 도구를 사용한 기계 가공을 위한 새로운 칩 형성 슬립라인 모델을 제안하였으며, 예측한 결과와 실험 결과 사이에 좋은 일치성을 보였다. Choudhury [10]는 금속 절단에서 모따기 도구의 적용에 대해 연구하였고, 이것은 중간 탄소 저합금강의 연속적으로 회전하는 동안 모따기 도구의 성능에 초점을 맞추었으며, 시멘트 카바이드 모따기 고체 도구를 사용하는 조건에서 절삭력, 도구 수명 및 칩 형성에 대한 성능이 조사하였다. 실험결과, 연속 회전에서 모따기 폭이 증가함에 따라 주 절단력과 공급력이 모두 증가하였고, 칩 두께는 모따기 폭이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

지금까지 연구한 모따기 방법으로는 대형 원심주조 파이프의 절단 후 원주 안쪽과 바깥쪽 모서리 모따기를 수행할 수 없으므로 새로운 구조의 원주 모따기장치의 개발 연구가 필요하다.

본 논문에서는 대형 원심주조 파이프(크기: 389 mm × 5700 mm × 36 mm, 무게: 1,200 kg)의 후처리 공정 중 원주 모따기장치를 설계 및 제작하였다. 원주 모따기장치를 새롭게 개념설계하였고, 솔리드웍스 소프트웨어를 이용하여 구조해석을 실시하였으며, 설계결과를 토대로 제작하였다. 제작한 원주 모따기장치를 이용하여 대형 원심주조 파이프의 안쪽과 바깥쪽의 모서리 원주 모따기하는 실험을 실시하였다.



(a) Full view



(b) Chamfered appearance

Fig. 1 Structure of the circular chamfering device

2. 원주 모따기장치의 설계

원주 모따기장치는 대형 원심주조 파이프의 안쪽과 바깥쪽의 모서리를 모따기할 수 있는 구조로 고안되어야 하고, 모따기시 파이프의 미소한 편심회전에 파괴되지 않도록 설계되어야 한다. Figs. 1은 원주 모따기장치의 구조를 나타내고 있고, 1(a) 원주 모따기장치의 전체 모습, 2(b)는 모따기 모습이며, 이것은 파이프를 절단한 후, 원주의 바깥 모서리와 안 모서리를 모따기 하는데 사용된다. 원주 모따기장치는 베이스(Base), 그라인더(Grinder), 전후이송장치(Forward and Backward Transfer Device), 좌우이송장치(Left and Right Transfer Device) 등으로 구성된다. 베이스는 이것의 하부판이 자동화장치의 몸체와 고정되고, 이것의 상부에 전후이송장치와 고정된다. 좌우이송장치는 그라인더를 고정하고, 그라인더를 파이프의 중심축과 직각 방향으로 좌우로 이동시키며, 이것의 하부는 전후이송장치에 고정되어 있다.

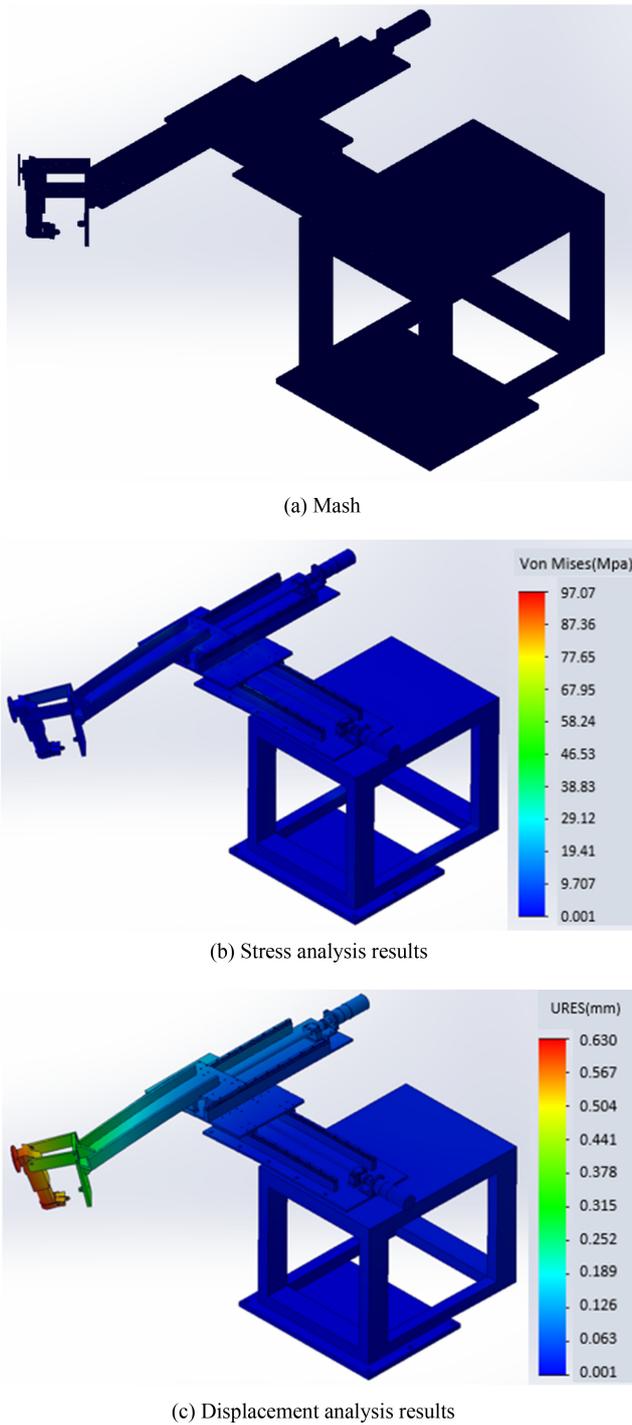


Fig. 2 Structural analysis results of the circular chamfering device

사용된 모터의 모델은 FBL-FB02AMK이고, 토크는 42 Nm이다. 기어박스의 모델은 HSS0601A-M3110103C14이고, 감속비는 60 : 1이다.

원주 모따기장치를 안전하게 설계하기 위해서는 구조해석을 통해 설계되어야 하고, 본 논문에서는 솔리드웍스를 이용하여 수행하였다. 원주 모따기장치 부품들의 재질은 SS41로 선택하였다. 구조해석시 모든 부품을 중력방향으로 자중을 가했고,

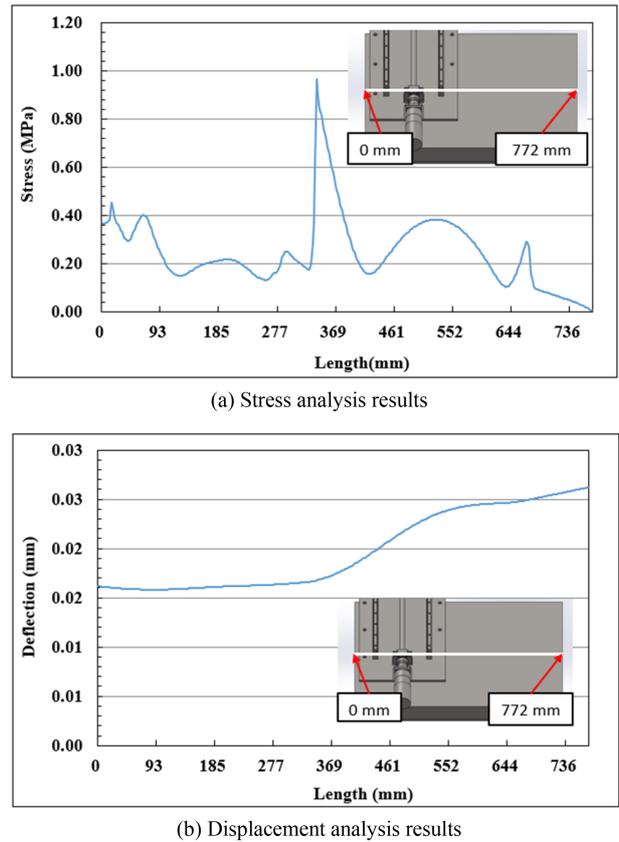


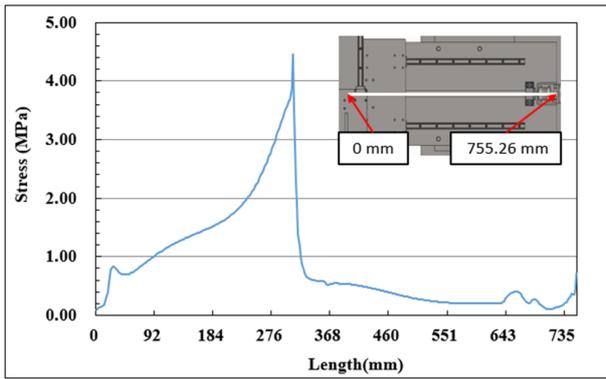
Fig. 3 Results of structural analysis of the base of the cylindrical chamfering device of the mechanical device for pipe post-processing

구조해석시 필요한 재질의 특성은 탄성계수가 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 포아송비가 0.28, 전단계수가 $27.9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 질량밀도가 $7,800 \text{ ks/m}^3$, 인장강도가 410 MPa, 항복강도가 275 MPa이다.

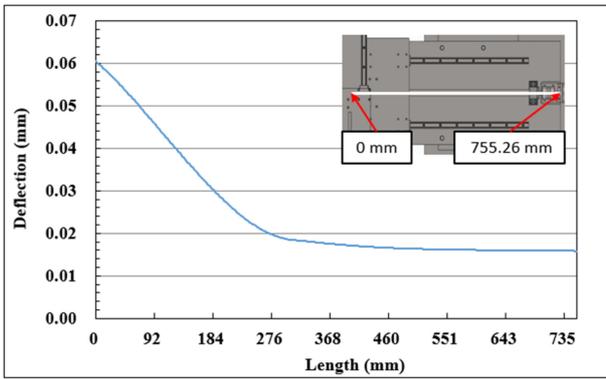
Figs. 2는 원주 모따기장치의 구조해석 결과를 나타내고 있고, 2(a)는 원주 모따기장치의 메쉬한 모습을 나타내고 있고, 메쉬크기는 최소 0.2 mm, 최대 4 mm로 하였고, 메쉬갯수는 7,367,347로 나누었다. 그리고 메쉬 유형은 개체메쉬, 야코비안 포인트는 16개 점으로 선택하였다. Fig. 2(b)는 원주 모따기장치의 응력해석 결과를 나타내고 있고, 최대응력은 97.1 MPa이었으며, 안전율은 부품재질의 항복강도를 기준으로 계산한 결과 2.11이었다. Fig. 2(c)는 원주 모따기장치의 변위해석 결과를 나타내고 있고, 최대변위는 0.63 mm이었다.

Figs. 3은 파이프 후처리리를 위한 기계장치의 원주 모따기장치 베이스 구조해석 결과를 나타내고 있고, 3(a)는 응력해석 결과를 나타내고 있고, 베이스의 338 mm 부근에서 최대 상당응력이 0.964 MPa이었으며, 이것은 전후이송장치의 고정판의 모서리가 누르고 있기 때문이다. Fig. 3(b)는 변위해석한 결과를 나타내고 있고, 최대 변위는 722 mm 지점에서 0.26 mm이었으며, 이것은 원주 모따기장치의 하부판이 일부만 존재하기 때문, 즉 몸체의 우측부분이 공중에 떠있기 때문이다.

Figs. 4는 파이프 후처리리를 위한 기계장치의 원주 모따기장치



(a) Stress analysis results



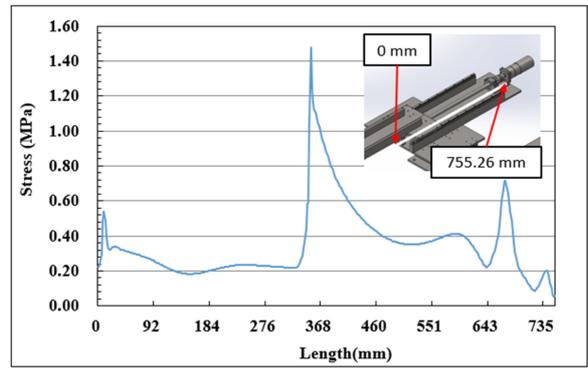
(b) Displacement analysis results

Fig. 4 Results of structural analysis of the fixed plate of the forward and backward transfer device of the machine device for pipe post-processing

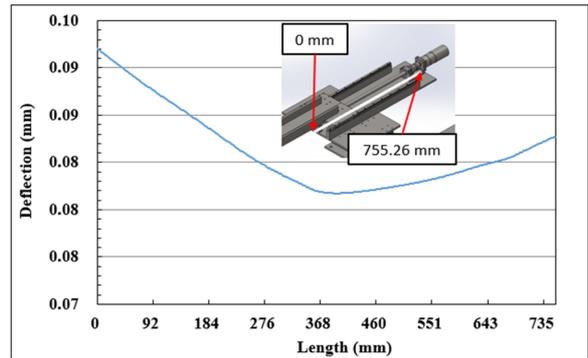
전후이송장치 고정판 구조해석 결과를 나타내고 있고, 4(a)는 응력해석 결과를 나타내고 있고, 고정판의 309 mm 부근에서 최대 상당응력이 4.47 MPa이었으며, 이것은 전후이송장치 고정판과 베이스가 접촉하는 부분이다. Fig. 4(b)는 변위해석한 결과를 나타내고 있고, 최대 변위는 0 mm 지점에서 0.06 mm이었으며, 이것은 좌우이송장치와 그라인더 등의 무게 때문이다.

Figs. 5는 파이프 후처리기를 위한 기계장치의 원주 모따기장치 좌우이송장치의 고정판 구조해석 결과를 나타내고 있고, 5(a)는 응력해석 결과를 나타내고 있고, 고정판의 351 mm 부근에서 최대 상당응력이 1.48 MPa이었으며, 이것은 전후이송장치의 고정판의 모서리와 접촉되는 부분에 하중이 집중되기 때문이다. 5(b)는 변위해석한 결과를 나타내고 있고, 최대 변위는 0 mm 지점에서 0.10 mm이었으며, 이것은 그라인더 등의 무게가 집중되기 때문이다.

Figs. 6은 파이프 후처리기를 위한 기계장치의 원주 모따기장치 그라인더 지지대 구조해석 결과를 나타내고 있고, 6(a)는 그라인더 지지대의 응력해석 결과를 나타내고 있고, 지지대의 79 mm 부근에서 최대 상당응력이 4.79 MPa이었으며, 이것은 그라인더 등의 무게가 집중되기 때문이다. Fig. 6(b)는 변위해석한 결과를 나타내고 있고, 최대 변위는 1,542 mm 지점에서 0.29 mm이었으며, 이것은 그라인더 등의 무게가 집중되기

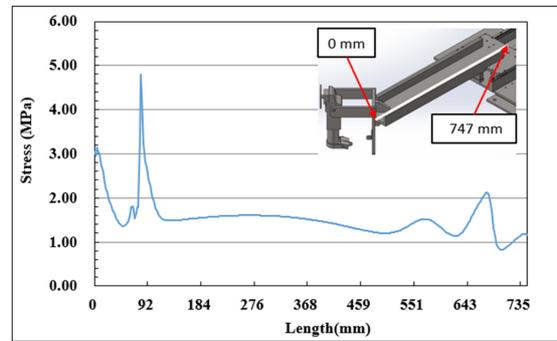


(a) Stress analysis results

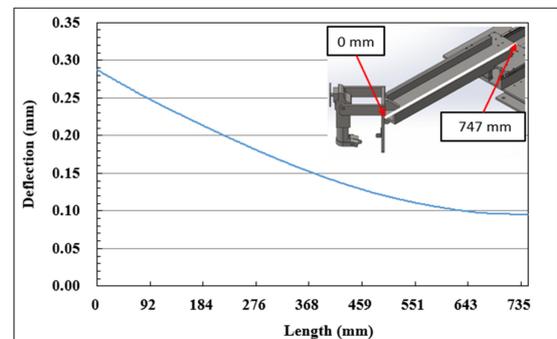


(b) Displacement analysis results

Fig. 5 Results of structural analysis of the fixed plate of the left and right transport device of the machine device for pipe post-processing



(a) Stress analysis results

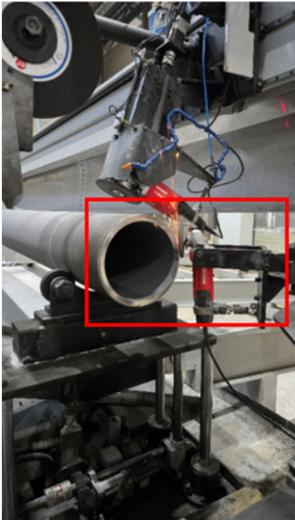


(b) Displacement analysis results

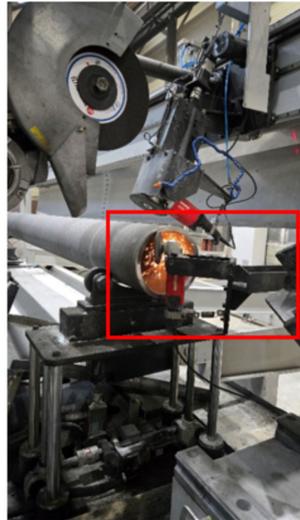
Fig. 6 Results of structural analysis of the grinder support for the circumferential chamfering device of the mechanical device for pipe post-processing



(a) Fabricated cylindrical chamfering device



(b) Outer circular chamfer



(c) Inner circular chamfer

Fig. 7 Fabricated cylindrical chamfering device and experimental results

때문이다. 따라서 파이프 후처리를 위한 기계장치의 원주 모따기장치를 응력해석 결과, 안전율은 2.83배이었고, 최대변위가 0.63 mm이었다. 파이프 후처리를 위한 기계장치의 원주 모따기장치 그라인더가 대형 원심주조 파이프를 원주모따기하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

3. 원주 모따기장치의 제작 및 실험

Figs. 7은 제작된 원주 모따기장치 및 실험결과를 나타내고 있고, 7(a)는 제작된 원주 모따기장치(사각박스 내 그림)이며, 이것은 개념설계한 모습과 일치한다. 즉, 원주 모따기장치의 몸체, 좌우이송장치, 전후이송장치, 그라인더 등으로 구성되었다. 제작된 원주 모따기장치의 좌우이송장치와 전후이송장치의 특성실험을 50회 이상 실시하였고, 그 결과 안전하게 동작됨을 확인하였다. 이 장치의 이동거리를 측정 한 결과는 약 300 mm이었다. 이 거리는 대형 원심주조 파이프(크기: 389 mm × 5700 mm × 36 mm)를 모따기하기 위해 그라인더를 원주모서리에 접촉시키는데 충분하다.

그라인더 회전특성실험을 30분간 실시하였다. 특성실험 결과, 모든 특성실험에서 안전하게 동작됨을 확인하였다. Figs. 3(b)와 3(c)는 각각 대형 원심주조 파이프의 바깥쪽과 안쪽 원주 모서리를 모따기 특성실험 결과이고, 특성실험시 그라인더 회전속도는 500 rpm, 파이프의 회전속도는 10 rpm이며, 특성실험 결과, 제작된 원주 모따기장치가 안전하게 정상대로 동작되었고, 정확하게 모따기가 수행됨을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 대형 원심주조 파이프의 절단 후 버를 제거하기 위한 원주 모따기장치를 설계 및 제작하였다. 원주 모따기장치를 새롭게 개념설계하였고, 이것을 구조해석한 결과 안전율이 2.83 이상, 처짐이 0.63 mm 이내로 안전하게 설계되었다. 설계를 토대로 원주 모따기장치를 제작하였고, 제작된 원주 모따기장치의 특성실험을 실시하였다. 기초 동작 특성실험한 결과, 좌우이송장치, 전후이송장치, 그라인더 등이 정상적으로 동작됨을 확인하였고, 대형 원심주조 파이프의 모따기 특성실험한 결과 안전하게 모따기됨을 확인하였다. 따라서 본연구에서 제작한 원주 모따기장치는 대형 파이프의 내외측의 원주 모따기를 수행하는데 사용될 수 있을 것으로 판단되고, 이로 인해 주조산업의 인력난해소, 생산성향상 등이 기대된다.

추후 연구는 제작된 원주 모따기장치와 기 제작된 도형제 세척장치, 파이프 외부원주 표면 그라인딩장치, 길이 절단장치를 종합한 원심주조 후처리장치의 전체 자동화연구를 실시하는 것이다.

REFERENCES

1. Asakawa, N., Toda, K., Takeuchi, Y., (2000), Automation of chamfering by an industrial robot; for the case of hole on a free curved surface, IFAC Proceedings Volumes, 33(17), 1215-1220.
2. Kana, S., Lakshminarayanan, S., Mohan, D. M., Campolo, D., (2021), Impedance controlled human-robot collaborative tooling for edge chamfering and polishing applications, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 72, 102199.
3. Lee, H., Kim, S., (2014), Advanced chamfering technology for edge strengthening, Journal of the American Ceramic Society, 97(8), 2364-2367.
4. Amersdorfer, M., Kappey, J., Meurer, T., (2020), Real-time freeform surface and path tracking for force controlled robotic tooling applications, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 65, 101955.
5. Solanes, J. E., Gracia, L., Munoz-Benavent, P., Miro, J. V., Girbés, V., Tornero, J., (2018), Human-robot cooperation for robust surface treatment using non-conventional sliding mode control, ISA Transactions, 80, 528-541.

6. Tian, F., Li, Z., Lv, C., Liu, G., (2016), Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1), 639-646.
7. Gaz, C., Magrini, E., De Luca, A., (2018), A model-based residual approach for human-robot collaboration during manual polishing operations, *Mechatronics*, 55, 234-247.
8. Yin, S., Ji, W., He, G., Liu, X., Wang, L., (2018), Experimental evaluation on texture of flank face on tool wear in chamfer milling of stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(9), 2929-2937.
9. Fang, N., Wu, Q., (2005), The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(10), 1178-1187.
10. Choudhury, I., See, N., Zuhairi, M., (2005), Machining with chamfered tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 170(1-2), 115-120.

**Kyu-Jo Lee**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hankook University. His research interest is Centrifugal casting system.

E-mail: dsc8230@hanmail.net

**Gab Soon Kim**

Professor in the Department of Control & Robot Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is Walking aid robot and Intelligent robot.

E-mail: gskim@gnu.ac.kr

모델 기반 이력특성 및 커플링 보상을 통한 압전형 고속 조준 거울의 정밀 제어 시스템 설계

Model-based Hysteresis and Cross-coupling Compensation for Precision Control of Piezoelectric Fast Steering Mirror

이효건¹, 정재우¹, 정상원¹, 김재현¹, 임선빈¹, 박영진¹, 임재현¹,
성기준², 임대희², 강승구², 박노철¹, 윤준영^{1,#}

Hyo Geon Lee¹, Jae Woo Jung¹, Sang Won Jung¹, Jae Hyun Kim¹, Seonbin Lim¹, Youngjin Park¹, Jaehyun Lim¹,
Kijun Seong², Daehee Lee², Seunggu Kang², and No-Cheol Park¹, and Jun Young Yoon^{1,#}

¹ 연세대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)
² LIG넥스원 광정보융합연구소 (EO/IR System R&D, LIG Nex1)
Corresponding Author / E-mail: junyoung.yoon@yonsei.ac.kr, TEL: +82-2-2123-2817
ORCID: 0000-0001-5893-3477

KEYWORDS: Fast steering mirror (고속 조준 거울), Piezoelectric actuator (압전형 구동기), Nonlinearity (비선형성), Hysteresis (이력특성), Cross-coupling (축 간 커플링), Model-based compensation (모델 기반 보상)

This paper presents model-based hysteresis and cross-coupling compensators designed for precise control of a piezoelectric fast steering mirror (FSM). The hysteresis compensators are developed by inversely modeling the variation in the force constant relative to various excitation voltages, enabling the system to maintain linear response characteristics across a broad range of input amplitudes. The cross-coupling compensator is formulated by creating a decoupling matrix that cancels out coupling effects, generating signals of equal magnitude and opposite phase for each axis. The implementation of these compensators reduces the hysteresis band and magnitude uncertainty in the FSM dynamics by over 89.6% and 74.2%, respectively, while also significantly suppressing cross-coupling effects by more than 85.5%. Furthermore, the performance of the proposed compensators is validated in a closed-loop control system, demonstrating a notable reduction in cross-axis vibrations and improved tracking performance in response to step reference inputs and high-frequency sinusoidal trajectories.

Manuscript received: June 30, 2025 / Revised: November 18, 2025 / Accepted: November 26, 2025

1. 서론

첨단 광학 시스템의 요구 성능 고도화에 따라 빔의 경로를 능동적으로 제어할 수 있는 고속 조준 거울(Fast Steering Mirror, FSM)의 중요성이 높아지고 있다. 특히 압전형 구동기를 사용하는 FSM은 높은 추력 성능과 넓은 구동 대역폭의 장점으로 외란 저감 및 고속 지령 추종 성능이 요구되는 레이저 통신[1-3], 스캔[4,5], 가공[6,7] 등의 다양한 분야에서 활용되고 있다.

압전형 구동기는 역 압전 효과(Converse Piezoelectric Effect)를

이용하여 전압을 입력함으로써 변위를 발생시키는데, 인가한 전압을 제거하더라도 초기 상태로 돌아가지 못하는 이력 특성(Hysteresis)을 필연적으로 가지게 된다. 이는 압전형 FSM의 구동 정밀도와 제어 시스템의 안정성을 저하시키는 주요 요인으로 알려져 있다[8-10]. 따라서 이력특성을 정량적으로 모델링하고 이를 보상하기 위한 다양한 접근법이 제안되어 왔으며, 특히 입력 신호에 이력특성의 역함수(Inverse Hysteresis) 모델을 캐스케이드(Cascade) 형태로 결합하여 비선형성을 보상하는 연구가 활발히 수행되고 있다[11-13]. 이와 관련하여 대표적인 이력 보상 모델로는 Preisach, Prandtl-Ishlinskii 그리고 Bouc-Wen 모델이

있으며[12,14], 각 모델은 구조적 특성과 실시간 제어 측면에서 상이한 장단점을 가진다. Preisach 모델은 다수의 이진 릴레이 연산자들의 조합을 통해 이력특성을 근사하는 방식으로 구성된다. 다양한 이력특성 곡선을 높은 정밀도로 재현 가능하다는 장점이 있지만, 정확도 확보를 위해서는 많은 수의 연산자들이 필요하여 연산 부하가 높다는 단점을 가진다[13,15]. Prandtl-Ishlinskii 모델은 Preisach 모델과 유사한 구조를 가지며, 다수의 1차 이상의 연산자들의 선형 조합을 통해 이력특성을 표현하는 방식이다. 역함수 모델을 설계하기 용이하고, 상대적으로 적은 연산자만으로도 높은 정확도를 확보할 수 있어 실시간 제어에 효과적이라는 장점을 가진다[16,17]. 마지막으로 Bouc-Wen 모델은 미분 방정식을 통해 상대적으로 적은 수의 파라미터로 다양한 이력 곡선을 연속적으로 표현 가능하나, 모델 파라미터에 대한 물리적 해석이 제한적이고 역함수 모델을 해석적으로 도출하기 어렵다는 단점을 가진다[18,19].

압전형 FSM은 유연형 힌지를 통해 거울이 팁(Tip), 틸트(Tilt) 두 방향으로만 움직이도록 하는데, 하나의 이동부를 두 축으로 제어하는 구조적 특성으로 축 간 커플링(Cross-coupling)이 필연적으로 발생하게 된다. 커플링은 제어 시스템 내에서 외란으로 작용하며 구동 정밀도를 저해하기 때문에[20,21], 유연형 힌지는 상호 축 간 영향을 최소화하도록 설계된다[22,23]. 그러나 가공 및 조립 공차로 인해 기구 설계를 통한 커플링 저감에는 한계가 있으며, 구동 주파수가 높아질수록 그 영향이 커지기 때문에, 이를 능동적으로 저감하기 위한 제어 관점에서의 연구들도 진행되었다. Wang(L.) 등[24]은 전자기형 FSM의 선형 응답 특성을 이용한 모델 기반 디커플링 제어를 설계하였으며, 개루프 제어 시스템에서 100 Hz 정현파 신호에 대한 상호 축의 진동을 7%에서 0.8%까지 저감하고 페루프 제어 시스템의 지령 추종 오차 감소를 통해 제어기의 성능을 검증하였다. 제어 시스템 성능 검증 과정에서 특정 주파수에서의 커플링 저감 성능만을 나타내고 있으며, 구동기에 높은 전류가 인가되었을 때 발생하는 비선형적인 특성에 대한 고려가 이루어지지 않아 운용 환경에 따른 제어기의 성능 저하가 발생할 수 있다는 제한점을 가진다. Wang(R.) 등[25]은 압전형 FSM에 대하여 다중 신경망 구조와 피드백 오차 학습을 통해 이력특성과 축 간 커플링을 보상하는 제어 기법을 제안하였으며, 100 Hz의 정현파 지령 신호에 대한 상호 축에 발생하는 진동을 2.85%에서 1.17%까지 저감하였다. 그러나 해당 연구 또한 특정 주파수에 대한 지령 추종 성능만을 나타내고 있으며, 이력특성과 커플링 특성이 보상을 통해 얼마나 저감되었는지에 대한 정량적인 분석이 이루어지지 않았다는 한계를 가진다.

본 연구에서는 압전형 FSM의 비선형 이력특성과 축 간 커플링에 대한 모델 기반 보상을 설계하였으며, 그 성능에 대한 체계적인 검증을 진행하였다. 주파수 응답 특성을 기반으로 한 이력 특성 보상을 설계함으로써 주파수 영역에서 시스템의 높은 선형성을 확보하였으며, 입력 크기에 따른 시스템의 주파수 응답 특성 변화와 저주파 입력 전압 신호에 따른 출력 변위 간의 관계를

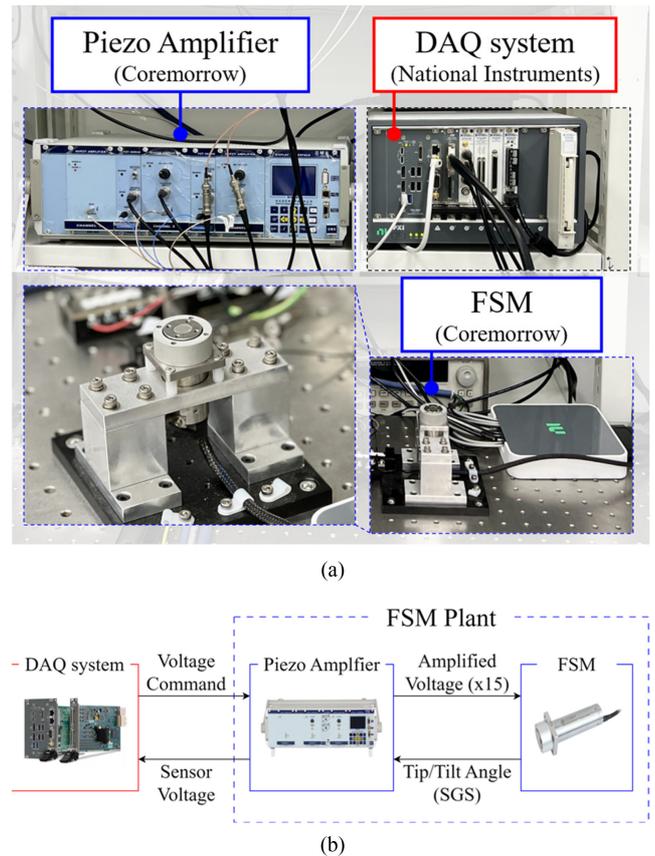


Fig. 1 (a) Experimental testbed for the precision measurement and control of the FSM Plant and (b) Physical signal wiring between the DAQ system and the FSM plant

통해 그 성능을 검증하였다. 이를 기반으로 커플링으로 인해 발생하는 상호 축 진동을 효과적으로 상쇄할 수 있는 디커플링 행렬을 설계 및 모델링 하였으며, 넓은 주파수 범위에 대한 커플링 크기 저감을 통해 그 성능을 확인하였다. 또한 페루프 제어 시스템 내에서 제안하는 보상기가 지령 추종 성능 개선 및 진동 저감에 미치는 영향을 정량적으로 측정하였으며, 이를 통해 제안하는 보상기 설계 과정에 대한 타당성을 실험적으로 검증하였다.

2. FSM 비선형 거동 계측

2.1 FSM 응답 특성 계측 환경

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용한 압전형 FSM과 피에조 증폭기(Coremorro社, FSM : S37.T4SF, Piezo Amplifier : E00.D3), 그리고 비선형 거동 계측을 위한 DAQ (Data Acquisition) 시스템(National Instruments社, Controller : NI 8861, FPGA Module : NI 7856R)을 나타내고 있다. FSM의 각 축을 구성하는 두 개의 피에조 구동기는 중립 전압 75 V를 중심으로 입력 전압(u_x, u_y)에 따라 각 구동기에 서로 반대 방향의 증폭된 전압이 인가되어 이동부에 회전 운동을 발생시킨다. FSM 이동부의 팁, 틸트 방향

Table 1 Specifications of FSM plant and DAQ system

Piezoelectric FSM (Coremorrow, S37.T4SF)		
Moving range	± 3.1	mrاد
Unloaded resonance frequency	5.9	kHz
Capacitance	7.2	μF
Piezo amplifier (Coremorrow, E00.D3)		
Input voltage range	± 5	V
Output voltage range	± 75	V
Voltage amplification ratio	15	V/V
Bandwidth	> 20	kHz
Sensor signal sensitivity	1.626	V/mrad
Peak current	1	A
DAQ system (National instruments, NI 7856R)		
Analog I/O voltage range	± 10	V
Analog I/O sampling rate	1	MHz
Analog I/O resolution	16	bit

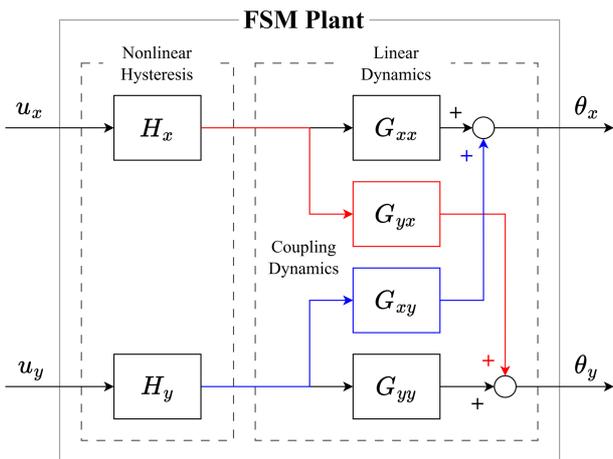


Fig. 2 Hammerstein-Wiener structure of the FSM plant, consisting of static nonlinear hysteresis in each axis and linear dynamics of the flexure hinge with cross-coupling effects

회전각은 스트레인 게이지 센서(Strain Gauge Sensor, SGS)를 통해 측정되며 해당 변위 신호는 피에조 증폭기에서 일정 비율 (1.626 V/mrad)로 변환되어 전압 형태로 출력된다. 각 실험 구성 요소들의 성능은 Table 1에 정리되어 있으며 Fig. 1(b)와 같이 연결되었다. FSM과 같이 빠른 동특성을 가지는 구동기에서는 충분히 높은 샘플링 주파수를 설정하여 위상 지연을 최소화하는 것이 중요하다[7,20]. 이를 위해 FSM Plant 동특성 대비 10배 이상 빠른 샘플링 주파수(400 kHz)를 적용하고, 디지털 신호처리 간 지연을 최소화할 수 있도록 제어 시스템을 설계하였다.

2.2 FSM의 비선형 거동

압전형 구동기의 이력특성으로 인해 FSM Plant는 비선형적인

거동을 하게 되는데, 이를 모델링하는 방법으로 Hammerstein-Wiener 구조가 널리 이용되고 있다[10,14,26,27]. 비선형성을 정적인 특성으로 가정하고 선형적인 동특성과의 조합을 통해 전체 시스템 거동을 모델링하는 방식으로 이를 블록 선도로 나타내면 Fig. 2와 같다. 이러한 구조적 가정을 활용하면 낮은 주파수 영역에서 피에조 증폭기 및 힌지 등의 구조로 인한 동특성을 상수로 간주할 수 있게 되고, 결과적으로 이력특성이 FSM Plant 응답에 미치는 영향을 독립적으로 측정할 수 있다. 측정된 이력특성을 기반으로 적절한 보상기를 설계하면 비선형성으로 인한 FSM Plant의 모델 불확실성을 크게 저감함으로써 선형 동특성 모델을 정확하게 식별할 수 있게 된다. 이를 위해 3장에서는 압전형 구동기의 이력특성에 대한 보상기와 선형 동특성 기반의 커플링 보상기를 설계하였으며, 4장에서는 설계된 보상기를 통한 개루프 및 폐루프 제어 성능 개선을 통해 제안하는 보상기들의 효과를 실험적으로 검증하였다.

3. 이력특성 및 커플링 보상기

3.1 이력특성 보상기

이력특성은 시스템의 응답 지연, 입력에 따른 주파수 응답 특성 변화 등을 발생시키게 된다. 시스템 거동의 불확실성은 제어 시스템의 여유(Margin)에 영향을 주며 시스템의 진동 및 발산을 야기할 수 있기 때문에 제어 성능과 안정성 확보를 위해 필수적으로 보상되어야 한다. 이를 위해 주파수 응답 특성 기반의 이력 특성 보상기 설계 방식을 적용하였는데, 이는 일반적으로 사용되는 이력특성 초기 곡선 기반이 아닌 정현파 입력 신호의 진폭에 따른 추력 상수 변화를 직접적으로 사용하여 입력 크기 변화에 강건한 주파수 응답 특성 확보에 유리하다는 장점이 있다[10]. Fig. 3(a)는 1.0 Hz 정현파 신호의 입력 진폭에 따른 응답 크기 변화를 0.615 mrad/V를 기준으로 정규화 한 그래프와 이를 보상하기 위한 이력 특성 보상기의 이득 특성을 나타내고 있다. 입력 전압의 진폭이 증가할수록 힘을 발생시키는 전기 쌍극자 모멘트들의 정렬이 더 많이 발생하게 되고 이로 인해 추력 상수가 증가하는 효과를 가져오게 된다. 이력특성 보상기는 이러한 추력 상수의 변화를 일정하게 만드는 것을 목적으로 하며, 이를 구현하기 위해 Fig. 3(b)와 같이 Prandtl-Ishlinskii 모델 기반의 보상기를 설계하였다. 이는 입력 범위에 따른 추력 상수의 변화를 구간별 선형화(Piecewise-linear) 과정을 통해 보상하는 구조로 식(1)에 나타난 것과 같은 백래쉬 연산자(Backlash Operator)와 가중치 벡터의 선형 조합을 통해 나타낼 수 있다.

$$v[k] = \begin{cases} v[k-1], & |u[k] - v[k-1]| \leq \frac{DB}{2} \\ u[k] - \frac{DB}{2}, & u[k] - v[k-1] > \frac{DB}{2} \\ u[k] + \frac{DB}{2}, & u[k] - v[k-1] < -\frac{DB}{2} \end{cases} \quad (1)$$

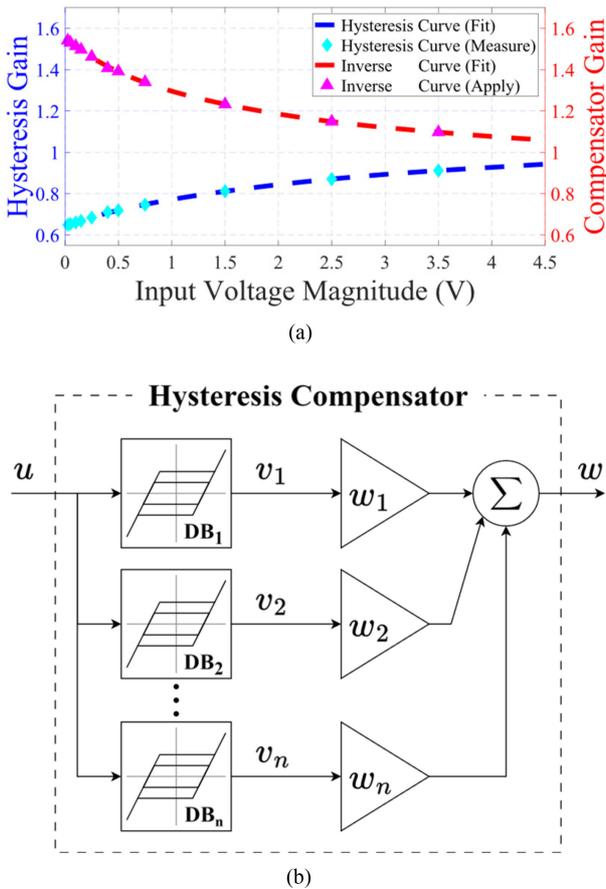


Fig. 3 (a) The effects of hysteresis and the desired compensator gains by input voltage magnitudes and (b) Schematic of Prandtl-Ishlinskii model using a linear combination of backlash operators and weights

여기서 DB, $u[k]$ 와 $v[k]$ 는 각각 불감대(Deadband), k 번째 입력과 출력을 의미한다. 본 연구에서는 총 12개의 백래쉬 연산자들을 사용하였으며, 입력 크기의 변화에 따라 Fig. 3(a)에 나타난 Compensator Gain에 해당하는 값이 출력되도록 가중치를 설정하였다. 구간별 선형화를 위한 연산자들의 불감대 분포는 추력 상수의 변화가 상대적으로 급격하게 나타나는 1.0 V 이하의 입력 구간에 밀집되도록 설계하였다. 이력특성으로 인한 시스템의 불확실성 저감을 확인하기 위해 입력 신호의 크기 변동에 따른 FSM Plant의 주파수 응답 특성을 확인하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 이력특성으로 인해 입력 신호에 따른 주파수 응답 크기가 최대 3.1 dB 발생하였으나, 이력특성 보상기를 사용하였을 때는 Fig. 4(b)와 같이 응답크기 변화가 0.8 dB로 입력 크기에 따른 시스템의 불확실성이 74.2% 감소한 것을 확인하였다. Fig. 5는 최대 구동 진폭으로 시스템을 1.0 Hz로 가진 하였을 때 입력 전압과 출력 변위 간의 관계를 보여주고 있다. 기준 전압에서 틸트, 틸트 방향의 변위 폭 감소가 각각 95.5%, 89.6%로 측정되었으며, 이를 통해 비선형성 이력특성이 상쇄되어 입출력 관계가 선형적으로 보상되었음을 확인할 수 있었다.

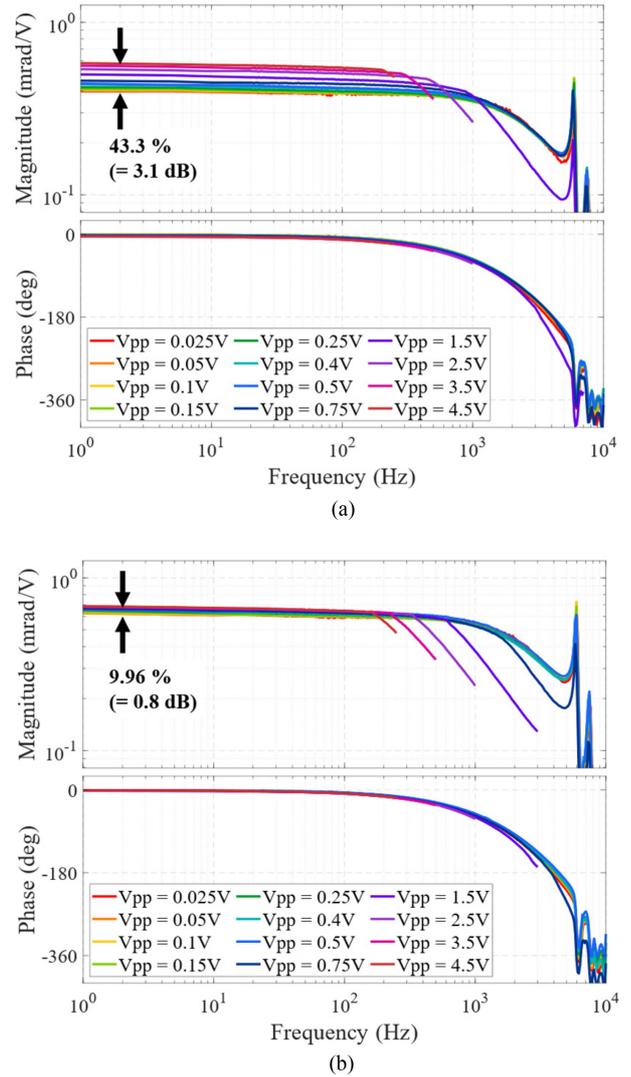


Fig. 4 Frequency response of the tip axis (a) without and (b) with hysteresis compensator

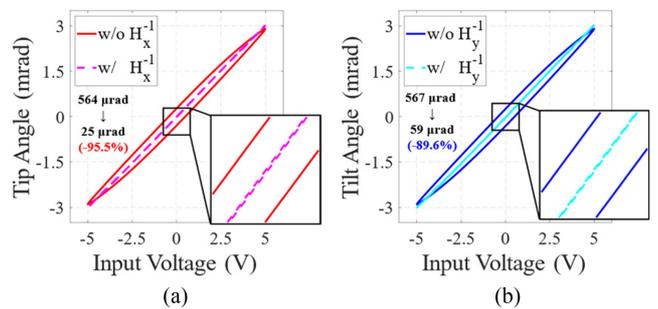


Fig. 5 Open-loop response of the FSM plant with and without the hysteresis compensator in (a) the tip and (b) the tilt axis

3.2 커플링 보상기

3.2.1 커플링 보상 모델 설계

압전형 FSM의 모델 기반 커플링 보상기를 설계하기 위해서는 넓은 대역폭에 대하여 시스템 거동을 왜곡 없이 식별하고

모델링하는 과정이 필요하다. 이를 위해 FSM Plant를 다중 입력 출력 시스템(Multi-input Multi-output, MIMO)으로 취급하고 이를 수식으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{yx} & G_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 G_{ji} 는 i 축 방향 입력 신호에 대한 j 축 변위 출력 전달함수를 의미하며, 우변 동특성 행렬의 비대각(Off-diagonal) 요소들이 커플링을 나타낸다. 입력 신호에 식(3)과 같은 변환 행렬을 추가하여 비대각 행렬 요소들을 상쇄시켜주는 것이 커플링 보상기의 기본적인 원리이며, 이를 위해 해당 변환 행렬 모델을 정확하게 설계하는 것이 중요하다.

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{xy}}{G_{xx}} \\ -\frac{G_{yx}}{G_{yy}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_x \\ u'_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

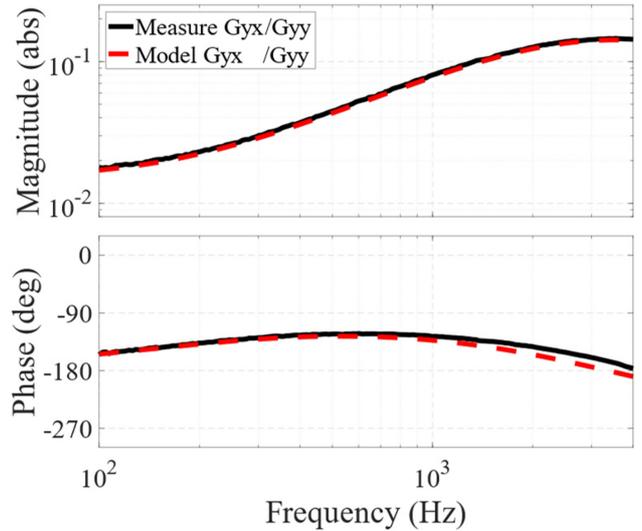
식(3)의 행렬을 디커플링 행렬이라고 하며, 비대각 요소들은 대각 요소로 인해 발생하는 커플링 효과를 모델 기반으로 예측하여 보상하는 역할을 한다. 이를 식(2)의 시스템 동특성 행렬과 함께 나타내면 식(4)와 같은 결과를 얻을 수 있으며 비대각 요소가 0이 되는 것을 통해 이상적으로 커플링이 제거됨을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 FSM Plant는 식(4)의 대각요소에 존재하는 $G_{yx} \cdot G_{xy}$ 의 크기가 G_{xx} , G_{yy} 보다 100배 이상 작기 때문에 설계된 커플링 보상기는 기존 FSM Plant의 동특성에 큰 변화 없이, 제어 시스템에 외란으로 작용하게 되는 상호 축에 대한 영향을 저감할 수 있게 된다. 또한 이러한 모델 기반의 보상은 지령 전압에 대한 신호처리로 작동하여 실시간 제어 간에 센서 노이즈의 영향을 직접적으로 받지 않는다는 장점을 가진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{yx} & G_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{xy}}{G_{xx}} \\ -\frac{G_{yx}}{G_{yy}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_x \\ u'_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} G_{xx} - \frac{G_{xy}G_{yx}}{G_{yy}} & 0 \\ 0 & -\frac{G_{xy}G_{yx}}{G_{xx}} + G_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_x \\ u'_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

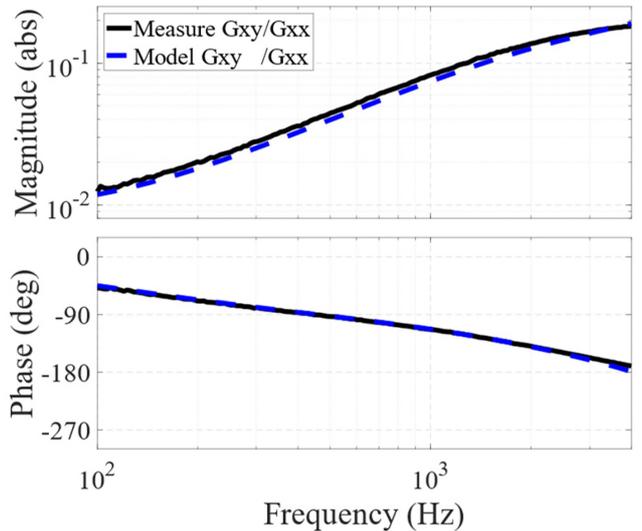
3.2.2 커플링 보상 모델 식별

앞서 식(3)에 나타난 디커플링 행렬의 비대각 요소들은 전달 함수들의 나눗셈을 통해 표현되며 주파수 응답 영역에서 식(5) 및 식(6)과 같이 계산된다.

$$\left| \frac{G_{ij}}{G_{ii}} \right| = \left| \frac{G_{ij}}{G_{ii}} \right| \quad (5)$$



(a)



(b)

Fig. 6 Identified frequency response of the decoupling matrix components for canceling out the cross-coupled dynamics of (a) G_{yx} and (b) G_{xy}

$$\angle \left(\frac{G_{ij}}{G_{ii}} \right) = \angle (G_{ij}) - \angle (G_{ii}) \quad (6)$$

이는 곧 디커플링 행렬은 식(2)에 나타난 FSM Plant의 선형 동특성 행렬 요소에 대한 개별 측정을 통해 계산됨을 의미한다. 이력특성 보상기를 사용하여 시스템 동특성의 불확실성을 감소시키고, 다양한 주파수의 정현파 신호 입력에 대한 출력 신호의 크기 및 위상 지연을 측정하여 FSM Plant에 대한 선형 동특성을 측정하였다. 이를 기반으로 디커플링 행렬 요소에 대한 이산 시간 전달함수 모델을 다음과 같이 설계하였다.

$$D_{yx} = \frac{G_{yx}}{G_{yy}} = \frac{-0.0310z^{-1} + 0.0309z^{-2}}{1 - 0.888z^{-1} - 0.997z^{-2} + 0.891z^{-3}} \quad (7)$$

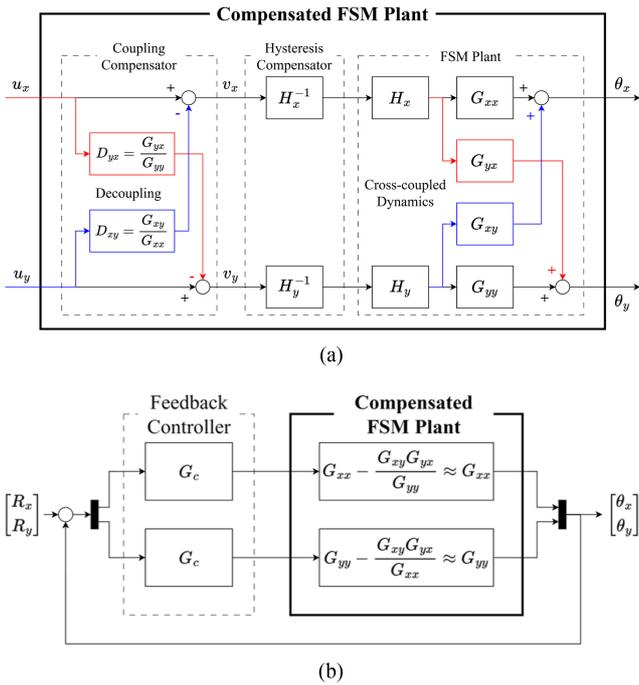


Fig. 7 Block Diagram of (a) the hysteresis and cross-coupling compensator with the FSM Plant and (b) the feedback control system

$$D_{xy} = \frac{G_{xy}}{G_{xx}} = \frac{-0.002486z^{-1} + 0.002490z^{-2}}{1 - 2.855z^{-1} - 2.728z^{-2} + 0.872z^{-3}} \quad (8)$$

Fig. 6에서 이에 대한 계측 데이터와 모델의 주파수 응답 특성을 비교하고 있다. 실선으로 표시된 계측 결과와 점선으로 표시된 모델링 결과가 고주파수 영역까지 높은 정확도로 일치함을 통해 디커플링 행렬 요소에 대한 모델링이 적절하게 설계되었음을 확인할 수 있었다.

4. 제어 성능 검증

4.1 개루프 제어 시스템

Figs. 7(a)는 커플링 보상기와 이력특성 보상기, 그리고 FSM Plant가 합쳐진 Compensated FSM Plant를 나타내고 있다. 커플링 보상기는 상호 축에 대한 커플링 동특성 크기 저감을 통해 그 성능을 확인할 수 있으며, Figs. 8(a)와 8(b)는 각각 틸트 방향으로 0.5 V의 진폭을 가지는 정현파 신호가 입력되었을 때 상호 축에 대한 주파수 응답 크기를 보여준다. 커플링 보상 이후 틸트와 틸트 방향의 커플링 크기는 100 Hz에서 각각 0.13%, 0.08%를 보였으며, 1,000 Hz의 높은 주파수에서도 두 방향 모두 1.11% 이하로 측정되었다. 이는 커플링 보상기를 사용하지 않았을 때의 동일한 주파수에 대한 응답 크기와 비교하여 85.5% 이상 감소한 수치로 커플링 보상기가 커플링으로 인한 진동을 효과적으로 상쇄하고 있음을 보여준다.

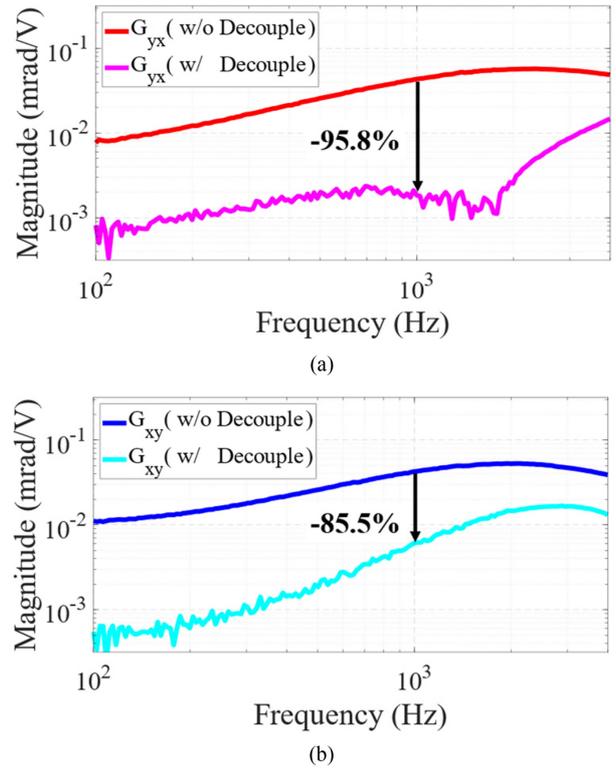


Fig. 8 Frequency response of the FSM plant with and without the cross-coupling compensator for (a) G_{yx} and (b) G_{xy}

4.2 페루프 제어 시스템

본 연구에서 설계한 보상기가 페루프 제어 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 식(9)와 같은 이산시간 비례-적분 (Proportional-Integral, PI) 제어기를 적용하였다.

$$G_c = 0.45 \times \left(\frac{1 - 0.9215z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) \quad (9)$$

Fig. 9는 제어 시스템의 루프 전달함수(Loop Transfer Function)에 대한 주파수 응답을 나타내고 있으며, 틸트 방향 모두 42.5 deg, 7.58 dB 이상의 충분한 위상 및 이득 여유를 확보하여 이력특성의 영향으로 FSM Plant의 응답 크기 및 위상에 변화가 발생하더라도 제어 시스템이 안정적으로 작동할 수 있도록 하였다.

Figs. 10(a)와 10(b)는 각각 틸트 방향으로 1.0 mrad의 계단 지령 신호를 입력하였을 때의 시스템 응답을 나타내고 있다. 이러한 계단 지령 신호는 FSM Plant의 동특성 전 영역을 가진 함으로써 FSM Plant의 커플링 특성으로 인한 상호 축의 지령 추종 성능 변화를 효과적으로 볼 수 있다. PI 제어기와 이력특성 보상기를 함께 사용한 결과 두 축 모두 시스템 응답의 상승 시간이 11.3% 이상 더 빨라진 것을 확인할 수 있는데, 이는 이력특성으로 인해 응답 초기 추력 상수의 감소를 보상하였기 때문이다. 동시에 짧은 시간동안 더 큰 전압이 시스템에 인가되며,

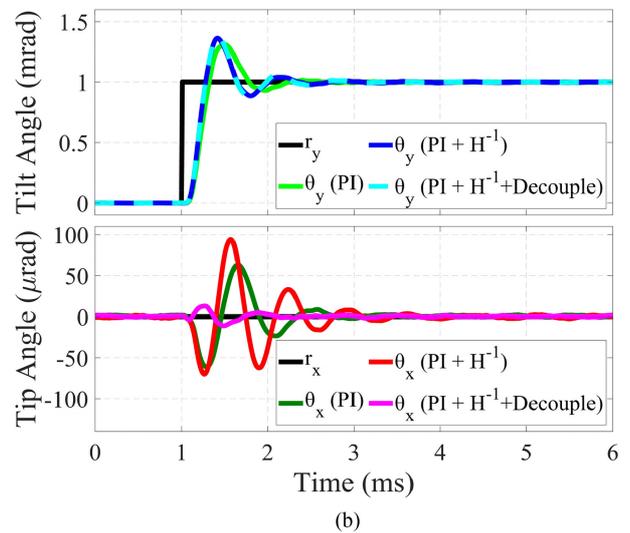
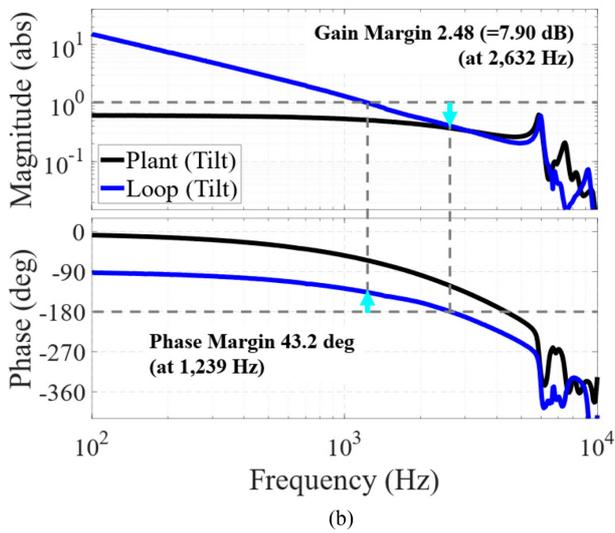
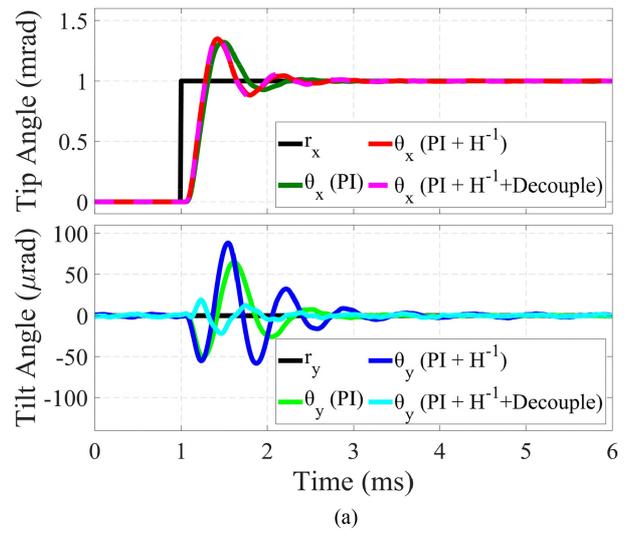
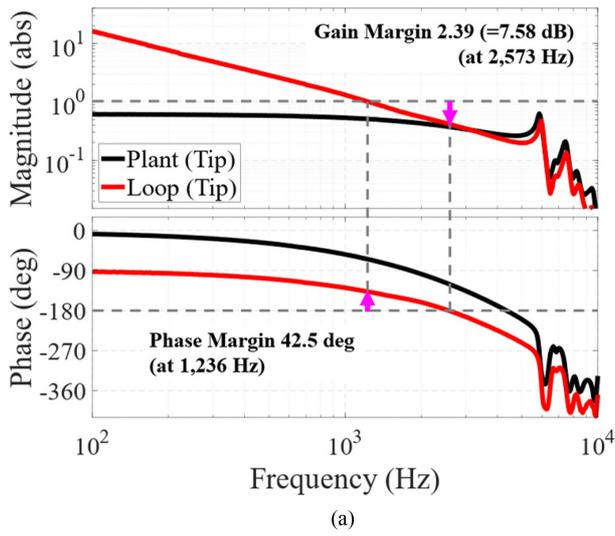


Fig. 9 Frequency response of the compensated FSM plant and the loop transmission for (a) the tip and (b) the tilt axis

Fig. 10 Closed-loop system response of the tip and tilt angle for the reference input of 1.0 mrad for (a) the tip and (b) the tilt axis

이로 인해 상호 축에 대한 진동의 크기(peak-to-peak)도 증가한 것을 볼 수 있다. 이후 디커플링 제어를 함께 사용하게 되면 Fig. 8에 나타난 것과 같이 커플링의 크기가 크게 감소하여 외란이 작아지는 효과를 가지며, 이를 통해 상호 축 진동이 틸트 방향은 146.6에서 40.4 μrad , 틸 방향은 164.0에서 23.7 μrad 로 각각 72.5%, 85.6% 감소한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 한 축에 300 Hz, 1.0 mrad 진폭의 정현파 지령 신호와 반대 축에 정지 지령 신호를 입력했을 때 추종 성능을 나타내고 있다. 이러한 정현파 지령 신호는 이력특성 보상기를 통한 FSM Plant의 위상 지연 저감 및 응답 크기 변화 감소 효과가 제어 시스템에 미치는 영향을 효과적으로 보여줄 수 있다. 이력특성 보상기는 이력특성으로 인해 발생하는 시스템의 지연을 보상함으로써 선형적인 시스템 응답을 확보하며, 정현파 지령에 대한 제곱-평균-제곱근(Root-mean-square, RMS) 오차를 16.9% 이상 감소시킨 것을 확인하였다. 또한, 커플링 보상기를

사용하지 않은 경우 정현파 신호와 동일한 주파수의 외란이 상호 축에 인가되어 진동이 발생하게 되고, 그 결과 틸트, 틸 방향으로 각각 4.59, 5.24 μrad 의 RMS 오차가 발생하였다. 커플링 보상기를 사용하였을 때는 틸트, 틸 방향의 추종오차가 1.54, 1.46 μrad 로 각각 66.5%, 72.2% 감소하였으며, 이를 통해 제안하는 보상기가 페루프 제어시스템에서 추종 성능의 향상뿐만 아니라 상호 축에 대한 진동을 효과적으로 저감할 수 있다는 것을 실험적으로 검증하였다.

5. 결론

본 연구에서는 압전형 FSM 구동 시스템의 제어를 위해 외란으로써 작용하게 되는 비선형 이력특성 및 축 간 커플링 현상에

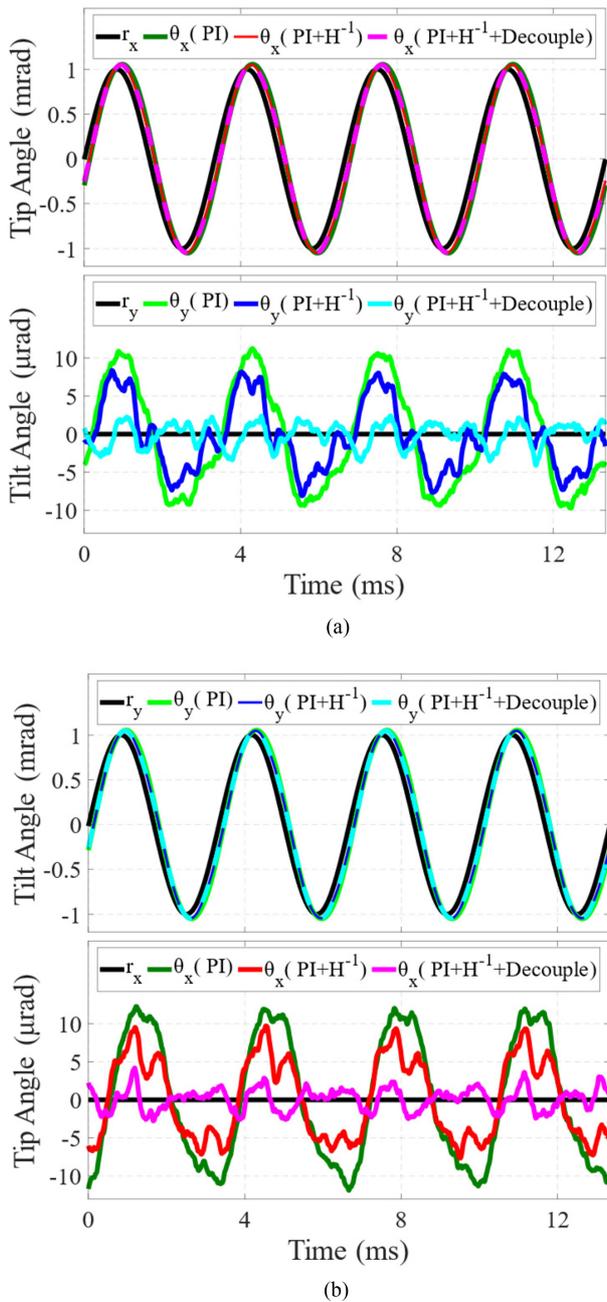


Fig. 11 Closed loop tracking performance for the 300 Hz, 1.0 mrad reference of (a) tip and (b) tilt axis and the reference angle for the cross-axis is set to be zero

대한 모델 기반 보상 시스템을 설계하였다. 제어 및 계측 시스템의 높은 샘플링 주파수를 통해 고주파 영역에서도 신호 왜곡 및 위상 지연 없이 시스템 응답을 계측하였으며, 이를 통해 시스템에 대한 정확한 식별이 가능하였다. 압전형 FSM의 비선형 거동에 대한 모델링과 이에 대한 보상기 설계를 위해 시스템 응답을 구동기의 전압-추력 상수 간의 정적인 이력특성과 유연형 힌지를 비롯한 구조물의 선형 동특성의 조합으로 나타내었다. 이력특성 보상기 설계에서 이력특성 초기 곡선 기반의 접근 방식 대신 주파수 응답 특성에서 관찰되는 추력 상수의 변화를

직접적으로 활용함으로써 입력 진폭에 따른 주파수 응답 크기 변화에 강건한 보상기를 구현할 수 있었다. 이러한 방식은 주파수 영역에서 시스템의 선형적인 응답을 확보하는데 유리하며, 모델 기반 커플링 보상기를 설계 및 그 성능을 안정적으로 유지하는 데 핵심적인 역할을 한다. 커플링 보상기는 이력특성 보상기를 통해 확보된 시스템의 선형 응답 특성을 기반으로 축 간 커플링으로 인한 상호 축 응답을 상쇄할 수 있도록 디커플링 행렬을 설계하였다. 모델 기반의 보상기 설계와 제어 시스템의 빠른 샘플링으로 신호 이산화로 인한 보상 성능 저하를 방지할 수 있었으며, 이를 통해 고주파 영역에서도 높은 커플링 억제 효과를 유지할 수 있었다. 설계된 이력특성 및 커플링 보상기는 개루프 제어 시스템에서 주파수 응답 특성 변화와 폐루프 제어 시스템에서의 추종 오차 및 진동 감소에 대한 정량적인 측정을 통해 그 성능을 실험적으로 검증하였다. 이러한 보상기 설계 과정에서 사용한 가정 및 수학적 모델들은 특정 장비의 물리적 구조에 종속되지 않는 일반적인 방법론으로써, 유사한 거동 구조를 갖는 FSM을 비롯한 다양한 다자유도 고정밀 시스템에 대해 적용 가능하다. 또한 복잡한 비선형 MIMO 시스템 거동을 독립적인 선형 SISO 시스템으로 취급함으로써 제어 시스템 설계 복잡도를 크게 낮추고 성능을 향상시키는 데 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구에서 설계한 보상기를 통해 압전형 FSM의 이력특성 및 커플링 모두 크게 저감할 수 있었으나, 약간의 잔여 오차가 존재하였다. 이는 이력특성을 정적인 특성으로 가정한 부분과 보상 모델 설계 과정에서 발생한 파라미터 오차 성분에 기인했을 것으로 추정된다. 이러한 요인들을 반영하여 향후 연구에서는 동적인(Rate-dependent) 이력특성 성분을 포함하고, 실제 운용 환경을 고려하여 파라미터 오차에 따른 보상 성능 저하를 최소화할 수 있도록 보상기를 개선할 예정이다. 이와 함께, 추종 성능 이외에도 노이즈 민감도 및 외란 저감 성능에 미치는 영향을 통합적으로 분석하여 보상기의 실용성을 보다 다양한 관점에서 검증하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIT-CT-22-084).

REFERENCES

1. Langenbach, H., Schmid, M., (2005), Fast steering mirror for laser communication, Proceedings of the 11th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 27-33.
2. Alvi, B. A., Asif, M., Siddiqui, F. A., Safwan, M., Bhatti, J. A., (2014), Fast steering mirror control using embedded self-learning fuzzy controller for free space optical communication, Wireless Personal Communications, 76(3), 643-656.

3. Kuiper, S., Crowcombe, W., Human, J., Dekker, B., Nieuwkoop, E., Meskers, A., Witvoet, G., Kramer, L., Lemmen, M., Lagemaat, H., (2017), High-bandwidth and compact fine steering mirror development for laser communications, Proceedings of the 17th European Space Mechanisms and Tribology Symposium.
4. Hafez, M., Sidler, T. C., (1999), Fast-steering two-axis tilt mirror for laser pointing and scanning, *Microrobotics and Microassembly*, 172-181.
5. Csencsics, E., Schitter, G., (2017), System design and control of a resonant fast steering mirror for lissajous-based scanning, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(5), 1963-1972.
6. Zhou, Q., Ben-Tzvi, P., Fan, D., Goldenberg, A. A., (2008), Design of fast steering mirror systems for precision laser beams steering, Proceedings of the International Workshop on Robotic and Sensors Environments, 144-149.
7. Zhong, J., Nishida, R., Shinshi, T., (2022), Design and precision tracking control of a high-bandwidth fast steering mirror for laser beam machining, *Precision Engineering*, 73, 128-139.
8. Wang, G., Rao, C., (2015), Adaptive control of piezoelectric fast steering mirror for high precision tracking application, *Smart Materials and Structures*, 24(3), 035019.
9. Hao, G., Cao, K., Li, R., Li, Z., Du, H., Tan, L., (2024), Rate-dependent hysteresis modeling and compensation for fast steering mirrors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 376, 115568.
10. Jung, S. W., Lee, H. G., Jung, J. W., Kim, J. H., Lim, S., Park, Y., Kim, O., Lim, J., Seong, K., Lee, D., Ko, M., Park, N. C., Yoon, J. Y., (2024), Study on hysteretic characteristics of piezoelectric fast steering mirror in frequency response, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 41(11), 913-920.
11. Wang, W., Wang, J., Chen, Z., Wang, R., Lu, K., Sang, Z., Ju, B., (2020), Research on asymmetric hysteresis modeling and compensation of piezoelectric actuators with PMPI model, *Micromachines*, 11(4), 357.
12. Gan, J., Zhang, X., (2019), A review of nonlinear hysteresis modeling and control of piezoelectric actuators, *AIP Advances*, 9(4), 040702.
13. Gu, G.-Y., Yang, M.-J., Zhu, L.-M., (2012), Real-time inverse hysteresis compensation of piezoelectric actuators with a modified Prandtl-Ishlinskii model, *Review of Scientific Instruments*, 83(6), 065106.
14. Dai, Y., Li, D., Wang, D., (2023), Review on the nonlinear modeling of hysteresis in piezoelectric ceramic actuators, *Actuators*, 12(12), 442.
15. Jiang, H., Ji, H., Qiu, J., Chen, Y., (2010), A modified prandtl-Ishlinskii model for modeling asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 57(5), 1200-1210.
16. Chen, Y., Qiu, J., Palacios, J., Smith, E. C., (2013), Tracking control of piezoelectric stack actuator using modified Prandtl-Ishlinskii model, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(6), 753-760.
17. Shan, Y., Leang, K. K., (2012), Dual-stage repetitive control with Prandtl-Ishlinskii hysteresis inversion for piezo-based nanopositioning, *Mechatronics*, 22(3), 271-281.
18. Wang, W., Wang, R., Chen, Z., Sang, Z., Lu, K., Han, F., Wang, J., Ju, B., (2020), A new hysteresis modeling and optimization for piezoelectric actuators based on asymmetric Prandtl-Ishlinskii model, *Sensors and Actuators A: Physical*, 316, 112431.
19. Heredia-Pérez, M., Alvarez, D. A., Bedoya-Ruiz, D., (2025), A state-of-the-art review of the Bouc-Wen class model of hysteresis: Origin, evolution and current state: M. Heredia-Pérez et al, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-51.
20. Xie, Y., Tan, Y., Dong, R., (2012), Nonlinear modeling and decoupling control of XY micropositioning stages with piezoelectric actuators, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(3), 821-832.
21. Wang, F., Zhao, X., Huo, Z., Shi, B., Liang, C., Tian, Y., Zhang, D., (2021), A 2-dof nano-positioning scanner with novel compound decoupling-guiding mechanism, *Mechanism and Machine Theory*, 155, 104066.
22. Han, W., Shao, S., Zhang, S., Tian, Z., Xu, M., (2022), Design and modeling of decoupled miniature fast steering mirror with ultrahigh precision, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 167, 108521.
23. Zhang, Z., Yang, X., Yan, P., (2019), Large dynamic range tracking of an Xy compliant nanomanipulator with cross-axis coupling reduction, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 117, 757-770.
24. Wang, L., Liu, X., Liang, S., Wang, C., (2024), Decoupling modeling design and high-precision position control of fast steering mirror, *Precision Engineering*, 88, 487-496.
25. Wang, R., Qiao II, Y., Lv III, T., (2017), Movement decoupling control for two-axis fast steering mirror, Proceedings of the Second International Conference on Photonics and Optical Engineering, 413-419.
26. Jian, Y., Huang, D., Liu, J., Min, D., (2018), High-precision tracking of piezoelectric actuator using iterative learning control and direct inverse compensation of hysteresis, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 368-377.
27. Liu, L., Li, Q., Yun, H., Liang, J., Ma, X., (2019), Composite modeling and parameter identification of broad bandwidth hysteretic dynamics in piezoelectric fast steering platform, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 121, 97-111.



Hyo Geon Lee

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2021. He is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include analytical modeling of electromagnetic actuators, precision motion control and manufacturing mechatronics.

E-mail: hyocheon007@yonsei.ac.kr



Jae Woo Jung

received the B.S. degree in mechanical engineering in 2020 from Yonsei University, Seoul, South Korea, where he is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering. His research interests include mechatronic systems for manufacturing, electromagnetic and electromechanical machine design, and precision motion control.

E-mail: jjwooo@yonsei.ac.kr



Sang Won Jung

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2020. He is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include analytical modeling and design of electromagnetic machines, manufacturing mechatronics and precision motion control.

E-mail: jahoo135@yonsei.ac.kr



Jae Hyun Kim

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2021. He is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include analytical modeling and design optimization of electromagnetic machines.

E-mail: jaehyun0924@yonsei.ac.kr



Seonbin Lim

is graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University and currently majoring in Structural Vibration. He is especially interested in vibration transmissions in electric vehicles.

E-mail: dlaths@yonsei.ac.kr



Youngjin Park

received the B.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University, Seoul, South Korea, in 2020. He is currently working toward the Ph.D. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include mechanical vibration, haptic, and structural vibration.

E-mail: pyj1586@yonsei.ac.kr



Jaehyun Lim

received the B.S. degree in mechanical engineering from Gachon University, Seongnam, South Korea, in 2024. He is currently working toward the M.S. degree in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include mechanical vibration, vibroacoustics, and structural vibration.

E-mail: jhlim00@yonsei.ac.kr



Kijun Seong

received the M.S. degree in aerospace engineering from Pusan University, Pusan, South Korea, in 2005. He is currently working at LIG Nex1 Co., Ltd.. His research interests include linear system control, stabilization control of EO/IR system.

E-mail: kijun.seong@lignex1.com



Daehee Lim

received the M.S. degree in aerospace engineering from Pusan University, Pusan, South Korea, in 2019. He is currently working at LIG Nex1 Co., Ltd.. His research interests include linear system control, stabilization control of EO/IR system.

E-mail: daehee.lim@lignex1.com



Seunggu Kang

received the B.S. degree in robotics from Kwangwoon University, South Korea, in 2024. He is currently working at LIG Nex1 Co., Ltd.. His research interests include linear system control, stabilization control of EO/IR system.

E-mail: seunggu.kang@lignex1.com



No-Cheol Park

received B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Yonsei University in 1986, 1988, and 1997, respectively. He is currently a professor at the department of mechanical engineering in Yonsei University. His research interest is in Vibration & Optics.

E-mail: pnch@yonsei.ac.kr

**Jun Young Yoon**

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2009 and the M.S. and Ph.D. degrees in mechanical engineering from the Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA, in 2011 and 2017, respectively. He is currently an Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University. From 2017 to 2019, he was a postdoctoral researcher in mechanical engineering and biological engineering at MIT. His research interests include manufacturing mechatronics and robotics system design, electromagnetic and electromechanical machine design, mechatronic devices for biomedical applications, and precision motion control.

E-mail: junyoung.yoon@yonsei.ac.kr

브레이드 슬리브의 포아송비 특성을 활용한 웨어러블 로봇용 가변 결착 메커니즘 개발

Development of a Adjustable fastening Mechanism for Wearable Robots Utilizing the Poisson's Ratio Properties of Braided Sleeves

서용신^{1,2}, 이재영^{1,2}, 박철훈¹, 송성혁^{3,4,#}

Yong-Sin Seo^{1,2}, Jae-Young Lee^{1,2}, Cheol Hoon Park¹, and Sung-Hyuk Song^{3,4,#}

¹ 한국기계연구원 첨단로봇연구센터 (Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials)

² 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

³ 동국대학교 기계로봇에너지공학과 (Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering, Dongguk University)

⁴ 서강대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Sogang University)

Corresponding Author / E-mail: songsh@sogang.ac.kr, TEL: +82-2-2260-3705

ORCID: 0000-0002-8541-9534

KEYWORDS: Wearable robot (웨어러블 로봇), Braided sleeve (브레이드 슬리브), Poisson's ratio (포아송 비), Scissoring effect (가위 효과), Adjustable fastening (가변 결착)

This study introduces a novel adjustable fastening mechanism for wearable robots, aimed at alleviating user discomfort associated with traditional fixed attachment methods. By utilizing the unique scissoring effect of braided sleeves, we demonstrated that axial manipulation can effectively translate into radial size control, allowing for precise regulation of fastening force. To address the size limitations of commercial braided sleeves, we developed a large-area fastening structure by combining multiple braided sleeve sheets. Additionally, we incorporated a wire tendon system to enable active operation in both Daily Mode (fastening-release) and Exercise Mode (fastening-tightening). Experimental results on an anthropomorphic model revealed that this adjustable fastening structure offers variable fastening forces, achieving a 4.8-fold difference between the exercise and daily modes. This research presents a new approach by leveraging the Poisson's ratio properties of braided sleeves for dynamic fastening, tackling fabrication challenges for large-area structures, and improving user comfort and compliance in wearable robot applications.

Manuscript received: July 2, 2025 / Revised: October 22, 2025 / Accepted: October 30, 2025

NOMENCLATURE

L_o	=	Initial Vertical Length
L_f	=	Final Vertical Length
W_o	=	Initial Horizontal Width
W_f	=	Final Horizontal Width
ΔL	=	Change in Vertical Length
ΔW	=	Change in Horizontal Length
ε	=	Vertical Strain
ε'	=	Horizontal Strain
ν	=	Poisson's Ratio

1. 서론

기존 웨어러블 로봇은 허리, 종아리, 허벅지, 발목 등 다양한 신체 부위에 부착되어 사용자의 근력보조[1-4], 하지마비 장애인의 자립 보행 및 재활 훈련 지원등 일상생활의 운동 능력 향상에 중요한 역할을 한다[5]. 일반적인 웨어러블 로봇은 액추에이터(Actuator)의 동력을 인체에 전달하기 위한 연결 방안으로서 결착 구조를 이용하며, 이러한 결착 구조는 보통 벨크로[6] 혹은 사전에 길이가 조절된 버클[7]을 활용하여 착용 내내 고정된 결착력을 유지한다. 또한 어깨와 몸에 걸치는 하네스 타입[8,9]도 널리 사용된다. 이러한 방식은 강한 구동력 전달을 위해

높은 결착력이 요구되지만, 장시간 착용 시 혈액 순환 저해, 피부 쓸림 등 심각한 사용자 불편을 초래하며 전반적인 착용감을 저하시킨다. 결과적으로 이러한 고정 결착 방식은 사용자 피로도를 가중시키고, 장시간 사용 시 로봇에 대한 순응도를 저해하는 주요 요인이다.

최근에는 결착력을 가변하려는 다양한 연구가 수행되었다. 공압형 웨어러블 로봇에서, 공압형 근육 자체와 결착 구조가 일체형으로 설계된 구조는 공압이 주입되면 액추에이터의 운동과 결착을 동시에 수행하며 높은 적응성을 제공한다. 하지만, 공압 특성상 외부에서 공압 발생 장치가 필수적인 한계가 있다[10]. 다른 예로, 와이어 텐던 구조를 적용하고 모터 구동을 통해 사용자의 특정 움직임이 필요한 때 결착력을 능동적으로 조절할 수 있는 메커니즘이 개발되었다[11]. 하지만 능동 앵커 메커니즘은 모터 및 와이어 텐던을 지지하는 강성 구조물 탑재가 필수적이며, 이는 전체 시스템 무게 증가 및 착용자의 기동성이 저해된다. 결착 구조의 결착력을 가변하기 위해서는 복잡한 구조가 필요하고 제한적인 유연성으로 인해 광범위한 적용에 한계가 있었다. 따라서, 웨어러블 로봇이 실제로 힘을 전달하고 작동할 때에 높은 결착력을 제공하고, 그 외 평상시에는 압박력을 낮춰 통풍과 사용자 편의성을 극대화할 수 있는 새로운 결착 메커니즘의 개발이 필요하다.

이러한 요구를 충족할 수 있는 유망한 소재 중 하나가 바로 브레이드 슬리브(Braided Sleeve)이다. 브레이드 슬리브는 케이블 및 호스 등을 보호하고 관리하는 데 사용되는 케이블 부자재이며, 여러 가닥의 가는 섬유나 금속 와이어를 일정한 패턴으로 교차시켜 튜브 형태로 편조한 직물이다. 특히, 브레이드 슬리브는 뛰어난 신축성과 형태 적응성을 가지고 있어, 좁고 복잡한 공간이나 급격하게 구부러지는 경로에도 케이블을 쉽고 자연스럽게 따라가며 설치할 수 있다. 이러한 독특한 기계적 특성 덕분에 브레이드 슬리브는 상업적인 사용자 외에 오래전부터 공압 인공 근육(Pneumatic Artificial Muscles, PAM)의 핵심 소재로 연구되어 왔다[12]. PAM은 내부 공기 주머니가 팽창시, 이를 감싸는 브레이드 슬리브의 기하학적 구조가 반경 방향 팽창을 길이 방향으로 변환하여 근육과 유사한 움직임을 구현한다. 이 슬리브의 꼬임 각도에 따라 수축력과 수축률이 결정되며, 가볍고 탄력적이면서도 강력한 힘을 발휘할 수 있는 특징을 지닌다.

언급된 브레이드 슬리브의 고유한 기하학적 특성, 특히 독특한 포아송비 변화 특성을 활용하여, 본 연구는 기존 웨어러블 로봇 결착 구조의 고정된 착용 압박과 동적(Dynamic) 결착력 조절 한계를 극복하는 새로운 가변 결착 메커니즘을 제안한다. 이 메커니즘은 브레이드 슬리브에 와이어 텐던 기반의 온-오프 결착 모드를 결합하여 필요에 따라 결착력을 능동적으로 조절하도록 설계되었다. 또한, 브레이드 슬리브는 자유롭게 변형되어 착용한 신체 형상에 밀착함으로써 착용감을 극대화한다. 이러한 구조는 일상생활에서는 일상모드(결착 이완)로 착용 부위에 불필요한 부하를 최소화하고, 웨어러블 로봇의 보조가 필요할 때 운동모드(결착 강화)로 전환하여 결착력을 안정적으로

확보하는 장점을 지닌다. 본 연구는 제안된 가변 결착 구조의 효율성과 웨어러블 로봇 결착 시스템으로서 잠재적 적용 가능성을 검증하고자 한다. 연구 결과는 사용자에게 최적화된 착용감과 안정성을 동시에 제공하는 웨어러블 로봇의 결착 구조 메커니즘 개발에 이론적 기반을 제공할 것으로 기대된다.

2. 브레이드 슬리브 기반 결착 구조의 기초 연구

2.1 브레이드 슬리브 구조의 특성

브레이드 슬리브는 와이어 로프와 마찬가지로 여러 가닥의 와이어를 편조하여 제작되지만, 그 구조와 목적에서 큰 차이를 보인다. 와이어 로프는 여러 가닥의 와이어를 작은 묶음인 스트랜드(Strand)로 먼저 꼬아 모으고, 이 스트랜드들을 다시 중심 코어 주위로 꼬아서 최종 로프를 완성한다. 이러한 다단계 구조는 주로 높은 하중 지지를 목적으로 한다. 반면에, 브레이드 슬리브는 얇은 와이어들이 스트랜드 없이 독립적인 편조(Braiding) 방식으로 직접 엮여 제작된다. 이처럼 스트랜드 구조가 없이 각 와이어가 독립적으로 편조 패턴을 구성하는 브레이드 슬리브의 독특한 구조는 유연성과 형태 적응성을 제공하며, 웨어러블 로봇 적용 시 인체의 비정형 형상에 밀착하여 착용감 극대화에 유리하다.

이러한 브레이드 슬리브의 특성은 특히 브레이딩 각도(Braiding Angle)에 의해 크게 좌우된다. 브레이딩 각도는 튜브의 축 방향과 개별 와이어 가닥이 이루는 각도를 의미한다. 브레이드 슬리브 제작 시 소선의 지름과 재질은 마찰, 내마모성 등의 물리적 특성을 결정하는 직관적인 설계 변수이다. 하지만 브레이딩 각도는 슬리브의 인장 강도, 강성, 포아송비와 같은 여러 기계적 특성에 밀접하게 연관된다. 작은 브레이딩 각도(20-40°)를 가질 경우, 와이어 가닥들이 튜브의 축 방향에 더 가깝게 정렬된다. 이는 슬리브를 길이 방향으로 당겼을 때 높은 인장 강도와 강성을 부여하고, 늘어나거나 변형되는 정도가 작게 나타난다. 그러나 축 방향으로 견고하게 배열되어 있기 때문에 슬리브를 구부리거나 비틀 때 유연성이나 신축성은 상대적으로 떨어진다. 반대로 큰 브레이딩 각도(50-70°)를 가질 경우, 와이어 가닥들이 튜브의 축 방향에 대해 더 높은 각도로 배열된다. 이 경우, 슬리브를 길이 방향으로 당겼을 때 낮은 인장 강도를 가지며 쉽게 늘어날 수 있다. 하지만 슬리브를 구부리거나 비틀 때 매우 유연하게 움직이며 높은 신축성을 가지므로, 굴곡이나 움직임이 많은 환경에 쉽게 적용할 수 있는 특징을 나타낸다.

이 브레이딩 각도는 브레이드 슬리브의 포아송비(Poisson's Ratio)에도 결정적인 영향을 미친다. 포아송비는 재료가 한 방향으로 변형될 때 다른 방향으로 얼마나 변형되는지를 나타내는 값으로, 일반적인 재료는 인장 시 수축하고 압축 시 팽창하는 양의 값을 갖는다. 이와 달리 브레이드 슬리브는 브레이딩 각도에 따라 비선형적인 포아송비 특성을 보인다. 각도가 0°에 가까울수록 슬리브를 축 방향으로 압축할 때 와이어 가닥이 측면으로

Table 1 Parameters for small-scale adjustable fastening structure

Specification (Unit)	Value
Material	PET
Wire diameter [mm]	0.24
Braiding angle [°]	22
Initial vertical length (L_o) [mm]	100
Final vertical length (L_f) [mm]	40
Initial horizontal width (W_o) [mm]	13
Final horizontal width (W_f) [mm]	27

벌어지며 반경 방향으로 크게 팽창한다. 이때 포아송비는 극단적으로 높은 값(0.5 이상)을 가진다.

이러한 극단적인 포아송비 특성은 외부 제어를 통해 슬리브의 직경을 효과적으로 조절하여, 웨어러블 로봇의 걸착력을 능동적으로 제어하는 데 활용될 수 있고, 착용자의 신체에 대한 능동적인 밀착력 조절을 가능하게 하여, 안정적인 착용감과 효율적인 힘 전달을 동시에 확보할 수 있다.

2.2 소형 걸착 구조의 개념 및 기초검증

브레이드 슬리브 팽창 운동의 능동 제어 가능성을 검증하기 위해, 소형 브레이드 슬리브를 활용한 걸착 구조의 기초 검증을 수행하였다. 사용된 브레이드 슬리브의 재질 및 매개변수는 Table 1, 사진과 브레이딩 앵글은 Fig. 1(a)에 제시되어 있다.

브레이드 슬리브는 개별 와이어가 독립적으로 교차하는 특수 구조로 인해 축 방향 힘이 가해질 경우, 와이어 간의 가위 효과(Scissoring Effect)가 발생하며 슬리브 폭이 변화가 극단적으로 나타난다. Figs. 1(b)와 1(c)에서 길이 방향 변형률(ϵ)은 초기 길이(L_o) 100 mm가 40 mm로 감소함에 따라 식(2)에 -0.6으로 계산되었으며, 폭 방향 변형률(ϵ')은 13에서 27 mm로 증가함에 따라 식(3)에 의해 1.077로 계산되었다.

여기서 산출된 지표는 슬리브를 하나의 이방성 구조체로 간주한 구조적 포아송비(Structural Poisson's Ratio) 개념이며, 슬리브를 구성하는 개별 재료의 고유적인 포아송비와는 구분되는 개념이다. 그 결과 식(2) 및 식(3)에 따른 길이 방향 변형률에 비해 매우 큰 폭 방향 변형률이 유도됨을 확인하였다. 식(4)로 계산된 포아송비는 1.795로, 이는 축 방향 변위가 가위효과를 통해 구조적인 폭 방향 변위 발생을 유도할 수 있음을 나타낸다. 이를 통해 27 mm 이내의 걸착에 사용할 수 있으며, 손가락의 걸착에 사용하기 충분한 폭 변화를 제공할 수 있다.

$$(L_f - L_o) = \Delta L, (W_f - W_o) = \Delta W \tag{1}$$

$$\epsilon = \Delta L / L_o \tag{2}$$

$$\epsilon' = \Delta W / W_o \tag{3}$$

$$\nu = -\epsilon / \epsilon' \tag{4}$$

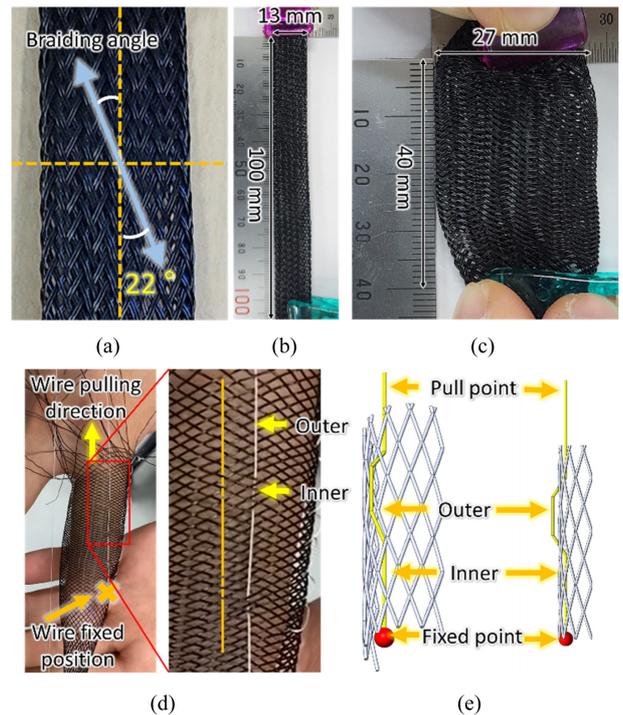


Fig. 1 Small-scale adjustable fastening structure characteristics and deformation mechanism. (a) Small-scale braided sleeve and its braiding angle, (b) Initial length of braided sleeve, (c) Compressed length of braided sleeve, (d) Arrangement and working mechanism of the wire tendon structure for diameter control, and (e) Zigzag installation of the wire, showing the fixed point and pull point

걸착 구조의 탈부착 용이성 확보를 위해 와이어 텐던 구조를 활용하여 브레이드 슬리브와의 직접적인 접촉 없이 와이어 텐던의 장력으로 슬리브의 수축 및 팽창을 조절하는 구조를 Fig. 1(d)와 같이 고안했다. 브레이드 슬리브 편조 와이어의 교차점(Wire Fixed Position)에 구동 와이어를 고정하여 인장력 전달의 기준점으로 설정하였다. 인장력 전달의 효율성을 높이기 위해, 와이어는 슬리브의 원통 내외부를 따라 지그재그 경로로 배치되어, Fixed Point에 고정된 와이어를 Pull Point 에서 당기면, 가위 효과 메커니즘에 의해 브레이드 슬리브의 길이 방향 수축이 폭 방향 팽창으로 변환된다.

손가락이 삽입되는 개구부는 고정되어 있으며, 와이어를 당기면 브레이드 슬리브가 축 방향으로 수축되고 폭 방향으로 팽창하여 일상모드(걸착이 완료된 상태)로 전환 된다. 반대로 와이어를 풀어서 브레이드 슬리브가 수축되어 운동모드(걸착을 강화하는 상태)로 변환된다.

Fig. 2(a)는 제작된 소형 걸착 구조의 개구부를 고정하고 와이어 텐던을 당겨 폭을 확장된 초기 상태를 보여준다. Figs. 2(b)와 같이 확장된 폭으로 손가락의 원활한 삽입이 가능하였으며, 2(c)에서 슬리브의 길이 방향으로 약한 장력을 가할 경우 손가락 주변의 슬리브가 폭 방향으로 수축되어 피부에 단단히 밀착됨을

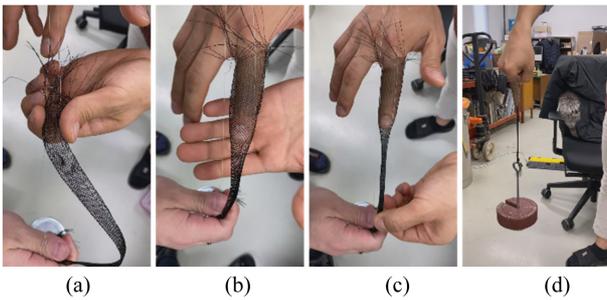


Fig. 2 Attachment process of small-scale adjustable fastening structure. (a) Initial state with expanded diameter, (b) Finger insertion, (c) Attached state with contracted diameter, and (d) Increased attachment force under axial load

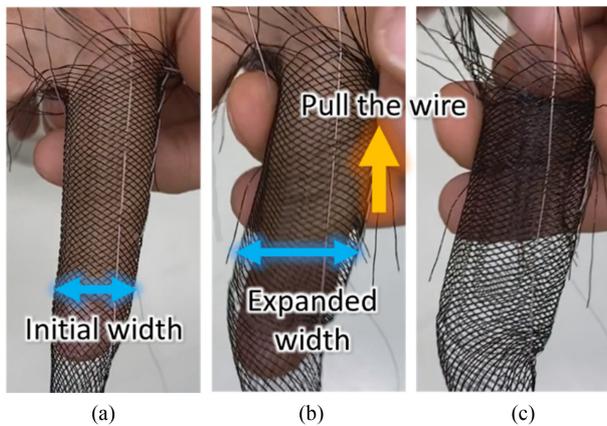


Fig. 3 Detachment process of small-scale adjustable fastening structure. (a) Attached state on finger, (b) Diameter expanded for detachment by pulling wire tendon, and (c) Easy finger removal

확인했다. Fig. 2(d)는 손가락에 결합된 구조가 길이 방향으로 하중을 지지할 때 미끄러짐 없이 더욱 단단히 결합되어, 2 kg 무게의 추를 안정적으로 지지할 수 있음을 보여준다.

Fig. 3은 소형 결합 구조의 탈착 과정을 보여준다. Figs. 3(a)는 손가락에 밀착되어 있는 슬리브의 운동모드 상태를, 3(b)는 모드 변환 와이어 텐던을 당겨 슬리브가 폭 방향으로 확장된 상태를 보여준다. Fig. 3(c)에서는 확장된 슬리브로 인해 손가락이 쉽게 빠져나오는 것을 확인할 수 있다. 위 결합 구조는 부착 및 탈착 과정의 용이성뿐만 아니라, 브레이드 슬리브 자체의 유연성으로 인해 Fig. 4와 같이 착용 후 손가락의 굽힘을 원활히 수행하여 관절 운동을 방해 하지 않는 것을 확인했다.

3. 대면적 가변 결합 구조의 설계, 제작 및 성능 평가

3.1 대면적 가변 결합 구조의 설계 및 제작

웨어블 로봇이 다리, 허리, 팔 등 다양한 인체 부위에 장착되기 위해서는 각 인체 부위의 넓은 둘레 범위를 수용할 수

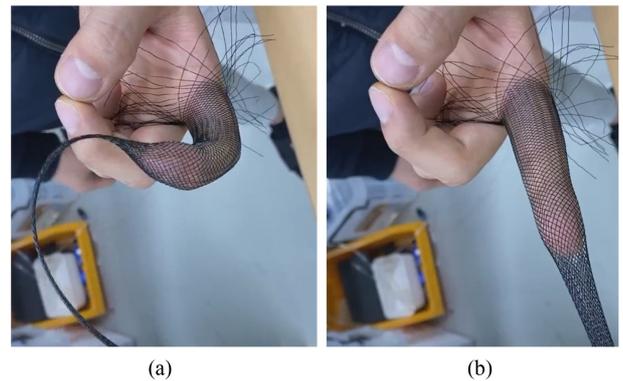


Fig. 4 Flexibility of small-scale adjustable fastening structure. (a) Closely fitted to the finger and (b) Maintaining close fit during finger bending.

있어야 한다. 예를 들어, 팔꿈치부터 허벅지까지 약 200에서 600 mm, 허리의 둘레는 800 mm 이상이다. 그러나 기초 검증에 사용된 소형 브레이드 슬리브 또는 현재 상업적으로 생산되는 가장 큰 단일 브레이드 슬리브는 운동모드 시 최대 80 mm, 일상모드 시 최대 150 mm 둘레를 가지며, 이보다 큰 인체 부위에는 적용이 제한적이다. 보다 대형의 단일 구조 브레이드 슬리브를 제작하기 위해서는 브레이드 슬리브 제작 장비의 크기가 급격히 커지며, 이는 대면적 결합 구조의 제작에 공정상의 어려움을 야기한다.

이러한 공정상의 제약을 극복하고 보다 넓은 인체 부위에 결합 구조를 적용하기 위해, 본 연구에서는 브레이드 슬리브를 시트 형태로 재단하고 복수의 시트를 겹쳐 더 큰 원통의 슬리브를 제작하는 방식을 고안하여 제작 가능한 결합 구조의 직경 한계를 확장하고자 했다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이, 브레이드 슬리브 시트는 가로 120 mm, 세로 150 mm 크기로 재단되었으며, 절단 후에도 길이 방향 인장에 따른 폭 방향 수축 특성이 유지되었다. 그러나 브레이드 슬리브는 각 와이어가 고정되어 있는 부분이 존재하지 않아, 개별 와이어의 울 풀림이 쉽게 발생한다. 이를 방지하기 위해 각 시트의 절단면을 지그재그 방식으로 재봉했다. 이 재봉 방법은 일반적인 일자 박음질에 비해 브레이드 슬리브의 길이 방향 인장 및 폭 방향 수축 특성을 방해하지 않으면서 테두리의 울 풀림을 효과적으로 방지하기 위해 사용되었다. Fig. 5(b)는 테두리에 마감 처리된 동일한 개별 브레이드 슬리브 시트 2장을 겹치고 길이 방향으로 좌우를 지그재그 방식으로 다시 재봉하여 원통 형상으로 구현된 모습을 보여준다. 여기에 결합 구조의 부착 및 탈착 편의성을 위해 와이어 텐던 구조를 적용했다. 와이어의 말단부에는 벨크로를 부착하여, 벨크로의 위치 조정을 통해 결합 구조의 두 구동 모드(일상모드 및 운동모드)를 전환하도록 설계했다.

Fig. 5(c)의 운동모드는 결합 구조가 신체에 밀착하여 인공 근육 장착시 근력 전달 및 운동 보조 역할을 수행하며 힘을 전달할 수 있는 모드이다. Fig. 5(d)의 일상모드는 결합 구조가 폭 방향으로 늘어나 신체에 밀착하지 않아 편안한 착용감을 제공하며,

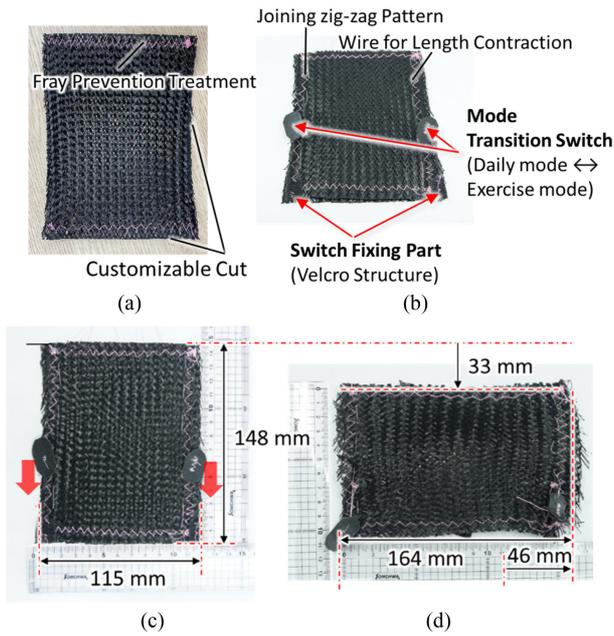


Fig. 5 Fabrication process of large-area adjustable fastening structure and mode classification. (a) Zigzag stitching for fray prevention of sheets, (b) Fabrication of cylindrical adjustable fastening structure by overlapping two sheets, (c) Exercise mode and (d) Daily mode

Table 2 Parameters for large-scale adjustable fastening structure

Specification	Value (Unit)
Material	PET
Wire diameter [mm]	0.24
Braiding angle [°]	30
Initial vertical length (L_o) [mm]	148
Final vertical length (L_f) [mm]	115
Initial horizontal width (W_o) [mm]	115
Final horizontal width (W_f) [mm]	164

일상생활에서 보조가 필요하지 않을 때 사용하는 모드이다. 일상모드로 전환은 모드전환 스위치를 Fig. 5(c)와 같이 빨간색 화살표 방향으로 내려 전환 된다. 대면적 결착 구조의 재질 및 제작 매개변수는 Table 2에 정리 되어있다.

3.2 대면적 가변 결착 구조의 성능 평가

대면적 가변 결착 구조의 성능을 평가하기 위해 인체 팔 부위를 모사한 구조를 제작했다. 이 구조는 팔의 평균 지름을 고려하여 250에서 280 mm 둘레를 가지는 완만한 원뿔형 기둥으로 제작되었으며, 인체 피부 경도와 유사한 물성을 구현하기 위해 폴리머(Ecoflex 0020, Smooth-on)를 사용하였다. 실제 인체 피부 및 근육의 탄성계수와 폴리머의 탄성계수는 다소 차이가 있으나, 본 연구는 마찰 기반의 결착 메커니즘의 성능 검증에 초점을 맞추었기에 표면 경도 및 마찰력이라는 핵심 물성치를

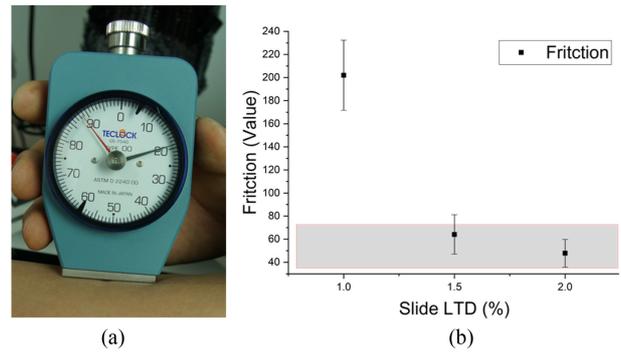


Fig. 6 Measurement of fundamental parameters for the fabrication of a large-area adjustable fastening structure. (a) Shore hardness measurement result (Shore 00 20), and (b) Skin friction force measurement result.

인체 피부와 가장 유사하게 모사하는 것을 목표 했다. 인체 피부의 경도를 경도 측정기(GS-754G, TECLOCK)로 측정된 결과 Shore 00 20으로 나타났으며, 이는 Ecoflex 0020의 경도와 일치한다. 또한, 인체 피부의 마찰력 지수를 마찰력 측정기(FR700, Epigem)로 측정했을 때 35-70 범위였으며, Ecoflex 0020에 Slide STD 2%의 첨가제를 사용하여 제작한 인체 모사 구조의 마찰력 지수가 35-60로 측정되어 실제 인체 피부의 마찰력 특성을 가장 유사하게 재현했다.

결착 구조의 성능을 다양한 마찰 환경에서 평가하고자, 인체 모사 구조의 표면에 라텍스 시트를 덮은 저마찰 환경과 및 폴리머 표면의 고마찰 상태로 구분하여 실험을 진행했다. Fig. 7의 인체 모사 구조는 1축 인장 시험기(MCT-2150, AND)의 베이스에 볼트로 고정하고, 그 둘레에 가변 결착 구조를 장착했다. 결착 구조에 연결된 와이어는 원통의 한쪽 측면에만 연결되었으며, 반대편 와이어는 인장시험기의 로드셀에 연결하였다. 실험은 와이어 텐션을 편측에만 연결하는 비대칭 조건으로 구성되었고, 이는 인체 근육의 편측 구동 구조 힘 전달 방향을 모사한 것이다. 편측 결착 조건은 구조체에 힘이 가장 불균형하게 작용하는 가장 불리한 조건이다. 따라서 본 논문에서 제시된 성능은 가혹한 조건하에서 검증되었다.

인장 실험 결과, 일상 모드에서는 결착 구조가 인체 모사 구조로부터 쉽게 벗겨져 인장 방향 변형이 최소화되고, 폭 방향 수축 변위도 적었다. 이와 달리 운동 모드에서는 와이어를 상부로 당길 때 결착 구조 하단은 움직임이 거의 없고, 인장 변형을 통해 폭이 감소하면서 인체 모사 구조를 강하게 압박하여 안정적 지지를 구현함을 확인했다. 이러한 특성 차이는 표면 마찰에 기인한다. 저마찰 환경(Fig. 7)에서 결착 지지력 측정 결과(Fig. 8), 일상 모드는 평균 8 N(표준편차 1.36 N)인 반면, 운동 모드는 평균 16.5 N(표준편차 2.16 N)으로 측정되어, 약 2.1배의 지지력 차이를 보였다. 고마찰 환경(Fig. 9)에서는 지지력 측정 결과(Fig. 10), 일상 모드에서 평균 11.2 N(표준편차 0.45 N), 운동모드가 53.5 N으로 측정되어 약 4.8배의 지지력 차이가 나타났다. 제시된 평균 값과 표준편차는 확보된 반복 실험 데이터를 활용하여 통계적

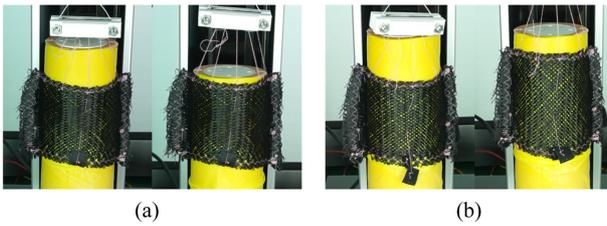


Fig. 7 Comparison of large-area adjustable fastening structure before and after tension in low surface friction environment. (a) Daily mode and (b) Exercise mode

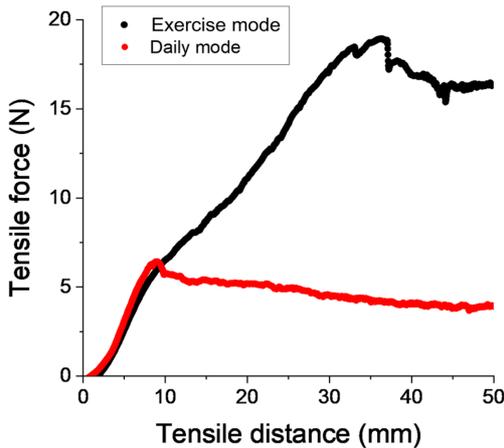


Fig. 8 Measured holding force graph of large-area adjustable fastening structure by working mode in low surface friction environment

신뢰성을 보강한 결과이다. 고마찰 환경 운동 모드 최종 실험 시 로드셀과 결착 구조 간의 연결부가 파손되어 추가적인 반복 실험 데이터를 취득하지는 못했으나, 연결부가 정상이었다면 53.5 N 보다 더욱 높은 지지력이 측정되었을 것으로 예상된다.

Figs. 8과 10에서, 운동모드의 힘 곡선은 급격한 비선형 증가를 보인다. 이는 구조적 강성 증가와 마찰 기반 결착력 극대화라는 두 가지 핵심 요인의 결합에 기인한다. 첫째, 인장 거리가 늘어나 브레이딩 각도 감소하며, 이는 슬리브의 축 방향 강성을 비선형적으로 급격히 증가시키는 구조적 강성 증가(Structural Stiffening)를 유발한다. 둘째, 이 강성 증가가 폭 수축을 심화시켜 결착력을 증대시키고, 결과적으로 지지력이 급격히 상승한다. 이러한 비선형 변화의 결합이 본 구조의 하중 지지 능력을 극대화하는 핵심이다.

그러나, 고마찰 환경의 일상 모드(Fig. 10)에서 슬라이딩 중에도 인장력이 부분적으로 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 고마찰 환경에서 브레이드 슬리브의 폭 수축에 의한 압착이 강한 마찰 결합을 유발하기 때문이다. 특히, 낮은 초기 결착력에도 불구하고 인장 거리가 증가에 따라 발생하는 결착 구조의 잔여적인 미세 변형과 마찰 상호작용이 지속되어, 부분적인 인장력 증가를 유도한다. 이 결과는 결착 대상의 마찰 특성이 최대 결착력의 크기와 거동 양상에 큰 영향을 미치는 주요 변수이며,

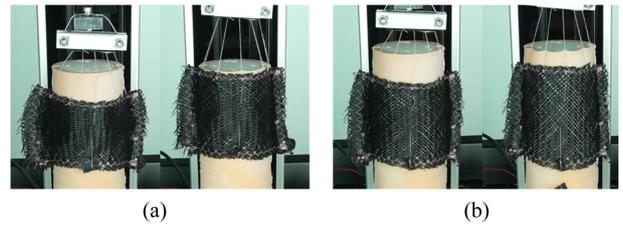


Fig. 9 Comparison of large-area attachment structure before and after tension in high surface friction environment. (a) Daily mode and (b) Exercise mode

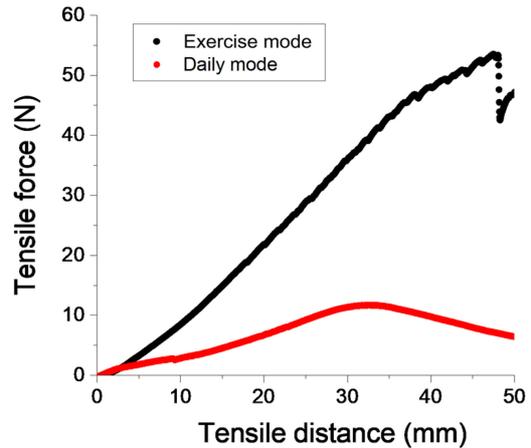


Fig. 10 Measured holding force graph of large-area adjustable fastening structure by working mode in high surface friction environment

향후 결착 메커니즘 설계 시 마찰 환경의 변화를 고려하는 것이 필수적이다.

4. 결론

본 연구에서는 웨어러블 로봇의 고정 결착력 한계 및 사용자 불편을 해소하고자 브레이드 슬리브 기반의 가변 결착 메커니즘을 제안하고 검증은 수행했다.

연구 결과 브레이드 슬리브의 고유한 가위 효과를 활용하여, 인장력이 폭 방향 수축으로 전환되어 효과적인 결착력 전달이 가능함을 입증하였다. 특히, 상용 브레이드 슬리브의 지름 한계를 극복하고자 다수의 시트를 재단 및 결합하여 대면적 결착 구조를 성공적으로 구현했다. 또한, 와이어 텐던 구조를 적용함으로써 일상 모드(결착 이완)와 운동 모드(결착 강화)간의 능동적 모드 전환 기능을 추가했다. 기존의 단단한 벨크로나 버클 방식과 달리, 가변 결착 구조는 와이어 텐던 구조를 통해 유연하면서 결착력을 실시간으로 가변 제어할 수 있는 기능적 차별성을 갖는다. 이러한 연구 결과는 웨어러블 로봇 결착 기술에 사용자의 착용감을 개선 및 순응도 향상에 기여할 수 있으며, 향후 연구를 통해 웨어러블 로봇에 최적화된 동적 결착 시스템 개발의 기반이 될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (IRIS Project No. RS-2022-NR067545).

REFERENCES

1. Zhou, Y. M., Hohimer, C. J., Young, H. T., McCann, C. M., Pont-Esteban, D., Civici, U. S., Jin, Y., Murphy, P., Wagner, D., Cole, T., (2024), A portable inflatable soft wearable robot to assist the shoulder during industrial work, *Science Robotics*, 9(91), eadi2377.
2. Shi, K., Kong, K., (2025), Recreating human ability with wearable robotics technology, *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2, 369-370.
3. Park, Y.-L., Chen, B.-r., Pérez-Arancibia, N. O., Young, D., Stirling, L., Wood, R. J., Goldfield, E. C., Nagpal, R., (2014), Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation, *Bioinspiration & Biomimetics*, 9(1), 016007.
4. Lotti, N., Xiloyannis, M., Durandau, G., Galofaro, E., Sanguineti, V., Masia, L., Sartori, M., (2020), Adaptive model-based myoelectric control for a soft wearable arm exosuit: A new generation of wearable robot control, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 27(1), 43-53.
5. Huo, W., Mohammed, S., Moreno, J. C., Amirat, Y., (2014), Lower limb wearable robots for assistance and rehabilitation: A state of the art, *IEEE Systems Journal*, 10(3), 1068-1081.
6. Liu, T., Xia, H., Lee, D.-Y., Firouzeh, A., Park, Y.-L., Cho, K.-J., (2021), A positive pressure jamming based variable stiffness structure and its application on wearable robots, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4), 8078-8085.
7. Choi, B., Lee, Y., Lee, J., Lee, M., Lim, B., Park, Y. J., Kim, K., Kim, Y.-J., Shim, Y., (2019), Development of adjustable knee assist device for wearable robot based on linkage and rolling joint, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4043-4050.
8. Xiloyannis, M., Chiaradia, D., Frisoli, A., Masia, L., (2019), Physiological and kinematic effects of a soft exosuit on arm movements, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 16(1), 29.
9. Zhang, H., Shea, H., (2025), Clutchable fabric actuator for energy-efficient wearable robots, *Advanced Functional Materials*, 35(6), 2415099.
10. Nguyen, P. H., Zhang, W., (2020), Design and computational modeling of fabric soft pneumatic actuators for wearable assistive devices, *Scientific reports*, 10(1), 9638.
11. Choi, H., Kang, B. B., Jung, B.-K., Cho, K.-J., (2019), Exo-wrist: A soft tendon-driven wrist-wearable robot with active anchor for dart-throwing motion in hemiplegic patients, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(4), 4499-4506.
12. Daerden, F., Lefeber, D., (2001), The concept and design of pleated pneumatic artificial muscles, *International Journal of Fluid Power*, 2(3), 41-50.



Yong-Sin Seo

Postdoctoral Researcher, Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Soft robotics.

E-mail: sys7668@kimm.re.kr



Jae-Young Lee

Student Researcher, Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Soft robotics.

E-mail: leejy@kimm.re.kr



Cheol Hoon Park

Principal Researcher, Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Wearable robot.

E-mail: parkch@kimm.re.kr



Sung-Hyuk Song

Assistant Professor, Department of Electronic Engineering, Sogang University. His research interest is Soft robotics.

E-mail: songsh@sogang.ac.kr

SHPB 실험에서 정렬 불량에 따른 파형 왜곡 분류를 위한 머신러닝 기반 접근법

A Machine Learning-based Approach for Classifying Waveform Distortion Due to Misalignment in SHPB Experiments

황효성¹, 김정¹,#
Hyo Sung Hwang¹ and Jeong Kim¹,#

¹ 부산대학교 항공우주공학과 (Department of Aerospace Engineering, Pusan National University)
Corresponding Author / E-mail: greatkj@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-2477
ORCID: 0000-0002-7292-7441

KEYWORDS: Split hopkinson pressure bar (SHPB), Waveform distortion (파형 왜곡), Misalignment (정렬 불량), Machine learning (머신러닝), Classification model (분류 모델), Finite element method (유한요소법)

The Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) experiment is commonly employed to assess the dynamic mechanical properties of materials under high strain-rate conditions (10^2 - 10^4 s⁻¹) through the propagation of elastic stress waves via pressure bars. The precision and dependability of SHPB measurements are heavily influenced by the alignment of the specimen with the bars. Misalignment can lead to flexural vibrations, causing waveform distortion and undermining the assumption of one-dimensional stress waves. While previous research has explored the impact of misalignment on waveform characteristics, pinpointing the specific sources of distortion from measured signals remains a challenge. This study introduces a machine learning-based classification method that extracts features from distorted SHPB waveforms to identify the type of misalignment. Incident wave signals under various misalignment scenarios were simulated using the commercial finite element software LS-DYNA, and the extracted features were utilized to create a training dataset. Several machine learning models, including XGBoost, were trained and evaluated, with XGBoost yielding the highest accuracy and F1-score. The trained model was then applied to experimentally measured distorted waveforms to validate its effectiveness. This proposed approach facilitates the automated diagnosis of distortion sources in SHPB data, reducing the need for manual interpretation and improving analysis efficiency.

Manuscript received: July 29, 2025 / Revised: August 22, 2025 / Accepted: August 29, 2025

1. 서론

재료의 물성은 제조 공정에서 기본적으로 고려되어야 하는 핵심 요소이며, 연구자와 엔지니어는 응력, 변형률, 변형률 속도와 같은 재료의 역학적 특성을 신중하게 검토해야 한다. 응력과 변형률은 변형률 속도의 변화에 따라 준정적(Quasi-static) 조건과 동적(Dynamic) 조건에서 상이하게 거동한다. 변형률 속도는 단위 시간당 변형률의 변화를 의미하며, 일반적으로 재료는 높은 변형률 속도에서 더 높은 항복 강도와 인장 강도를 나타내는 것으로 알려져 있다[1,2]. 이러한 현상은 변형률 속도 효과

(Strain Rate Effect)로 정의되며, 각 재료의 동적 특성을 규명하고 실험 결과의 유효성을 확보하기 위해 목표 변형률 속도 범위에 따라 다양한 실험 방법이 연구되어 왔다. 폭굉(Detonation)이나 초고속 충격 현상을 제외하면, 일반적인 수송기의 충돌 시 발생하는 변형률 속도는 대략 10^4 s⁻¹ 수준에 이른다. 이러한 변형률 속도 범위(10^2 - 10^4 s⁻¹)에서 재료의 응력, 변형률, 변형률 속도를 측정하기 위해 가장 널리 사용되는 충격 실험 기법은 SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar)이다. SHPB 실험은 1차원 응력과 전달 이론에 기반하며, 하중 센서 없이 봉을 통해 전파되는 탄성 응력파를 통해 다양한 재료의 동적 물성을 획득할 수

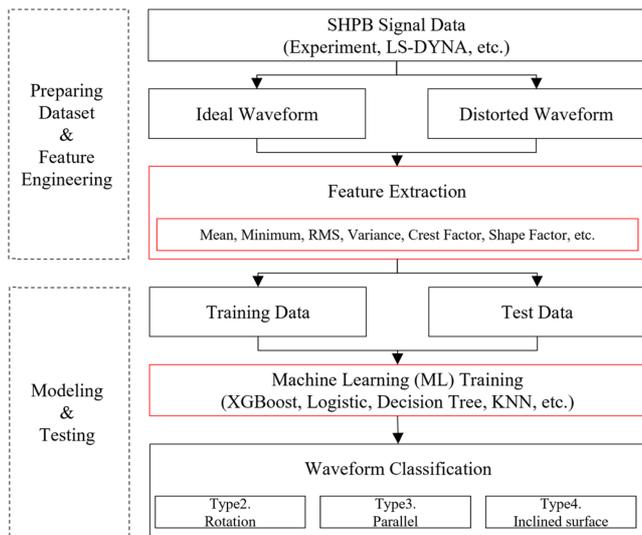


Fig. 1 Process of misalignment classification using ML in SHPB testing

있어 관련 연구가 이어지고 있다[3,4]. SHPB 기법을 적용하기 위해서는 응력봉과 시편이 1축 응력 상태를 유지해야 하며, 시편 내부의 응력 및 변형률 분포가 시간에 따라 일정해야 한다. 1축 응력 상태를 확보하기 위해서는, 응력봉 직경의 최소 10배 이상이 되는 입사파를 사용하는 것이 권장되며, 봉의 길이(L) 대 직경(D)의 비율(L/D)은 20 이상이어야 한다. 또한, 충돌면에서의 마찰을 최소화하고 충격봉의 정렬을 유지하여 직진도를 확보하는 것이 중요하다.

기존 연구에서는 SHPB 실험에서 정렬 불량인 입사파 및 반사파 내에 굽힘 진동 모드(Flexural Mode of Vibration)를 유발하여 1차원 파동 이론을 위배하고 SHPB 실험의 신뢰도를 저해할 수 있음을 지적하였다. Wu 등은 충돌면의 기울기 및 함몰이 입사파의 상승 시간과 하강 시간을 연장시키고, 파형의 평탄부를 왜곡시키는 요인임을 제시하였다[5]. Panowicz와 Konarzewski는 충격면이 마모된 충격봉과 펄스 조정기(Pulse Shaper)가 포함된 3차원 유한요소해석 모델을 기반으로, 충격봉과 입력봉 간의 기울기 및 편심이 신호 품질에 미치는 영향을 분석하였다[6]. Kariem 등은 곡률, 편심, 기울기, 충돌면 형상 등 다양한 정렬 불량 유형에 대해 SHPB 신호 왜곡을 종합적으로 분석하고, 유형별 허용 오차 한계를 제시하였다[7]. 기존 연구들은 정렬 불량이 파형에 미치는 영향을 규명하고 그 원인을 분석하였으나, 실제 실험에서 측정된 왜곡 신호의 파형으로부터 정렬 불량 유형을 판별하는 데에는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 SHPB 실험에서 측정된 왜곡 신호로부터 파형의 특성(Feature)값을 추출하고, 이를 활용하여 정렬 불량 유형을 분류하는 머신러닝 기반의 분류 프로세스를 제안한다. Fig. 1은 분류 프로세스를 나타낸 것이다. 먼저, 모델 학습을 위해 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 LS-DYNA를 활용하여 정렬 불량 유형별 입사파 신호를 모사하고, 각 신호로부터 파형의 특성값을 추출하여 데이터 벡터를 생성하였다. 정렬 불량 유형 분류를

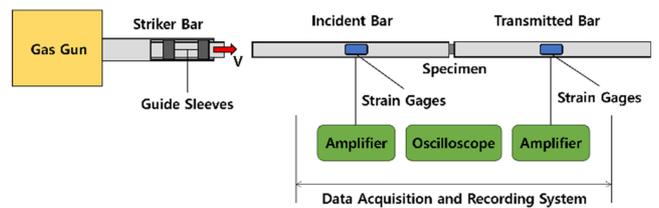


Fig. 2 Schematic of SHPB apparatus

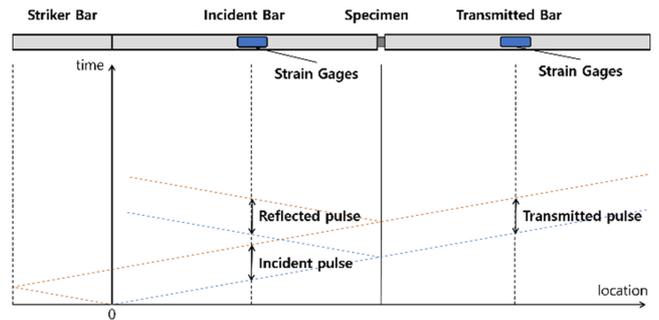


Fig. 3 location-time graph of stress wave propagation in SHPB

위해 머신러닝 기법을 적용하여 분류 모델의 성능을 비교 분석하였으며, XGBoost 모델이 정확도 및 F1-score를 포함한 평가 지표에서 우수한 성능을 나타냈다. 최종적으로, 개발된 머신러닝 분류 모델에 실제 실험에서 측정된 왜곡 신호를 입력하여 실효성을 평가하였다.

2. Split Hopkinson Pressure Bar

2.1 기본 이론

Fig. 2는 SHPB 장비 구성 개략도를 나타낸 것으로 충격봉(Striker Bar), 입력봉(Incident Bar), 출력봉(Transmitted Bar), 시편(Specimen), 그리고 데이터 수집 및 기록 시스템(Data Acquisition and Recording System)으로 구성된다. 입력봉과 출력봉 사이에는 시편이 배치되며, 충격봉이 입력봉 전면에 충돌하면 응력파가 발생하고, 이는 입력봉의 축 방향을 따라 전파된다. 생성된 응력파는 시편과의 경계면에 도달한 후, 봉과 시편 간의 임피던스 차이에 의해 일부는 입력봉 내로 반사되고, 나머지는 시편을 통과하여 출력봉으로 전달된다. 입력봉에 부착된 스트레인 게이지(Strain Gages)를 통해 측정되는 초기 신호는 입사파(Incident Pulse), 시편에 도달한 이후 경계에서 반사되어 되돌아오는 신호는 반사파(Reflected Pulse), 그리고 시편을 통과하여 출력봉에서 측정되는 신호는 투과파(Transmitted Pulse)로 정의된다. Fig. 3은 이러한 응력파가 봉 내부를 따라 전파되는 과정을 위치-시간 그래프로 나타낸 것이다. 반사파와 투과파는 시편의 동적 거동 정보를 포함하고 있으며, 이를 통해 시편의 응력(σ_s), 변형률(ϵ_s), 변형률 속도($\dot{\epsilon}_s$)를 식(1)-식(3)을 통해 도출할 수 있다.

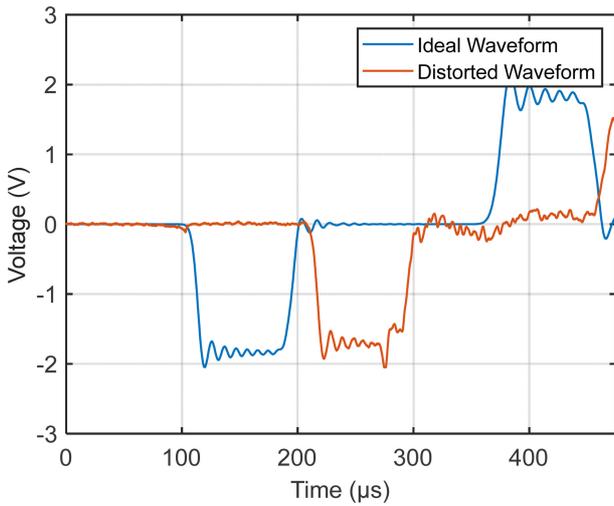


Fig. 4 Comparison of ideal and distorted waveform

$$\sigma_S = E_B \left(\frac{A_B}{A_S} \right) \epsilon_T \tag{1}$$

$$\epsilon_S = \frac{-2C_B}{L_0} \int_0^t \epsilon_R dt \tag{2}$$

$$\dot{\epsilon}_S = \frac{-2C_B}{L_0} \epsilon_R \tag{3}$$

이때, E_B 와 A_B 는 봉의 탄성계수와 단면적, A_S 와 L_0 는 시편의 단면적 및 초기 길이, C_B 는 응력파의 전파 속도를 의미한다.

SHPB 실험에서 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해서는 신호 왜곡을 유발할 수 있는 원인을 사전에 제어하는 것이 중요하다. SHPB 실험에서 발생할 수 있는 주요 신호 왜곡 원인으로는 스트레인 게이지의 부착 상태, 데이터 수집 시스템 간의 연결 상태, 봉의 정렬 상태 등이 있으며, 이 중 봉의 정렬 상태는 1차원 응력파 전달 이론이 성립하기 위해 가장 중요한 요소이다. 본 이론은 충격봉의 충돌로 발생한 응력이 봉 전체에 균일하게 분포하며, 파형의 분산 없이 전달된다고 가정한다. 이러한 가정을 충족시키기 위해서는 충격봉과 입력봉의 중립축(Neutral Axis)이 동축(Coaxial)이 되어 임피던스 불일치 없이 충돌해야 한다. 실제 실험에서 충격봉과 입력봉의 정렬이 맞지 않을 경우, 예를 들어 두 봉의 접촉면이 평행하지 않을 경우 임피던스 불일치에 의해 왜곡된 신호가 발생한다[7]. Fig. 4 는 실험에서 계측된 왜곡된 입사파와 유한요소 해석을 통해 도출된 이상 정렬 상태의 입사파를 비교한 것이다. 비교의 용이성을 위해 왜곡된 입사파는 시간 축 기준으로 100 μs 이동되었다. 입사파의 왜곡은 반사파 및 투과파의 왜곡으로 이어지며, 결과적으로 시편의 응력, 변형률, 변형률 속도 계산에 오차를 발생시킨다.

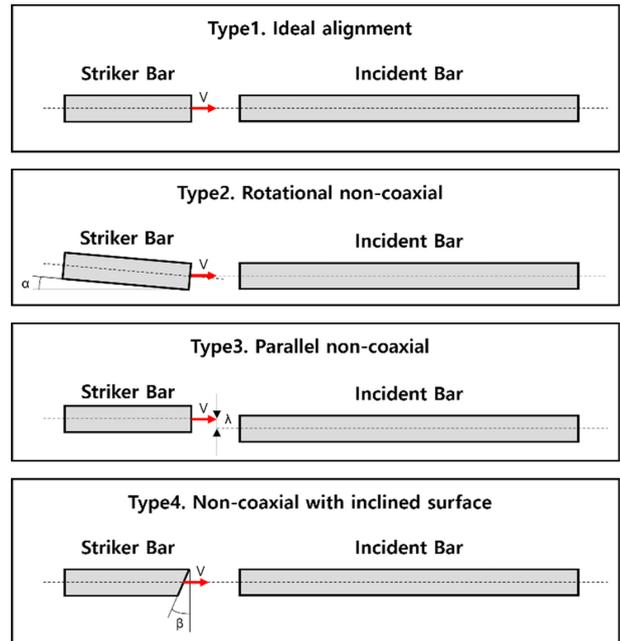


Fig. 5 Classification of misalignment type in SHPB

2.2 비정렬 유형

본 연구에서는 SHPB 실험에서 신호 왜곡을 유발하는 정렬 상태를 유형별로 분류하였다. 이상적인 정렬 상태를 포함하여, 실험 과정에서 발생할 수 있는 비정렬 유형을 Fig. 5와 같이 세 가지로 구분하였다. 회전 비동축과 평행 비동축은 정렬 슬리브(Guide Sleeves)의 마모나 배치에 따라 발생할 수 있으며, 경사진 면이 포함된 비동축은 생산 품질과 직접적으로 연관되어 정렬 상태가 이상적일지라도 신호 왜곡을 유발한다. 이러한 비정렬 유형에 따른 실험 조건은 다음과 같다: 회전 비동축(Rotational non-coaxial, $\alpha = 0.1^\circ / 0.3^\circ / 0.4^\circ / 0.5^\circ / 1^\circ$), 평행 비동축(Parallel non-coaxial, $\lambda = 0.1 / 0.3 / 0.4 / 0.5 \text{ mm}$), 경사진 면이 포함된 비동축(Non-coaxial with Inclined Surface, $\beta = 0.1^\circ / 0.3^\circ / 0.4^\circ / 0.5^\circ / 1^\circ$). 해당 조건들은 비정렬 정도가 심화됨에 따른 왜곡 변화를 관찰하기 위해 선정하였으며, 각 조건의 상한값($\alpha, \beta = 1^\circ, \lambda = 0.5 \text{ mm}$)은 실제 실험 장비에서 발생할 수 있는 최대 오차 범위를 고려하여 설정한 것이다.

또한, 충격봉의 충돌 속도에 따라 응력파의 전파 속도가 달라지며 왜곡 파형이 변형된다. 따라서 실제 실험 장비의 작동 환경을 고려하여 인가 압력에 따른 충돌 속도를 구분했다. $V = 12.5 \text{ m/s}$ (0.5 bar), 17.5 m/s (1.0 bar), 22.5 m/s (1.5 bar).

2.3 Finite Element Method (FEM)

정렬 유형별 입사파의 파형 데이터를 획득하고 파형 왜곡을 정량적으로 분석하기 위해, 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 모델은 Fig. 6과 같이 충격봉과 입력봉으로 구성되었으며, 두 봉은

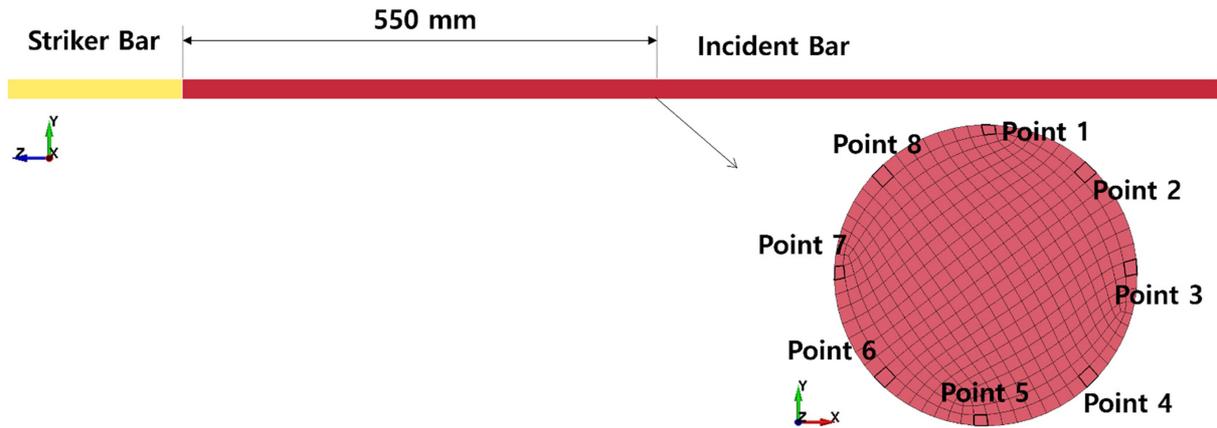


Fig. 6 Configuration of output points on the cross section for incident wave measurement

Table 1 Material property of bar

Density [kg/m ³]	7,850
Young's modulus [GPa]	196
Yield strength [MPa]	1,550
Possion's ratio	0.3

Table 2 Dimensions of bar

	L [mm]	D [mm]
Striker bar	200	20
Incident bar	1,200	20

탄성 영역(Elastic Region) 내에서 거동하므로 탄성 물성만을 적용하였다. 두 봉은 동일한 직경(D), 밀도(Density), 탄성계수(Young's Modulus), 푸아송 비(Poisson's Ratio)를 가지며, 재료 물성 및 기하학적 치수는 각각 Tables 1과 2에 제시하였다[8].

비정렬 상태에서는 충돌면으로부터 축 방향(Axial Direction)으로 동일한 거리에 위치하더라도 응력 분포가 균일하지 않기 때문에, 원주 방향(Circumferential Direction)에 따라 입사파의 파형이 달라진다. 이에 따라 실제 스트레인 게이지 부착 위치를 고려하여, 충돌면으로부터 550 mm 떨어진 단면 상에 Fig. 6과 같이 0°부터 360°까지 45° 간격으로 총 8개의 출력 지점(Output Points)을 설정하였다. 총 339개의 파형 데이터가 획득되었으며, Fig. 7은 전체 파형 데이터 중 회전 비동축 조건 및 충돌 속도 17.5 m/s 하에서, 충격봉의 회전각(α)에 따른 각 출력 지점의 입사파 왜곡 파형을 나타낸 것이다. 정렬 불량은 1차원 응력파 전달 가정을 위배하며 신호 왜곡을 유발한다. Fig. 4의 이상적인 파형은 충격봉의 충돌로 발생한 축 방향 응력파와 푸아송 효과에 의해 형성된 반경 방향 응력파가 중첩되어 형성된다. 그러나 충돌면의 기울기와 같은 정렬 불량은 기존의 응력파 성분 외에 추가적인 굽힘 모드(Flexural Mode)를 유발하며 파형에 직접적인 영향을 미친다. Figs. 7(a)의 왜곡 파형은 굽힘 모드가 파형의 평탄부를 왜곡시킨 결과이며, 이는

4에 제시된 왜곡 파형과 유사한 양상을 보인다. 또한 회전각이 증가함에 따라 입사파의 초기 피크 진폭이 감소하고 평탄부의 왜곡이 심화되는 경향을 확인할 수 있으며, 이러한 평탄부 왜곡은 대칭적으로 나타난다. 예를 들어, 반대 위치(Point 1과 Point 5)에서 계측된 Figs. 7(a)와 7(e)의 평탄부 왜곡은 180°의 위상차를 가지며 대칭적인 형태를 보이는데, 이는 굽힘 모드의 전형적인 특징이다.

2.4 특성 추출

유한요소 해석을 통해 획득한 입사파의 파형 데이터를 머신러닝(Machine Learning, ML) 모델의 학습 데이터로 활용하기 위해, 각 파형으로부터 총 10개의 특성(Feature)을 추출하였다. 추출된 특성에는 파형의 평균값(μ), 최대/최소값(x_{max}/x_{min}), 제곱평균근(Root Mean Square, RMS), 분산(σ^2), 표준편차(σ), 파고율(Crest Factor, CF), 파형률(Shape Factor, SF), 누적면적(A), 초기 피크 지점과 최소 피크 지점 간의 시간차(Δt)가 포함된다. 모든 특성은 시간 영역에서 계산된 값으로 입사파의 물리적 의미를 내포한다. 이 중 파고율은 파형의 순간적인 진폭 변화 정도를 나타내는 지표로서, 임펄스(Impulse)와 같은 충격성 파형의 비율을 파악하는데 사용된다. 반면, 파형률은 파형의 평균 진동 특성을 나타내는 지표로, 파형의 에너지 분포 형태를 분석하는 데 활용된다. 이러한 특성들은 신호 처리 분야에서 일반적으로 활용되며, 식(4) 및 식(5)를 통해 계산된다. 이때, 본 연구에 사용된 파형이 음의 값을 가지므로, 식(4)의 x_{peak} 는 최소값인 x_{min} 을 적용하였다. 추출된 특성값은 머신러닝 모델이 효과적으로 학습할 수 있도록 구조화된 벡터 형태로 저장되었으며, 각 데이터 벡터는 수치적 특성값과 해당 파형의 정렬 유형을 구분하는 레이블(Label)로 구성된 데이터셋을 형성하였다.

$$Crest\ Factor = \frac{x_{peak}(=x_{min})}{RMS} \tag{4}$$

$$Shape\ Factor = \frac{RMS}{\mu} \tag{5}$$

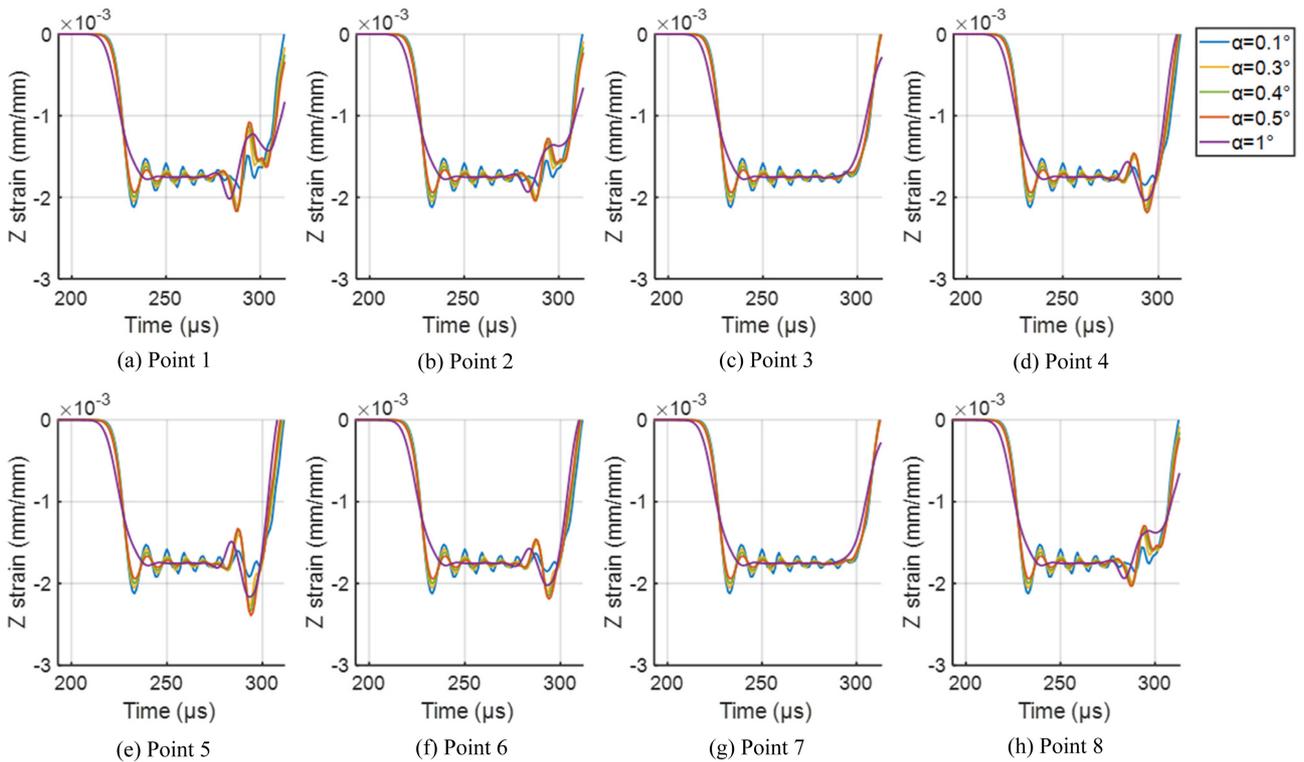


Fig. 7 Distortion of incident waveforms at eight output points under rotational non-coaxial and impact velocity of 17.5 m/s

3. 머신러닝 분류 모델

3.1 분류 모델

본 연구의 목적은 왜곡된 입사파의 파형이 주어졌을 때, 머신러닝 기법을 활용하여 해당 파형의 왜곡 원인을 판별하는 것이다.

이는 입력 데이터 대한 출력 레이블이 존재하는 지도학습(Supervised Learning) 기반의 분류(Classification) 문제로 정의된다. 지도학습 기반 분류 모델은 입력 데이터와 그에 대응하는 출력 레이블을 바탕으로 학습하며, 모델이 학습을 완료한 뒤에는 새로운 입력에 대해 해당 입력이 속하는 레이블을 예측한다. 이러한 분류 모델을 구현하기 위해, 로지스틱 회귀(Logistic Regression), 결정 트리(Decision Tree), K-최근접 이웃(K-Nearest Neighbors, KNN), eXtreme Gradient Boosting (XGBoost)을 활용하였다.

로지스틱 회귀는 이진 분류 문제에 적합하며, 입력 변수의 선형 결합에 시그모이드 함수를 적용하여 확률을 예측한다[9]. 결정 트리는 조건에 따라 데이터를 분할하는 트리 구조로 직관성이 높고 비선형 데이터에도 높은 적합성을 보이지만, 과적합의 가능성이 있어 가지치기(Pruning) 등의 기법이 요구된다[10,11]. K-최근접 이웃(KNN)은 예측 시점에서 가장 가까운 K개의 데이터를 기준으로 분류를 수행하며, 학습 과정은 단순하나 예측 시 연산량이 많아 효율성이 떨어진다[12]. XGBoost는 결정 트리와 같은 약한 학습기를 순차적으로 결합하는 부스팅 기반 알고리즘으로, 높은 예측 정확도와 안정성을 제공한다[13].

Table 3 Classification performance of ML model

Model	Logistic regression	Decision tree	KNN	XGBoost
Accuracy	0.82	0.84	0.84	0.93
Precision	0.87	0.87	0.87	0.92
Recall	0.82	0.84	0.84	0.93
F1-score	0.83	0.85	0.85	0.92

3.2. 모델 성능 평가

총 339개의 파형 데이터로부터 10개의 특성을 추출한 후, 271개를 훈련 데이터로, 그 외 68개를 테스트 데이터로 활용하여 모델의 학습 및 성능을 평가하였다. 분류 성능 평가를 위해 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 재현율(Recall), F1-score가 고려되었으며, 해당 지표 들은 혼동행렬(Confusion Matrix)을 기반으로 산출되었다.

모델의 분류 성능 결과는 Table 3에 제시되어 있으며, XGBoost 모델이 정확도 0.93, 정밀도 0.92, 재현율 0.93, F1-score 0.92로 가장 우수한 분류 성능을 나타냈다. 결정 트리와 K-최근접 이웃 모델은 정확도 0.84로 유사한 성능을 보였으며, 로지스틱 회귀 모델은 정확도 0.82로 상대적으로 가장 낮은 성능을 나타냈다. Fig. 8은 XGBoost 모델의 특성 중요도(Feature Importance) 분석 결과를 나타낸다. XGBoost의 특성 중요도는 주로 Weight, Gain, Cover와 같은 지표를 통해 산출된다. 본 연구에서는 모델

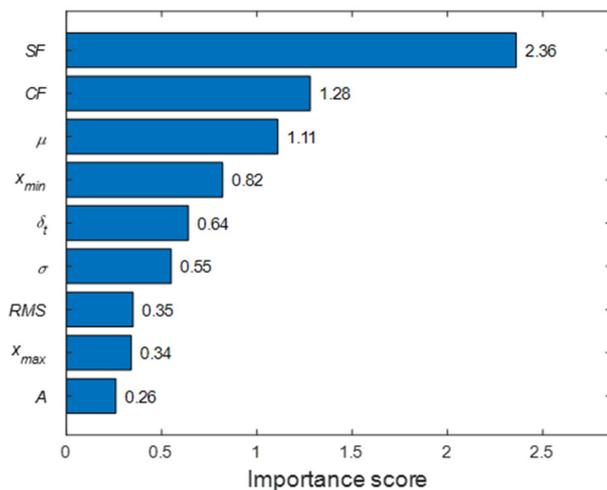


Fig. 8 Feature importance scores of the XGBoost model for waveform classification

성능 향상에 기여한 정도를 직접적으로 반영하는 Gain을 기준으로 특성 중요도를 평가하였다. Gain은 분류 모델의 트리에서 각 특성이 분기(Split)에 사용될 때마다 예측 오류를 얼마나 감소시키는지를 정량화한 지표이다. 따라서 Gain 값이 높을수록 해당 특성이 모델의 예측 성능 향상에 더 크게 기여했음을 의미한다. 파형률은 중요도 점수 2.36으로 가장 높은 값을 기록하였으며, 파고율과 평균값은 각각 1.28, 1.11로 상대적으로 높은 중요도를 기록했다. 이를 통해 파형률, 파고율, 평균값이 파형 분류에 있어 주요 특성임을 확인하였다.

Figs. 4의 왜곡 파형은 실제 실험에서 획득된 결과이며, 7(a)의 파형과 유사한 왜곡 양상을 보인다. 해당 실험 파형을 XGBoost 모델에 입력한 결과, 회전 비동축에 의한 파형 왜곡으로 분류되었으며, 이를 통해 실제 실험 데이터를 활용한 머신러닝 분류 모델의 적용 가능성을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 SHPB 실험에서 계측된 왜곡 신호로부터 파형의 특성(Feature)값을 추출하고, 이를 활용하여 정렬 불량 유형을 진단하기 위해 머신러닝 기반의 분류 프로세스를 제안하였다. 정렬 불량에 대한 대표적인 세 가지 유형(회전 비동축, 평행 비동축, 경사진 면이 포함된 비동축)에 대해 LS-DYNA를 활용한 유한요소 해석을 수행하고, 시뮬레이션을 통해 획득한 입사파의 파형으로부터 10개의 특성값을 추출하여 분류 모델의 학습 데이터를 구성하였다. 머신러닝 모델 중 XGBoost가 가장 우수한 분류 성능을 나타냈으며, 특성 중요도 분석을 통해 파형률, 파고율, 평균값이 파형 분류에서 주요한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 실제 실험에서 계측된 왜곡 파형에 모델을 적용한 결과, 회전 비동축으로 분류되어 제안된 접근법의 실효성을 입증하였다. 제안된 머신러닝 기반 분류 방법은

SHPB 결과 분석의 신뢰성 향상에 기여할 수 있으며, 신호 품질 진단 및 자동화 분석의 기술로 활용될 수 있다. 향후에는 다양한 실험 조건을 반영한 데이터셋의 확대와 더불어 딥러닝 모델의 적용을 통해 파형 분류의 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 교육부 및 한국연구재단의 4 단계 두뇌한국 21 사업 (4 단계 BK21 사업)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Khan, A. S., Suh, Y. S., Kazmi, R., (2004), Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys, *International Journal of Plasticity*, 20(12), 2233-2248.
2. Khan, A. S., Pandey, A., Baig, M., Tarigopula, V., (2012), Quasi-static and dynamic responses of advanced high strength steels: experiments and modeling, *International Journal of Plasticity*, 30, 1-17.
3. Kolsky, H., (1963), *Stress waves in solids*, Dover Publications.
4. Hopkinson, B., (1914), A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 213(497-508), 437-456.
5. Wu, X., Dai, H., Li, Y., Liu, Q., Zhang, Z., (2015), Effects of imperfect experimental conditions on stress waves in SHPB experiments, *Acta Mechanica Sinica*, 31(6), 827-836.
6. Panowicz, R., Konarzewski, M., (2020), Influence of imperfect position of a striker and input bar on wave propagation in a split Hopkinson pressure bar (SHPB) setup with a pulse-shape technique, *Applied Sciences*, 10(7), 2423.
7. Kariem, M. A., Beynon, J. H., Ruan, D., (2012), Misalignment effect in the split Hopkinson pressure bar technique, *International Journal of Impact Engineering*, 47, 60-70.
8. An, W. J., Woo, M. A., Noh, H. G., Kang, B. S., Kim, J., (2016), Design and fabrication of Split Hopkinson Pressure Bar for acquisition of dynamic material property of Al6061-T6, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 33(7), 587-594.
9. Jurafsky, D., Martin, J. H., (2025), *Speech and language processing*, 3rd Edition, Pearson Education.
10. Quinlan, J. R., (1986), Induction of decision trees, *Machine Learning*, 1(1), 81-106.

11. Ying, L. U., (2015), Decision tree methods: applications for classification and prediction, Shanghai Archives of Psychiatry, 27(2), 130-135.
12. Cover, T., Hart, P., (1967), Nearest neighbor pattern classification, IEEE Transactions on Information Theory, 13(1), 21-27.
13. Chen, T., Guestrin, C., (2016), XGBoost: A scalable tree boosting system, Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785-794.



Hyo Sung Hwang

M.Sc. candidate in the Department of Aerospace Engineering, Pusan National University. His research interest is acquisition of dynamic material properties.
E-mail: 201927151@pusan.ac.kr



Jeong Kim

Professor in the Department of Aerospace Engineering, Pusan National University. His research interest is high speed forming.
E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

실시간 운동 오차 측정 및 보정 기능이 통합된 초정밀 에어베어링 스테이지 개발

Development of an Ultra-precision Air-bearing Stage Integrated with Real-time Motion Error Measurement and Compensation Functions

고은영¹, 이훈희², 이광일³, 양승한^{1,#}

Eun Young Ko¹, Hoon Hee Lee², Kwang Il Lee³, and Seung Han Yang^{1,#}

¹ 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)

² 한국생산기술연구원 정밀기계공정제어연구그룹 (Precision Mechanical Process and Control R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

³ 경일대학교 기계전기융합학부 (Department of Mechanical and Electrical Engineering, Kyungil University)

Corresponding Author / E-mail: syang@knu.ac.kr, TEL: +82-53-956-2855

ORCID: 0000-0001-7842-0492

KEYWORDS: Air-bearing (에어베어링), Capacitive sensor (정전용량 센서), Motion error (운동 오차), Real-time measurement (실시간 측정), Compensation (보정)

This study details the development of an ultra-precision air-bearing stage that integrates real-time motion error measurement and compensation features. The motion errors addressed include horizontal and vertical straightness errors, as well as roll, pitch, and yaw errors. These errors are measured by an embedded system that incorporates five capacitive sensors and a reference mirror within the stage. A key advantage of this stage is its capability to perform real-time compensation using the internal measurement system and on-stage pneumatic regulators, eliminating the need for external measurement and compensation devices. Experimental results show a significant reduction in motion errors, with horizontal and vertical straightness errors decreasing from 3.09 and 1.95 μm to 0.29 and 0.25 μm , respectively. Additionally, roll, pitch, and yaw errors were reduced from 3.18, 3.45, and 4.93 arcsec to 0.35, 0.41, and 0.49 arcsec, respectively. These results clearly demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Manuscript received: July 31, 2025 / Revised: October 22, 2025 / Accepted: October 29, 2025

NOMENCLATURE

F_{al} = Left Side Levitation Force of the Stage [N]
 F_{ar} = Right Side Levitation Force of the Stage [N]
 F_m = Magnetic Attractive Force [N]
W = Weight of the Stage [N]
d = Distance from the Permanent Magnet to Center [mm]
l = Distance from the Air-bearing to t Center [mm]
 m_i = Measured Data of i-th Sensor, ($i=1,\dots,5$) [μm]
b = Distance between the First and Second Sensors [mm]
h = Height between m_3 and m_5 [mm]

δ_{cx} = Linear Displacement Error [μm]
 δ_{yx} = Horizontal Straightness Error [μm]
 δ_{zx} = Vertical Straightness Error [μm]
 ϵ_{rx} = Roll Error [arcsec]
 ϵ_{px} = Pitch Error [arcsec]
 ϵ_{yx} = Yaw Error [arcsec]

1. 서론

최근 산업의 고도화에 따라 초정밀 부품에 대한 수요가

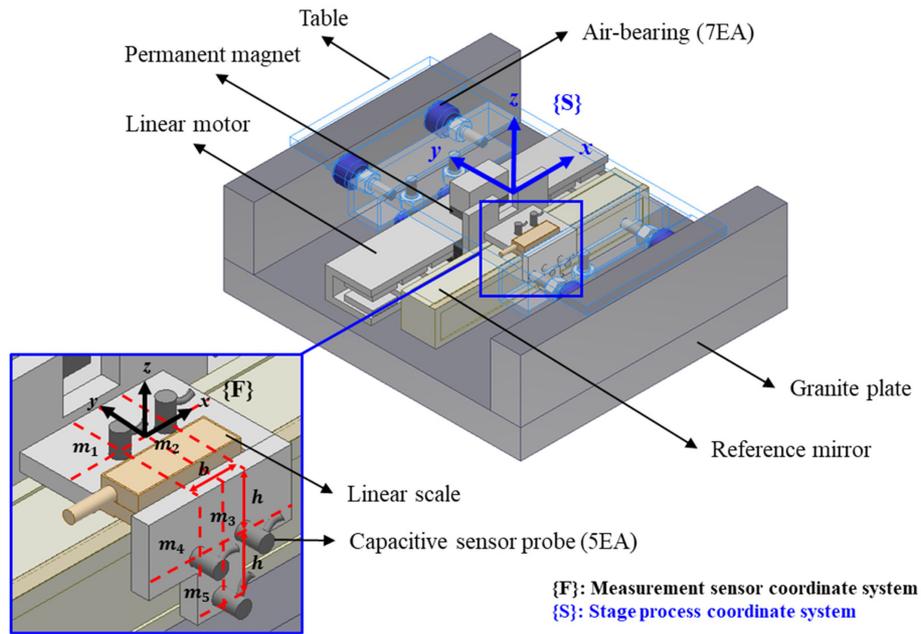


Fig. 1 Isometric view of the air-bearing stage

지속적으로 증가하고 있다. 반도체 제조 및 정밀 계측 장치 분야에서는 스테이지의 성능이 제품 품질에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 높은 정밀도를 확보할 수 있는 초정밀 스테이지를 사용한다[1,2]. 특히 웨이퍼 노광(Wafer Photolithography) 공정에서 초정밀도 확보의 핵심 요소로 에어베어링 스테이지가 활용된다[3].

에어베어링 스테이지는 마찰이 거의 없는 부상 상태에서 구동되므로, 높은 분해능(Resolution)과 재현성(Repeatability)을 제공하여 초정밀 구동에 적합하다. 하지만 에어베어링 스테이지는 이송 중 운동 오차를 나타내며, 이러한 오차를 정밀하게 측정하고 보정하는 것이 필요하다[4].

일반적으로 오차 보정 방식은 하드웨어 방식과 소프트웨어 방식으로 나뉜다. 하드웨어 방식은 완성된 스테이지의 운동 오차를 측정하고, 운동 오차가 기준을 초과하는 경우 구성품을 수정가공 및 재조립하는 과정을 반복하여 기준을 충족시키는 방법이다[5]. 반면에 소프트웨어 방식은 스테이지의 운동 오차를 측정하고 체적 오차를 계산한 후 제어기에서 보정하는 방법으로 하드웨어 방식에 비해 유연하며 실시간 보정에 유리하다. 초정밀 스테이지의 운동 오차는 레이저 간섭계(Laser Interferometer)와 정전용량 센서(Capacitive Sensor)등을 사용하여 측정하고 있으나, 사전에 측정된 값을 제어기에서 보정하기에 실시간 측정 및 보정이 제한된다[6].

따라서 본 연구는 초정밀 스테이지의 성능 향상을 목표로 운동 오차의 실시간 측정과 보정 기능이 통합된 에어베어링 스테이지를 개발한다. 스테이지의 운동 오차는 스테이지 내부에 설치된 5개의 정전용량 센서와 기준 미러(Reference Mirror)를 사용하여 측정한다. 측정된 오차는 스테이지 에어베어링의 압력 조절을 통해 보정한다.

Table 1 Components of the air-bearing stage

Name	Features	Manufacturer
Air-bearing	Porous type, $\phi 25$ mm round	LNK Co., Ltd., Republic of Korea
Linear encoder	Resolution: 5 nm	Renishaw Plc., United Kingdom
Granite plate	Flatness: 2 μ m, Squareness: 1 μ rad	Mikro Mi Tech Co., Ltd., Republic of Korea
Reference mirror	Coated with conductive layers	Charm-Tech Co., Ltd., Republic of Korea

2. 에어베어링 스테이지 설계

2.1 스테이지 구조 설계

본 연구에서 제안한 에어베어링 스테이지는 Table 1에 명시된 주요 구성 요소들을 기반으로 Fig. 1과 같이 제작되었다.

스테이지의 구조적 안정성을 확보하고 흔들림(Rocking) 문제를 방지하기 위해, Fig. 2와 같이 스테이지의 수직 방향 에어베어링을 3점 지지 구조(Three-point Support)로 채택하였다[7].

에어베어링의 부상력(Air Levitation Force)에 대응하여 네오디뮴(Neodymium)을 주성분으로 이루어진 영구 자석(Permanent Magnet)의 흡착력(Magnetic Attractive Force)을 예압(Preload)으로 활용하였다[1].

영구 자석의 설치 위치는 스테이지 테이블의 무게와 에어베어링 위치를 고려하여 결정하였다. 스테이지 예압은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 영구 자석을 배치하여 형성하였다.

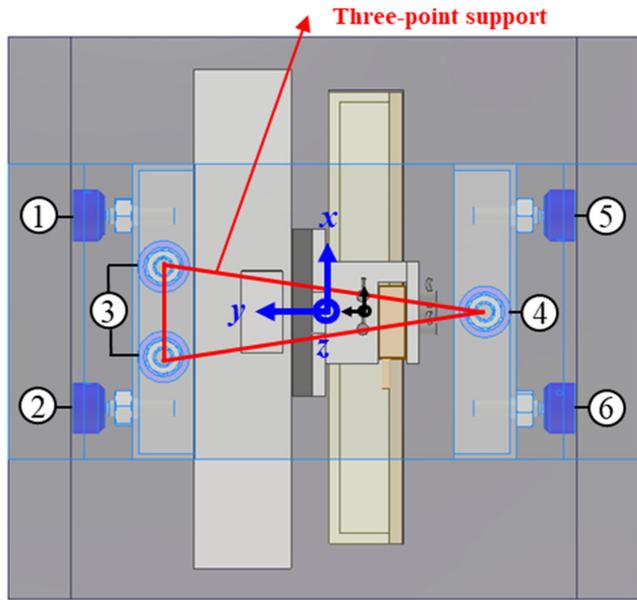


Fig. 2 Top view of the air-bearing stage

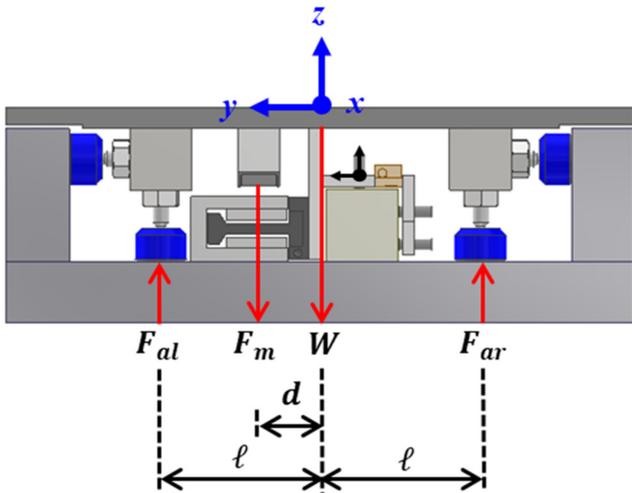


Fig. 3 Front view of the air-bearing stage

힘과 모멘트의 평형식은 각각 식(1), 식(2)와 같으며, 영구 자석 간의 최적 거리 d 를 식(3)과 같이 도출하였다.

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0, \\ \sum F_y &= 0, \\ \sum F_z &= 0 = (F_{al} + F_{ar}) - W - F_m \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \sum M_x &= 0, \\ \sum M_y &= 0, \\ \sum M_z &= -lF_{al} + lF_{ar} - d(F_{al} + F_{ar}) - W \end{aligned} \tag{2}$$

$$d = \frac{lF_{al} + lF_{ar}}{(F_{al} + F_{ar}) - W} \tag{3}$$

2.2 스테이지 시스템 구성

스테이지 시스템은 오차 측정 기능을 담당하는 센서 모듈 (Sensor Module), 구동 및 위치 제어를 수행하는 제어 모듈 (Control Module), 에어베어링에 압축공기를 공급하는 공압 모듈(Pneumatic Module)로 Fig. 4와 같이 구성하였다.

센서 모듈에서 정전용량 센서 5개와 기준 미러를 Fig. 1에서 확대된 부분과 같이 스테이지 내부에 설치하였다. T자 형태의 측정 지그(Jig)를 사용하여 기준 미러의 상단에는 센서 2개, 측면에는 센서 3개를 배치하였다. Lee 등[6,8-11]이 제안한 측정 좌표계와 정전용량 센서 간의 위치를 최적화하는 식(4)을 응용하여, 센서의 위치와 측정 좌표계를 설정하여 측정불확도를 최소화하였다. 식(4)에서 사용되는 m 값은 정전용량 센서의 출력 전압 신호를 변위로 환산한 값이다.

$$\begin{aligned} \delta_{yx} &= \frac{4m_5 - (m_3 + m_4)}{2} \\ \delta_{zx} &= \frac{(m_1 + m_2)}{2} \\ \epsilon_{xx} &= \frac{(m_3 + m_4) - 2m_5}{2h} \\ \epsilon_{yx} &= \frac{(m_1 - m_2)}{b} \\ \epsilon_{zx} &= \frac{(m_4 - m_3)}{b} \end{aligned} \tag{4}$$

제어 모듈은 PMAC (Programmable Multi Axis Controller) 제어 기와 리니어 모터(Linear Motor), 리니어 엔코더(Linear Encoder)로 구성하였다.

공압 모듈은 메인 공압 레귤레이터(Pneumatic Regulator, SMC Corporation, Japan, Max. set pressure 1.0 MPA(10 bar))를 통해 스테이지의 에어베어링에 공압을 공급하였다. 특히, Fig. 2에서 나타난 바와 같이 스테이지 각 측면에 배치된 4개의 베어링(1번, 2번, 5번, 6번)은 각각 독립된 공압 레귤레이터에 연결하고, 바닥면에 위치한 2개의 베어링(3번, 4번)은 좌우로 구분하여 각각 공압 레귤레이터를 연결하였다.

2.3 오차 측정 및 보정 기능 통합 알고리즘

에어베어링 스테이지의 오차 보정을 위해, 먼저 스테이지를 X 방향으로 구동하면서 수평 및 수직 진직도, 롤, 피치, 요 오차를 정전용량 센서를 이용하여 실시간 측정하였다. 이후, 측정된 오차 데이터를 알고리즘에 적용하여 보정 값을 산출하였다.

스테이지의 좌표계 구성은 ISO 230-1[12] 표준 규격과 Lee 등[6,13-16]의 연구 결과를 적용하였다 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 측정 센서 좌표계 {F}, 스테이지 공정 좌표계 {S}, 오차가 반영된 좌표계 {X}로 정의하였다.

측정 센서 좌표계에서 스테이지 공정 좌표계까지 두 좌표계 사이 기준 위치 차이(Offset)인 o_x, o_y, o_z 를 곱하여, 오차 동차 변환 행렬(Homogeneous Transformation Matrix)로 나타내면 식(5)와 같다.

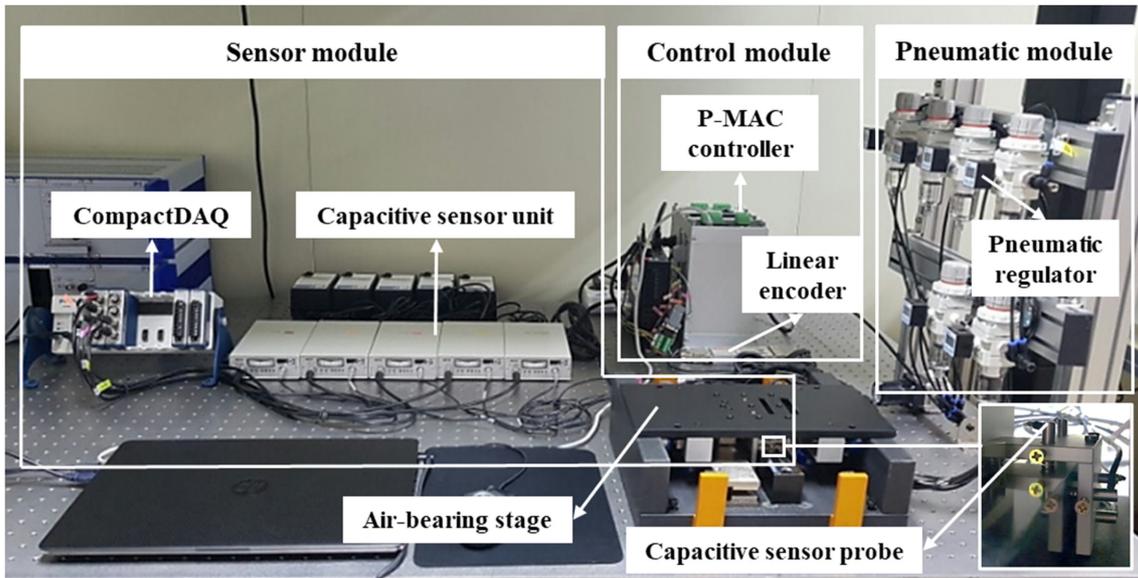
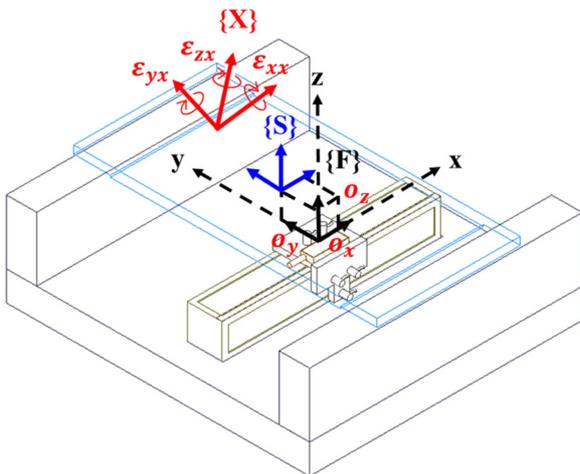


Fig. 4 System configuration of the air-bearing stage



{F}: Measurement sensor coordinate system
{S}: Stage process coordinate system (Ideal)
{X}: Error-affected coordinate system (Actual)

Fig. 5 Coordinate system of the air-bearing stage

$${}^F_S \tau = {}^F_X \tau = \begin{bmatrix} {}^F_X R & {}^F_X P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^F_X \tau = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & \delta_{xx} + x \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & o_x \\ 0 & 1 & 0 & o_y \\ 0 & 0 & 1 & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)로부터 얻어진 ${}^F_X P$ 는 식(6)과 같이 표현된다.

$${}^F_X P = \begin{bmatrix} o_x - \varepsilon_{zx}o_y + \varepsilon_{yx}o_z + \delta_{xx} + x \\ \varepsilon_{zx}o_x + o_y - \varepsilon_{xx}o_z + \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx}o_x + \varepsilon_{xx}o_y + o_z + \delta_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (6)$$

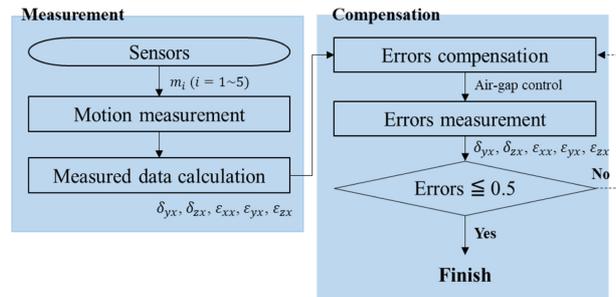


Fig. 6 Compensation algorithm of the air-bearing stage

여기서 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 각각 X, Y, Z 방향의 운동 오차를 나타내며, 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x - x = o_x - \varepsilon_{zx}o_y + \varepsilon_{yx}o_z + \delta_{xx} \\ \Delta y &= \varepsilon_{zx}o_x + o_y - \varepsilon_{xx}o_z + \delta_{yx} \\ \Delta z &= -\varepsilon_{yx}o_x + \varepsilon_{xx}o_y + o_z + \delta_{zx} \end{aligned} \quad (7)$$

본 연구에서는 Roh 및 Shin 등[17,18]이 제안한 공압 기반 정밀 제어 원리를 응용하여, 공압 레귤레이터를 활용한 오차 보정 시스템을 구현하였다.

Fig. 6에 나타난 알고리즘으로 산출된 보정 값은 공압 모듈을 통해 공압 레귤레이터로 전달되어 스테이지 위치를 정밀하게 조정한다. 스테이지의 오차가 적절히 보정되었는지 검증하기 위해 보정 후 운동 오차를 다시 측정하였다. 이때 오차 값이 0.5 μm 이하이면 알고리즘을 종료하였으며, 0.5 μm 를 초과할 경우 오차 측정 단계로 돌아가 알고리즘을 반복 수행하였다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 공압 레귤레이터를 통해 에어베어링 1, 2, 5, 6번의 공압을 조절하여 스테이지의 Y방향 운동 오차를 보정하고, 에어베어링 3, 4번의 공압을 조절하여 스테이지의 Z방향 운동 오차를 보정하였다.

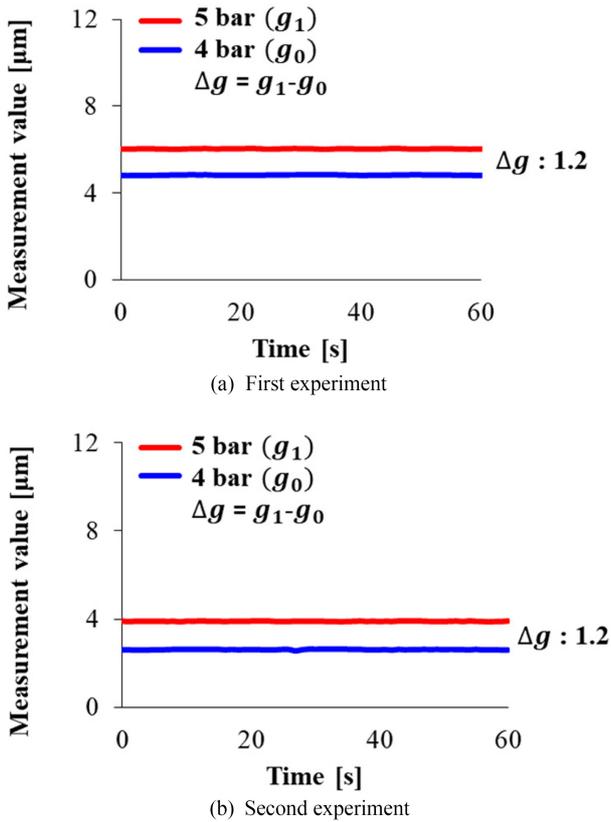


Fig. 7 Air gap variation between 4 and 5 bar

3. 실험 및 결과

3.1 공압을 활용한 오차 보정 성능 실험

스테이지의 오차 보정을 위한 기초 실험으로, 공압 변화에 따른 에어 갭(Air gap) 변화를 측정하였다. 스테이지에 4 bar (g_0)의 공압을 기준으로 설정한 후, 공압을 5 bar (g_1)로 증가시켜 각 상태에서 정전용량 센서를 이용하여 각 에어 갭을 측정하였다.

실험은 스테이지가 보정되지 않은 상태에서 반복 수행되었으며, 측정 위치에 따라 1차와 2차로 나누어 진행하였다. 1차 실험은 스테이지 시작점에서 측정하고 2차 실험은 스테이지를 10 mm 이동한 다른 지점에서 수행하였다. 각 위치에서 공압 변화에 따른 에어 갭 변화를 60초 동안 측정하였다. Figs. 7(a)와 7(b)에서 4 bar 기준 에어 갭 값이 서로 다르게 나타나는데, 이는 측정 위치에 따른 석정반의 평탄도(Flatness)에 의한 영향이다.

공압이 4 bar일 때와 5 bar일 때의 에어 갭 차이($\Delta g = g_1 - g_0$)는 1 bar에 해당하는 공압 변화에 따른 기준값으로 활용된다. Fig. 6과 같이 제안한 스테이지의 경우, 4와 5 bar 압력 조건에서 평균적으로 1 bar당 약 1.2 μm 의 에어 갭이 발생함을 확인하였다.

3.2 실시간 운동 오차 측정 및 보정 결과

운동 오차 측정은 스테이지의 총 이동 거리(Stroke) 100 mm 이송과 동시에 실시간으로 수행되었으며 이송 속도는 10 mm/s 설정하였다.

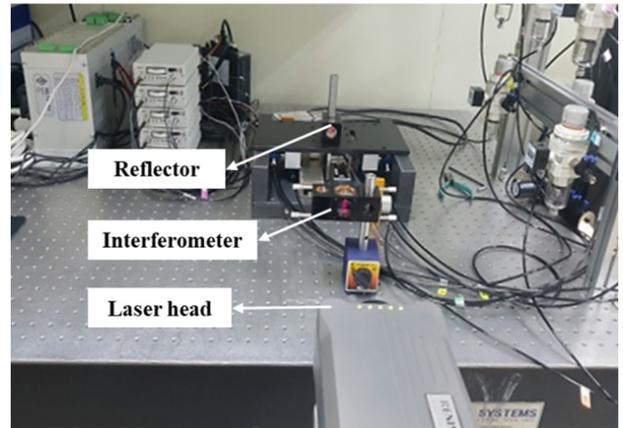


Fig. 8 Experimental environment for linear displacement error measurement using laser interferometer

Table 2 Compensation results of motion errors

Parameters	Compensation		
	Before	After	Reduction
	PV Mean \pm Standard deviation		[%]
δ_{xx} [μm]	0.71 \pm 0.03	0.03 \pm 0.01	95.77
δ_{yx} [μm]	3.09 \pm 0.13	0.29 \pm 0.02	90.61
δ_{zx} [μm]	1.95 \pm 0.10	0.25 \pm 0.02	87.18
ϵ_{xx} [arcsec]	3.18 \pm 0.13	0.35 \pm 0.03	89.00
ϵ_{yx} [arcsec]	3.45 \pm 0.12	0.41 \pm 0.04	88.12
ϵ_{zx} [arcsec]	4.93 \pm 0.14	0.49 \pm 0.04	90.06

스테이지의 구동 방향인 X방향의 선형 변위 오차(Linear Displacement Error)는 설치된 정전용량 센서로 측정할 수 없기 때문에 Fig. 8과 같이 레이저 간섭계(XL80; Renishaw Plc., UK)를 사용하여 측정하였다. 측정된 데이터를 사용하여 수정한 제어 위치를 기반으로 오차 보정을 수행하였다.

정전용량 센서로 측정된 운동 오차 값은 제안한 알고리즘을 통해 Y, Z방향에 해당하는 보정 값 산출에 사용하였으며, 산출된 보정 값을 사용하여 각 방향에 대응되는 에어베어링의 공압을 조절하였다. 오차에 따라 공압을 실시간으로 제어하였으며, 보정 결과는 정전용량 센서를 통해 재 측정하여 평가하였다. 또한 운동 오차 측정 신뢰성을 확보하기 위해, 실험은 10회 반복 수행하였다.

스테이지의 오차 보정 성능은 Fig. 9와 나타낸 바와 같이 현저히 개선되었으며, 반복 측정된 오차의 PV (Peak-to-Valley)값에 대한 평균과 표준편차는 Table 2에 제시되어 있다.

선형 변위 오차는 PV값이 0.7에서 0.03 μm 로 약 96% 감소하였으며, 진폭도 오차는 수평 방향이 3.09에서 0.29 μm 로 약 91%, 수직 방향이 1.95에서 0.25 μm 로 약 87% 감소하여 우수한 보정 성능을 확인하였다.

회전 오차의 경우 롤, 피치, 요 오차가 각각 3.18에서 0.35 arcsec로

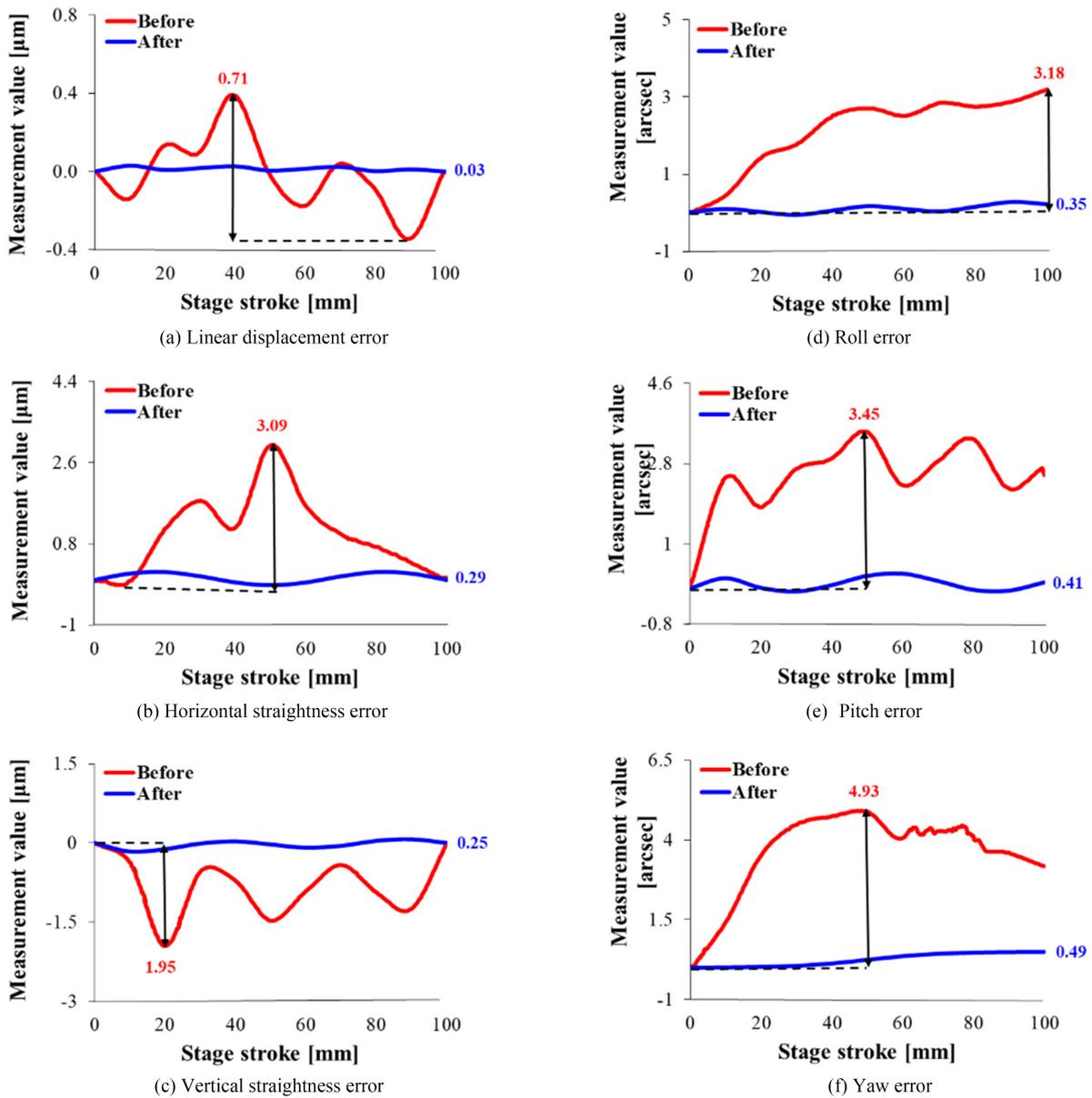


Fig. 9 Results of motion errors compensation

약 89%, 3.45에서 0.41 arcsec로 약 88%, 4.93에서 0.49 arcsec로 약 90% 감소하여 효과적인 보정이 이루어졌다.

4. 결론

본 연구에서는 에어베어링 스테이지의 운동 오차를 실시간으로 측정하고 보정하는 기능이 통합된 초정밀 스테이지 시스템을 개발하였다. 정전용량 센서를 이용하여 실시간으로 운동 오차를 측정하고, 에어베어링의 공압을 제어함으로써 오차를 보정하는 방식을 제안하였다.

제안된 스테이지는 측정 및 보정 기능을 하나의 통합 구조로 구현함으로써 전체 시스템의 구조적 단순화뿐만 아니라 실시간

오차 보정 기능의 유효성을 확보하였다. 실험 결과, 87% 이상의 오차 감소율을 달성하였으며, 이는 제안한 스테이지의 오차 보정 알고리즘이 효과적인 것을 실험적으로 확인하였다.

향후 연구에서는 제안된 스테이지의 산업 적용 확대를 위해 10 mm/s 이상의 이송 속도에서 동적 응답 특성을 분석하여 보정 성능을 유지할 수 있는 스테이지 시스템을 개발하고자 한다.

REFERENCES

1. Ro, S.-K., Kim, S., Kwak, Y., Park, C. H., (2010), A linear air bearing stage with active magnetic preloads for ultraprecise straight motion, Precision Engineering, 34(1), 186-194.

2. Tian, C., Ming, Z., Yu, Z., Chuxiong, H., (2011), Dynamic modeling and analysis of a 3-dof ultra-precision positioning stage with air bearing, *Procedia Engineering*, 16, 264-270.
3. Lee, C.-W., Kim, S.-W., (1997), An ultraprecision stage for alignment of wafers in advanced microlithography, *Precision Engineering*, 21(2-3), 113-122.
4. Gao, W., Arai, Y., Shibuya, A., Kiyono, S., Park, C. H., (2006), Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage, *Precision Engineering*, 30(1), 96-103.
5. Ryu, D., Lee, J. H., Park, S.-S., Kim, G. H., (2020), Effect of shape error of an air stage on motion precision, *Tribology and Lubricants*, 36(2), 68-74.
6. Lee, J.-C., Yang, S.-H., (2017), Development of nanopositioning mechanism with real-time compensation algorithm to improve the positional accuracy of a linear stage, *Precision Engineering*, 50, 328-336.
7. Elliott, R., (2003), The principles of model locomotive suspension, *Scalefour digest* 41.0, Issue 2. <http://www.clag.org.uk/41-0rev.html>
8. Lee, J. H., Liu, Y., Yang, S.-H., (2006), Accuracy improvement of miniaturized machine tool: geometric error modeling and compensation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13), 1508-1516.
9. Lee, K.-I., Lee, J.-C., Yang, S.-H., (2013), The optimal design of a measurement system to measure the geometric errors of linear axes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, 141-149.
10. Lee, J.-C., Lee, K.-I., Yang, S.-H., (2014), Performance evaluation of five-dof motion under static and dynamic conditions of ultra-precision linear stage, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 31(5), 423-430.
11. Lee, H.-H., Lee, I.-S., Lee, K.-I., Yang, S.-H., (2021), Development and performance evaluation of a fine stage for compensating 6-DOF motion errors of an ultra-precision linear stage, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(2), 123-129.
12. ISO 230-1, (2012), Test code for machine tools – Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions, Third edition.
13. Lee, J. H., Yang, S. H., (2005), Measurement of geometric errors in a miniaturized machine tool using capacitance sensors, *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 1402-1409.
14. Lee, K.-I., Lee, D.-M., Kweon, S.-H., Yang, S.-H., (2010), Geometric errors estimation of a rotary table using double ball-bar, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(11), 98-105.
15. Lee, D.-M., Zhu, Z., Lee, K.-I., Yang, S.-H., (2011), Identification and measurement of geometric errors for a five-axis machine tool with a tilting head using a double ball-bar, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 337-343.
16. Lee, J.-C., Lee, H.-H., Yang, S.-H., (2016), Total measurement of geometric error of a three-axis machine tool by developing the hybrid technique, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17, 427-432.
17. Roh, C.-H., Kim, Y.-S., (2001), Development of the small-displacement-movement of a pneumatic piston and the hybrid control algorithm for precision position control, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 18(7), 40-45.
18. Shin, J.-M., Ahn, H.-J., (2024), Active control of pneumatic vibration isolator with pressure observer, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 41(3), 169-174.



Eun Young Ko

Ph.D Student in School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University.

Her research interest are intelligent manufacturing systems, pre-cision engineering and robot.

E-mail: nona2222@naver.com



Hoon Hee Lee

Senior Researcher in Precision Mechanical Process and Control R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology.

His research interest are machine tool metrology and precision process control.

E-mail: hhlee84@kitech.re.kr



Kwang Il Lee

Professor in School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University.

His research interests are precision methodologies for machine tools and 3D printer.

E-mail: kilee@kiu.kr



Seung Han Yang

Professor in School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University.

His research interests are intelligent manufacturing systems and CAD/CAM.

E-mail: syang@knu.ac.kr

저에너지 소비를 위한 연성 전자소자의 전극계면 제어 공정 최적화

Optimization of Electrode Interface Control Process of Soft Electronic Devices for Low Energy Consumption

문서진¹, 김태현², 박민규², 심현석^{1,#}
Seojin Moon¹, Taeheon Kim², Minkyu Park², and Hyunseok Shim^{1,#}

¹ 부산대학교 전기전자공학부 (School of Electrical & Electronics Engineering, Pusan National University)
² 부산대학교 전기전자공학과 (Department of Electrical and Electronic Engineering, Pusan National University)
Corresponding Author / E-mail: hshim@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-7383
ORCID: 0000-0003-2225-0978

KEYWORDS: Threshold voltage (문턱전압), OTFT (유기박막 트랜지스터), Low energy consumption (저에너지 소비), Galvanic replacement (갈바닉 치환), Soft electronics (연성 전자소자)

In this study, we demonstrate a well-established strategy for controlling the threshold voltage (V_{th}) in organic thin-film transistors (OTFTs) by applying uniform gold nanoparticle (AuNP) coatings onto silver nanowire (AgNW) electrodes using a galvanic replacement process in the presence of NaCl. This approach highlights the potential for low-energy consumption operation. The AuNP coatings effectively adjust the work function of the AgNW electrodes to better match that of the organic semiconductor. As a result, the OTFT devices show significantly reduced threshold voltages, enhancing charge injection efficiency and lowering the operating voltage. Additionally, when used as synaptic transistors, the optimized Au-coated AgNW composite electrodes demonstrate superior neuromorphic performance, including a lower maximum drain voltage (V_{DS}), indicating a potential for improved energy efficiency per spike event. This advancement marks a critical step toward developing low-power neuromorphic devices and low-voltage flexible electronics. Our work establishes a practical methodology for quantitatively and reproducibly controlling V_{th} through precise modulation of metal coating uniformity, providing a solid technological foundation for future optimization of organic electronic devices.

Manuscript received: August 1, 2025 / Revised: October 10, 2025 / Accepted: November 1, 2025

1. 서론

유기박막 트랜지스터(OTFT)는 차세대 연성 및 웨어러블 전자소자의 핵심 기술로 주목받고 있다[1]. 웨어러블 기기의 특성 상 배터리의 소형화가 필수적이며, 이에 따라 저에너지 소비를 가지는 소자에 대한 수요가 증가하고 있다. 기존 연구들은 주로 전극 소재의 변경이나 소자 구조의 최적화를 통해 에너지 효율을 개선하려는 시도를 해왔으나, 이러한 방법들은 비용이 많이 들고 공정이 복잡하다는 한계가 있다[2]. 최근에는 금속/유기 반도체 계면의 에너지 장벽을 조절하거나 복합 전극을 도입하는 방식이 보고되었으나, 공정 변수의 정밀 제어를 통한 문턱전압 및 에너지 소비량의 체계적 조절에 관한 연구는 상대적으로 한계가 존재한다.

본 연구에서는 은전극 기반 유기 트랜지스터의 갈바닉 치환 공정에서 NaCl을 첨가하고, 이의 농도를 조절함으로써, 유기박막 트랜지스터의 문턱전압을 정밀하게 제어하여 디바이스 에너지 소비 특성 향상 가능성을 제시하고자 한다[3].

2. 실험

2.1 AgNWs/Polydimethylsiloxane 전극 제작

AgNWs/PDMS (Polydimethylsiloxane)전극은 유리 기판 위에 캡톤 테이프 기반 새도우 마스크를 부착한 후 AgNWs 용액을 도포하여 60°C에서 10분간 핫 플레이트(Hot Plate)로 건조한다.

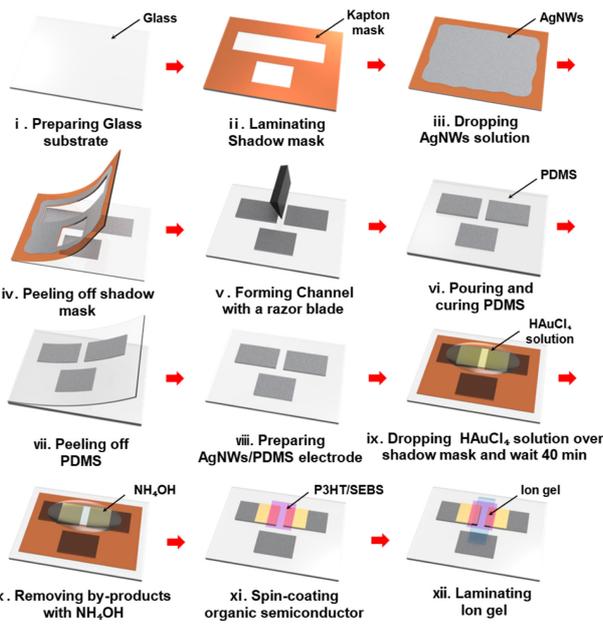


Fig. 1 The schematic fabrication process of the OTFT

마스크 제거 후 패터닝(Patterning)된 AgNWs 위에 채널을 형성하고 200°C에서 20분간 어닐링(Annealing)하여 전도도를 향상시킨다. PDMS 기판을 제작하기 위해, 프리폴리머(Prepolymer)와 경화제를 10 : 1 질량비로 혼합한 후 진공 챔버(Vacuum Chamber)에서 20분간 기포를 제거한다. 기포가 제거된 PDMS 용액을 300 rpm에서 60초간 스핀 코팅(Spin coating)한 뒤 진공 오븐(Vacuum Oven)에서 90°C로 4시간 동안 경화시켜 PDMS 내부에 AgNWs가 부분적으로 매립된 구조를 형성한다. 마지막으로 PDMS 기판을 유리 기판에서 떼어낸 후, 뒤집어 은 전극이 노출되도록 한다[4].

2.2 유기 연성 반도체 용액 제작

P3HT (poly-3-hexylthiophene) 용액은 P3HT 5 mg을 톨루엔(Toluene) 1 ml에 용해한 후, 60°C에서 가열하여 제작한다. SEBS (Styrene-ethylene-butylene-styrene, H1052) 용액은 SEBS 25 mg을 톨루엔 1 ml에 용해한 후, 60°C에서 가열하여 제작한다. 유기 연성 반도체 용액은 P3HT 용액과 SEBS 용액을 2 : 1의 질량비로 혼합하여 제작한다[5].

2.3 이온 겔 유전체 제작

P(VDF- HFP) (poly(vinylidene fluoride- hexafluoro propylene)), 전도성 물질인 [EMIM][TFSI] (1-Ethyl-3-methylimidazolium Bis(trifluoromethylsulfonyl)imide), 아세톤(Acetone)을 질량비 1 : 4 : 7로 혼합한 후 70°C, 800 rpm으로 12시간 교반하여 이온 겔 용액을 제조한다. 제조된 용액을 유리 기판에 도포한 후 진공 오븐에서 70°C에서 12시간 동안 경화시켜 이온 겔을 제작한다[6].

2.4 유기 연성 트랜지스터 제작

먼저 0.75 mM의 농도비로 HAuCl₄를 DI water에 교반해준 후,

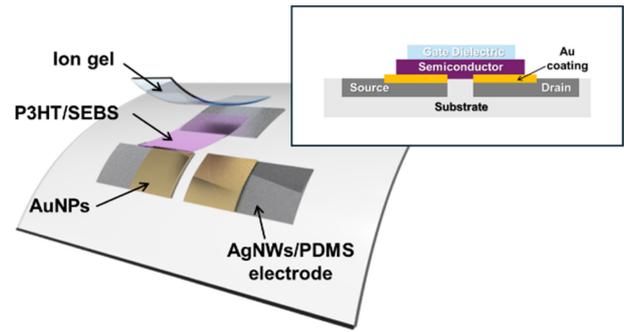


Fig. 2 Exploded view of OTFT. The inset shows schematic cross-sectional illustration of the OTFT structure

NaCl 농도를 각각 0, 50, 100 mM의 농도비로 HAuCl₄ 용액(0.75 mM)에 교반한다. 마이크로 피펫 (Micropipette)을 이용하여 용액을 전극의 채널 영역에 도포해준 후, 40분간 반응시킨다. 이후, DI water로 1분간 세척 후, NH₄OH 용액으로 1분간 갈바닉 치환의 부산물인 AgCl을 제거한다. 최종적으로 DI water로 세척한 뒤 N₂ 가스로 건조하여 Au coated AgNWs/PDMS 전극을 제작한다. 제작된 전극의 채널 영역 위에 준비된 유기 연성 반도체 용액을 1,000 rpm, 60초 스핀 코팅하여 박막 형태의 유기 반도체층을 형성한다. 이후 90°C에서 30분간 어닐링 후 준비된 이온 겔을 채널 위에 적층하여 유기 트랜지스터를 완성한다. 트랜지스터 제작 공정은 Figs. 1에 소개 되어있으며, 제작된 트랜지스터의 구조는 2를 통해 자세히 살펴볼 수 있다.

3. 결과 및 토의

3.1 NaCl 첨가를 통한 전극의 접촉저항 감소

Fig. 3에 나타난 바와 같이, 본 연구에서는 TLM (Transmission Line Method) 방식을 이용하여 AgNWs 전극의 접촉저항(R_c)을 산출하였다. 그 결과, NaCl의 농도가 증가함에 따라 접촉저항이 점진적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. AgNWs 전극의 접촉저항은 약 0.812 kΩ·cm로 산출되었고, NaCl을 첨가하지 않은(0 mM) 소자의 접촉저항은 약 0.632 kΩ·cm이었으나, 100 mM 조건에서는 0.402 kΩ·cm으로 약 0.41 kΩ·cm(약 50.5%) 감소하였다. 이는 NaCl이 증가할수록 갈바닉 치환 반응 시 AgNWs 표면에 Au가 균일하게 코팅되고, 그 결과 금속-반도체 계면에서 전하 주입 장벽이 낮아져 전하 전달 특성이 개선된 것으로 해석할 수 있다.

한편, 면저항(R_s)의 경우 NaCl 농도 변화에 크게 영향을 받지 않고 일정한 수준을 유지하였다. 이는 NaCl 첨가가 AgNWs 소재의 저항을 낮추는 것이 아닌 전극과 반도체층 간의 계면 저항을 낮추는 것으로 해석된다.

3.2 NaCl 첨가를 통한 전극의 일함수 제어

Fig. 4에 제시된 바와 같이, AgNWs-Poly (3-hexylthiophene-

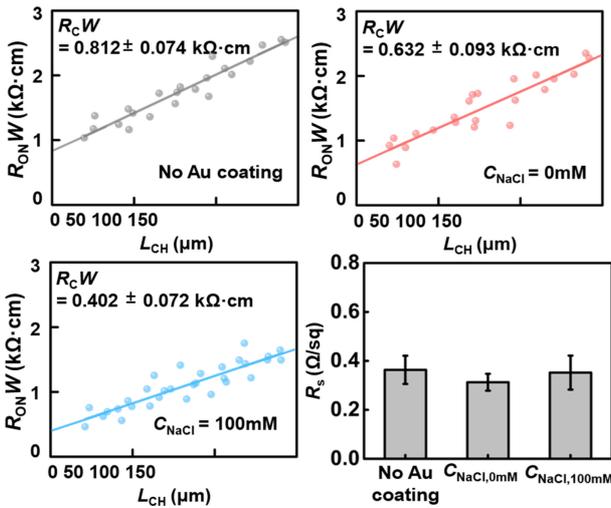


Fig. 3 Contact resistance and sheet resistance of AgNWs, AuNPs (at different NaCl concentrations)

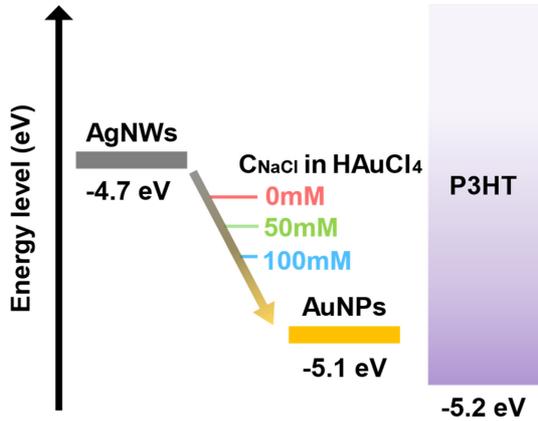


Fig. 4 Energy band diagrams of AgNWs, AuNPs (at different NaCl concentrations), and P3HT

2,5-diyl) (P3HT) 계면에서는 큰 에너지 장벽이 존재하여 전하가 장벽을 넘을 시, 큰 에너지가 소비되어 비효율적이다. 이를 극복하기 위해 기존의 연구에선 갈바닉 치환 공정을 통해 AgNWs를 AuNPs로 치환해주며 전극의 일함수(Work Function)를 AgNWs의 약 -4.7 eV에서 Au의 약 -5.1 eV 수준으로 치환한다[5]. 이 결과 전극의 일함수가 P3HT의 최상위 점유 분자 오비탈(Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO) 준위(~ -5.2eV)와 정렬시킴으로써 금속-반도체 계면이 옴릭 접합(Ohmic Contact)을 형성하여, 에너지 장벽을 낮추려는 시도가 존재했다. 하지만 이는 Au가 AgNWs에 균일하게 코팅되지 못하여 에너지 장벽을 효율적으로 낮추지 못하였다[5,7,8]. 하지만 본 연구에서는 NaCl을 첨가해주는 것으로 AgNWs 전극 표면에 Au를 더욱더 균일하게 코팅 해주는 결과를 도출했다. 이는 구동전압의 감소를 의미하며 효율성 측면에서의 소자 성능 극대화를 확인할 수 있다.

기존의 갈바닉 치환 시 HAuCl₄ 용액과 AgNWs 전극 사이에서는 식(1)과 같은 산화-환원 반응이 진행된다. 본 연구에서는 갈바닉 치환의 속도를 지연시킴으로써 AuNPs의 균일한 코팅을

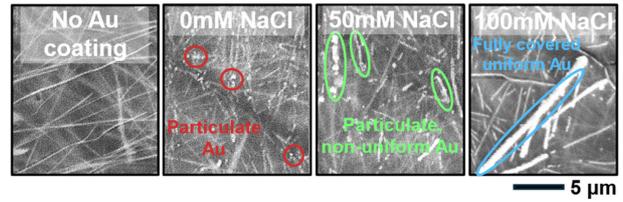
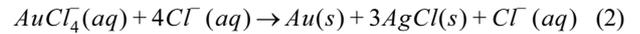
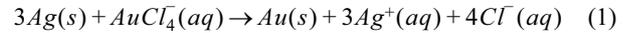


Fig. 5 SEM image of Au coated AgNWs/PDMS electrodes depending on NaCl concentration

도모한다. 기존의 HAuCl₄ 용액에 NaCl을 첨가해준 후 갈바닉 치환을 시켜준다면, 여분의 Cl⁻ 이온이 과다하게 발생하며 항상성 유지 법칙(Le Chatelier's Principle)에 따라 금의 치환 속도를 지연시킬 수 있다. 이는 식(2)에서 확인할 수 있다[3].



또한 NaCl 농도가 증가할수록 Cl⁻ 이온 농도의 증가로 인해 반응 속도가 더욱 저하된다. 기존 연구에서도 이러한 원리를 적용하여 금 코팅의 균일도를 향상시킬 수 있음을 보고한 바 있다[3]. Fig. 5는 갈바닉 치환 공정 동안 NaCl 농도에 따라 AgNWs/PDMS 전극에서 노출된 AgNWs SEM 이미지를 보여준다. SEM 이미지에 나타난 바와 같이, 갈바닉 치환 공정을 거치지 않은 AgNWs 전극에서는 나노 와이어가 불규칙하게 얽혀 있는 형태를 보인다. 한편, 갈바닉 치환 공정을 거친 AuNPs-AgNWs/PDMS 전극의 경우, NaCl 농도에 따라 서로 다른 코팅 양상이 관찰되었다. 먼저, NaCl을 첨가하지 않은 경우, Au가 AgNWs 표면에 불균일한 입자 형태로 결합하여, 금의 코팅이 균일하지 못한 모습을 볼 수 있다. 50 mM을 도핑한 경우에는 Au가 비교적 균일하게 분포하되 일부 빈틈이 존재하는 모습을 확인할 수 있고, NaCl 100 mM을 첨가한 경우에는 Au가 연속적으로 AgNWs를 균일하게 감싸진 구조를 형성했다. 이로써 NaCl 농도(0, 50, 100 mM)에 따라서 갈바닉 치환의 균일도를 정밀하게 제어할 수 있음을 확인했다.

Fig. 5는 갈바닉 치환 공정 과정에서 HAuCl₄ 용액에 혼합된 NaCl 농도에 따른 AgNWs/PDMS 전극의 SEM 이미지를 보여준다. SEM 이미지에 나타난 바와 같이, 갈바닉 치환 공정을 거치지 않은 AgNWs/PDMS 전극에서는 나노 와이어가 불규칙하게 얽혀 있는 형태를 보인다. 한편, 갈바닉 치환 공정을 거친 Au coated AgNWs/PDMS 전극의 경우, NaCl 농도에 따라 서로 다른 코팅 양상이 관찰되었다. 먼저, NaCl을 첨가하지 않은 HAuCl₄ 용액을 이용해 갈바닉 치환 공정을 진행한 경우, Au가 AgNWs 표면에 불균일한 입자 형태로 결합하여, 금의 코팅이 균일하지 못한 모습을 볼 수 있다.

NaCl 50 mM을 첨가한 HAuCl₄ 용액을 이용해 갈바닉 치환 공정을 진행한 경우, Au가 비교적 균일하게 분포하되, 일부

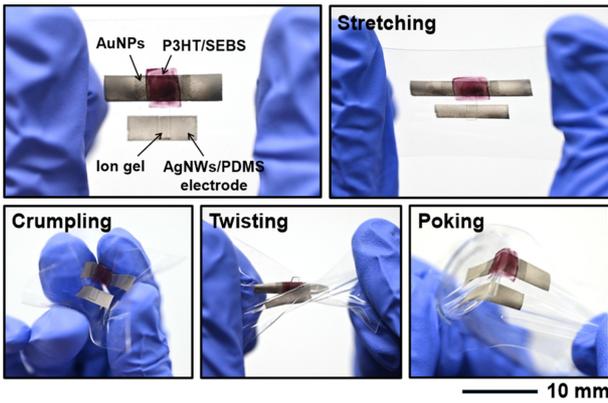


Fig. 6 Optical images of OTFTs subjected to different mechanical deformations, including stretching, crumpling, twisting, poking

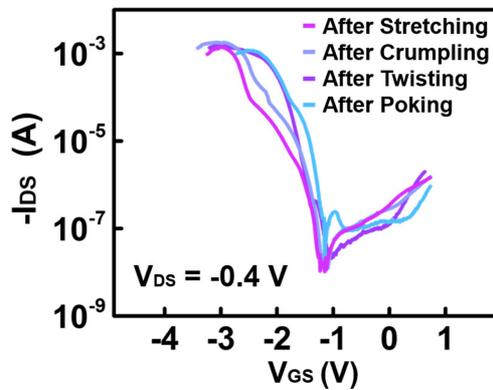


Fig. 7 Transfer characteristics of the rubbery OTFT under stretching, crumpling, twisting, poking

빈틈이 존재하는 모습을 확인할 수 있다. NaCl 100 mM을 첨가한 HAuCl₄ 용액을 이용해 갈바닉 치환 공정을 진행한 경우, Au가 연속적으로 AgNWs를 균일하게 감싸진 구조를 형성하였다. 이로써 HAuCl₄ 용액에 첨가된 NaCl 농도(0, 50, 100 mM)에 따라서 갈바닉 치환의 균일도를 정밀하게 제어할 수 있음을 확인하였다.

3.3 접촉저항 및 일함수가 제어된 전극을 사용한 트랜지스터의 구동전압 조절

준비된 전극을 사용하여 앞서 Fig. 1에 제시한 제작 방법을 이용하여 트랜지스터를 제작하였다. 제작된 트랜지스터는 Figs. 6과 7에서 확인할 수 있듯, 다양한 기계적 변형에도 성능 유지가 가능한 연성 소자이다. 제작된 소자의 V_{th} 값은 반도체 파라미터 분석기(Semiconductor Parameter Analyzer, Keithley 4200A-SCS)에서 측정된 I_{DS} (드레인 전류)를 바탕으로 식(3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sqrt{I_{DS}} = \sqrt{\frac{W}{2L} \mu C_{diel} (V_{GS} - V_{th})} \quad (3)$$

Fig. 8의 전달 곡선 (Transfer Curve)에서 Fitting Range (-3.2 V ~ -2.6 V)을 선정한 후, 해당 구간에 대해 최소제곱법(Least Squares

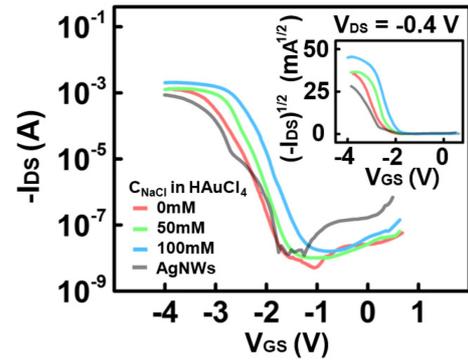


Fig. 8 Transfer characteristics of device containing various C_{NaCl}. The inset shows linear plotted transfer characteristics of device containing various C_{NaCl}

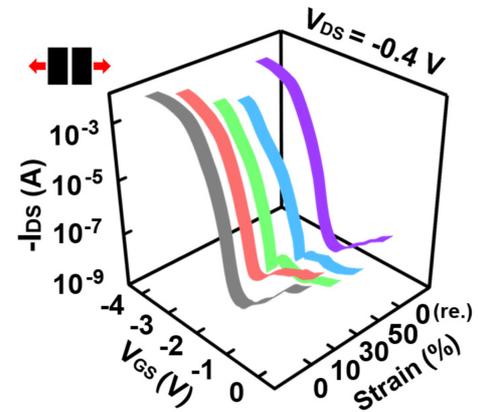


Fig. 9 Transfer characteristics of the rubbery OTFT under mechanical strains of 0, 10, 30, 50 and 0% (re.)

Estimation)으로 Linear Fitting을 수행하였다[10]. 식(3)에 따라, 이때 얻어진 x절편을 V_{th}로 결정하였다. 순수 은 전극의 V_{th}는 -2.683 V였으며, NaCl 농도 0 mM(즉, 순수 HAuCl₄ 용액) 처리 시 -2.218 V로 기준값 대비 465 mV(17.33 %)이 감소하였다. NaCl 50 mM의 경우, V_{th}값은 -1.897 V로 추가로 321 mV (14.47%) 양(+)의 방향으로 이동하였고, NaCl 100 mM 도핑 시, -1.5166 V로 380 mV (20.05%) 양(+)의 방향으로 이동하였다. 결과적으로 NaCl 농도를 조절하여 V_{th}값을 -2.683에서 -1.516 V까지 1.167 V (43.50%) 범위로 이동시킴으로 인해 소자의 구동전압을 낮추었다.

100 mM의 NaCl을 사용하여 갈바닉 치환 공정을 통해 제작된 트랜지스터의 인장에 따른 전달 곡선 그래프가 Fig. 9에 나타나 있다. 본 소자는 50%의 기계적 인장 하에서도 성능이 유지되며, 이를 초기상태로 되돌렸을 때 초기상태와 가까운 성능으로 돌아오는 것을 확인할 수 있다. 이로써 NaCl을 첨가한 HAuCl₄용액을 이용한 갈바닉 치환공정을 통하여 트랜지스터의 V_{th}를 mV 단위로 정밀한 제어가 가능함을 확인하였으며, 50%의 기계적 인장에서도 구동 가능한 에너지 효율적인 저전압 구동 소자의 최적화에 성공했다.

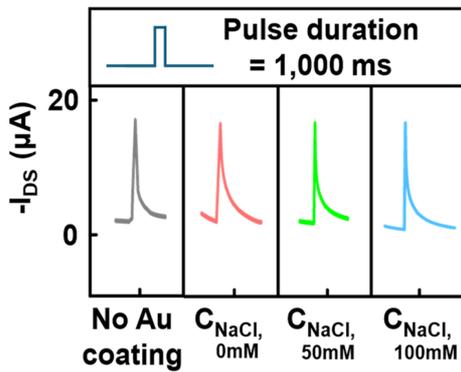


Fig. 10 OTFTs fabricated with different electrodes under identical single square-wave voltage pulses. Electrodes include pristine AgNWs, Au coated AgNWs without NaCl (0 mM NaCl), and Au coated AgNWs with NaCl concentrations of 50 mM and 100 mM, respectively

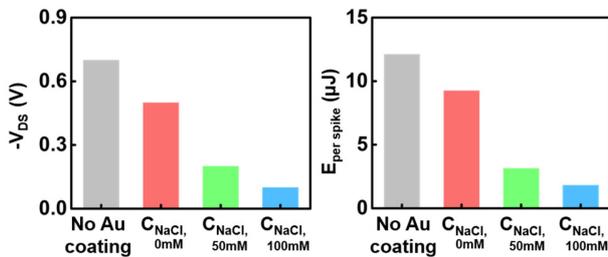


Fig. 11 (a) Output current characteristics under different drain voltages (b) Characteristics of drain voltage and energy consumption per spike

3.4 Spike당 에너지 소모 평가

NaCl 농도를 달리한 갈바니 치환 공정을 통해 제작된 소자의 Spike 당 에너지 소비를 예측하였다[10]. 정밀 공정을 통해 문턱 전압이 제어된 소자는 기존 소자 대비 동일한 구형파를 인가 했을 때, 더 낮은 구동전압으로 동일한 출력 전류를 흐르게 하는 것을 Fig. 10에서 확인할 수 있다. V_{DS} 는 공정 조건 별로 각각 -0.7, -0.5, -0.3, -0.1 V를 인가하고, V_{GS} 는 1,000 ms의 Pulse Duration을 가진 구형파 ($V_{pp} = -2 \sim 0$ V)를 인가하였다. Fig. 10(b)에 제시된 바와 같이, 본 소자는 동일한 출력 전류(~18 μ A)에 필요한 드레인 전압이 -0.7 V 인 기존 소자 대비 -0.1 V로 약 85.7% 더욱 낮음을 확인했다. 이러한 결과를 바탕으로 식(5)를 이용하여 에너지 소비량을 분석했을 때, AgNWs 전극을 사용한 소자의 에너지 소비량은 12.1 μ J로 가장 높은 경향을 보인다. 반면, 갈바니 치환 공정에 사용된 H₂AuCl₄용액에 포함된 NaCl 농도를 증가시킬수록 에너지 소비량은 0 mM에서는 9.26 μ J, 50 mM에서는 3.15 μ J, 100 mM에서는 1.82 μ J로 점진적으로 감소하는 것이 확인되었다. 따라서 AgNWs 전극을 사용한 소자 대비 100 mM의 NaCl을 첨가하여 갈바니 치환 공정을 시행한 전극의 소자는 동일한 출력 전류(I_{peak})가 흐를 때에도 더 낮은 인가 전압(V_{DS})으로 구동이

가능하므로, 약 85% 이상의 에너지 절감 효과를 나타낸다. 이는 앞서 제시한 전극의 일함수를 제어하여 V_{th} 값을 낮춰준 것이 저전압 구동뿐만이 아니라 에너지 소비 관점에서도 장점이 있는 고에너지효율 소자라는 것을 검증한다[11-13].

$$E_{per\ spike} = V_{DS} \cdot I_{peak} \cdot t_{spike\ width} \tag{5}$$

4. 결론

본 연구에서는 갈바니 치환 공정을 도입하여 AgNWs 전극 표면에 Au를 코팅함으로써 Au coated AgNWs/PDMS 복합 전극을 구현하고, 체계적으로 농도를 달리하여 NaCl을 첨가해주는 것으로, 전극의 일함수를 조절하여, 연성 유기 반도체 물질과의 에너지 준위를 맞추어 주었다. 이로 인해, 유기 박막 트랜지스터의 문턱전압(V_{th})을 정밀하게 조절할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 특히, Au coated AgNWs/PDMS 복합 전극 도입을 통해 기존 AgNWs/PDMS 전극 기반 소자 대비 V_{th} 가 유의미하게 감소함에 따라 동일한 입력 전압에서 측정된 I_{DS} 가 유의미하게 증가하는 현상을 확인하였으며, 이는 전극의 일함수 변화가 소자의 전하 전달 효율을 현저히 향상되었음을 보여준다. 또한, 이는 소자가 동일한 구동 전압 조건에서 더 큰 전류를 발생시킬 수 있음을 의미하며, 결과적으로 단위 전압 기준 에너지 소비 효율이 크게 개선되며 에너지 소비 측면에서 우수한 특성을 확보하였다.

본 연구의 핵심 차별점은 단순한 복합전극 적용을 넘어, AuNPs 대 AgNWs의 비율, NaCl의 농도에 따른 Au 코팅의 균일도, 열처리 조건 등 다양한 공정 파라미터를 정교하게 조절함으로써 목표한 V_{th} 를 맞춤형으로 설정할 수 있다는 점이다.

아울러, 공정 변수의 미세 조절에 따라 V_{th} 이 정밀하게 이동하는 현상을 입증함으로써, 본 연구가 단순 현상적 개선을 넘어 V_{th} 의 정량적·재현적 제어를 가능하게 하는 실질적 방법론임을 확립하였다.

이러한 연구 성과는 웨어러블 뉴로모픽 컴퓨팅 등 차세대 유연 전자소자 분야에 본 소자가 효과적으로 응용될 수 있는 가능성을 제시하며[14], 나아가 문턱전압 및 에너지 소비의 체계적·정밀 제어가 유기 신축성 전자소자의 실용화 및 고도화에 핵심적 역할을 수행할 수 있음을 보여준다[15]. 본 연구는 다양한 유기 반도체 소자의 맞춤형 특성 제어 및 최적화를 위한 기술적 기반을 실험적으로 규명했다는 점에서 그 의미가 크다[16].

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2023학년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수 연구정착금)에 의한 연구임.

REFERENCES

1. Seneviratne, S., Hu, Y., Nguyen, T., Lan, G., Khalifa, S., Thilakarathna, K., Hassan, M., Seneviratne, A., (2017), A survey of wearable devices and challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2573-2620.
2. Lee, J., Llerena Zambrano, B., Woo, J., Yoon, K., Lee, T., (2020), Stretchable electronics: Recent advances in 1D stretchable electrodes and devices for textile and wearable electronics: Materials, fabrications, and applications (adv. Mater. 5/2020), *Adv Mater*, 32(5), 2070038.
3. Park, H., Kim, S., Lee, J., Kim, K., Na, H., Kim, Y., Kim, D., Shin, D., Kim, B., Sim, K., (2024), Facile strategy for uniform gold coating on silver nanowires embedded PDMS for soft electronics, *npj Flexible Electronics*, 8(1), 63.
4. Shim, H., Ershad, F., Patel, S., Zhang, Y., Wang, B., Chen, Z., Marks, T. J., Facchetti, A., Yu, C., (2022), An elastic and reconfigurable synaptic transistor based on a stretchable bilayer semiconductor, *Nature Electronics*, 5(10), 660-671.
5. Shim, H., Jang, S., Thukral, A., Jeong, S., Jo, H., Kan, B., Patel, S., Wei, G., Lan, W., Kim, H.-J., (2022), Artificial neuromorphic cognitive skins based on distributed biaxially stretchable elastomeric synaptic transistors, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(23), e2204852119.
6. Sim, K., Rao, Z., Kim, H.-J., Thukral, A., Shim, H., Yu, C., (2019), Fully rubbery integrated electronics from high effective mobility intrinsically stretchable semiconductors, *Science Advances*, 5(2), eaav5749.
7. Kim, T., Canlier, A., Cho, C., Rozyyev, V., Lee, J.-Y., Han, S. M., (2014), Highly transparent au-coated Ag nanowire transparent electrode with reduction in haze, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(16), 13527-13534.
8. Chang, Y., Huang, Y.-H., Lin, P.-S., Hong, S.-H., Tung, S.-H., Liu, C.-L., (2024), Enhanced electrical conductivity and mechanical properties of stretchable thermoelectric generators formed by doped semiconducting polymer/elastomer blends, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(3), 3764-3777.
9. Zhou, Y., Wang, X., Dodabalapur, A., (2023), Accurate field-effect mobility and threshold voltage estimation for thin-film transistors with gate-voltage-dependent mobility in linear region, *Advanced Electronic Materials*, 9(2), 2200786.
10. Wang, Q., Zhao, C., Sun, Y., Xu, R., Li, C., Wang, C., Liu, W., Gu, J., Shi, Y., Yang, L., (2023), Synaptic transistor with multiple biological functions based on metal-organic frameworks combined with the LIF model of a spiking neural network to recognize temporal information, *Microsystems & Nanoengineering*, 9(1), 96.
11. Kim, D.-H., Yoon, S.-M., (2023), Improvement in energy consumption and operational stability of electrolyte-gated synapse transistors using atomic-layer-deposited HfO₂ thin films, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 153, 107182.
12. Lee, J., Kaake, L. G., Cho, J. H., Zhu, X.-Y., Lodge, T. P., Frisbie, C. D., (2009), Ion gel-gated polymer thin-film transistors: Operating mechanism and characterization of gate dielectric capacitance, switching speed, and stability, *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(20), 8972-8981.
13. Hills, G., Bardon, M. G., Doombos, G., Yakimets, D., Schuddinck, P., Baert, R., Jang, D., Mattii, L., Sherazi, S. M. Y., Rodopoulos, D., (2018), Understanding energy efficiency benefits of carbon nanotube field-effect transistors for digital VLSI, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 17(6), 1259-1269.
14. Kim, Y., Chortos, A., Xu, W., Liu, Y., Oh, J. Y., Son, D., Kang, J., Foudeh, A. M., Zhu, C., Lee, Y., (2018), A bioinspired flexible organic artificial afferent nerve, *Science*, 360(6392), 998-1003.
15. Someya, T., Bao, Z., Malliaras, G. G., (2016), The rise of plastic bioelectronics, *Nature*, 540(7633), 379-385.
16. Van De Burgt, Y., Lubberman, E., Fuller, E. J., Keene, S. T., Faria, G. C., Agarwal, S., Marinella, M. J., Alec Talin, A., Salleo, A., (2017), A non-volatile organic electrochemical device as a low-voltage artificial synapse for neuromorphic computing, *Nature Materials*, 16(4), 414-418.



Seojin Moon

Undergraduate research student in the School of Electrical & Electronics Engineering, Pusan National University. Her research interest is soft electronics.

E-mail: tjwls0108@pusan.ac.kr



Taeheon Kim

M.S course student in the Department of Electronics Engineering, Graduate School, Pusan National University. His research interest is soft electronics.

E-mail: rlaxogis1206@pusan.ac.kr



Minkyu Park

M.S course student in the Department of Electronics Engineering, Graduate School, Pusan National University. His research interest is soft electronics.

E-mail: minkyu4872@pusan.ac.kr



Hyunseok Shim

Assistant Professor in the School of Electrical & Electronics Engineering, Pusan National University. His research interest is soft electronics.

E-mail: hshim@pusan.ac.kr

Frameless BLDC 모터와 Stepped 유성기어 감속기를 통합한 로봇 관절용 액츄에이터 및 제어기 개발

Development of an Actuator and Controller for Robotic Joints Integrating a Frameless BLDC Motor and a Stepped Planetary Gear Reducer

박상신^{1,#}
Sangsin Park^{1,#}

¹ 한국교통대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation)
Corresponding Author / E-mail: spark@ut.ac.kr, TEL: +82-42-841-5126
ORCID: 0000-0002-9509-0058

KEYWORDS: Robotic joint (로봇 관절), Frameless BLDC motor (프레임리스 BLDC 모터), Planetary gear reducer (유성기어 감속기), Actuator (액츄에이터), Motor controller (모터 제어기)

This paper details the design and development of a robotic joint actuator that combines a frameless BLDC motor with a two-stage stepped planetary gear reducer, as well as a custom-built controller for precise position control. The rotor is physically coupled to a hollow sun gear shaft to facilitate internal cable routing, and the actuator features a high-resolution absolute encoder utilizing the BiSS-C protocol. The controller includes a 3-phase H-bridge driver, differential signal conversion for encoder communication, and a CAN interface for host communication. Position control is achieved through a PID loop operating at 1 kHz. A prototype actuator and controller have been fabricated, and step response tests were conducted. Experimental results indicate stable and accurate tracking of position commands, with a short settling time of 0.04773 seconds. These findings confirm the effectiveness of the integrated actuator system for robotic joint applications. Future work will focus on optimizing internal cable space and implementing sensorless control algorithms.

Manuscript received: August 7, 2025 / Revised: September 3, 2025 / Accepted: September 9, 2025
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2025

1. 서론

최근 로봇 기술의 고도화와 다양화에 따라, 로봇의 구동을 담당하는 액츄에이터에 요구되는 성능 수준이 점차 높아지고 있다. 특히 족형 로봇, 협동로봇, 휴머노이드 로봇과 같이 정밀한 동작과 높은 토크, 빠른 응답성이 동시에 필요한 분야에서는, 기존의 산업용 액츄에이터로는 한계가 드러나고 있다. 로봇 액츄에이터는 단순히 회전 운동을 발생시키는 기능뿐만 아니라, 경량화, 소형화, 고정밀도, 저소음, 제어기 통합, 통신 기능, 내구성 등 다양한 기술 요건을 동시에 만족해야 하며, 이는 고성능 일체형 모듈 형태의 액츄에이터 개발을 요구하는 배경이 된다.

이러한 조건을 충족시키기 위한 핵심 기술 중 하나가 바로

Frameless BLDC 모터의 활용이다. Frameless 모터는 외부 하우징 없이 고정자(Stator)와 회전자(Rotor)만으로 구성되어 있어, 사용자가 직접 설계한 구조물에 통합하기 용이하다. 특히 모터 하우징과 베어링 등의 외부 구성 요소를 생략함으로써 경량화가 가능하며, 모터 내부 공간의 활용도를 극대화할 수 있다. 토크 대 중량비(Torque-to-weight Ratio)가 높고 열 방출 효율이 좋기 때문에, 로봇 관절 내부에 직접 적용되기에 매우 적합한 솔루션이 될 수 있다[1,2].

하지만 Frameless BLDC 모터를 직접 구동(Direct-drive) 방식으로 적용할 경우 충분한 토크 확보가 어렵고, 출력 샤프트의 설계와 체결에서 고정성과 정밀도를 확보하기 위한 별도의 기구 설계가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 감속기와의

통합이 필수적이다. 특히 소형 로봇에서는 고효율이면서도 콤팩트한 감속기를 필요로 하며, 이에 적합한 방식으로 유성기어(Planetary Gear) 감속기가 널리 활용된다. 유성기어 감속기는 중심의 선기어(Sun Gear), 그 주변의 유성기어들(Planet Gears), 그리고 외곽의 링기어(Ring Gear)로 구성되며, 토크 전달 효율이 높고 동심구조로 인한 균형성과 내구성이 우수하다.

그 중에서도 Stepped 유성기어 감속기는 다단 감속을 통해 더 높은 감속비를 구현할 수 있으며, 특히 축 방향으로 길이를 절약할 수 있어 공간 제약이 심한 로봇 관절 구조에 최적화된 형태로 적용되고 있다[3,4]. 이러한 감속기 구조는 고속 회전 모터의 저속 및 고 토크로 변환하는 데 매우 효과적이지만, 동시에 모터와 감속기의 정밀한 정렬 및 체결, 엔코더의 장착 위치, 축 중심을 통한 배선 설계 등 여러 설계 상의 난제를 수반한다.

로봇 관절의 위치 제어를 위해서 앵슬루트 엔코더(Absolute Encoder)가 많이 사용되며, 최근에는 산업용 고정밀 제어 시스템에서 BiSS-C 통신 프로토콜을 지원하는 엔코더가 보편적으로 사용되고 있다. BiSS-C는 비동기식 직렬 통신 방식으로, 낮은 지연시간과 높은 내성, 차동 신호(Differential Signal)를 통한 신뢰성 높은 데이터 전송이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 BiSS-C 프로토콜은 대부분의 MCU에서 직접 지원되지 않으며, 이를 처리하기 위해서는 SPI 기반의 마스터 클럭 생성을 포함한 커스텀 회로와 RS-422 기반 차동 통신 트랜시버 설계가 반드시 요구된다.

이러한 기술적인 요구사항을 모두 충족하면서 하나의 일체형 액츄에이터 시스템으로 통합된 설계를 구현하는 것은 매우 도전적인 과제이다. 로봇의 전체적인 설계 자유도를 확보하면서도, 개별 구성요소의 성능을 손상시키지 않고 정밀하게 통합하기 위해서는, 기계 설계, 회로 설계, 펌웨어 개발, 통신 인터페이스 설계 등이 유기적으로 결합되어야 한다. 또한, 센서와 모터의 데이터를 실시간으로 처리하고 외부 제어기와 통신할 수 있는 내장형 제어기(Embedded Controller)의 설계 역시 필수적이다. 특히 소형화된 제어기 보드는 열 해소 구조와 배선 구조까지 고려해야 하며, 시스템 통합성 측면에서 기술적으로 높은 수준의 완성도를 요구 받는다.

이와 같은 통합 액츄에이터 시스템에 대한 연구는 국내외에서도 활발히 진행되어 왔다. Elery et al.[5]은 Frameless BLDC 모터와 Stepped 유성기어 감속기를 사용한 무릎-발목 구동형 의족을 설계한 내용을 다룬다. 낮은 감속비와 고토크 저속 모터의 조합은 낮은 기계적 임피던스와 높은 백드라이버빌리티를 제공한다. 하지만 상용 제품의 제어기 사용으로 일체화 측면에서 한계가 존재한다. Nandor et al.[6]은 외골격 관절을 위한 두 가지 구동기 후보의 차이를 분석하기 위해 두 개의 액츄에이터를 개발하였다. 두 액츄에이터 모두 동일한 Frameless BLDC 모터와 유사한 기어비를 사용하였으며, 하나는 상용 하모닉 드라이브를, 다른 하나는 맞춤형 2단 유성기어 감속기를 사용하였다. 유성기어 기반 액츄에이터가 우수한 성능을 보였다.

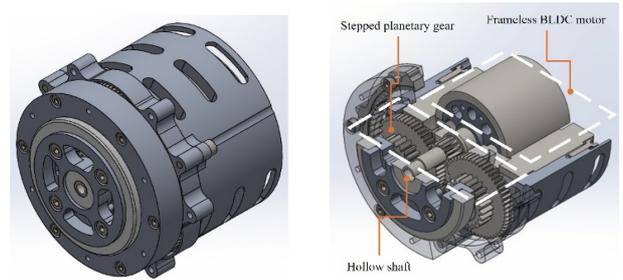


Fig. 1 A designed actuator integrating a frameless BLDC motor and a stepped planetary gear

이에 본 연구에서는 Frameless BLDC 모터와 Stepped 유성기어 감속기를 통합한 중공축 구조의 로봇 관절용 액츄에이터를 Fig. 1과 같이 설계[7]하고, 이를 위한 전용 BLDC 모터 컨트롤러를 개발하였다. 제안된 시스템은 Kollmorgen사의 TBM-7631-A Frameless 모터를 기반으로 하며, 기계적 체결을 통해 회전자와 중공 샤프트를 연결하고, BiSS-C 통신을 지원하는 앵슬루트 엔코더를 탑재하였다. 또한, 고속 PID 제어 루프(1 kHz), RS-422 기반 차동 신호 변환, CAN 통신 기능을 포함한 제어 보드를 설계 및 제작하였으며, 실험을 통해 스텝 응답 특성을 정량적으로 평가하였다.

본 논문에서는 해당 액츄에이터 및 제어기 시스템의 설계 과정, 시제품 구현, 통신 구조, 제어기 동작 방식, 실험 결과를 자세히 기술하고, 추후 개선 방향으로 센서리스 제어 알고리즘(Sensorless Control) 통합과 중공축 설계 개선, 시스템 소형화 전략 등에 대해 논의하고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 로봇 관절용 액츄에이터 설계와 관련하여 Frameless BLDC 모터의 회전자 체결을 위한 회전축 설계 그리고 Stepped 유성기어 감속기 모듈 설계에 대한 내용을 상세히 기술하며, 3장에서는 BLDC 모터 컨트롤러 설계와 관련하여 회로 블록도를 가지고 기술한다. 4장에서는 Step 응답 실험 결과를 제시하고, 5장에서는 논의를 제시하며, 마지막으로 6장에서는 결론과 함께 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 로봇 관절용 액츄에이터 설계

2.1 Frameless BLDC 모터의 회전자 체결을 위한 회전축 설계

Frameless BLDC (Brushless DC) 모터는 고정자와 회전자가 분리되어 있어서 각각은 로봇의 관절 형상에 따라서 자유롭게 설계가 가능하다. 먼저 회전자 설계에서는 케이블이 관절을 통과할 수 있도록 중공축 형태를 선택하였고, 다음으로 이 중공축과 회전자를 결합하기 위해서 화학적 물질을 사용한 결합 대신 물리적 결합 방법을 채택하였다. 그 이유는 모터의 회전자와 중공축 분해 과정에서 물리적 결합 방법이 화학적 물질을 사용한 방법 보다 더 유리하기 때문이다.

Fig. 2는 회전자와 중공축을 결합한 모습의 단면도를 보여준다. 회전자 어셈블리는 회전자, 선 기어 샤프트(Sun Gear Shaft),

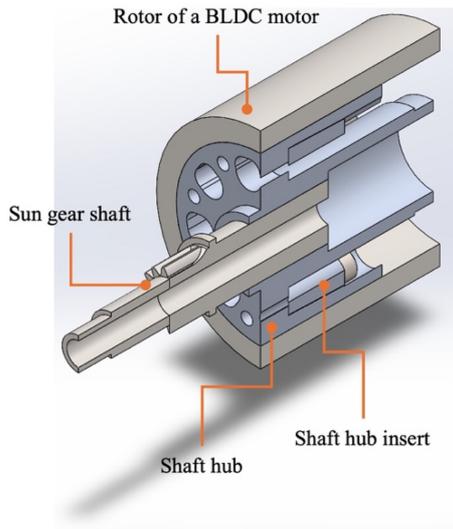


Fig. 2 A section view of the rotor assembly which is made up of a rotor of a BLDC motor, a sun gear shaft, a shaft hub and a shaft hub insert

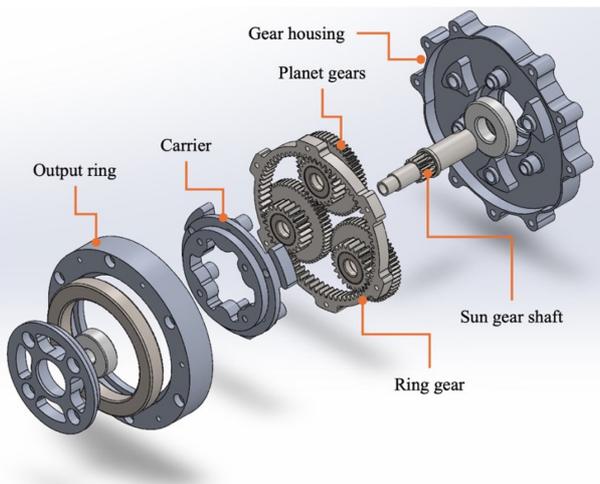


Fig. 3 A disassembly of a stepped planetary gear module. The input is a sun gear shaft, and the output is an output ring connected to a ring gear

샤프트 허브(Shaft Hub), 그리고 샤프트 허브 인서트(Shaft Hub Insert)로 구성된다[8]. 선 기어 샤프트는 중공축 형태이고, 샤프트 허브와 결합된다. 샤프트 허브는 회전자 내부에 삽입이 되고, 샤프트 허브 인서트는 샤프트 허브 속으로 들어가게 된다. 회전자와 샤프트 허브가 물리적으로 체결되는 방법은 다음과 같다. 샤프트 허브와 샤프트 허브 인서트가 볼트로 체결되는 과정에서 샤프트 허브의 외벽이 벌어지고 회전자 내부에 강하게 밀어내면서 물리적으로 체결된다.

2.2 Stepped 유성기어 감속기 모듈 설계

액츄에이터의 축 방향 길이를 고려하여 감속기 모듈을 2단으로 구성된 Stepped 유성기어 시스템으로 Fig. 3과 같이 설계하였다.

Table 1 The number of teeth in the stepped planetary gear system and gear ratio

Gear		Number of teeth
Sun gear		15
Plant gear	1st	55
	2nd	22
Ring gear		71
Sun-Ring gear		11.8335 : 1

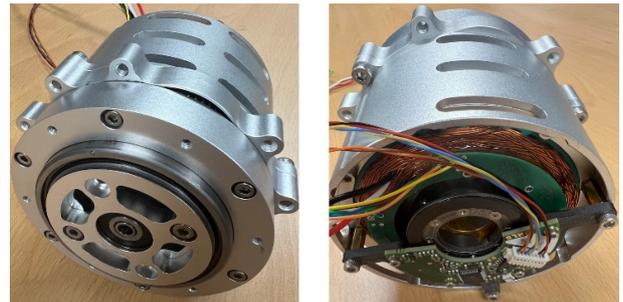


Fig. 4 The front and back view of the developed actuator. An absolute encoder is installed on the back side

이 기어 시스템은 유성기어를 2단으로 구성하여 입력 축인 선 기어 샤프트가 첫 번째 단 유성기어를 회전시키면 두 번째 단 유성기어가 링 기어(Ring Gear)를 회전시키는 구조이다. 최종적으로 링 기어가 출력 기어가 되고 여기에 출력 링(Output Ring)을 부착하여 감속기 프레임 구성하였다.

Table 1에 기어들의 잇수를 정리하였다. 선 기어와 유성 기어 1단 사이의 기어 비는 3.6667 : 1이고 유성 기어 2단과 링 기어 사이의 기어 비는 3.2273 : 1이다. 따라서 선 기어(입력 기어)와 링 기어(출력 기어) 사이의 기어비는 11.8335 : 1이다.

2.3 액츄에이터 시제품 제작

액츄에이터의 모터 부분과 감속기 부분의 설계에 따라서 시제품을 제작하였다. 감속기의 기어 부품은 스테인리스 스틸(Stainless Steel)로 가공되었고, 그 기어 부품을 제외한 나머지 부품은 알루미늄 합금(AL6061)으로 가공되었다. 모터의 위치제어를 위해서 앵솔루트 엔코더(Absolute Encoder)를 액츄에이터의 입력 축에 장착하였다. 액츄에이터의 입력 축에 장착된 앵솔루트 엔코더를 이용하여 출력 축 회전 각도를 제어하기 위해서는 멀티턴(Multi-turn) 기능이 있는 앵솔루트 엔코더를 선택하였다. Fig. 4에 제작된 액츄에이터의 시제품 형상을 나타내었고, Table 2에 액츄에이터의 사양서(Specification)를 정리하였다.

3. BLDC 모터 컨트롤러 설계

3.1 회로도 설계

Fig. 5에 BLDC 모터 컨트롤러의 회로를 블럭도로 나타내었다.

Table 2 Specification of the actuator

Frameless BLDC motor	Model	Kollmorgen TBM-7631-A
	Power	307 W
	Rated voltage	48 V
	Rated torque	1.65 Nm
	Rated current	10.9 A
	Mass	0.738 kg
Absolute encoder	Model	Renishaw MB039DCC19MENT00
	Readhead	MRA039BC020DSE00
	Magnetic ring	MRA039BC020DSE00
	Resolution	19 bit
	Multi-turn	16 bit
	Communication	BiSS-C
Reduction ratio		11.8335 : 1
Total mass		1.514 kg

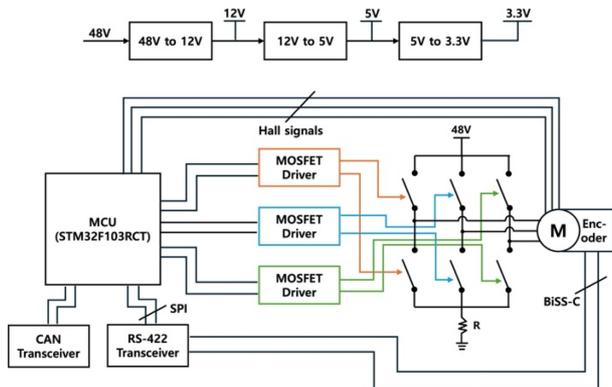


Fig. 5 A circuit diagram of a BLDC motor controller. It shows a power part, a MOSFET & H-bridge part, and a communication part

블록도 중에서 BLDC 모터 컨트롤러의 전원부는 48 V 외부 DC전원을 입력 받아 12 V로, 12 V는 다시 5 V로, 마지막으로 5 V는 3.3 V로 DC-DC 강압 변환을 한다. 12 V는 모스펫 (MOSFET) 드라이버, 5 V는 홀센서와 앵슬루트 엔코더, 그리고 3.3V는 MCU의 전원 공급으로 사용된다.

BLDC 모터 구동을 위해서 6개의 N채널 MOSFET을 이용하여 H-브릿지(H-bridge) 회로를 구성하였다. H-브릿지의 High 사이드와 Low 사이드의 MOSFET 동작을 on/off하기 위해서 드라이버 IC칩을 사용하였다. MOSFET 드라이버 회로는 하프-브릿지(Half-bridge)용 드라이버 3개를 사용하여 BLDC 모터의 3상을 각각 담당할 수 있도록 하였다.

앵슬루트 엔코더의 통신 방식은 BiSS-C 방식이고 클럭이 엔코더로 입력되면 엔코더는 회전각에 대한 절대 값을 출력한다. 하지만, MCU에서는 직접적으로 BiSS-C 통신 방식을 지원하지 않는다. 그래서 MCU의 SPI 통신을 통해서 클럭을 출력하고

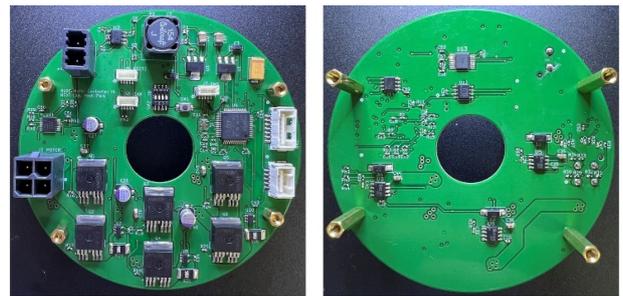


Fig. 6 A top and bottom view of a prototype of a BLDC motor controller

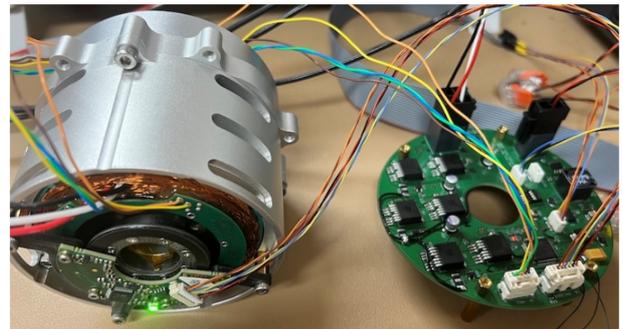


Fig. 7 An experiment of the actuator integrated with the developed BLDC motor controller

데이터를 입력 받는 방법을 사용한다. 추가로 BiSS-C 방식은 클럭과 데이터 신호는 차동 신호(Differential Signal)로 이루어져 있기 때문에 MCU의 SPI 통신 신호를 차동 신호로 변환하기 위해서 RS-422 Transceiver IC칩을 이용하였다.

상위 제어기와 통신은 CAN 통신 방식을 채택하였고 MCU에서 CAN 통신을 구현하기 위해서 CAN Transceiver IC칩을 이용하였다.

3.2 BLDC 모터 컨트롤러 시제품 제작

BLDC 모터 컨트롤러는 액츄에이터 후면에 장착하여 액츄에이터와 일체형으로 제작할 계획이다. Fig. 6과 같이 액츄에이터의 중공축 설계를 반영하여 제작된 모터 컨트롤러 보드의 형상은 도넛 모양으로 중심이 뚫려 있다. 그러나 현재의 시제품 버전은 크기가 액츄에이터 보다 크고 전원 선, 모터 3상 선, 홀센서 및 엔코더 선들의 연결 편의성을 위해서 커넥터로 체결되도록 제작하였다. 왜냐하면 1차 버전의 시제품으로 충분한 회로 검증과 모터 테스트를 완료한 후에 2차 버전부터 크기를 줄여서 액츄에이터와 일체형이 가능한 모터 컨트롤러 보드를 제작하는 것이 새롭게 만들어지는 보드에서 예상할 수 없는 에러를 줄일 수 있는 방법이기 때문이다.

BLDC 모터 컨트롤러에 모터의 위치제어를 위한 PID 제어 루프를 구현하였다. 위치제어 루프는 1 kHz의 제어 주기로 동작한다.

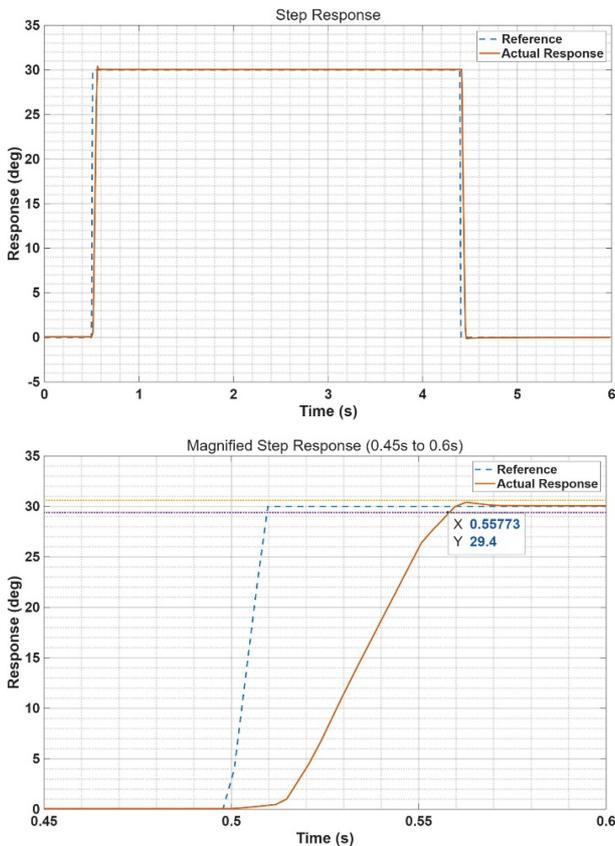


Fig. 8 A step response with respect to references of 30° and 0° is presented at the top. A magnified step response from 0.45 to 0.6 s is shown at the bottom for more details

4. 실험 결과

제작한 액츄에이터와 BLDC 모터 컨트롤러를 Fig. 7과 같이 연결하고, 추가로 모터 컨트롤러는 CAN통신으로 PC와 연결하였다. PC에서 Step 명령을 보내고 엔코더 값을 계속 읽으면서 Step 응답을 기록하였다.

첫 번째 Step 명령으로 액츄에이터의 출력 각도를 30°로 하였다. 그러면 실제 모터 입력 축은 355.005° 만큼 회전하여야 한다. 두 번째 Step 명령은 액츄에이터의 회전 각도를 처음 위치로 돌아오도록 0°를 입력하였다. 그 실험 결과에 대한 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 그래프의 점선은 Step 명령(Reference)을 각도로, 실선은 실제 모터의 응답을 각도로 표현한 것이다. 위쪽 그래프는 0에서 6초 동안 30° 그리고 0°로 변화하는 Step 명령에 대한 모터의 응답을 나타내었다. 모터는 Step 명령을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 아래쪽 그래프는 위쪽 그래프의 0.45에서 0.6초 사이의 그래프를 확대하여 30° 명령에 대한 실제 추종 그래프의 모습을 자세히 보여준다. Step 명령은 0.51초에 30°에 도달하고, 그 이후에 모터가 응답하는 것을 볼 수 있다. 명령 값의 ±2% 이내 (29.4°-30.6°)로 들어오는 시간인 Settling Time은 0.55773초로 측정이 되었다. 따라서 모터는 0.04773만에 정상상태에 도달하였다.

5. 논의

액츄에이터의 중공축인 선 기어 샤프트의 내경의 지름은 5 mm로 여러 전선들이 통과하기에는 넓지 못하다. 예를 들어 BLDC 모터의 리드 선의 직경은 18 AWG로 피복까지 고려하면 1.7 mm이다. 만약 3개의 리드선이 통과하게 된다면 중공축 내부의 여유공간이 부족하게 된다. 따라서 개선된 액츄에이터를 제작시에는 이런 단점을 보완할 것이다. 추가로 홀 센서가 없는 BLDC 모터의 구동을 위하여 BLDC 모터 컨트롤러에 센서리스 제어가 가능하도록 회로를 추가하고 펌웨어 코드를 업데이트 할 계획이다.

6. 결론

본 연구에서는 Frameless BLDC 모터와 Stepped 유성기어 감속기를 통합한 회전 관절용 액츄에이터를 설계 및 제작하고, 이를 제어하기 위한 BLDC 모터 컨트롤러를 개발하였다. 액츄에이터는 Kollmorgen TBM-7631-A 모터와 11.8335 : 1의 감속비를 갖는 2단 유성기어 시스템을 기반으로 하였으며, 고해상도 BiSS-C 절대 엔코더를 탑재하여 정밀한 위치 제어가 가능하도록 설계되었다. 제작된 시제품을 이용한 스텝 응답 실험 결과, 모터는 30° 명령에 대해 0.04773초만에 정상상태에 도달하는 것을 확인하였다.

향후 연구에서는 중공축 내경 확대를 통한 배선 편의성 개선, 센서리스 제어(Sensorless Control) 기능을 추가한 컨트롤러 설계, 그리고 액츄에이터-컨트롤러 일체형 소형화 설계 등을 진행할 예정이다. 본 연구의 결과물은 족형 로봇(Legged Robot) 및 다양한 로봇 관절 구동 시스템에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 글로벌대학30의 결과입니다(No. 2025-RISE-11-004).

REFERENCES

- Yeom, H., Ba, D. X., Bae, J., (2018), Design principles and validation of a human-sized quadruped robot leg for high energy efficiency, The Journal of Korea Robotics Society, 13(2), 86-91.
- Seo, W., Kwon, J., Ko, Y., Hong, D., (2019), An assistive control strategy using arm swing information for 1dof hip exoskeleton for hemiplegic gait rehabilitation, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 36(4), 419-424.

3. Lee, J. H., Hong, J. K., Woo, S. H., Lee, S. G., (2024), Development of a compound planetary gearbox for robot and performance evaluation using dynamometer, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 41(3), 163-168.
4. Park, H., Sim, Y., Kwon, O. Yi, H., Lee, S., (2021), Design of compound planetary gear reducer for mobile robot actuator, *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 23(2), 254-259.
5. Elery, T., Rezazadeh, S., Nesler, C., Doan, J., Zhu, H., Gregg, R., (2018), Design and benchtop validation of a powered knee-ankle prosthesis with high-torque, low-impedance actuators, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2788-2795.
6. Nandor, M., Heebner, M., Quinn, R., Triolo, R. Makowski, N., (2021), Transmission comparison for cooperative robotic applications, *Actuators*, 10(9), 1-15.
7. Park, S., (2025), Development of a Stepped Planetary Gear Actuator with an Integrated Hollow Shaft for Quadruped Robots, *Proceedings of the KSPE 2025 Spring Conference*, 189.
8. Park, S., (2021), The probe: Design and development of a large hexapod robot, *IEEE Access*, 9, 125628-125639.

**Sangsin Park**

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation. His research interests are legged robots, robot design, and control.

E-mail: spark@ut.ac.kr

Web: www.nextlab.one

금속 3D 프린팅 기술 기반 다결정 다이아몬드(PCD) 보링 공구 바디 제작에 관한 연구

A Study on Fabrication of PCD Boring Tool Body based on Metal 3D Printing Technology

손호민¹, 김동규², 사민우^{1,#}
Ho Min Son¹, Dong Gyu Kim², and Min-Woo Sa^{1,#}

¹ 에스제이엔텍 기업부설연구소 (R&D Center, SJNTEC)
² (재)대구기계부품연구원 정밀가공종합기술지원센터 (Center for Advanced Cutting Tool and Machining, Daegu Mechatronics & Materials Institute)
Corresponding Author / E-mail: 79smw42@gmail.com, TEL: +82-53-586-6210
ORCID: 0000-0003-0979-8736

KEYWORDS: Metal 3D printing (금속 3D 프린팅), Lightweight part (경량화 부품), Polycrystalline diamond (다결정 다이아몬드), Fused Deposition modeling (용착 적층 모델링), Boring tool (보링 공구)

The future mobility industry is increasingly utilizing advanced tools for cutting and machining lightweight parts to enhance the fuel efficiency of automotive engines. Machining companies are turning to polycrystalline diamond (PCD) tools to boost productivity in the production of these lightweight components. PCD tools provide exceptional machining performance and a long service life, making them ideal for high-mix, low-volume production, which often involves customized requirements for various materials. To further improve efficiency, this study explores the application of metal 3D printing technology in the manufacturing of PCD tools. This technology allows for the creation of PCD tools with superior cutting performance and wear resistance, tailored for high-speed machining of lightweight materials, including complex shapes. Thus, research into this area is essential. In this study, we manufactured boring tools by brazing PCD tips onto three different laminated structures created using Fused Deposition Modeling (FDM), a method within metal 3D printing technologies. We then evaluated the fabricated boring tools through comparative machining experiments against existing sintered PCD boring tools. The results indicated that the 3D-printed solid tools demonstrated no significant differences in machining accuracy or surface quality compared to the conventional tools.

Manuscript received: August 13, 2025 / Revised: September 9, 2025 / Accepted: September 19, 2025

1. 서론

금속(Metal) 기반 3D 프린팅(혹은 적층 제조(Additive Manufacturing)) 기술은 CAD (Computer-aided Design)을 사용하여 재료를 층층이 쌓아 3차원 입체 물체를 구성하는 것으로써 [1-3], 이 기술을 통해 자동차, 항공, 국방, 의료, 자동화, 및 정밀 금속 부품 산업 전반에 걸쳐 제조 산업을 위한 혁신적인 기술로 주목받고 있다[3-5]. 금속 적층 제조의 방식 중 용착 적층 모델링(Fused Deposition Modeling, FDM) 혹은 용융 적층 조형(Fused Filament Fabrication, FFF)은 노즐 부분에서 금속 파우더와

바인더가 혼합된 막대 형태의 금속 재료를 열에 녹여 압출하여 한 층씩 원하는 형태로 제작하는 방식이다. 이 때 필요한 부분에 녹인 물질을 밀어내어 굳히면서 아래에서부터 연속적으로 적층하며 압출한다[3-6]. FDM 적층 방식의 장점은 전담 작업자 및 분말 관리 시스템이 필요 없고, 최소한의 개인 보호 장비(Personal Protective Equipment)만 있으면 된다. 또한, 고비용의 레이저를 사용하는 분말 베드 용해(Powder Bed Deposition, PBF) 적층 방식 대비 생산성이 우수하고 고탄소 철강 및 난주조성, 난용접성 소재 적용이 가능하다. 사용되는 대표적인 금속 재료로는 스테인레스 강(17-4 PH, 316L), 공구 강(H13, A2, D2),

니켈합금(IN625), 구리 등이 있다[7].

제작된 금속 적층 구조물은 자동차, 항공 우주, 방산, 의료, 및 다양한 산업분야에 적용이 가능하다. 여러 산업 중에서도 부품을 가공하기 위해 필요한 절삭공구는 그 쓰임과 용도가 다양하며, 복잡한 형상이 요구되거나 빠른 시일 내로 제작이 요구되는 경우가 대부분이다. 따라서, 절삭 공구 제조 분야에서 적층 제조 기술을 활용하면 기존 방식인 공구의 플루트 및 원통, 샌크 가공 등을 적층 공정으로 대체할 수 있는 더 축소된 제조 단계로 형상을 생산할 수 있어 리드 타임을 단축하고 납기를 앞당기게 될 수 있다. 또한, 공구 내부를 설계하여 진동 감쇠(멤핑) 특성 개선이나 절삭유가 절삭 날의 올바른 지점에 정확하게 당도록 유도함으로써 공구의 수명 향상이 가능하다[8]. 이를 통해 절삭 공구 내부 구조를 여러 형상으로 적층 제조하여 비교 실험을 통해 공구의 성능 및 수명 향상에 대한 최적화 조건을 찾는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 금속 3D 프린팅 기술의 FDM 방식을 이용한 보링 공구 바디를 내부 구조가 없는 Solid 형상 및 적층 소프트웨어를 활용한 Triangle 및 Grid 패턴으로 적층 제작하였고, 이때 절삭날 소재인 다결정 다이아몬드(Polycrystalline Diamond, PCD) Tip을 적층 공구 바디에 브레이징 접합하여 PCD 보링 공구를 제작하였다. 이후, 제작된 보링 공구를 기존 선반/밀링 방식의 보링 공구와의 비교 가공 실험을 수행하여 평가 및 분석을 실시하였다.

2. 3D 프린팅 조건 및 적층 PCD 보링 공구 제작

2.1 적층 장비 및 소재

FDM 방식의 장비는 금속 분말과 바인더가 혼합된 필라멘트를 사용하여 층층이 적층하면서 물체를 제작하는 방식이며, 3축(X, Y, Z) 방향으로 위치 조절이 되는 이송기구에 장착된 히터노즐에서 필라멘트를 용융시켜 배출시킨다. 배출되는 필라멘트는 층별로 쌓아가는 과정에서 빠르게 냉각되어 굳어져 최종 형상을 나타낸다. 사용되는 금속 분말의 필라멘트의 소재로는 공구강, 알루미늄합금, 구리, 스테인리스 강 등이 있으며, 각 소재는 특성에 따라 적합한 용도를 가진다.

Fig. 1은 FDM 방식의 적층 제조 공정으로 제품 모델링 및 설계 도면을 토대로 3D 프린팅 장비를 통해 제품이 적층 제작된다. 이후 적층된 제품을 세척 후 소결로 장비를 통해 소결하여 적층 제품이 완성된다. 필라멘트 성분 중 바인더는 소결 공정에서 열을 받게 될 때 분해되면서 금속분말 확산에 도움을 주고 증발된다. Figs. 2는 본 PCD 보링 공구 홀터 제작에 사용된 장비이며, 2(a)는 3D 프린팅 장비(Metal X System, Markforged, USA)이고, 2(b)는 적층 작업 후 소결 공정에 사용된 소결 장비(Sinter-2, Markforged, USA)를 보여준다.

본 PCD 보링 공구 바디 제작에는 H13 공구강 소재를 선정하였다. Table 1은 Metal X System 적층 장비를 이용한 H13 공구강

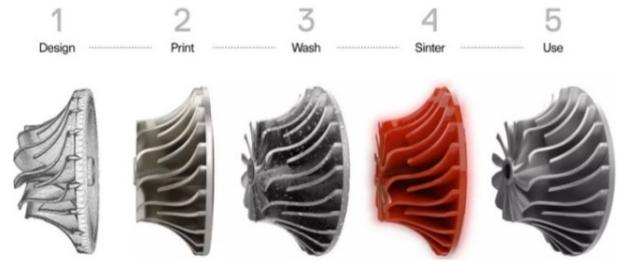


Fig. 1 3D printing processing using Metal X system [9] (Adapted from Ref. 9 on the basis of OA)



Fig. 2 3D printing equipment [9,10] (Adapted from Refs. 9,10 on the basis of OA)

소재의 물리적 특성으로 소결 상태, 열처리, 단조 열처리에 따른 물리적 특성 값들을 보여준다. 이를 통해 H13 공구강은 단단하고 고온에서도 특성을 유지하며, 1,500 MPa 극한 인장 강도 및 45 HRC 정도까지 열처리 작업이 가능한 것을 알 수 있다. H13 공구강은 우수한 내마모성 및 강도를 가지지만 기존 가공 공정을 통한 제작에서는 절삭공구의 내부 유로 및 복잡한 형상 등을 제작하는 것이 힘들다. 하지만 적층 제조 기술을 활용하면 제작이 원활하며, 소재 특성 및 품질을 향상시킬 수 있다[11].

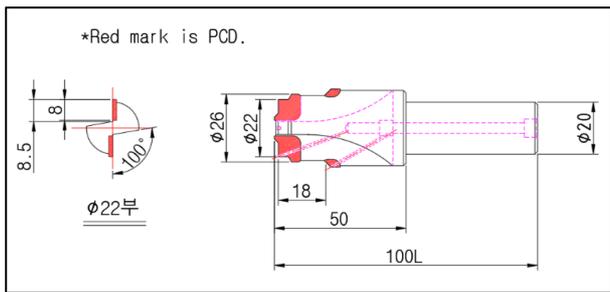
2.2 PCD 보링 공구 설계

Figs. 3은 직선형 플루트 형상의 PCD 보링 공구 제작을 위한 설계 도면으로 3(a)는 2D 도면, 3(b)는 3D 모델링 도면을 각각 보여준다. 보링 공구의 절삭날은 앞쪽과 뒤쪽 각각 2개로 총 4개이고, 직경은 $\varnothing 22$, $\varnothing 26$ 가 있지만 본 가공실험에서 사용할 직경은 $\varnothing 26$ 이다. 샌크 직경은 $\varnothing 20$, 전장 길이 100 mm, 절삭부 길이는 50 mm이고, 내부 급유 가공을 위해 공구 바디 내부에 오일 홀 설계를 하였다.

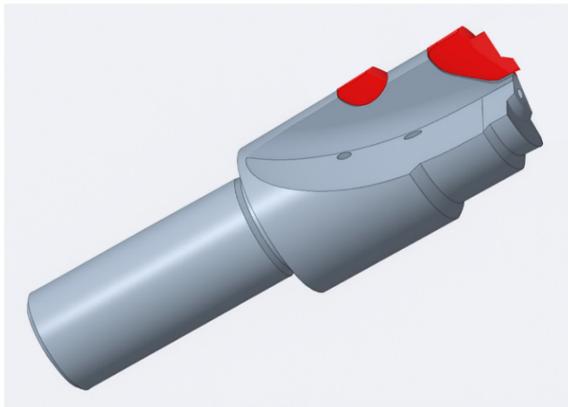
Figs. 4는 보링 공구 바디를 적층 구조 설계한 것으로 4(a)는 내부 형상 구조 없이 적층 내부를 가득 채운 Solid 형상 설계를 보여준다. Figs. 4(b)와 4(c)는 Metal X System 적층 장비에 내재된 Eiger (Eiger Software, Markforged, USA) 소프트웨어를 통해 설계한 내부 구조로 Triangle 및 Grid 형상을 보여준다.

Table 1 Physical properties of H13 tool steel material

	Sintered state	Heat treatment	Forging heat treatment
Ultimate tensile strength [MPa]	1,420	1,500	1,580
0.2% Yield strength [MPa]	800	1,250	1,360
Elongation at break [%]	5	5	14
Hardness [HRC]	40	45	46
Relative density [%]	94.5	94.5	100



(a) 2D CAD



(b) 3D modeling

Fig. 3 2D and 3D design of PCD boring tool

2.3 PCD 보링 공구 제작

기존 스틸 바디의 보링 공구 제작에서는 환봉 소재를 가지고 범용 선반 및 밀링 가공과 열처리 과정을 진행하였다. 이후 샌크 연마 및 날부 샌딩 연마 작업을 통해 최종 PCD Tip 부착을 할 수 있도록 수행하였다.

3D 프린팅 보링 공구의 제작은 다음과 같이 진행하였다. 보링 공구의 도면 설계를 토대로 Metal X System 3D 프린팅 장비를 통해 Solid 공구 바디를 적층 제작하였다. 또한 적층 내부 구조가 있는 Triangle 및 Grid 보링 공구 바디는 Eiger 소프트웨어를 활용하여 설계 도면을 토대로 각각 적층 제작을 진행하였다. Fig. 5는 3D 프린팅으로 적층 제작된 Solid 공구 바디와 내부 형상 구조로 적층 제작된 Triangle 및 Grid 공구 바디를 보여준다. 각 내부 형상 구조에 따른 보링 공구 바디의 제조 시간은 Table 2에 나타내었다. 프린팅 공정 및 세척 시간은 Solid 구조가 오래 걸렸고, 모든 보링 공구 바디의 소결 공정은 동일하게

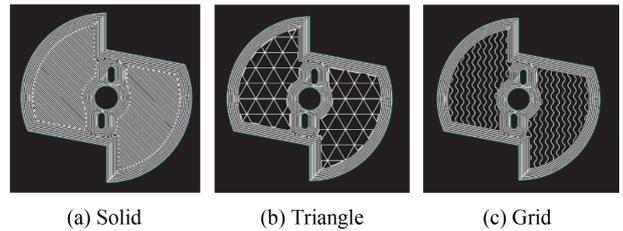


Fig. 4 Design of inner lattice pattern



(a) Solid



(b) Triangle



(c) Grid

Fig. 5 Tool body fabricated by Markforged's Metal X equipment

Table 2 Fabrication time for additive tool body

Type	Print	Wash	Dry
Solid	16h 34 min	29 min	4h
Triangle	13h 16 min	14h	4h
Grid	15h 4 min	15h	4h

30시간이 걸렸다. 보링 공구 바디 적층 제조 후 PCD Tip 소재를 적층 공구 바디에 부착하여 PCD 보링 절삭공구를 완성하였다. Figs. 6은 최종 제작된 PCD 보링 공구의 모습으로 6(a)는 기존 선반/밀링 방식으로 제작한 스틸 소재의 PCD 보링 공구, 6(b)는 적층 제작한 Solid 형상의 PCD 보링 공구를 보여준다. 그리고 Figs. 6(c)와 6(d)는 Eiger 소프트웨어를 통해 제작한 Triangle 및 Grid 형상의 PCD 보링 공구이다.

2.4 공구 주요 치수 측정

Fig. 7은 공구 측정 장비(Genius3, Zoller, German)를 통해 PCD 보링 가공의 주요 치수를 측정하여 Table 3에 나타내었다. 측정된 값은 Lip height 및 Runout 그리고 직경이며, 4가지 PCD 보링 공구에 대해 서로 차이가 나타나지 않은 것을 확인할 수 있었다. 또한 전자저울(WK-4C, CAS, Korea)을 통해 PCD 보링 공구의 무게를 측정하였다. 공구 무게는 기존 선반/밀링

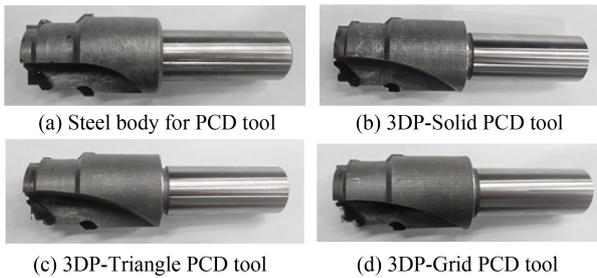


Fig. 6 Photos of the fabricated PCD boring tool

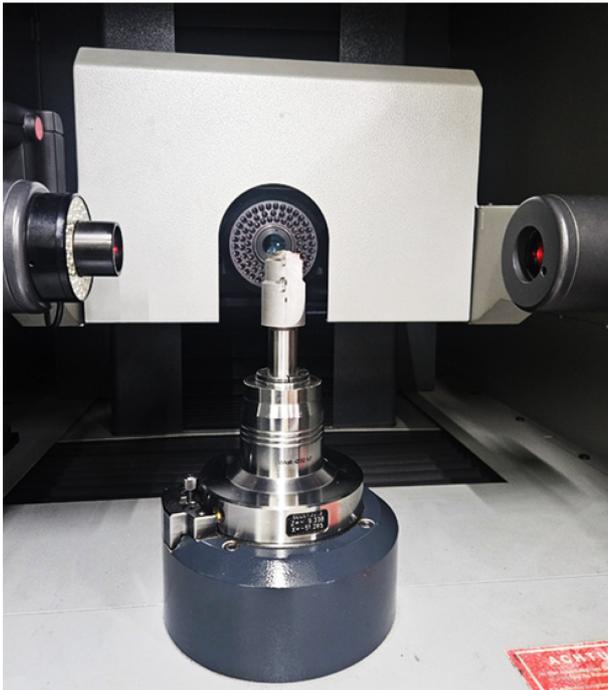


Fig. 7 Dimension measurement set up

Table 3 Dimension information for PCD boring tools

Tool type	Lip height [mm]	Runout [mm]	Diameter [mm]	Weight [g]
Steel body	0.002	0.005	26.006	266
3DP-solid	0.001	0.003	26.002	254
3DP-triangle	0.005	0.004	25.994	161
3DP-grid	0.004	0.005	25.997	158

방식의 Steel 공구가 높게 나타났다. 적층 공구에서는 내부 구조가 가득 찬 Solid 공구가 높게 나타났으며, 적층 내부 구조 형상에 따라 무게가 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

3. 제작한 PCD 보링 공구의 가공 평가

3.1 PCD 보링 공구의 가공 실험 준비

제작된 적층 PCD 보링 공구의 가공 특성을 분석하기 위해

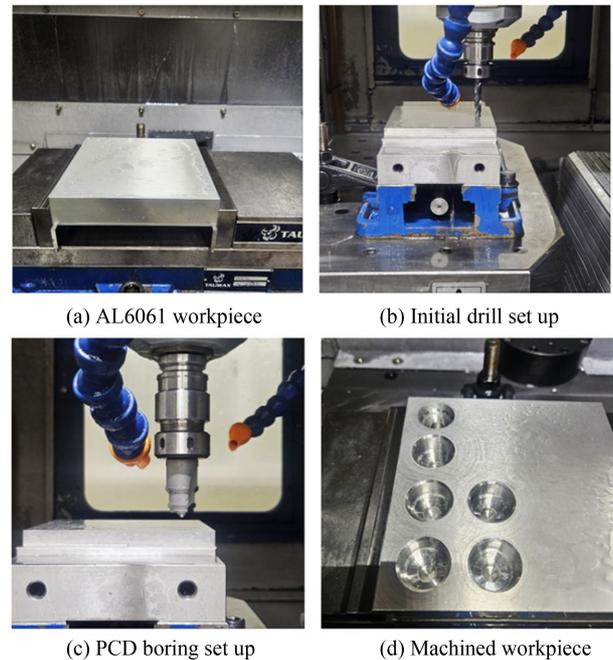


Fig. 8 Experiment set up

Table 4 Processing conditions for machining

Parameter	Value
Cutting velocity [m/min]	100
Feed rate [mm/rev]	0.2, 0.3, 0.4
Cutting depth [mm]	21

알루미늄합금 소재를 통해 비교 가공 실험을 수행하였다. Fig. 8은 머시닝 센터(Machining Center, MCT) 장비(DST-36D, Daesung HITEC, Korea)의 실험 세팅 사진을 보여준다. Figs. 8(a)는 가공 실험에 사용된 알루미늄합금(AL6061) 피삭재, 8(b)는 PCD 보링 공구 가공에 앞서 기초 홀 드릴 가공의 모습, 8(c)는 MCT 장비에 장착된 적층 PCD 보링 공구 가공의 모습, 그리고 8(d)는 가공된 피삭재의 모습을 나타낸다. 절삭유 가공방식은 실험에 사용된 PCD 보링 공구 모두 오일 홀이 있어 내부 급유 가공을 실시하였다. Table 4는 실험을 진행한 가공조건을 나타낸 것으로 절삭 속도 100 m/min에 대하여 1회전당 이송량으로 가공 조건을 하여 총 3가지의 동일한 가공조건과 동일한 피삭재로 진행하였다.

3.2 가공 내경 치수 측정

각 공구별 가공 정밀도를 분석하기 위해 가공 내경 치수에 대한 측정이 필요하다. Fig. 9는 PCD 보링 공구로 가공된 알루미늄 피삭재의 홀을 측정하는 사진이다. 가공 내경 치수는 한 조건당 한 홀씩 가공된 홀에 3차원 측정 장비(Axiom too CMM, Aberlink, UK)를 통해 측정되었다.

3.3 표면 거칠기 측정

또한, 가공 품질에 대하여 분석하기 위해 Fig. 10과 같이

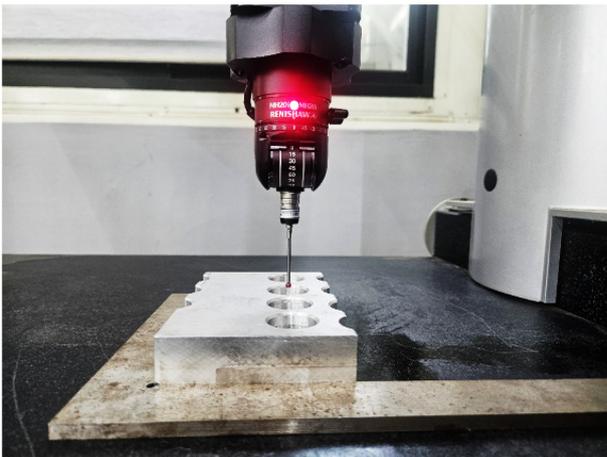
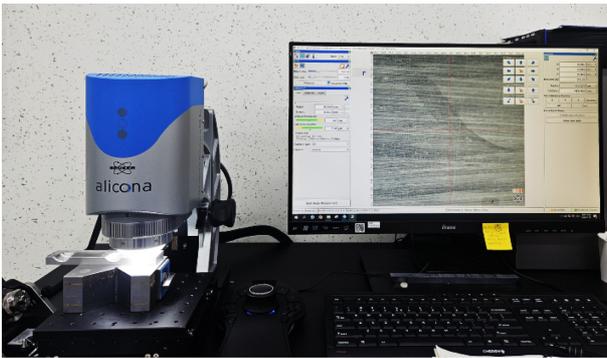


Fig. 9 Inner diameter dimension set up



(a) SJ-210 measurement set up



(b) Alicona measurement set up

Fig. 10 Surface roughness measurement set up

가공된 표면 거칠기를 측정하였다. Figs. 10(a)는 조도 측정기 (SJ-210, Mitutoyo, Japan)를 사용하여 표면 거칠기 값을 측정한 사진이고, 10(b)는 3D 표면 형상 측정기(3D Surface Measurement System, Alicona, Austria)를 통해 표면 형상을 측정한 사진이다. 표면 거칠기는 3가지 조건별로 측정하여 Ra값으로 측정되었다.

3.4 PCD 보링 공구의 정/동적 특성 분석

각 방식으로 제작한 보링 공구를 공작기계에 장착한 뒤 주파수

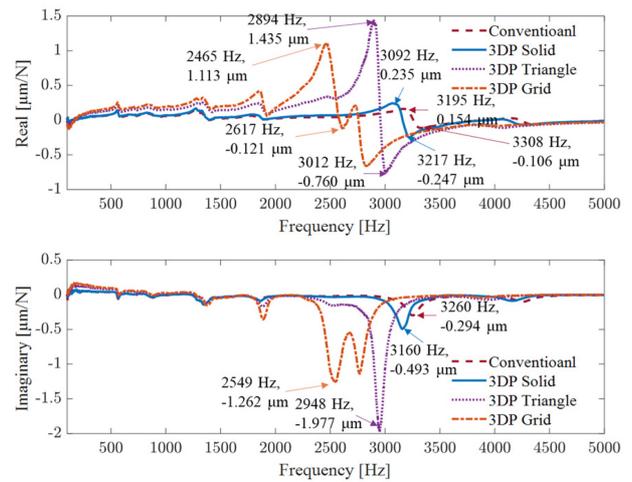


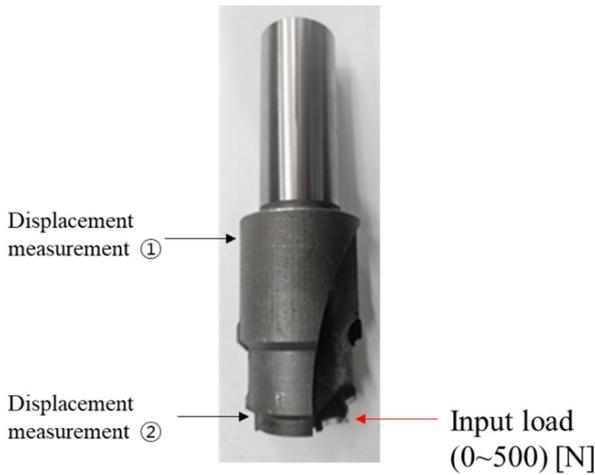
Fig. 11 Measured frequency response functions (FRFs) in the X-direction

응답 함수(Frequency Response Function, FRF) 시험을 수행하였다. X 방향에서의 동적 응답(실수부, 허수부)은 Fig. 11에 제시하였다. 상단 그래프는 실수부, 하단 그래프는 허수부이다. 기존 Steel 공구와 비교하면, Triangle 및 Grid 내부 격자를 적용한 적응 공구는 동특성 측면에서 현저히 취약하다. 기존 공구의 주요 모드 주파수는 3,195와 3,308 Hz이며, 이에 대응하는 실수 리셉턴스는 각각 0.154와 -0.106 µm이다. 반면, 적응 Triangle과 Grid 공구의 주요 모드 주파수는 각각 2894/3012와 2465/2617 Hz이며, 실수 리셉턴스는 Triangle이 1.435와 -0.760 µm, Grid가 1.113과 -0.121 µm이다. 즉, 기존 공구 대비 내부 격자 적용 적응 공구는 공구 모드 주파수가 약 9-23% 낮아졌고, 실수부 양의 리셉턴스는 약 7-9배 증가하였다. 이는 공구의 등가 강성이 감소하여 안정 절삭 한계가 낮아지고, 상대적으로 낮은 회전수·작은 절삭력 조건에서도 chatter(Chatter) 등 불안정 진동이 발생할 수 있음을 시사한다.

이에 비해 적응 Solid 공구의 주요 모드 주파수는 3,092와 3,217 Hz, 실수 리셉턴스는 각각 0.235와 -0.247 µm로 나타났다. 기존 공구와 비교하면 모드 주파수는 약 3% 낮고, 실수부 양의 리셉턴스는 약 1.5배 높다. 결과적으로 적응 Solid 공구의 동적 특성은 기존 공구 대비 다소 취약해졌으나, 이러한 특성이 실제 보링 절삭 성능에 미치는 영향의 정도는 절삭 실험을 통해 검증하였다.

각 제작 방식별 보링 공구의 정강성을 비교하기 위해, 공구를 공작기계에 장착한 상태에서 Fig. 12와 같이 하중을 가하여 처짐(Deflection)을 측정하였다. 공구 상단과 하단에 변위 센서를 부착하여 변위를 측정하였으며, 두 측정값의 차이를 이용해 처짐을 계산하였다.

처짐 시험 결과는 Fig. 13에 제시하였다. 기존 Steel 공구는 100 N 하중에서 약 2 µm, 500 N 하중에서 최대 10 µm의 처짐을 보였다. 적응 Solid 공구는 100 N 하중에서 약 4 µm, 500 N 하중에서 최대 13 µm 처짐을 나타내어, 동일 하중 조건에서



Deflection, ΔD
 = Displacement measurement ① - Displacement measurement ②

Fig. 12 Measuring method for deflection of tool

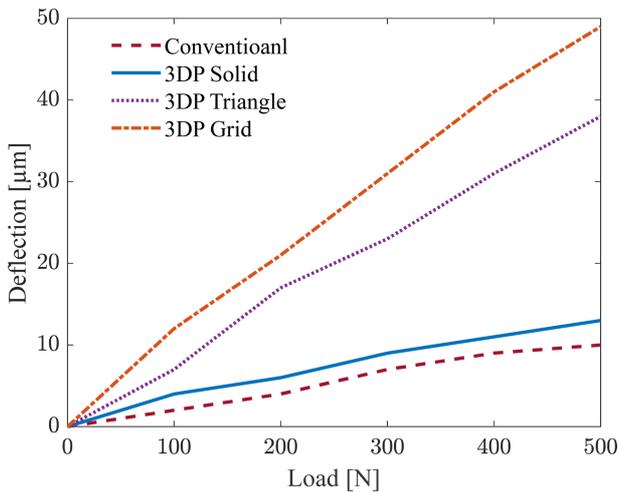


Fig. 13 Static stiffness measurement data

약 30% 큰 처짐을 보였다. 이는 절삭력에 의해 공구가 더 크게 변형되어 절삭품질에 영향을 줄 가능성을 시사한다. 다만, 보링 공정에서는 절삭력이 상대적으로 낮기 때문에 이러한 강성저하가 실제 성능에 미치는 영향은 절삭시험을 통해 확인하였다.

적층 Triangle 및 Grid 구조 공구는 500 N 하중에서 각각 38과 49 μm 의 처짐을 기록하였다. 이는 FRF 시험 결과와 일관되게, 두 구조 모두 정강성 측면에서 매우 취약함을 확인하였다.

3.5 PCD 보링 가공의 내경 치수 분석

PCD 공구는 다른 소재 공구에 비해 경도 및 내마모성이 뛰어나 알루미늄 소재 가공에서 오랜 시간 동안 가공이 가능하며, 내부 표면 및 치수 정밀도가 우수하다[12,13]. 이를 통해 내부 형상 구조별 각각의 보링 공구에 대한 가공 내경 치수를 분석할 필요가 있다. 따라서, 총 3개의 가공조건에서 가공된 홀의 내경 치수를 측정하여 나온 결과 값들에 대해 그래프를 나타내었다.

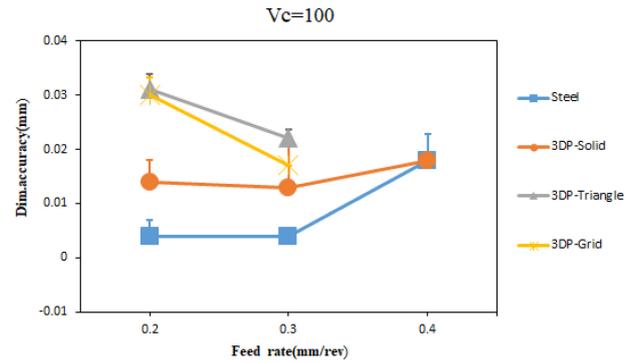


Fig. 14 Result graph of inner diameter dimensional accuracy

Fig. 14는 각 PCD 보링의 날 직경 대비 가공 내경 치수의 오차 값에 대한 그래프이다. 각 가공 조건의 홀당 3개 깊이(소재 표면을 기준으로 3.5, 7, 10.5 mm의 깊이)에서 내경을 측정하여 각 공구의 직경 대비 내경 치수의 오차 값과 표준 오차 막대를 그래프에 나타내었다. 본 실험에서 통상 도면의 치수 공차를 참고하여 각 공구의 직경 대비 가공 치수 오차는 0-0.02 mm를 기준으로 삼았다. Eiger 소프트웨어로 적층 제조한 Triangle 및 Grid 구조의 보링 공구는 1회전당 이송량 0.4 mm/rev에서 부하가 다른 공구에 비해 5%이상 높게 나타나 가공을 멈춰 결과 값을 측정하지 못했다. 가공 내경 치수의 오차 값을 전체 평균으로 나타낸 결과, Steel 공구는 0.008 mm, Solid 공구는 0.015 mm로 기준 오차 값에 들어왔다. 반면, Triangle 공구는 0.026 mm, Grid 공구는 0.023 mm로 오차 값에 들어오지 못했다. PCD 보링 공구 중 Triangle 및 Grid 형상 구조는 1회전당 이송량이 증가함에 따라 가공 내경 치수의 오차 값이 점점 감소하는 경향이 나타났다. 반면, 소결 가공으로 제작된 Steel 공구는 1회전당 이송량 0.4 mm/rev에서 증가하였고, 적층 Solid 공구는 1회전당 이송량 0.3 mm/rev에서 감소하다가 0.4 mm/rev에서 증가하는 경향이 나타났다. 기존 선반/밀링 방식의 공구가 적층 공구에 비해 가공 정밀도가 높게 나타난 것은 공구 강성으로 인한 공구의 휨이 발생될 수 있다는 연구 결과를 통해 기존 선반/밀링 방식 공구가 적층 공구보다 비교적 강성이 높아 가공 시 공구 휨이 덜 발생된 것으로 여겨진다[14].

3.6 PCD 보링 가공의 표면 거칠기 분석

Fig. 15는 2가지 표면 조도 측정기를 통해 가공된 홀의 표면 거칠기 Ra 값에 대한 그래프이다. 각 가공 조건의 홀당 4개의 각도(홀 중심을 기준으로 0°, 90°, 180°, 270°) 지점에서 표면 거칠기를 측정하여 표면 거칠기 평균 값과 표준 오차 막대를 그래프에 나타내었다. Figs. 15(a)는 SJ-210 조도 측정기로 측정 한 그래프, 15(b)는 3D 표면 형상 측정기로 측정한 그래프이다. 마찬가지로 Triangle 및 Grid 적층 공구는 0.4 mm/rev에서 가공 부하가 심하여 표면 거칠기 측정 값을 나타내지 못했다. 기존 선반/밀링 방식의 Steel 공구를 포함한 모든 적층 공구는 1회전당 이송량이 커질수록 표면 거칠기 값이 높게 나타나는 경향이

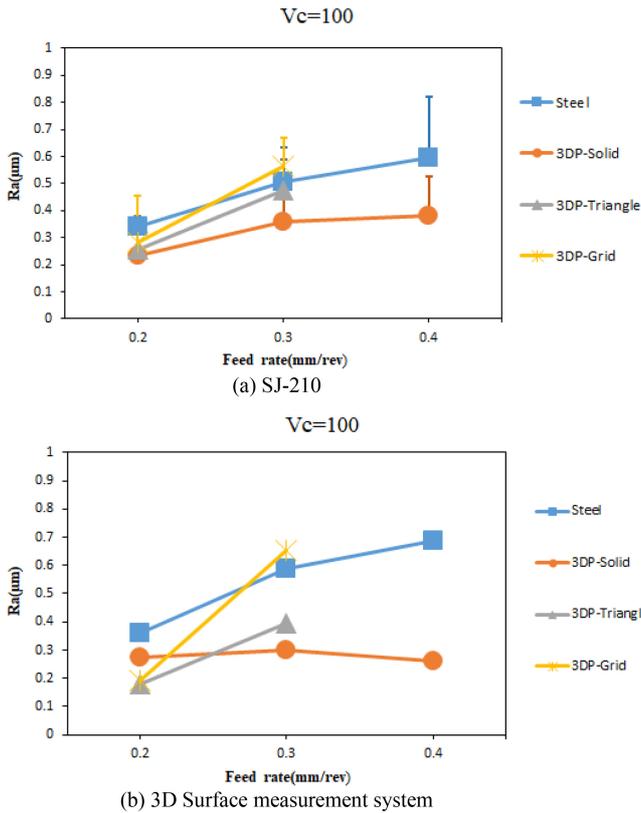


Fig. 15 Result graph of surface roughness

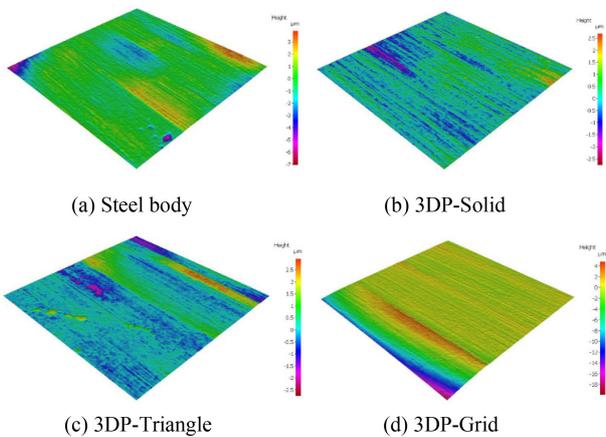


Fig. 16 3D geometry of machined AL6061 surface (At Fr = 0.3 mm/rev)

나타났다. 각 PCD 보링 공구의 전체 가공 표면 거칠기 값을 평균 으로 나타낸 결과, Steel 공구는 0.481 μm, 적층 Solid 공구는 0.326 μm, Triangle 공구는 0.364 μm 그리고 Grid 공구는 0.423 μm로 나타났다. 그 결과 적층 Solid 공구가 표면 거칠기 값이 비교적 낮게 나타났으며, 기존 선반/밀링 방식의 Steel 공구에 비해 가공 품질이 비교적 우수함을 확인할 수 있다. 또한, 적층 구조로 생성된 공구 중 Solid 공구가 Triangle 및 Grid 공구에 비해 표면 거칠기 값이 비교적 낮게 나타난 것은 Solid 공구의 무게가 Triangle 및 Grid 공구에 비해 무겁고, 적층 내부 구조가 격자 구조보다 조밀하게 형성되어 가공 시 흔들림이 덜 발생된 것으로 추측된다[15].

가공된 알루미늄 합금 표면에 대한 심층적인 분석을 위해 Fig. 16과 같이 1회전당 이송량이 0.3 mm/rev일 때의 3D 표면 형상을 측정하여 나타내었다. Figs. 16(a)는 선반/밀링 방식의 Steel 보링 가공, 16(b)는 적층 Solid 보링 가공, 16(c)는 적층 Triangle 보링 가공 그리고 16(d)는 적층 Grid 보링 가공에 대한 3D 표면 형상이다. 분석 결과, 적층 제조한 모든 보링 공구가 Steel 보링 공구와 거의 유사하게 가공 표면 거칠기 값이 나타나 제작된 적층 공구의 가공성이 기존 선반/밀링 방식의 공구와 비슷하다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 금속 FDM 적층 방식을 통해 내부 격자 구조를 서로 다르게 하여 공구 바디를 제작하였고, 절삭날인 PCD 소재를 브레이징 접합하여 보링 공구를 완성하였다. 이후, 가공성을 비교하기 위해 동일한 가공 조건 및 장비를 통해 알루미늄합금 피삭재 비교 가공 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

각 내부 형상 구조에 따라 공구 바디를 적층한 결과, 내부 격자 구조가 설계된 공구가 Solid 대비 적층 제조 시간이 짧게 나타났다. 이를 통해 추후, 가공 성능 향상에 최적화된 내부 격자의 공구 바디를 제조한다면 효율적인 공구 생산에 접근이 가능한 것을 확인하였다. 또한 PCD 소재를 브레이징 접합하여 보링 공구를 제작한 결과, H13 공구강 적층 소재에서도 PCD Tip 브레이징 접합성에 문제가 없음을 확인하였다.

제작된 PCD 보링 공구의 가공 조건에 따른 가공된 홀의 내경 치수에 대한 오차 값에서 기존 선반/밀링 방식의 공구가 적층 공구에 비해 가공 정밀도가 비교적 높게 나타났다. 이는 공구 강성으로 인해 가공 중 공구 휨이 적층 공구에 비해 덜 발생된 것으로 확인된다.

강성 특성을 바탕으로 각 공구의 가공 표면 거칠기 값을 비교한 결과, 내부 격자 구조가 형성된 Triangle 및 Grid 공구는 강성 측면에서 비교적 취약하게 나타나 표면 거칠기 값이 높게 나타난 것으로 확인된다. 하지만, Solid 공구는 기존 방식의 공구와 비교해 강성 특성에서는 저조하였지만 가공 표면 거칠기 값에서는 수치가 좋게 나타났다. 이러한 결과가 나타난 것은 가공 실험에서 MCT 장비의 진동이나 불안정, 공구와 피삭재간의 상대적인 진동, 보링 가공의 낮은 절삭력 등의 여러 요인으로 인해 강성 결과가 표면 거칠기 값에 직접적으로 영향을 끼치지 않은 것으로 보였다.

본 연구에서 적층 제조된 PCD 리머 공구는 기존 선반/밀링 방식 공구와 비교해 복잡하고 다양한 형상 제조성이 유리하면서도 가공성이 유사하다는 것을 볼 수 있었다. 아직 적층 공구의 내부 구조 형상에 대한 연구가 부족하였다. 추후, 적층 공구 바디의 내부 구조를 최적화하여 가공의 절삭력 분석 및 강성 평가에 대한 연구를 계속해서 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2024년도 중소벤처기업부의 ‘중소기업기술혁신개발사업 시장대응형(일반)’의 지원을 받아 연구되었음(No. RS-2024-00487244).

REFERENCES

1. Yoon, J. C., Lee, M. G., Choi, C. Y., Kim, D. H., Jeong, M. S., Choi, Y. J. and Kim, D. H., (2018), Evaluation of microstructure and mechanical properties in 17-4PH stainless steels fabricated by PBF and DED processes, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(2), 83-88.
2. Jeong, M. H., Kong, J. R., Kim, D. H., Kim, H. J., Kim, H. J., (2023), Metal additive manufacturing of canoe paddle grip using lattice structure, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 22(6), 47-54.
3. Yoon, J., (2018), Study of the mechanical properties and orthotropy of abs materials fabricated by FDM printing, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(5), 143-148.
4. Lee, S. K., Kim, Y. R., Kim, S. H., Kim, J. H., (2018), Investigation of the internal stress relaxation in FDM 3D printing : Annealing conditions, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(4), 130-136.
5. Lee, S. K., Kim, Y. R., Kim, S. H., Kang, S. H., Kim, J. H., (2019), Investigation of the internal stress relaxation in FDM 3D printing : Vegetable lubricating oil, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 18(2), 82-90.
6. Do, J. S., (2024), A study on the improving extrusion defects in FDM 3D printers, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 23(4), 80-85.
7. Markforged, Understanding the manufacturing technology and its impact. <https://markforged.com/ko/resources/blog/additive-manufacturing-101-guide-the-basics>
8. Lee, H. B., Lee, H. J., Kim, K. H., Kim, K. M., Ryu, S. S., Han, Y. S., (2019), A Study on the mechanical properties of Al₂O₃ cutting tools by DLP-based 3D printing, *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*, 26(6), 508-514.
9. Markforged, Information on metal X system. https://markforged.com/3d-printers/metal-x-system?__geom=%E2%9C%AA
10. Mark3D, Information on sintering furnace 2 equipment. <https://www.mark3d.com/en/product/markforged-3d-printers/metal-x-markforged-3d-printer/markforged-sinter-oven-2-for-metal-x-3d-printer>
11. Yun, J. C., Choe, J. H., Lee, H. N., Kim, K. B., Yang, S. S., Yang, D. Y., Kim, Y. J., Lee, C. W., Yu, J. H., (2017), Mechanical property improvement of the H13 tool steel sculptures built by metal 3D printing process via optimum conditions, *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*, 24(3), 195-201.
12. Lee, E. S., (2021), Micro grinding of cemented carbide with micro polycrystalline diamond tools, M.Sc. Thesis, Soongsil University.
13. Lee, S. W., Lee, D. J., (2012), Prediction of surface roughness on the PCD tool turned aluminum alloys by using regression analysis, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 11(3), 41-47.
14. Choi, J. G., Kim, H. S., Kim, S. C., (2004), A study on the optimum finish allowance for machining accuracy improvement in the end milling processes, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 13(3), 8-15.
15. Yeo, U. S., (2021), A study on the manufacture of bite holder using 3D additive manufacturing technology, M.Sc. Thesis, Ulsan University.



Ho Min Son

Received his bachelor degree in 2021 from the Department of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea. He is currently a assistant researcher in R&D Center, SJNTEC company, Daegu, Korea. His research interest is cutting tool.
E-mail: shm0091@naver.com



Dong Gyu Kim

Principal Researcher, Daegu Mechatronics & Materials Institute (DMI), Daegu, Korea. His research interest is advanced manufacturing technology.
E-mail: kdg0830@dmi.re.kr



Min-Woo Sa

Received his Ph.D. degree in 2018 from the Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong, Korea. He is currently a director in R&D Center, SJNTEC company, Daegu, Korea. His current research interests are special cutting tools and additive manufacturing technology.
E-mail: 79smw42@gmail.com

CNT 스프레이 코팅 스트레인 센서의 제작 및 특성 분석

Fabrication and Evaluation of CNT Spray Coated Strain Sensor

염윤지^{1,*}, 박지현^{1,*}, 이상훈^{1,2,#}
Yoon Ji Yum^{1,*}, Ji Hyun Park^{1,*}, and Sang Hoon Lee^{1,2,#}

1 서울과학기술대학교 기계-자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

2 서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과 (Department of Rolling Stock System, Seoul National University of Science and Technology)

*These authors equally contributed

Corresponding Author / E-mail: hyla@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6433

ORCID: 0000-0001-9530-2818

KEYWORDS: Carbon nanotube (탄소나노튜브), Spray coating (스프레이 코팅), Strain sensor (스트레인 센서), Human motion detection (인체 동작 감지)

Carbon nanotubes (CNTs) are popular in strain sensors due to their exceptional electrical conductivity, flexibility, and sensitivity to deformation. In this study, a high-sensitivity strain sensor was fabricated by spray-coating CNT ink onto various paper substrates, with "lint-free paper" identified as the optimal choice. A total of 10 spray cycles ensured a reliable conductive coating. To enhance durability and broaden application potential, a PET protective layer was incorporated. The sensor's performance was assessed through bending tests using a push-pull gauge across a strain range of 0-2%. The lint-free paper-based sensor exhibited a consistent response up to 1.4% strain. The measured gauge factors (GF) were 121.370 in the 0-0.3% range, 70.999 in the 0.3-0.8% range, and 20.935 in the 0.8-1.4% range. A precise response was also noted when adjusting the bending angle in 1° increments, particularly within the 0-20° range. Additionally, the sensor was tested on the human wrist, confirming its viability for wearable applications. These findings indicate that the lint-free paper-based CNT strain sensor offers high sensitivity and measurement precision within narrow strain ranges. Its lightweight structure and flexible design suggest strong potential for practical use in areas such as sports monitoring and human motion detection.

Manuscript received: August 27, 2025 / Revised: October 13, 2025 / Accepted: October 17, 2025
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2025

NOMENCLATURE

r = Bending Radius
 l = Arc Length
 C = Chord Length
 θ = Bending Angle

1. 서론

탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)는 우수한 기계적 유연성과

전기적 특성을 동시에 보유하고 있어 차세대 유연 전자소자로 주목받고 있다[1-11]. CNT는 간단한 코팅 공정을 통해 유연한 전자소자로 구현이 가능하다는 점에서 착용형 헬스케어 디바이스 [3-5], 로보틱스[7,8] 등 여러 분야에서 응용 가능성이 보고되고 있으며, 특히 다양한 운동 특성 측정을 위한 스트레인 센서로 많이 연구되고 있다.

CNT 기반 스트레인 센서는 다양한 기판에 잉크젯 프린팅 [6,9], 스크린 프린팅[5], 레이저 커팅[10] 등 간편한 공정을 통해 제작이 가능하며, 반복적인 변형에도 안정적인 전기적 신호를 출력할 수 있음이 보고되어 왔다. 특히 CNT는 미세한 굽힘이나 인장 변형에 따라 저항이 변화하는 피에조저항 특성을 기반으로 높은 감도를 구현할 수 있다는 점에서, 기존 금속 기반 센서에

비해 우수한 성능을 발휘한다는 장점이 있다[2,3].

많은 연구에서는 이러한 CNT 스트레인 센서가 30° 이상의 굽힘 등 비교적 큰 변형에 대해 높은 게이지 팩터(Gauge Factor)를 보이며, 인체의 관절 움직임이나 웨어러블 장치의 동작을 모니터링하는 데 활용될 수 있음을 입증하였다[4,5,10]. 그러나 실제 착용형 센서의 경우, 손가락이나 얼굴 근육, 피부 미세 움직임 등 매우 작은 각도의 정밀한 감지가 필요한 상황이 많다.

예를 들어, 진전(Tremor) 같은 신경계 증상은 각도 크기가 주요 지표이며, 아주 작은 진폭 변화를 잡는 것이 치료 효과 판단에 필요하다[12]. 실제로 진전은 수 Hz 대의 리듬을 가진 주기적인 각도 운동으로 나타나며, 임상에서는 그 변화량을 정량화해 치료 반응 여부를 평가한다. 그럼에도 불구하고 기존 연구들은 주로 큰 각도에서의 응답성을 평가하는 데 집중되어 있어, 1° 이하의 미세 굽힘 변화를 정량적으로 감지할 수 있는 고감도 센서에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 간단한 제작 공정을 유지하면서도 미세 변형에 대한 정량적 전기적 응답 특성을 확보하는 연구는 여전히 한계가 존재한다.

최근 일부 연구에서는 종이 기반 기판[5], CNT/그래핀 복합체[10], CNT/폴리머 복합체[4] 등을 활용하여 감도 향상을 시도하고 있으나, 이들 또한 주로 큰 변형 영역에서의 성능 검증에 초점이 맞춰져 있어, 실제 미세 굽힘 응용에 적합한지에 대한 평가가 부족하다.

이에 본 연구에서는 CNT 스프레이 코팅 공정을 이용하여 단순하고 비용 효율적인 방법으로 제작 가능한, 1° 수준의 미세 굽힘 변형을 정량적으로 구별할 수 있는 스트레인 센서를 개발하였다. 제작된 센서는 반복 굽힘 하에서도 높은 재현성과 안정적인 전기적 응답을 보였으며, 기존 연구 대비 더욱 정밀한 굽힘 각도 감지가 가능함을 실험적으로 입증하였다.

2. 센서 제작

2.1 CNT 센서 제작 원리 및 방식 선정

CNT 기반 스트레인 센서가 굽힘 하중을 받을 때 전기 저항이 감소하는 현상을 보여준다. 센서가 굽힘을 받을 경우 CNT 네트워크 내 접촉점의 수와 배치가 변하여 전도 경로가 재구성되며, 이에 따라 저항이 변화한다. 이러한 메커니즘은 Jehn et al. (2021)[9]에서도 굽힘 변형 실험을 통해 보고된 바 있다. 이는 전기적 경로의 변화에 따른 저항 변화를 측정하는 압저항 효과(Piezoresistive Effect)에 기반한 것이다. CNT는 그 자체로 전도성을 가지며, 서로 접촉된 상태로 무작위적으로 분포된 CNT간의 전류가 흐를 수 있는 경로가 만들어진다[11]. 본 연구에서는 IPA를 용매로 사용한 CNT 분산액을 스프레이 코팅을 통해 기판 위에 인쇄함으로써 이러한 구조를 형성하였다.

코팅 직후 용매(IPA)의 증발과 함께 CNT들이 기판 표면에 남아 무작위로 배열되며, CNT 간의 물리적 접촉에 의해 전도성 경로가 형성된다. 이때 다층 코팅을 통해 CNT 밀도를 증가시

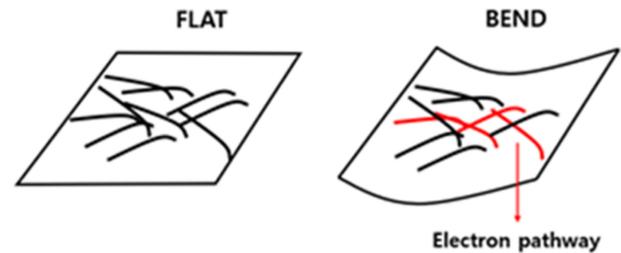


Fig. 1 Working principle of CNT-based strain sensing

키면 입자 간 접촉이 많아져 전도성이 향상된다. 외부에서 인장 또는 압축 등 기계적 자극이 가해지면 CNT 간의 상대적인 위치가 변하며 네트워크 구조가 재배열되고, 이로 인해 전기적 경로가 바뀌면서 전체 저항이 변화하게 된다.

CNT를 기판에 인쇄하기 위한 공정에는 잉크젯 프린팅, 스크린 프린팅, 드롭 캐스팅, 스프레이 코팅 등 다양한 방식이 있다. 본 연구에서는 이 중 스프레이 코팅(Spray Coating) 방법을 채택하였다. 이는 간단한 장비만으로도 대면적 균일 코팅이 가능하고, 제작 공정이 빠르며, 다양한 기판에 적용할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 코팅 횟수를 조절함으로써 민감도 제어가 가능하며, 반복성 있는 실험과 대량 제작 측면에서도 효율적이다. 따라서 본 연구에서는 간단성, 재현성, 고감도 특성 확보를 모두 만족할 수 있는 공정으로 스프레이 코팅법을 선택하였다.

2.2 사용 물질 및 제작 방법

일반적으로 CNT 기반 센서 제작에는 CNT 분말, 용매(IPA 또는 물), 그리고 계면활성제를 통한 분산 안정화 또는 화학적 기능화 공정이 활용된다. Jehn 등은 CNT/PDMS 복합 잉크 제작 시 Triton X-100을 첨가하여 CNT를 수용액에 안정적으로 분산시켰으며[9], Choudhary 등은 그래핀-CNT 복합 잉크 제조 과정에서 Triton X-100을 사용하여 용액의 균질성을 확보하였다[10]. 또한 Wang 등은 CNT/PDMS 복합 센서 제작 시 Triton X-100을 분산제로 사용하여 안정적인 수성 CNT 잉크를 제조하고 이를 스프레이 방식으로 적층하였다[7]. 이처럼 Triton X-100은 CNT 분산을 위한 대표적인 계면활성제로 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 이러한 기존 연구 동향을 바탕으로, 평균 지름 15-25 nm, 길이 5-15 μm 의 MWCNT를 IPA에 분산시키고, 분산 안정화를 위해 Triton X-100을 첨가하여 CNT 잉크를 조제하고자 하였다. 이후 이 잉크를 무진지(Lint-free Paper), 한지(Korean Paper), 일반 종이, PCB 기판 위에 스프레이 코팅하고자 하였으며, Wave A900 Airbrush (노즐 직경 0.7 mm)를 사용하였다. 코팅 시 노즐-기판 거리는 약 15 cm로 유지하였으며, 분사 시간은 약 3 ± 1 s 범위 내에서 10회 반복 분사하였다. 최대한 이러한 조건을 유지하여 CNT 층의 균일한 도포와 재현성을 확보하고자 하였다. 구체적인 코팅 조건 및 사용 기판의 특성은 Table 1에 요약하였다.

센서의 구조는 Fig. 2에 제시된 모식도와 같이 구현하였다. 앞면에서는 종이 기판 위에 폭 5 mm의 CNT 코팅층이 형성되도록

Table 1. Spray-coating parameters used in this work

Parameter	Value / Setting
Nozzle diameter	0.7 mm (airbrush)
Atomizing pressure	14 psi (≈ 0.97 bar)
Nozzle-substrate distance	~ 15 cm
Spray duration per pass	$3 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$
Passes	10
Drying between passes	Room temperature, 5 min after each pass
Final drying	Room temperature, 60 min (after 10th pass)
Substrate pre-treatment	Substrate pre-treatment

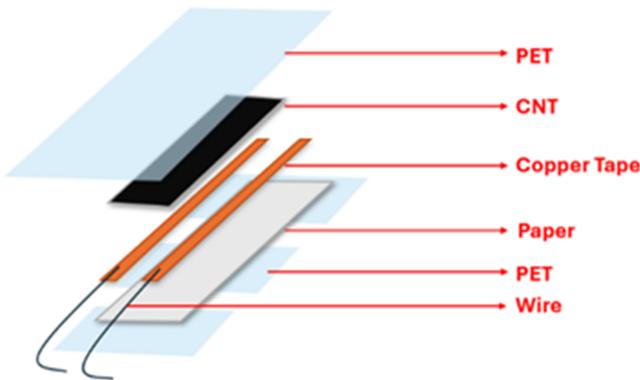


Fig. 2 Structural schematics of the fabricated paper-based strain sensor

하였으며, 코팅 영역 양 끝에는 전극으로서 구리테이프를 부착하고 외부 계측 장비와 연결하기 위한 전선을 배선하였다. 또한 기계적 안정성과 외부 충격에 대한 내구성을 높이기 위해 앞면 전체에 두께 110 μm 의 PET 필름을 부착하였다. 뒷면에서는 기관의 굽힘이 원활하게 이루어지도록 PET 필름을 세 구역으로 분할하여 부착함으로써 기계적 유연성과 내구성을 동시에 확보하고자 하였다. 이러한 층별 구조를 통해 CNT 층은 변형에 따른 전기적 신호 변화를 감지하고, 구리테이프는 전기 신호를 외부 회로로 전달하며, PET 필름은 앞·뒷면에서 소자를 보호하면서도 반복적인 굽힘 변형에 적합하도록 설계되었다.

또한 전극 연결부의 접촉저항 영향을 확인하기 위하여 동일 조건으로 제작된 센서 10개를 반복 측정하였다. 그 결과 접촉부 저항은 전체 초기 저항의 1% 미만으로 나타났다. 이를 통해 구리테이프 전극의 접촉저항은 센서 성능에 유의미한 영향을 주지 않으며, 센서의 응답 특성은 CNT 층의 저항 변화에 의해 결정됨을 확인하였다.

2.3 센서 제작

Fig. 3은 스프레이 코팅 과정을 포함하여 10회 코팅 후의 결과를 보여준다. (left)는 스프레이 장치와 기관의 모습, (right)는

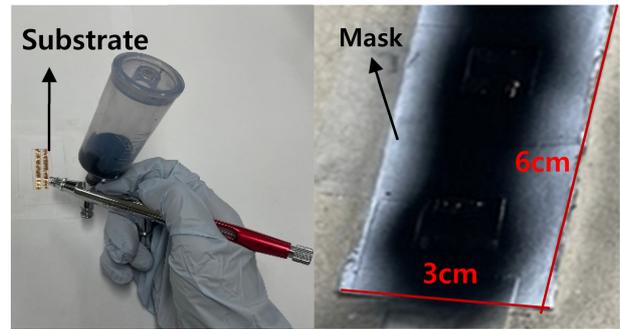


Fig. 3 Spray coating apparatus (left) and coated sample (right)

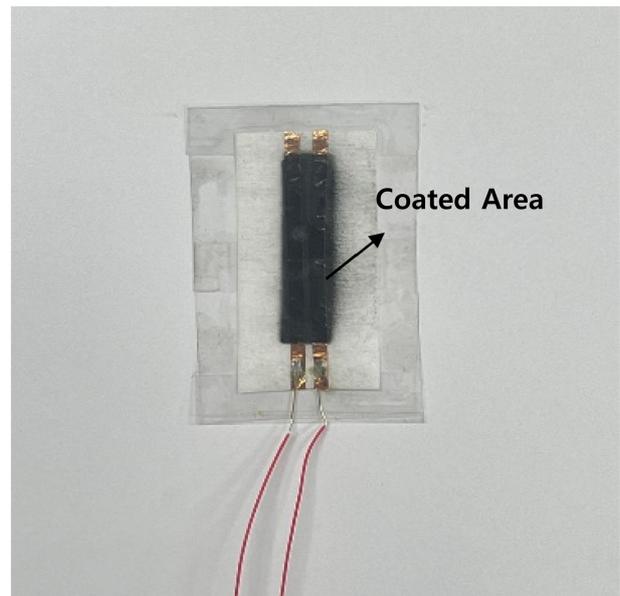


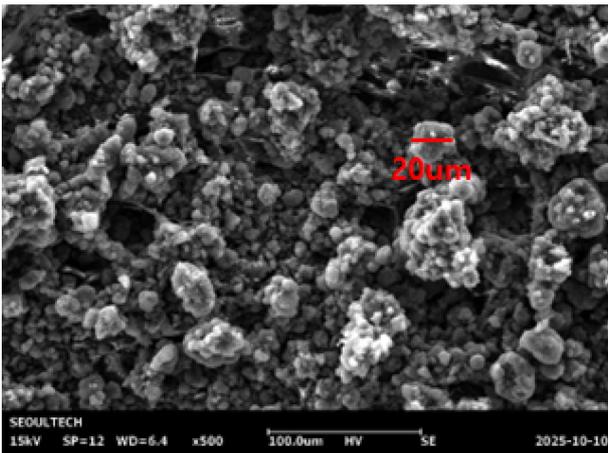
Fig. 4 Completed strain sensor on lint-free paper substrate

코팅이 완료된 센서의 모습을 나타낸다. Fig. 4에는 제작이 완료된 센서의 최종 외형을 제시하였다.

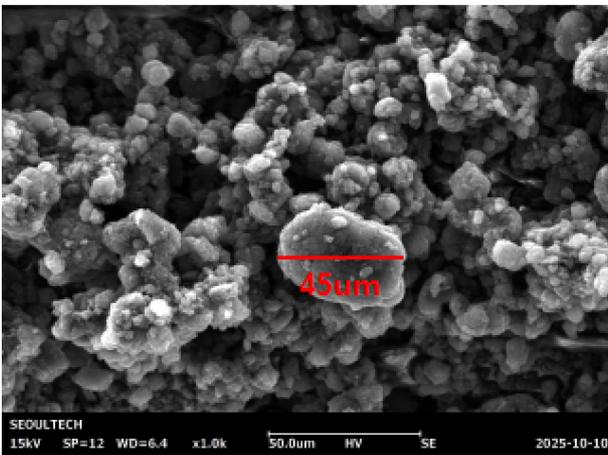
MWCNT (1 wt%, 0.25 g), IPA (24.5 g), Triton-X-100 (1 wt%, 0.25 g)을 혼합하여 25 g의 잉크를 2회 제조하였고, 총 50 g의 잉크를 확보하였다. 제조된 잉크는 초음파 분산기를 이용하여 1시간 동안 분산하였으며, 이후 교반기(500 rpm)를 사용하여 20분간 추가로 혼합하였다.

두께 300 μm , 크기 40 mm \times 30 mm의 기관에 CNT는 폭 5 mm의 선형 패턴으로 코팅하였으며, 코팅 영역 양 끝에는 구리테이프를 두 줄 부착하였다. 코팅 횟수는 센서 특성 확보를 위한 실험 조건 중 하나로 설정하였으며, 본 연구에서는 기관 선정 실험과 동일한 조건에 따라 총 10회 반복 코팅을 수행하였다. 이후 상온에서 1시간 동안 자연 건조하였다. 센서의 내구성과 반복성 향상을 위하여, 두께 110 μm 의 PET 필름을 센서 양면에 부착하였다. 최종적으로 크기 50 mm \times 40 mm, 두께 약 520 μm 의 스트레인 센서를 완성하였다.

또한 본 연구에서는 스프레이 코팅의 반복성을 확보하기 위하여 분사 거리(15 cm), 분사 시간(3 s)을 최대한 일정하게 유지하였다. 각 코팅 사이에는 5분의 간격을 두어 용매가 부분적으로



(a) ×500



(b) ×1000

Fig. 5 SEM images of the CNT layer formed on the lint-free paper substrate after 10 spray coatings

증발한 후 다음 층이 형성되도록 하였으며, 동일 조건으로 제작된 시편 5개에 대한 초기 저항 편차는 ±10% 이내로 확인되었다. 이를 통해 Hand-held 스프레이 방식에서도 적절한 공정 재현성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

또한, 코팅된 CNT 층의 미세 구조를 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM) 분석을 수행하였다. Fig. 5는 10회 스프레이 코팅 후 무진지 기판 위에 형성된 CNT 층의 표면을 500배 및 1,000배 배율로 관찰한 결과를 나타낸다. 낮은 배율(Fig. 5(a))에서는 CNT 입자들이 기판 전면에 균일하게 분포하며 다층 구조를 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 높은 배율(Fig. 5(b))에서는 입자 간 결합이 조밀하게 이루어져 연속적인 전도 경로가 형성된 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 스프레이 코팅 공정을 통해 CNT 잉크가 기판 표면에 안정적으로 적층되어, 균일한 전도성 네트워크가 형성되었음을 의미한다.

2.4 실험 장치 구성

2.4.1 공정 조건 확립을 위한 실험

센서의 출력 특성은 기판의 종류, CNT 코팅 횟수, 그리고 패키징

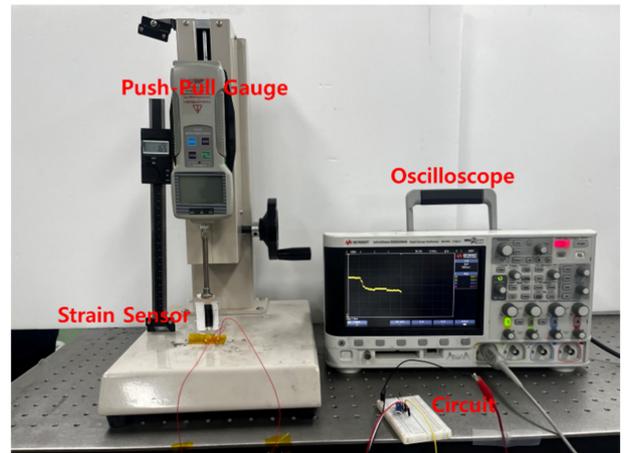


Fig. 6 Experimental setup for the strain sensor measurement

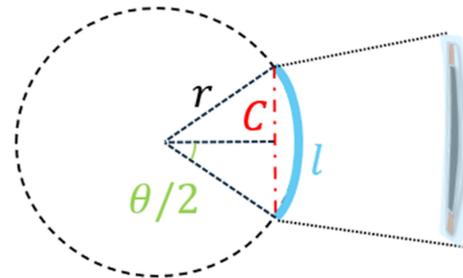


Fig. 7 Geometrical relationship between the height and the bending angle

방법에 따라 달라질 수 있다. 특히, 사용 환경에서의 압력 변화에 대해 센서가 얼마나 민감하고 안정적으로 반응하는지는 이러한 조건들에 크게 영향을 받는다. 이에 따라, 센서 제작 시 어떤 기판과 코팅 횟수, 패키징 공정을 적용하는 것이 가장 적절한지 확인하고자 본 실험을 진행하였다.

각 조합에 대해 10, 20, 30 g의 추를 순차적으로 올려 하중을 가하고, 오실로스코프를 통해 센서 출력 값의 변화를 관찰하여 조건별 반응 차이를 비교하였다.

2.4.2 스트레인 센서 특성 평가 실험

센서의 굽힘에 따른 반응을 정량적으로 분석하기 위해, Fig. 6와 같이 푸쉬-풀 게이지를 사용하였다. 푸쉬-풀 게이지를 통해 길이 방향으로 힘을 받게 되면 소자 전체에 굽힘이 일어나게 되는데, 이러한 굽힘 각도를 측정하여 특성을 분석하였다[5]. Fig. 7에 따르면, 굽힘 시 센서 양 끝 사이의 직선 거리 C는 식(1)과 같이 기하학적 관계로부터 계산된다.

$$C = 2r \times \sin(l/2r) \tag{1}$$

여기서 r은 반지름, l은 호의 길이로 센서의 길이이다. 센서가 굽힘을 받게 되면 저항이 변화하게 되는데, 이 저항 변화는 Fig. 8과 같이, 가변저항과 센서를 직렬로 연결한 전압 분배회로를 이용하여 측정하였다. 이 때, 발생하는 전압 변화는 오실

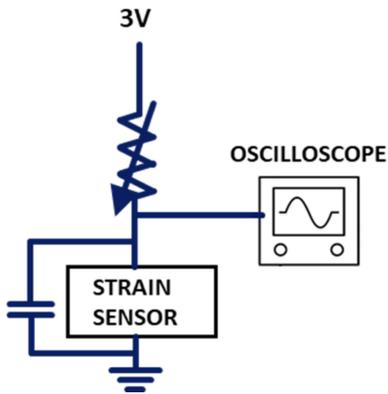


Fig. 8 Circuit configuration using voltage divider

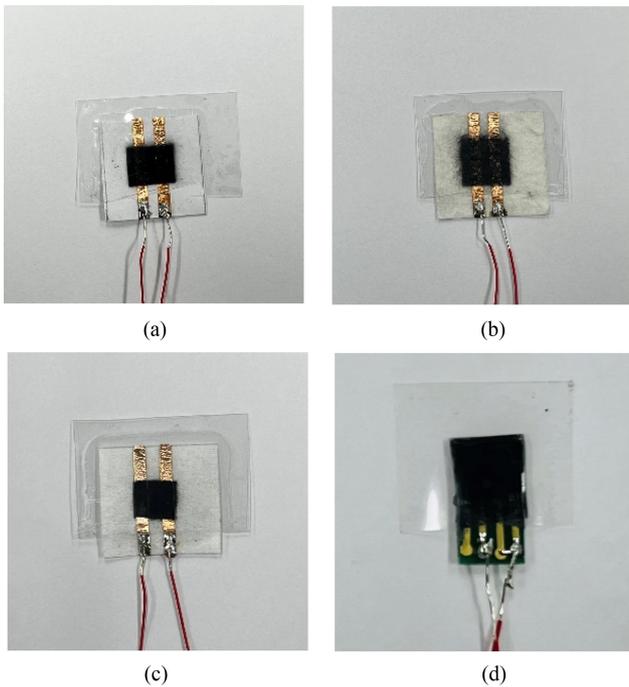


Fig. 9 Sensors fabricated using (a) common paper substrate, (b) Hanji substrate, (c) lint-free paper substrate, and (d) PCB substrate

로스코프를 통해 측정하였으며, 전압변화를 기반으로 최종적으로 민감도를 계산하여 특성을 분석하였다.

3. 실험

3.1 공정 조건 확립을 위한 실험에 따른 센서 특성 분석

본 연구는 스트레인 센서의 민감도에 영향을 미치는 주요 제작 변수인 기판의 종류, CNT 코팅 횟수, 패키징 방식에 따라 센서 특성이 어떻게 변화하는지를 실험적으로 분석하였다. 센서의 민감도(Sensitivity)는 식(2)와 같이 정의된다.

$$Sensitivity = \Delta R / R_0 \tag{2}$$

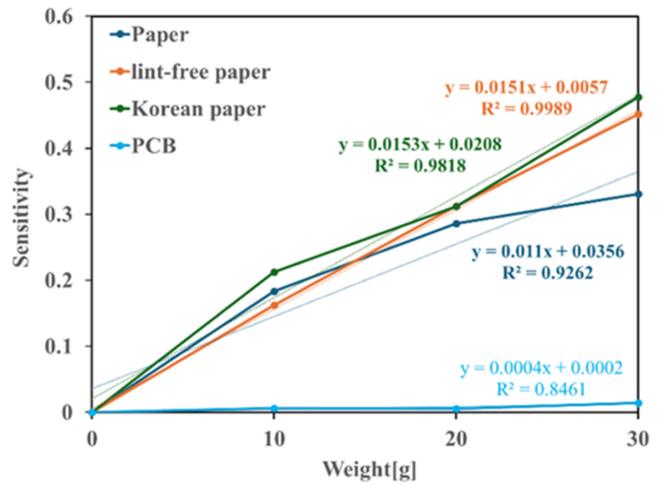


Fig. 10 Results of Sensitivity response comparison test of each substrate

3.1.1 기판 종류에 따른 특성 분석

Fig. 9은 종이, 무진지, 한지, PCB의 네 가지 기판을 기반으로 제작된 센서의 최종 모습을 보여준다. 센서 성능에 기판의 특성이 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해, 동일한 CNT 코팅 조건에서 종이, 무진지, 한지, PCB의 네 가지 기판을 비교하였다. 코팅은 각 기판에 10회 반복하여 진행하였으며, 그 결과 초기 저항은 종이 기판이 524Ω, PCB 기판이 230Ω, 무진지가 약 10kΩ, 한지가 약 9.5kΩ으로 나타났다. 이는 기판마다 CNT가 얼마나 잘 붙고 연결되었는지를 보여주는 지표로 해석할 수 있다.

각 기판에 대한 민감도 특성 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. 결과로부터 무진지를 사용한 센서가 가장 높은 민감도(기울기 0.0151)와 가장 뛰어난 선형성(R² = 0.9989)을 보이며, 무게 변화에 따라 저항이 일정하게 잘 증가함을 확인할 수 있다. 한지로 제작된 센서의 경우 민감도(0.0153)는 가장 높았지만, 초기부터 저항이 다소 높게 시작되어 작은 하중에 민감하게 반응하는 경향이 나타났다(R² = 0.9818). 종이 기판은 반응하는 정도(기울기 0.011)가 조금 낮았고 선형성도 비교적 떨어지는 편이었다(R² = 0.9262). 반면, PCB 기판은 민감도(0.0004)와 선형성(R² = 0.8461) 모두 가장 낮아 무게 변화에 거의 반응하지 않는 수준이었다.

이러한 결과는 각 기판의 표면 상태나 유연성 차이에서 비롯된 것으로 보인다. 특히 무진지는 표면이 매끄럽고 잘 휘어지는 특성 덕분에 외부 힘이 CNT 층에 효과적으로 전달되어 저항 변화가 더 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다.

3.1.2 CNT 코팅 횟수에 따른 특성 분석

Fig. 11은 CNT 코팅 횟수에 따른 민감도 결과를 보여준다. CNT의 코팅 횟수가 전도성 네트워크 형성과 민감도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여, 동일한 무진지 기판에 CNT를 각각 5회, 10회, 20회 스프레이 코팅하여 샘플을 제작하였다. 초기 저항은 각각 5회 코팅 시 약 150 kΩ, 10회 및 20회 코팅 시에는

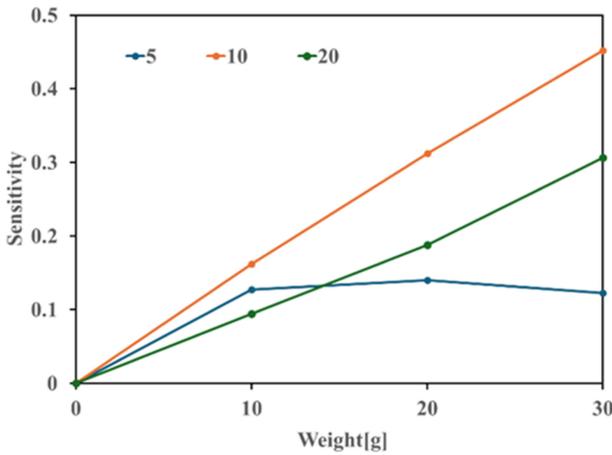


Fig. 11 Sensitivity results with respect to coating cycles

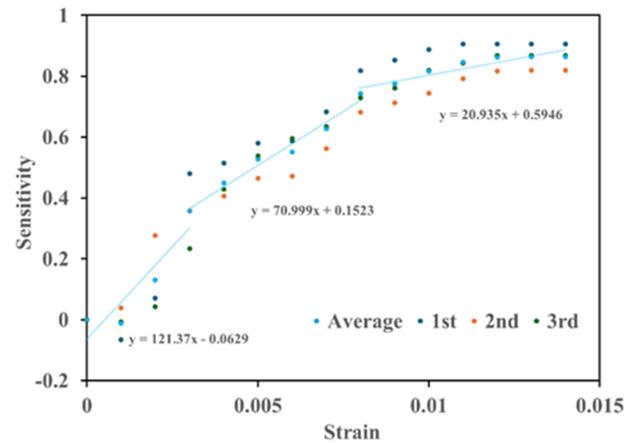


Fig. 13 Bending test results of the lint-free paper

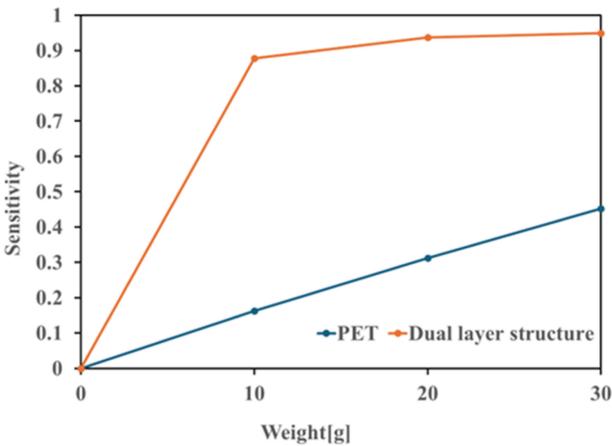


Fig. 12 Sensitivity comparison between single-layer and dual-layer structures

모두 약 10 kΩ으로 측정되었다. 이는 10회 이상 코팅 시 전도성 네트워크가 충분히 형성되어 저항 값이 포화됨을 의미한다. Fig. 11은 각각의 코팅 조건에 대한 민감도 측정 결과를 나타낸 것으로 10회 코팅된 센서가 가장 우수한 성능을 나타냈으며, 이는 전도성 확보와 기계적 민감도 간의 균형이 가장 잘 유지된 조건으로 해석된다. 5회 코팅의 경우 CNT 네트워크 형성이 불완전하여 접촉 저항의 불안정성과 낮은 신호 강도가 나타났으며, 20회 코팅된 샘플은 CNT 층이 과도하게 형성되어 변형이 효과적으로 전달되지 못함에 따라 민감도가 오히려 저하되었다. 이는 CNT 코팅이 너무 적을 경우 전도성 확보가 제한되고, 과도할 경우 기계적 민감도가 저하됨을 확인할 수 있다.

3.1.3 패키징 방식에 따른 특성 분석

Fig. 12은 PET 단일 필름과 이중 구조(CNT가 코팅된 두 기판을 코팅 면이 서로 마주보도록 겹친 구조)를 적용한 센서의 민감도 측정 결과를 보여준다. 패키징 구조가 센서의 기계적 보호 및 응력 전달에 미치는 영향을 평가하기 위하여, PET 단일 필름과 이중 구조(CNT가 코팅된 두 기판을 코팅 면이 서로 마주보도록

겹친 구조)를 적용한 센서를 비교하였다. 초기 저항은 PET 단일층 적용 시 약 10kΩ, 이중 구조 적용 시 약 6.8kΩ으로 측정되었으며, 이는 이중 구조에서 보다 밀집된 CNT 네트워크가 형성되었음을 알 수 있다. 전체적으로 이중 구조 방식은 높은 민감도를 나타냈으나, 구조적 복잡성으로 인해 일부 비선형 응답이 관찰되었다. 반면, PET 단일층을 적용한 센서는 상대적으로 낮은 민감도를 보였으나, 패키징의 내구성과 유연성이 우수하고 기계적 변형에 따른 저항 변화가 선형적으로 안정되게 나타났다. 따라서, 센서의 응답 특성과 내구성을 종합적으로 고려할 때, PET 단일층 패키징이 보다 적합한 선택으로 판단된다.

수행한 여러 실험을 종합해보면, 기판 재질, CNT 코팅 횟수, 패키징 방식이 스트레인 센서의 성능에 유의미한 영향을 미침이 확인되었으며, 각 공정 요소는 상호 연계적으로 고려될 필요가 있다. 특히, 무진지 기판에 10회 CNT 코팅, PET 단일층 패키징을 적용한 조합이 가장 우수한 민감도 및 선형성을 보였으며, 이는 고신뢰성 스트레인 센서 개발을 위한 기반 조건으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

3.2 스트레인 센서 특성 평가 실험

앞선 3.1의 결과, 무진지를 기판으로 한 10회 코팅의 PET 패키징 센서가 적절하다는 결론으로부터 스트레인 센서를 제작하였다.

본 절에서는 무진지 기반 CNT 스트레인 센서의 기계적 민감도 특성을 정량적으로 평가하고, 반복 굽힘-복원 실험을 통해 응답 안정성과 신뢰성을 분석하였다. 이를 위해 푸쉬-풀 게이지를 활용하여 센서에 일정 범위의 변형률(0-1.4%) 및 굽힘 각도(0-20°, 1° 간격)를 반복적으로 인가하였으며, 이에 따른 전기적 저항 변화와 민감도를 측정하여 Gauge Factor를 구하였다. Gauge Factor는 식(3)을 통해 정의된다.

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta \epsilon} \tag{3}$$

여기서 ΔR은 인가된 변형률 Δε에 따른 저항 변화량이며, R₀는 초기 저항이다. 또한, 굽힘 변형에 대한 실제 변형률 Δε는 센서의

Table 2 Comparison of gauge factor (GF) and stretchability/strain range between this work and previous studies

Reference	Gauge factor (GF)	Stretchability / Strain range & notes
Yan et al., 2021 [1]	Varies widely	Wide range depending on method
Kanoun et al., 2014 [2]	Varies by fabrication	Application-dependent
Kanaparthi et al., 2016 [3]	Comparable or higher than CNT/graphene sensors	Low strain sensitivity
Wang et al., 2018 [4]	35.75 (tunable)	Up to 45% strain
Thiyagarajan et al., 2022 [5]	Max 31	Moderate bending/strain
Michalet et al., 2015 [6]	Low hysteresis, reproducible	Moderate strain range
Wang et al., 2023 [7]	Varies widely	Wide range depending on method
Waiyat et al., 2018 [8]	13.07 (tensile), 12.87 (compressive)	Tensile & compressive bending
Jehu et al., 2021 [9]	~linear, low hysteresis	Up to 40% strain
Singh et al., 2022 [10]	118	0-0.35% strain
This work, 2025	121.370 (0-0.3%), 70.999 (0.3-0.8%), 20.935 (0.8-1.4%)	Bending up to 1.4% strain; 0-20° (1° resolution)

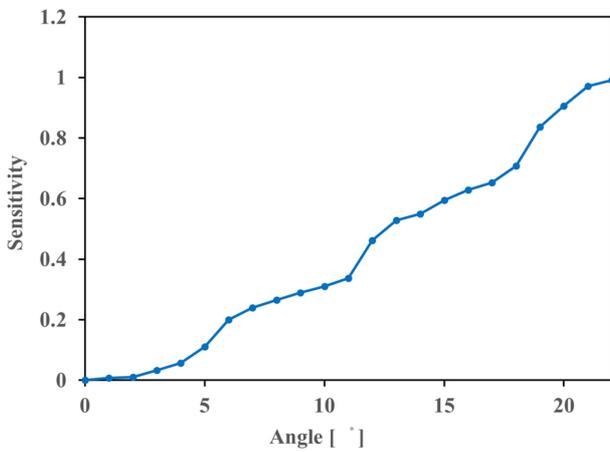


Fig. 14 Evaluation of bending characteristics in the 0-20° range

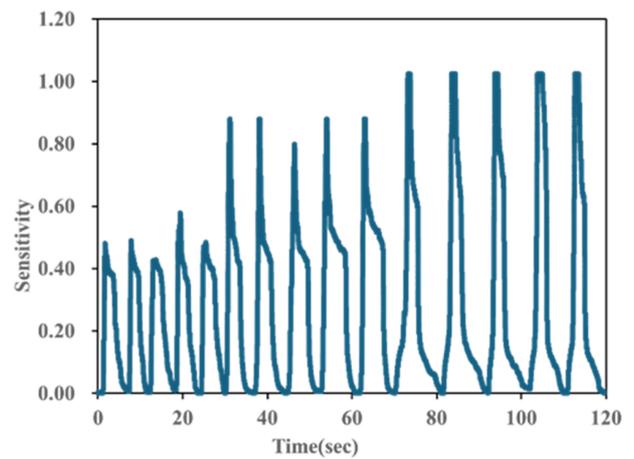


Fig. 15 Relative resistance change (Sensitivity) during repeated bending at 5°, 15°, and 20° (five cycles each)

두께 h 와 곡률 반지름 r 을 $\epsilon = h/2r$ 기반으로 계산하였다.

굽힘 실험을 통해 변형률 구간별 Gauge factor을 계산한 Fig. 13에 따르면, 0-0.3% 구간에서는 $GF \approx 121.370$, 0.3-0.8% 구간에서는 $GF \approx 70.999$, 0.8-1.4% 구간에서는 $GF \approx 20.935$ 로 도출되었다. 이는 센서가 낮은 변형률 구간에서 높은 민감도를 보이며, 변형률이 증가함에 따라 민감도가 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 특성은 낮은 응력 하에서는 CNT 네트워크가 민감하게 저항 변화를 유도하지만, 일정 수준 이상의 응력이 가해질 경우 전도 경로의 포화 또는 구조적 손상에 의해 감도 저하가 발생하는 것으로 해석된다.

Table 2에서 나타나듯, 본 센서는 좁은 변형 범위(0-0.3%)에서 $GF \approx 121.370$ 을 기록하여 기존 연구의 최고 수준인 Singh et al. (2022) [10]의 $GF \approx 118$ 을 상회하였다. 또한 0.3-0.8%와 0.8-1.4% 구간에서도 각각 $GF \approx 70.999$ 와 20.935 를 보여, 변형이 커짐에 따라 민감도가 감소하더라도 여전히 기존 연구[4,5,9]에서 보고된 값들과 비교해 우수한 성능을 유지하였다. 특히 변형 허용 범위는 최대 1.4%로 제한적이지만, 해당 범위 내에서의 정밀 감지 능력은 기존 CNT 기반 센서보다 한층 개선된 것으로 평가된다.

Fig. 14에 나타난 바와 같이, 센서는 0°에서 20°까지 1° 단위의 각도 변화에 따라 저항 변화(Sensitivity)가 점진적으로 증가하였다. 일부 구간에서 비선형성이 존재하지만, 전체적으로 각도 증가에 따른 $\Delta R/R$ 의 단조적 상승 경향이 유지되었으며, 이는 센서가 미세한 굽힘 변화에도 반응함을 보여준다.

또한, Fig. 15에 나타난 바와 같이, 5°, 15°, 20° 굽힘을 각각 5회 반복하여 총 120초 동안 민감도 변화를 측정된 결과, 각도 증가에 따라 최대 $\Delta R/R$ 값이 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 5°에서는 최대 민감도가 약 0.5 였으나, 15°에서는 약 0.9, 20°에서는 약 1.0 이상으로 나타나 각도 변화가 센서의 전기적 응답 폭에 직접적인 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 반복 변형 시 일관된 파형과 빠른 복원 특성이 유지되어, 센서가 반복 사용 환경에서도 우수한 반복성과 안정성을 보유함을 확인하였다.

Fig. 16(a)는 센서에 5° 굽힘을 약 1,000번 반복 가했을 때의 민감도를 나타낸 그래프이다. 전체 측정 구간 동안 민감도 값이 일정한 패턴을 유지하며 큰 변동 없이 반복적으로 응답한다. 이는 센서가 반복적인 외부 응력 인가에도 구조적 손상 없이

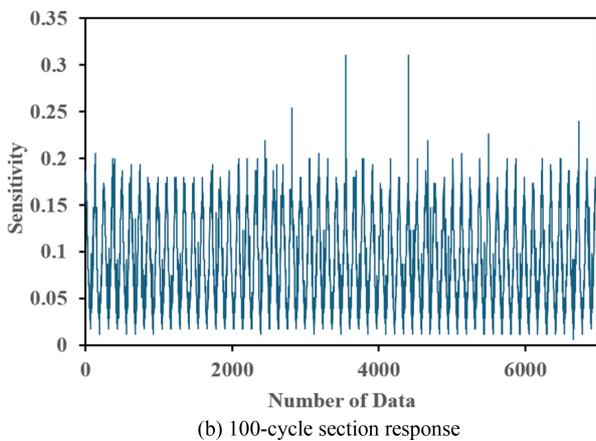
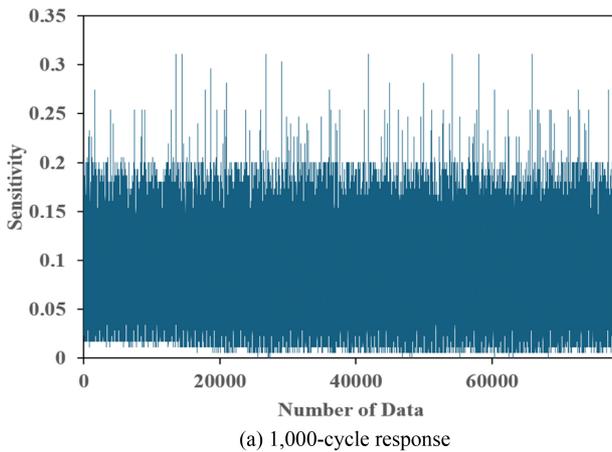


Fig. 16 Repetitive bending test results at 5° bending angle

안정적인 전기적 응답을 유지함을 의미하며, 실시간 모니터링 환경에서의 높은 반복성 및 신뢰도를 확보할 수 있음을 보여준다. 또한 Figs. 16(b)는 16(a) 그래프에서 대표적인 구간으로서 100회 굽힘 테스트를 보여준다.

종합적으로, 본 실험을 통해 무진지 기반 CNT 스트레인 센서는 낮은 변형률 구간에서 우수한 민감도를 가지며, 굽힘 각도의 세밀한 변화에도 안정적인 응답을 제공함을 확인하였다. 또한 5°, 15°, 20° 반복 굽힘 실험에서 각도 증가에 따라 최대 $\Delta R/R$ 값이 뚜렷하게 상승하고, 반복적인 변형-복원 사이클에서도 민감도가 유지되어, 본 센서가 다양한 정밀 스트레인 감지 시스템 또는 웨어러블 센서로서 적용 가능성이 높음을 확인하였다.

3.3 스트레인 센서의 신체 적용 가능성 평가

본 절에서는 무진지 기반 CNT 스트레인 센서를 인체에 부착하여 실제 운동 환경에서의 동작 감지 성능을 평가하고, 센서의 신체 적용 가능성을 검증하였다. 이를 위해 센서를 착용자의 손목 부위에 직접 부착한 후, 골프 스윙 및 탁구 동작 수행 시 발생하는 손목의 굽힘 움직임에 따른 전기적 응답을 측정하였다. 측정된 신호는 시간에 따른 출력 전압 변화로 기록되었으며, 이를 통해 미세 동작 감지 능력 및 반복 동작에 대한 복원성 여부를 분석하였다.

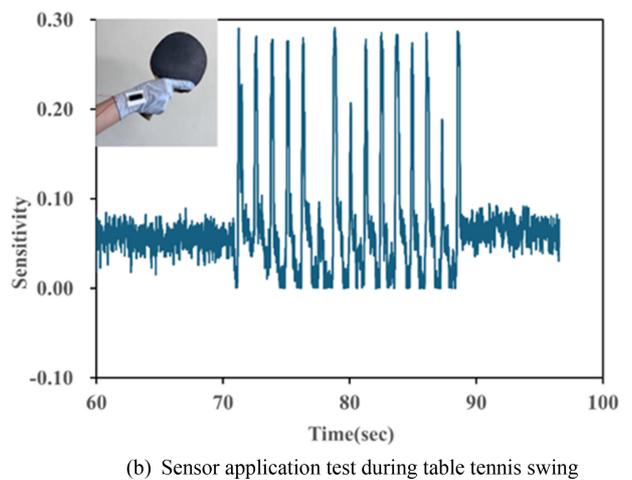
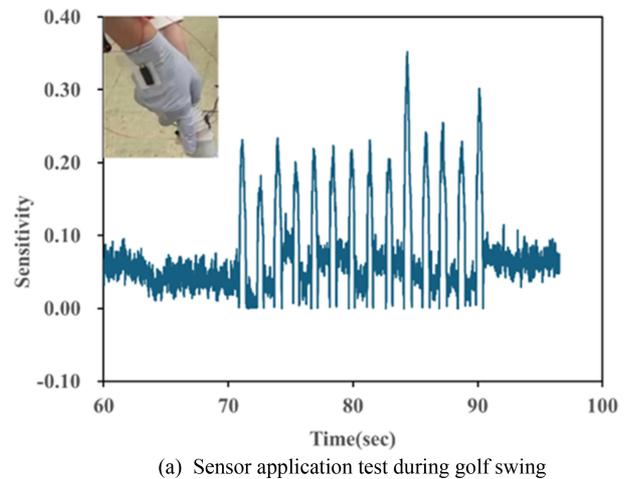


Fig. 17 Application test results of the fabricated strain sensor in sports motion experiments

골프 및 탁구는 일반적으로 손목을 고정된 상태에서 동작을 수행하는 것이 기본 자세이나, 실제 운동 수행 중에는 손목이 미세하게 흔들리는 경우가 자주 발생한다. 본 실험에서는 이러한 손목의 미세한 흔들림에 대해 센서가 민감하게 반응하여 출력 신호를 생성하는 것이 관찰되었다. Figs. 17(a)는 골프 스윙 동작, 17(b)는 탁구 스윙 동작에서 기록된 출력 신호를 각각 보여준다. 출력 신호 분석 결과, 손목이 고정된 자세를 유지하고 운동하는 경우 일정한 출력을 유지하는 반면, 손목의 위치가 불안정하거나 미세한 흔들림이 발생하는 상황에서는 진폭 및 주기의 불규칙성이 증가하였다. 이는 해당 센서가 단순한 관절의 굽힘뿐만 아니라 자세 안정성 및 미세한 움직임 변화를 정량적으로 감지할 수 있는 민감도를 갖추고 있음을 확인할 수 있다.

또한, 동일 동작을 반복 수행하였을 때에도 센서의 출력은 초기 상태로 안정적으로 복원되었으며, 반복 주기 간의 신호 차이가 크지 않게 유지되었다. 이는 센서가 반복적인 기계적 응력 하에서도 구조적 안정성을 유지하며, 높은 신뢰도의 전기적 응답을 지속적으로 제공할 수 있음을 의미한다.

종합적으로, 무진지 기반 CNT 스트레인 센서는 인체 부착 환경에서도 우수한 동작 감지 성능을 발휘하였으며, 운동 중 발생하는 미세한 흔들림까지 정밀하게 감지할 수 있는 가능성을 입증하였다.

Fig. 17은 특정 동작 시 민감도 응답에 피크가 나타나 동작 이벤트를 민감하게 감지할 수 있음을 보여준다. 다만, 본 연구에서는 각도·각속도와 $\Delta R/R$ 간의 정량적 상관관계까지는 제시하지 못하였다. 이는 측정장비의 한계로 인한 부분이며, 향후 IMU 등과 병행 측정을 통해 민감도와 각도·각속도 간 상관성을 규명한다면 센서의 정밀성과 신뢰성을 보다 명확히 제시할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 간단한 스프레이 코팅 공정을 통해 제작이 가능하며, 미세 변형 감지에 최적화된 무진지 기반 CNT 스트레인 센서를 개발하였다. 다양한 기판 재질과 CNT 코팅 횟수, 패키징 방식에 따른 센서 특성을 비교 분석한 결과, 무진지 기판과 10회 코팅, 단일 PET 패키징 센서가 우수한 민감도와 선형성을 나타냄을 확인하였다. 따라서 위 센서는 높은 민감도와 우수한 선형성, 반복 사용에 따른 내구성을 동시에 만족시키는 최적 조건으로 도출되었다.

정량적인 변형을 실험에서는 0-1.4% 구간에서 선형적인 전압 변화를 보였으며, 특히 0-0.3%의 변형률 구간에서 평균 Gauge factor가 121.370로 나타나는 등 매우 높은 민감도를 확인하였다. 또한, 0-20° 범위에서 1° 단위로 측정이 가능하였으며 여러 번 반복실험에도 균일한 특성을 나타내었다. 이러한 특성으로 제작된 소자가 세밀한 각도 변화 감지가 가능함을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

인체 착용 실험에서는 손목에 부착하여 실제 운동 동작을 측정 한 결과, 운동 시 발생하는 미세 움직임에 민감하게 반응하는 전기적 신호가 검출되었으며, 동작 반복 시 높은 재현성과 신뢰성이 확보됨을 확인하였다.

이러한 결과를 종합하면, 본 연구에서 개발한 무진지 기반 CNT 스트레인 센서는 단순한 제작 공정으로 우수한 민감도, 정밀도, 반복 신뢰성을 확보할 수 있음을 보여주었다. 특히 미세 변형 및 각도 변화를 정량적으로 감지할 수 있는 특성을 기반으로, 스포츠 동작 모니터링에서의 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Yan, T., Wu, Y., Yi, W., Pan, Z., (2021), Recent progress on fabrication of carbon nanotube-based flexible conductive networks for resistive-type strain sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 327, 112755.
2. Kanoun, O., Müller, C., Benchirouf, A., Sanli, A., Dinh, T. N., Al-Hamry, A., Bu, L., Gerlach, C., Bouhamed, A., (2014), Flexible carbon nanotube films for high performance strain sensors, *Sensors*, 14(6), 10042-10071.
3. Kanaparthi, S., Badhulika, S., (2016), Solvent-free fabrication of a biodegradable all-carbon paper based field effect transistor for human motion detection through strain sensing, *Green Chemistry*, 18(12), 3640-3646.
4. Wang, X., Li, J., Song, H., Huang, H., Gou, J., (2018), Highly stretchable and wearable strain sensor based on printable carbon nanotube layers/polydimethylsiloxane composites with adjustable sensitivity, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(8), 7371-7380.
5. Thiyagarajan, K., Rajini, G. K., Maji, D., (2022), Fully printed MWCNT strain sensor over paper substrate for human motion monitoring, *Flexible and Printed Electronics*, 7(4), 045003.
6. Michelis, F., Bodelot, L., Bonnassieux, Y., Lebental, B., (2015), Highly reproducible, hysteresis-free, flexible strain sensors by inkjet printing of carbon nanotubes, *Carbon*, 95, 1020-1026.
7. Wang, R., Sun, L., Zhu, X., Ge, W., Li, H., Li, Z., Lan, H., (2023), Carbon nanotube-based strain sensors: Structures, fabrication, and applications, *Advanced Materials Technologies*, 8(1), 2200855.
8. Wajahat, M., Lee, S., Kim, J. H., Chang, W. S., Pyo, J., Cho, S. H., Seol, S. K., (2018), Flexible strain sensors fabricated by meniscus-guided printing of carbon nanotube-polymer composites, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(23), 19999-20005.
9. Jehn, J., Sautter, M., Neumaier, P., Dörsam, E., (2021), Fully inkjet-printed carbon nanotube-PDMS-based strain sensor: Temperature response, compressive and tensile bending properties, and fatigue investigations, *IEEE Access*, 9, 72207-72216.
10. Singh, K., Gupta, M., Tripathi, C. C., (2022), Fabrication of flexible and sensitive laser-patterned serpentine-structured graphene-CNT paper for strain sensor applications, *Applied Physics A*, 128(12), 1131.
11. Tortorich, R. P., Choi, J. W., (2013), Inkjet printing of carbon nanotubes, *Nanomaterials*, 3(3), 453-468.
12. Abusrair, A. H., Elsekaily, W., Bohlega, S., (2022), Tremor in Parkinson's disease: from pathophysiology to advanced therapies, *Tremor and Other Hyperkinetic Movements*, 12, 29.

**Yoon Ji Yum**

Undergraduate Student, Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. Her research interests include micro/nano fabrication, MEMS, and sensors.

E-mail: yyji0504@seoultech.ac.kr

**Ji Hyun Park**

Undergraduate Student, Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. Her research interests include micro/nano fabrication, MEMS, and sensors.

E-mail: jihyun@seoultech.ac.kr

**Sang Hoon Lee**

Professor in the Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is micro/nano fabrication, MEMS, and sensors.

E-mail: hyla@seoultech.ac.kr

체결력 유지 및 조립 응력을 최소화하기 위한 케이블 체인의 형상 최적설계

Shape Optimization of Cable Chain to Minimize Assembly Stress and Maintained Retention Force under Tensile Loading

김민제¹, 오민성², 황순재², 김도형³, 홍석무^{4,5,#}
Min Je Kim¹, Min Seong Oh², Soon Jae Hwang², Do Hyoung Kim³, and Seok Moo Hong^{4,5,#}

¹ 국립공주대학교 대학원 스마트모빌리티공학과 (Department of Smart Mobility Engineering, Graduate School, Kongju National University)
² 국립공주대학교 대학원 미래융합공학과 (Department of Future Convergence Engineering, Graduate School, Kongju National University)
³ 토마스케이블 주식회사 (Thomas Cable Co., Ltd.)
⁴ 국립공주대학교 미래자동차공학과 (Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University)
⁵ 국립공주대학교 그린카기술연구소 (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: Cable chain (케이블 체인), Finite element analysis (유한요소해석), Response surface methodology (반응표면법), Shape-optimization (형상 최적화)

Cable chains are essential in the semiconductor industry for preventing the twisting or sagging of moving cables. They can be broadly categorized into two types based on their fastening methods, with rivet-based assembly being the most common. An alternative method utilizes integral locking features without rivets, which simplifies manufacturing and reduces production costs. However, integral cable chains are more susceptible to breakage during assembly, limiting their use in various industrial environments. This study introduces a structural design approach aimed at minimizing localized stress during assembly while ensuring the cable chain meets the required retention force. Design variables were selected from the modifiable features of the integral cable chain. Through sensitivity analysis, we identified key variables that significantly influence the retention force, which allowed us to reduce the number of design iterations. By employing finite element analysis and response surface methodology, we derived an optimal shape that achieved the target pull-out force and resulted in a 9.7% reduction in assembly stress compared to the original design.

Manuscript received: August 28, 2025 / Revised: September 25, 2025 / Accepted: October 10, 2025

1. 서론

케이블 체인은 산업 자동화, 정밀 공정 장비에서 전력, 신호 케이블을 외부 손상과 과도한 굽힘, 꼬임으로부터 보호한다[1]. 클린룸 기반 생산 라인에서는 장비의 고정밀, 고반복 운용으로 인해 무빙 케이블의 신뢰성이 특히 중요하다[2].

기존에 상용화된 케이블 체인의 대부분은 리벳(Rivet)을 이용한 체결 방식으로 구성되어 있다. 이 방식은 상대적으로 구조적인 신뢰성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 제조 과정에서 부품 간 체결을 위한 별도의 공정과 작업이 요구되므로, 제조

단가 상승, 조립 시간 증가, 유지보수의 비효율성 등 여러 가지 실용적인 한계가 존재한다[3]. 이러한 문제를 개선하기 위해 최근에는 부품 간 리벳 없이 일체형으로 성형된 케이블 체인 구조가 개발 및 상용되고 있으며, 이는 제조 공정의 단순화와 생산 비용 절감이라는 측면에서 더 높은 가치를 지닌다.

이탈력(Extraction Force)은 체결된 부품에 인장 하중을 가하여 분리할 때, 분리 직전까지 저항하는 최대 반력으로 정의되며, 스냅핏(Snap-fit) 구조를 포함한 다양한 결합 구조의 유지력 평가에 일반적으로 활용되는 지표이다[4]. 일체형 체인은 설계 방식에 따라 체결 시 과도한 응력이 집중되거나, 반복 체결 과정에서

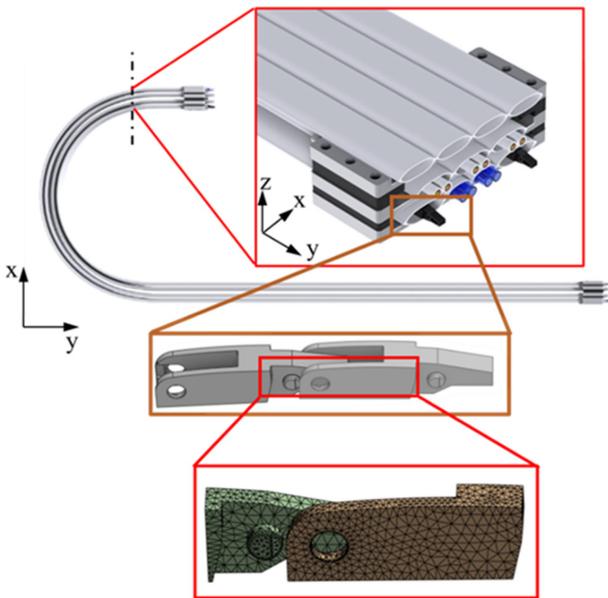


Fig. 1 FEA modeling and meshing

파손이 발생할 가능성이 있으며, 이러한 현상은 시스템 전체의 신뢰성 저하 및 예기치 못한 유지보수 비용 증가로 이어질 수 있다. 따라서 체결 후 유지력을 평가하기 위한 정량 지표인 이탈력 확보와 함께 조립 응력을 동시에 고려한 설계 접근이 필요하다.

그러나 케이블 체인의 설계 변수가 체결 응력과 이탈력에 미치는 영향을 동시에 고려하여 형상을 최적화한 연구는 부족하다. 이에 본 논문은 시뮬레이션 기반 반응표면법(Response Surface Methodology, RSM)을 적용하여, 이탈력 요구조건을 충족하면서 조립 중 최대 등가응력 최소화를 달성하는 설계방안을 제안한다.

먼저 케이블 체인의 체결-분리 과정을 비선형 구조 해석(Nonlinear Finite Element Analysis)으로 구현하였다. 다음으로 민감도 분석(Sensitivity Analysis)으로 각 변수의 영향도를 정량화하고 주요 변수를 선별하였다. 선정된 설계 변수들을 바탕으로 반응표면법을 진행하였으며, 최대 등가응력 최소화 및 이탈력 기준 충족을 동시에 만족하는 최적 형상을 도출하였다.

2. 케이블 체인 체결 프로세스 예측

2.1 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)

해석 모델은 무빙케이블 포드(Pod) 내부에 있는 상용 일체형 케이블 체인을 대상으로 구축하였다. 여기서 포드라 함은 반도체 생산시설 등 클린룸 환경에서 분진 유입을 차단하기 위하여 케이블 체인을 보호 피복하는 장치를 의미한다. 모델링은 3차원 CAD 프로그램인 CATIA V5를 이용하여 Fig. 1과 같이 구축하였다. 모델의 복잡도를 줄이고 해석 시간을 단축하기 위해 동일 형상의 링크 두 개만을 구현하였으며, 해석 결과에 영향을

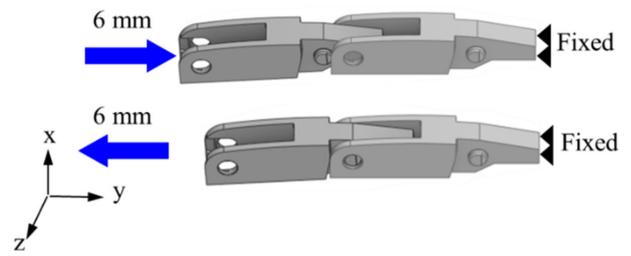


Fig. 2 FEA contact and boundary conditions

Table 1 Structure properties

Properties	Plastic, PA6 (30-35% glass fiber)
Density [kg/m ³]	1,350
Young's modulus [MPa]	5,469
Poisson's ratio [-]	0.35
Yield tensile strength [MPa]	141.4

미치지 않는 곡면 요소는 제거하여 단순화하였다. 또한 본 케이블 체인의 형상은 xy 평면을 기준으로 대칭이므로, 선형논문과 같은 방식으로 전체 모델의 절반인 1/2 모델을 적용하여 계산 효율을 높였다[5]. 해석에 사용된 메시는 총 8,306개의 요소로 구성되었으며, 비선형 거동 및 접촉 조건에 적합하도록 Hexa 요소와 Tetra 요소를 혼합하여 적용하였다.

N. Stefanoaca 외 2인은 유사한 재질인 PA6 GF60 스냅 핏 조립 후 유지력을 평가하기 위해 바디를 이탈방향으로 이동시켜 파손 또는 이탈 시점까지의 최대 반력을 이탈력으로 간주하였다[6]. 이 방법을 참고하여 일체형 케이블 체인의 체결 및 분리 과정을 구현하기 위해, Fig. 2와 같이 두 개의 링크 모델을 6 mm 간격으로 배치하였다. 또한 y 방향으로 체결과 분해 과정을 시뮬레이션 하였으며 이때 체결은 1 mm/s, 분해는 5 mm/min으로 설정하였다. 결합되는 링크의 y+ 방향 끝단에는 고정 경계 조건을 적용하여 링크간 상호 작용으로 인한 영향만을 고려하도록 하였다.

본 해석에 사용된 소재 물성은 Ansys Database을 참고하여 설정하였으며, 이때 사용된 데이터는 Table 1에 작성하였다[7].

2.2 기본 모델 해석 결과

본 절에서는 상용 일체형 케이블 체인을 기반으로 한 기본 해석 모델에 대한 체결 및 분리 시뮬레이션 결과를 제시하고, 구조적 문제점 및 최적설계의 필요성을 도출한다. Figs. 3(a)와 3(b)는 체결 및 분리 과정을 시간 순으로 시각화한 결과로, 링크 간 체결 시 접촉이 발생하며 구조적으로 강한 변형이 유도됨을 확인할 수 있다. 분리 과정 해석에서는 후크 구조에 의해 반력이 형성되며, 분리가 시작되는 시점부터 급격하게 반력이 감소한다.

체결 시 발생하는 최대등가응력은 Fig. 4(a)와 같이 시간에 따라 점진적으로 상승하며, 체결 직전에 최대값에 도달한다. 해당 응력은 약 125.0 MPa로 항복응력인 141.4 MPa에 근접한다.

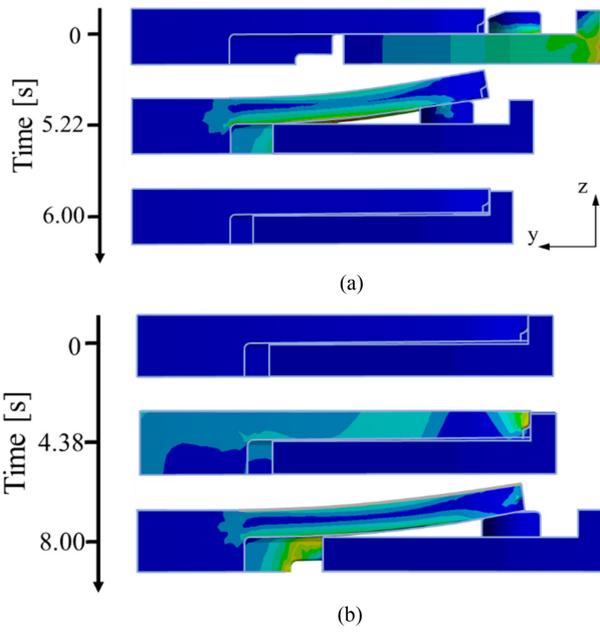


Fig. 3 (a) Assembly process of cable chain and (b) Unclipping processes of cable chain

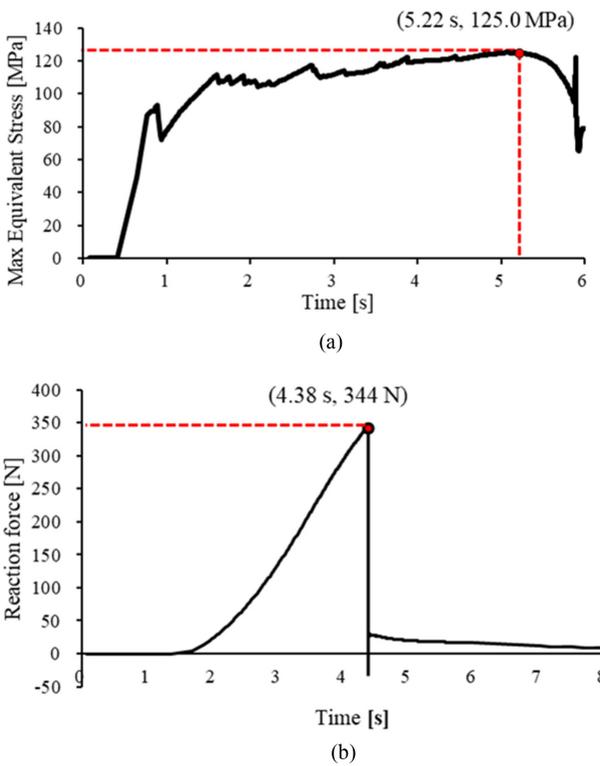


Fig. 4 (a) Maximum equivalent stress over time during assembly process and (b) Reaction force over time during the detachment (pull off) process

Fig. 4(b)는 분리해석 과정 중 발생하는 반력을 시간에 따라 나타낸 것으로, 최대 이탈력은 약 344 N 로 측정되었다.

Fig. 5은 조립과정 해석 중 최대 등가응력이 발생하는 시점의 응력분포를 나타낸 그림이다. 체결 직전 케이블체인이 돌기에

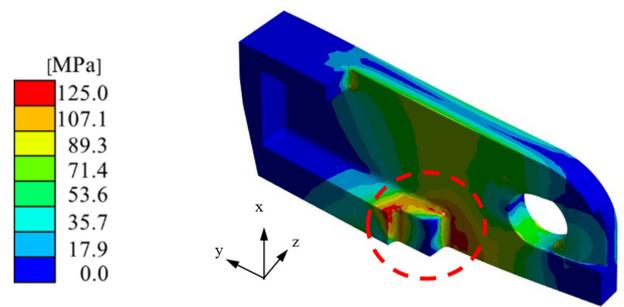


Fig. 5 Equivalent stress distribution at the moment of maximum stress during assembly process

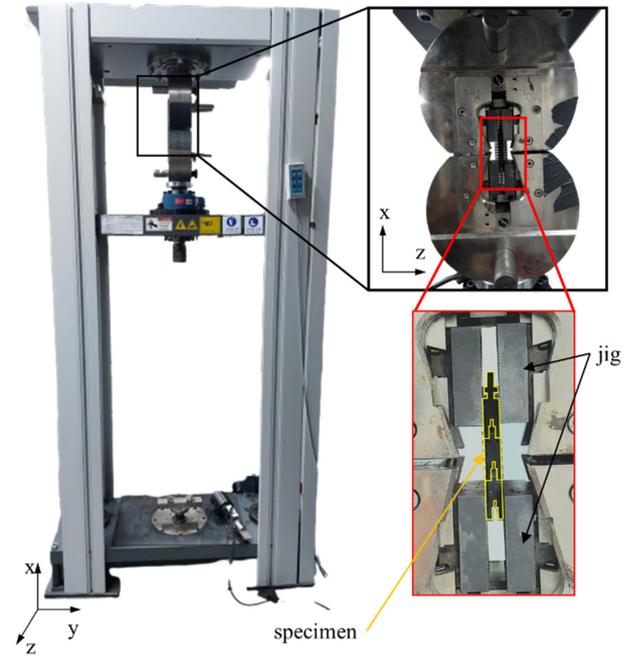


Fig. 6 Experiment setup

의해 양 날개부분이 바깥쪽으로 벌어지므로 내부 모서리에 응력이 집중됨을 확인할 수 있다. 해당 부위의 응력을 감소시키기 위해선 그 부위의 필렛 반경, 케이블체인 끝부분의 변위량 최소화, 벌어지는 날개부 길이 감소 등의 개선방향이 필요할 것으로 판단된다.

이상의 해석 결과를 종합하면, 기본 모델은 이탈력은 준수하나, 조립 과정 중 최대등가응력의 감소가 필요하다. 이에 따라 후속장에서는 체결력 확보와 함께 응력 집중을 완화할 수 있는 형상 최적화가 요구되며 이를 위해 설계 변수 정의 및 최적설계를 수행하였다.

2.3 해석 모델 검증

해석 결과의 타당성을 검증하기 위해, 체결된 일체형 케이블 체인의 분리 과정 중 최대 반력(이탈력)을 실험적으로 측정하였다. 실험은 인장시험기를 이용하여 수행하였으며, Fig. 6은 시험편이 지그에 고정된 상태를 보여준다. 체결된 케이블 체인 시편에

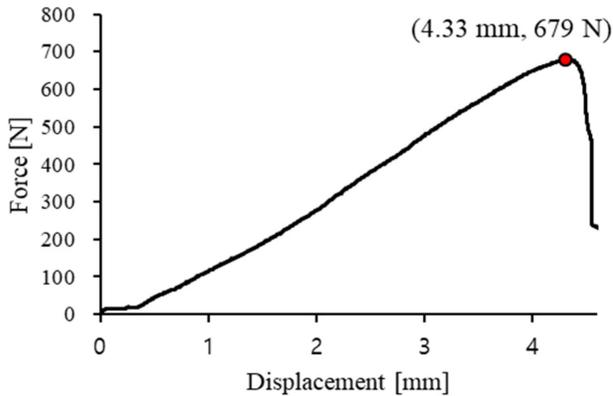


Fig. 7 Tensile test result: load–displacement curve of the cable chain

대해 y 방향으로 인장 하중을 가하였고, 파단 시까지의 하중–변위 데이터를 측정하였다.

플라스틱 소재 특성상 하중 속도가 결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해, 인장 속도는 인장시험기의 최소 속도인 5 mm/min으로 설정하였다. Fig. 7은 실험 중 측정된 하중–변위 곡선으로, 최대 인장 하중은 약 679 N으로 나타났다. 이는 2.2절에서 유한요소해석을 통해 도출된 최대 반력 값인 344 N의 약 두 배 수준으로 확인되었다.

해석 모델은 xy 평면 기준의 대칭성을 고려하여 전체 구조 중 절반만을 모델링하였기 때문에, 실험 결과와의 직접 비교를 위해서는 해석값을 두 배로 환산하여야 한다. 따라서, 실험 결과 값 679 N과 해석 환산값인 688 N이 약 1.3% 이내의 오차 범위 내에서 일치함을 확인할 수 있으며, 이는 본 해석 모델의 신뢰성을 입증하는 결과로 판단된다.

3. 케이블 체인 형상 최적화

3.1 파라미터 설정

본 논문에서 설계변수는 케이블 체인의 체결 과정 중 날개부가 휘어지는 때의 응력에 영향이 큰 5가지로 선정하였다. 각 설계 변수는 체결부 간극(H), 날개부 길이(L), 필렛 반경(R), 바깥쪽 너비(W1) 그리고 안쪽 너비(W2)이며, Fig. 8에 도시하였다. 기준이 되는 모델의 변수는 상용 일체형 케이블을 바탕으로 삼았으며 최대 등가 응력을 최소화하면서도 280 N의 이탈력을 보장하는 형상을 목표로 설계하였다. 초기 모델에 대한 각 변수를 변수범위의 중앙값으로 설정하였다. 케이블체인의 너비는 무빙 케이블 내 포드에 들어가야 하므로 7.2 mm이하로 제한하였다. L은 응력 민감도가 높다고 판단하여 범위를 넓게 설정하되, 음의 방향으로의 꺾임 방지 기능을 확보하기 위해 상한을 12 mm로 제한하였다. R은 금형 가공 한계를 고려하여 최소반경을 0.1 mm로 제한하였고 최대반경은 모델의 형상에서 벗어나지 않는 최대범위인 0.5 mm로 설정하였다. 각 설계변수의 범위는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Parameters – cable chain

Design variables	Interlocking gap [mm]	H
	Length [mm]	L
	Fillet radius [mm]	R
	Outer width [mm]	W1
	Inner width [mm]	W2
Objective function	Maximum equivalent stress	Min. $F(x) = \sigma_{max}$
Constraint	Minimum pull off force	$280 N \leq F_{PO}$
Design variables	H[mm]	$0.1 \leq H \leq 0.3$
	L[mm]	$10 \leq L \leq 12$
	R[mm]	$0.1 \leq R \leq 0.5$
	W1[mm]	$1.4 \leq W1 \leq 1.6$
	W2[mm]	$1.8 \leq W2 \leq 2.0$

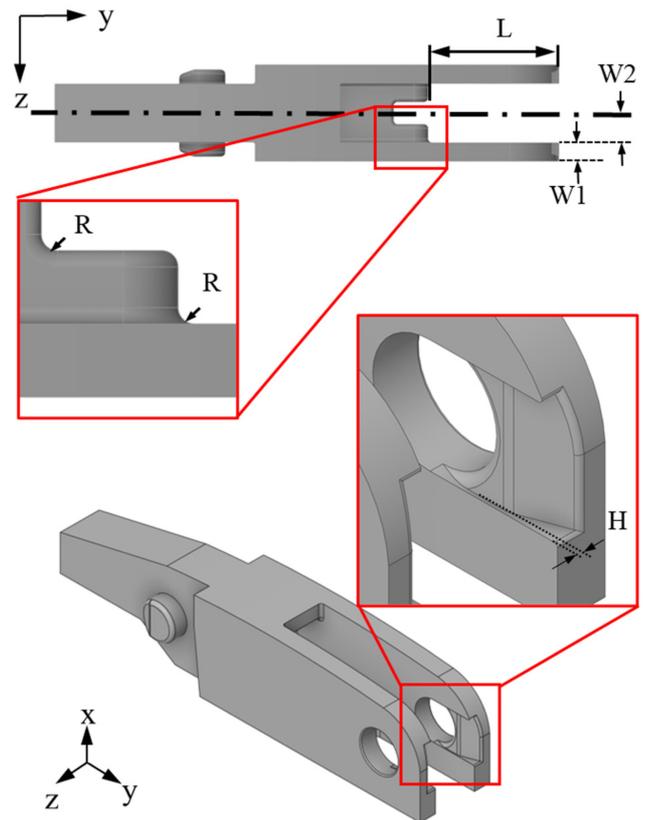


Fig. 8 Geometric model with defined parameters

3.2 민감도 분석

민감도 분석(Sensitivity Analysis)이란 설정한 설계변수들의 변화가 목적함수에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 때 사용된다. 설계변수의 영향도는 수치로 표현 가능하며, 시각화 방법으로는 파레토 차트(Pareto Chart)가 활용된다. 이는 각 변수의 수

Table 3 Design of experiment (DOE)

No.	Design variable = H, L, R, W1, W2					Object function	Constraint
	H [mm]	L [mm]	R [mm]	W1 [mm]	W2 [mm]	σ_{max} [MPa]	F_{PO} [N]
1	0.1	10	1.4	1.8	0.1	130.8	454.1
2	0.1	10	1.4	1.8	0.3	124.0	369.2
3	0.1	12	1.4	1.8	0.1	120.2	453.5
4	0.1	12	1.4	1.8	0.3	121.2	370.7
5	0.5	10	1.4	1.8	0.1	137.0	452.5
6	0.5	10	1.4	1.8	0.3	131.7	369.1
7	0.5	12	1.4	1.8	0.1	122.7	452.7
8	0.5	12	1.4	1.8	0.3	126.6	369.7
9	0.1	10	1.6	1.8	0.1	127.0	468.7
10	0.1	10	1.6	1.8	0.3	119.3	437.6
11	0.1	12	1.6	1.8	0.1	126.5	403.5
12	0.1	12	1.6	1.8	0.3	118.5	408.3
13	0.5	10	1.6	1.8	0.1	133.3	481.1
14	0.5	10	1.6	1.8	0.3	133.6	442.8
15	0.5	12	1.6	1.8	0.1	119.5	422.4
16	0.5	12	1.6	1.8	0.3	117.6	420.5
17	0.1	10	1.4	2	0.1	121.9	278.1
18	0.1	10	1.4	2	0.3	130.8	326.0
19	0.1	12	1.4	2	0.1	121.2	211.8
20	0.1	12	1.4	2	0.3	119.4	285.8
21	0.5	10	1.4	2	0.1	132.9	281.1
22	0.5	10	1.4	2	0.3	117.1	335.1
23	0.5	12	1.4	2	0.1	115.6	215.9
24	0.5	12	1.4	2	0.3	116.6	300.7
25	0.1	10	1.6	2	0.1	135.2	224.9
26	0.1	10	1.6	2	0.3	123.0	195.7
27	0.1	12	1.6	2	0.1	121.7	166.1
28	0.1	12	1.6	2	0.3	119.9	145.9
29	0.5	10	1.6	2	0.1	126.4	235.5
30	0.5	10	1.6	2	0.3	118.9	214.2
31	0.5	12	1.6	2	0.1	116.2	172.2
32	0.5	12	1.6	2	0.3	120.3	156.5

치가 클수록 목적함수에 끼치는 영향이 크다는 것을 의미한다[8].
 각 설계변수들이 케이블 체인의 최대 등가 응력과 이탈력에 대하여 미치는 영향도를 분석하기 위해 5 요소 2 수준으로 총 32번의 민감도 해석을 각각 수행하였다. 각 경우의 수에 따른 결과로는 감소값인 최대등가응력 σ_{max} 와 구속조건의 기준이 되는 이탈력(Pull Off Force, F_{PO})을 도출하였다. 이를 통해 얻은 파레토 차트를 Fig. 9, 10에 나타내었다. 이때 신뢰 수준 80%에 해당하는 유의 수준(Significance Level)은 0.05로 설정하였으며 파레토

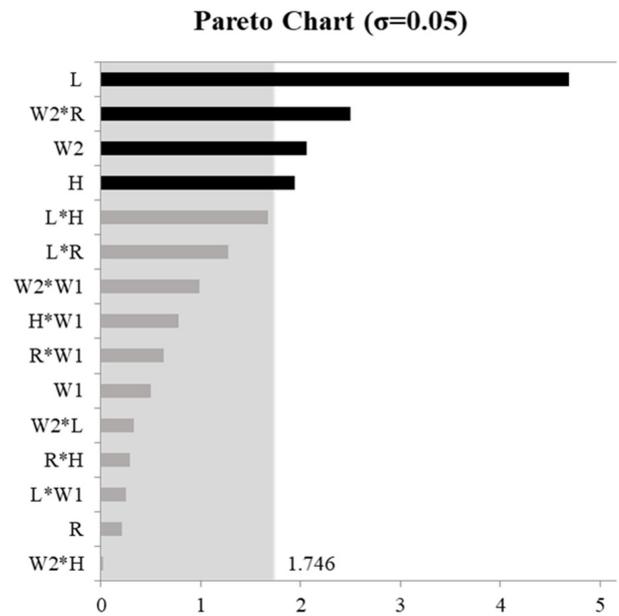


Fig. 9 Sensitivity analysis - pareto chart for object function

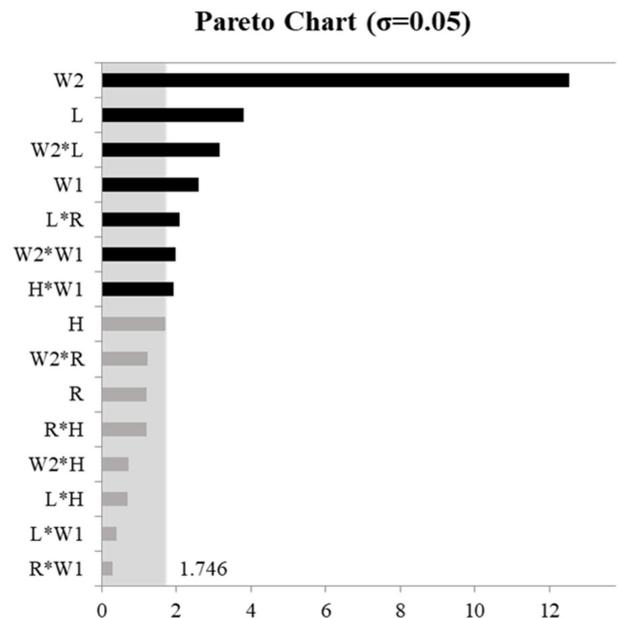


Fig. 10 Sensitivity analysis - pareto chart for constraint

차트상에서 기준선인 $X = 1.746$ 그래프를 넘지 못하는 값은 통계적으로 유의미하지 못한 값으로 판단하여 스크리닝(Screening)을 통해 제거 후 반응표면법을 진행하였다[9]. 민감도 분석 결과 최대 등가 응력에 대해서는 H, L 그리고 W2가 유의미한 값으로 나타났으며, 이탈력에 대해서는 L, W1 그리고 W2가 유의미한 값으로 나타났다. 두가지 값에 대하여 모두 만족하는 결과를 구하기 위하여 유의미한 모든 설계 변수를 포함하여 진행하였으며, 이때 최대 등가 응력과 이탈력에 대하여 R은 유의성을 만족하지 않으므로 제외하였다[10].

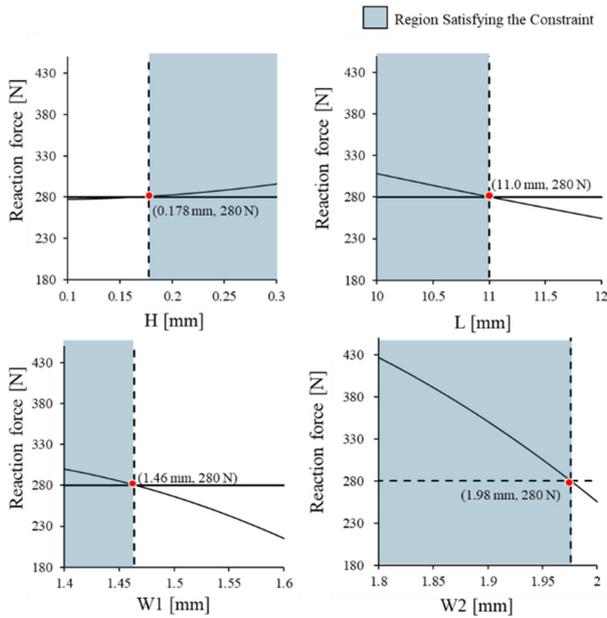


Fig. 11 Region satisfying the constraint

Table 4 Parameters – region satisfying the constraint

Design variables	H [mm]	$0.18 \leq H \leq 0.30$
	L [mm]	$10.0 \leq L \leq 11.0$
	W1 [mm]	$1.40 \leq W1 \leq 1.46$
	W2 [mm]	$1.80 \leq W2 \leq 1.98$

3.3 변수 범위 재설정 및 반응표면법

민감도 분석을 바탕으로 설계변수들이 목적함수에 영향을 미친다는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 목적함수와 설계변수들의 함수적인 관련성을 알아내고자 수학적 모형을 가정하기 위해 회귀분석을 적용하였다. 이러한 회귀 분석을 통해 설정된 설계변수 범위 내의 목적함수의 경향을 예측할 수 있다. 반응표면법은 일반적인 선형 회귀모델보다 복잡한 반응 곡면을 구성하여 더 정확한 근사 모델을 제공할 수 있는 회귀 분석 기법이다[11].

본 연구에서는 케이블 체인 체결 시 발생하는 응력을 최소화하면서도, 최소한의 이탈력을 확보할 수 있는 형상을 도출하는 것을 목표로 하였다. 그러나 반응표면법 단독으로는 목적함수인 최대 등가 응력 최소화과 구속 조건인 최소 이탈력 확보를 동시에 만족시키는 데 한계가 있었다. 이에 따라, 본 연구에서는 순차적 반응표면법(Sequential RSM)을 적용하여, 먼저 구속 조건을 만족하는 설계 변수의 범위를 선별하고, 이후 그 범위 내에서 목적함수를 만족하는 최적 설계 변수를 도출하였다.

3.3.1 가중치 기반 변수 범위 재설정

앞서 선정한 설계 변수들을 기반으로 중심합성 계획법(Central Composite Design, CCD)을 통해 해석을 진행하였다. 이는 3 수준의 Full-factorial Design 보다 적은 실험횟수로 회귀식을

Table 5 Comparison of simulation and RSM

No.	Design variable = H, L, R, W1, W2				Object function
	H [mm]	L [mm]	W1 [mm]	W2 [mm]	σ_{max} [MPa]
1	11	1.4	0.18	1.8	122.5
2	10	1.46	0.18	1.8	123.8
3	10	1.4	0.3	1.8	120.8
4	11	1.46	0.3	1.8	119.6
5	10	1.4	0.18	1.98	119.5
6	11	1.46	0.18	1.98	116.3
7	11	1.4	0.3	1.98	118.3
8	10	1.46	0.3	1.98	117.0
9	10.5	1.43	0.24	1.89	116.7
10	10.5	1.43	0.24	1.89	116.7
11	10	1.4	0.18	1.8	121.1
12	11	1.46	0.18	1.8	117.7
13	11	1.4	0.3	1.8	118.5
14	10	1.46	0.3	1.8	121.7
15	11	1.4	0.18	1.98	118.9
16	10	1.46	0.18	1.98	121.0
17	10	1.4	0.3	1.98	117.8
18	11	1.46	0.3	1.98	115.7
19	10.5	1.43	0.24	1.89	116.7
20	10.5	1.43	0.24	1.89	116.7
21	10	1.43	0.24	1.89	121.6
22	11	1.43	0.24	1.89	118.9
23	10.5	1.4	0.24	1.89	119.7
24	10.5	1.46	0.24	1.89	117.2
25	10.5	1.43	0.18	1.89	117.9
26	10.5	1.43	0.3	1.89	119.4
27	10.5	1.43	0.24	1.8	118.7
28	10.5	1.43	0.24	1.98	117.2
29	10.5	1.43	0.24	1.89	116.7
30	10.5	1.43	0.24	1.89	116.7

도출하기 위한 방법이다.

본 데이터를 바탕으로 Fig. 11과 같이 변수별 구속 조건의 평균 응답 그래프를 도출하였으며 이를 바탕으로 Table 4에 구속 조건을 만족하는 변수 범위를 재설정하였다.

3.3.2 반응표면법

재설정된 설계변수를 바탕으로 다시 중심합성계획법을 통해 구조해석을 진행하였으며 Table 5에 나타내었다. 본 논문에서는 각 설계변수의 교호작용이 발생함을 이전 민감도 분석을 통해 확인하였기에 2차항 예측 모델인 식(1)을 사용하였다. Y는 목적

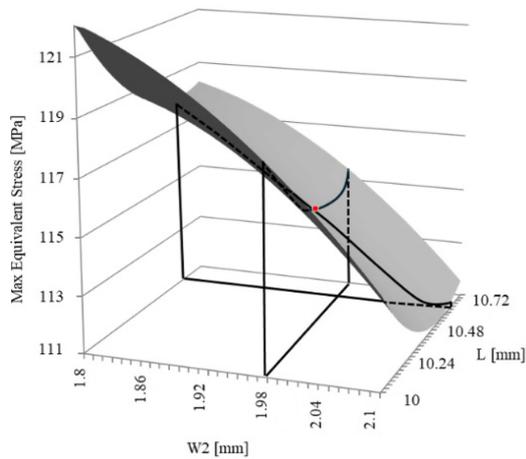


Fig. 12 Relationship between L and W2

Table 6 Optimized design variables

Design variable	H [mm]	L [mm]	W1 [mm]	W2 [mm]
Value	0.29	10.7	1.47	1.98

함수, X 는 설계변수이며 b 는 회귀계수, b_0 는 Y 절편이다.

이를 통해 얻은 반응표면법 회귀 모델 식(2)을 나타내었다. 해당 회귀식의 신뢰성을 검토하고자 결정계수(R^2)를 고려하였다. 결정계수란 회귀모델에서 설계변수가 목적함수의 변동을 얼마나 잘 설명하는지 나타내는 척도다. 0-100%의 값을 나타내며 100%에 가까워질수록 회귀모델이 유효함을 뜻한다. 본 논문에서의 결정계수는 약 94.7%로 나타나, 본 모델에 근거한 최적해에 대해 충분한 신뢰성이 검증되었다.

앞선 결과들을 통해 변수들과 목적함수 사이의 관계를 3차원 그래프로 작성하여 Fig. 12에 나타내었다. 목적함수와 각 변수의 관계를 통해 목표에 부합하는 최적 설계변수를 Table 6에 정리하였다.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

$$Y = 319.1549 - 71.303(L) + 109.242(W1) - 334.883(H) + 182.76(W2) + 7.828(L * L) + 216.276(W1 * W1) + 97.347(H * H) - 39.188(W2 * W2) - 67.488(L * W1) + 3.96(L * H) + 0.417489(L * W2) + 155.451(W1 * H) - 39.395(W1 * W2) + 6.589(H * W2) \quad (2)$$

3.4 최적 설계 변수 해석 결과

Table 6에서 도출된 최적 설계 변수를 기반으로 초기 형상과 최적 형상에 대해 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과는 Figs. 13과 14, 그리고 Table 7에 정리되어 있다. Fig. 13에 제시된 조립 과정 중 최대 등가응력이 발생하는 시점의 응력 분포를 살펴보면, 최적 형상은 초기 형상 대비 최대 응력이 125.0에서 112.9 MPa로 감소하여 약 9.7%의 응력 감소 효과를 나타냈다.

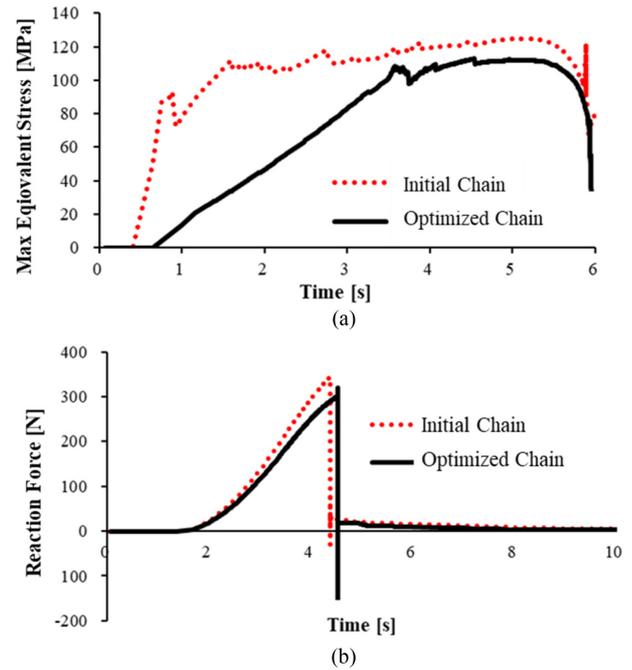


Fig. 13 (a) Maximum equivalent stress over time during the assembly process and (b) Reaction force over time during the detachment (pull-off) process

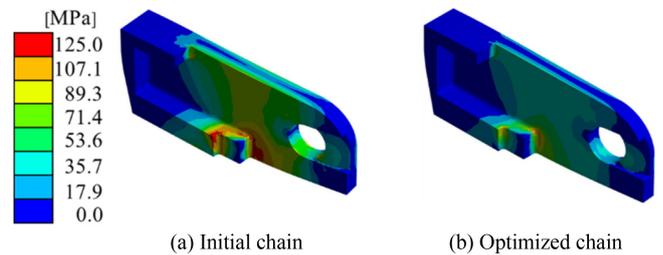


Fig. 14 Comparison of assembly responses between initial and optimized cable chains

Table 7 comparison between initial and optimized cable chain

	Equivalent stress [MPa]	Pull off force [N]	Improvement rate [%]
Initial chain	125.0	344.0	-
Optimized chain	112.9	319.7	9.7

Fig. 14에서는 조립 과정에 따른 시간 기반 응력 및 반력 거동을 비교하였으며, 조립 과정에서는 최적 형상이 응력 변화율이 더 낮게 나타나 구조적 부담이 분산되는 경향을 보였다. 이탈 과정에서도 최적 형상은 319.7 N의 반력을 유지하여 최소 요구 기준인 280 N을 충분히 만족하였다.

Table 6은 이와 같은 결과를 정리해 놓았으며, 이를 통해 최적 설계 형상이 조립 중 응력 집중을 효과적으로 완화하고, 분리 시에도 충분한 체결 유지력을 확보하여 케이블 체인의 구조적 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 일체형 케이블 체인의 이탈력 확보와 조립 응력 저감을 동시에 만족할 수 있는 최적 형상 설계를 목표로 하였다. 우선 유한요소 해석을 통해 케이블 체인의 체결, 분해 과정을 구현하였으며 반응표면법을 적용하여 조립 응력을 최소화할 수 있는 형상을 도출하고자 하였다. 이때 단순 반응표면법 만으로는 구속 조건인 최소 이탈력까지 고려하기는 어려우므로, 순차적 반응표면법을 통해 목표 이탈력을 만족하는 변수 범위를 재설정 한 뒤 최대 등가 응력에 대한 반응표면법을 진행하였다. 이를 통해 획득한 형상은 기존 설계 대비 약 9.7%의 응력 감소 효과를 보이며 체결 조건도 만족하였다. 본 연구 결과를 통해 클린룸 환경에서 사용되는 무빙 케이블 체인의 설계 및 개발이 가능할 것으로 기대된다.

다만 본 연구는 단순 인장 하중만을 고려하였다. 따라서 실제 사용 환경에서 빈번한 복합 하중에 대한 검증이 부족하다. 특히 무빙케이블의 왕복운동 과정에서 부품 간의 미세한 유격으로 인하여 발생하는 비틀림 하중에 대한 구조적 안정성은 평가하지 않았다. 향후 연구에서는 실제 무빙케이블에서 발생하는 비틀림 하중을 측정, 인장-비틀림 연계 해석 모델을 구축하여 보다 실 환경에 근접한 설계 최적화를 수행하고자 한다.

REFERENCES

- Shin, E., Kim, K., (2018), Influence of the operating conditions of a cable carrier on the dynamic characteristics, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 27(6), 570-576.
- Ramalho, P., Campilho, R., Silva, F., Pedroso, A., Sales-Contini, R., (2024), Productivity improvement of control cable manufacturing machine for the automotive industry, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 52(12), 9717-9740.
- Uhe, B., Kuball, C.-M., Merklein, M., Meschut, G., (2023), Increased sustainability in fastener production with the example of self-piercing rivets, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7(6), 193.
- Yoshida, K., Wada, H., (2020), Mechanics of a snap fit, Physical Review Letters, 125(19), 194301.
- Žák, S., Lassnig, A., Cordill, M. J., Pippan, R., (2021), Finite element-based analysis of buckling-induced plastic deformation, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 157, 104631.
- Stefanoaea, N., Rusu, D.-M., Pascu, A.-M., (2024), A simulation method for the one-time snap-fit assembly process of PA6 GF60-components, Engineering, Technology & Applied Science Research, 14(1), 12988-12992.
- Ansys, Ansys granta materials data. <https://www.ansys.com/products/materials/materials-data-library#tab1-1>
- Lee, C., Hong, S., (2018), Curvature area prediction for the deep drawing-ironing process of a cylindrical cup using finite element method and regression analysis, Journal of Mechanical Science and Technology, 32(12), 5913-5918.
- Montgomery, D. C., (2017), Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons.
- Hwang, S., Lee, C., Hong, S., optimal design technique for the shape of induction heating electric range coil using response surface method, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 41(5), 407-413.
- Gu, B.-J., Hong, S.-M., (2019), Numerical approach to optimize piercing punch and die shape in hub clutch product, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 20(9), 517-524.



Min Je Kim

M.S. student in the Department of Smart Mobility Engineering, Kongju National University. His research interest is FEA.
E-mail: A20250295@smail.kongju.ac.kr



Min Seong Oh

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



Soon Jae Hwang

Ph.D. candidate in the Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University. His research interest is FEA.
E-mail: krsoonjae@naver.com



Do Hyoung Kim

He received M. Eng. Degree in the Department of Electronic Engineering, Cheongju University. His research interest is the material analysis of ePTFE
E-mail: d.h.kim@thomas.co.kr



Seok Moo Hong

Professor in the Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University. His interest are Metal Sheet Forming and Forging, FEA, Optimizing.

E-mail: smhong@kongju.ac.kr

실시간 인스턴스 세그멘테이션 객체 탐지 및 적응형 배치 알고리즘을 활용한 저비용 빈피킹 시스템

Real-time Instance Segmentation-based Object Detection and Adaptive Placing Algorithm for Low Cost Bin-picking System

김기석¹, 신현표^{1,#}
Ki-Suk Kim¹ and Hyun-Pyo Shin^{1,#}

¹ 동양미래대학교 로봇자동화공학부 (School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University)
Corresponding Author / E-mail: hpshin@dongyang.ac.kr, TEL: +82-2-2610-1816
ORCID: 0000-0002-1779-0577

KEYWORDS: Real-time object detection (실시간 객체 탐지), Instance segmentation (인스턴스 세그멘테이션), Adaptive placing algorithm (적응형 플레이싱 알고리즘), Bin-picking process (빈피킹 공정), Inverse kinematics based on optimization (최적화 기반 역기구학), Empty hole detection (빈 홀 탐지)

Robots are increasingly utilized in manufacturing and logistics, where bin-picking has become crucial for managing randomly placed objects. However, traditional methods often rely on expensive 3D vision systems, have limited adaptability to unstructured environments, and primarily focus on the picking process, neglecting the placing tasks. To address these challenges, this study presents a cost-effective system that combines a depth camera, YOLO-based instance segmentation, and optimization-based inverse kinematics for real-time object detection and stable manipulation. In the placing stage, an adaptive algorithm detects empty tray holes and generates grid patterns, ensuring reliable placement even in the presence of tray misalignments, occupied slots, or partial occlusions. Experimental validation revealed a 91% success rate in mixed-object environments during picking tasks and a 94% success rate for placing tasks, even with tray displacement and occlusion conditions. The results demonstrate that the system maintains stable performance across both picking and placing processes while minimizing reliance on expensive hardware and complex initial setups. By enhancing flexibility and scalability, the proposed approach offers a practical solution for intelligent automation and can serve as a foundation for broader applications in assembly, logistics, and service robotics.

Manuscript received: September 22, 2025 / Revised: November 25, 2025 / Accepted: December 17, 2025

1. 서론

로봇을 활용한 제조업과 물류 분야에서의 자동화가 빠르게 진행되고 있다[1-3]. 특히 다양한 형상과 자세의 부품을 자동으로 인식하고 이송, 조립하는 로봇 비전 기술의 중요성이 높아지고 있으며, 이는 생산성과 품질을 높이는데 핵심적인 역할을 한다[4-6]. 최근에는 실제 산업 현장에서 무작위로 놓인 부품을 집어 내는 빈피킹(Bin-picking) 기술이 자동차 조립, 전자부품 포장, 물류 분류 등 다양한 분야에 도입되고 있다[7-9].

그러나 지금까지 상용화된 빈피킹 시스템(Pickit3D, Ensenso

N, Photoneo PhoXi 등)은 비교적 고가의 3D 비전 시스템을 적용하여 대당 적게는 수백 만원에서 수천 만원에 이르는 구축 비용을 필요로 하여 중소기업에서는 기술 도입이 쉽지 않으며, 물체의 형상이나 자세 인식이 어려운 경우에 대해 사용자가 유연성 있게 대응하기 어려운 한계도 있다[10-12].

또한 기존의 빈피킹 시스템에 대한 연구는 물체를 집어 올리는 피킹(Picking) 단계에만 중점을 두고 있는 경우가 대부분이며 피킹한 물체를 다양한 환경에서 정확하고 안정적으로 위치 또는 배치시키는 플레이싱(Placing) 단계에 대한 연구는 부족하다[13]. 피킹이 이루어진 후에는 물체를 일관성 있게 정렬하여 위치시키기 위한 트레이로의 이동이 필요하다. 그러나, 빈피킹

공정을 수행하는 중에는 플레이싱 단계에서 예상치 못한 상황이 발생할 수 있다. 예를 들어, 물체를 위치시키기 위한 트레이의 자세가 사용자의 부주의나 실수로 틀어짐이 발생할 수 있고, 트레이 상에 물체를 위치시킬 공간이 이미 다른 물체에 의해 채워져 있을 수 있는데 이러한 상황에 실시간으로 적절히 대응하지 않으면 충돌과 파손이 일어날 수 있다. 그러므로 원활한 전 공정의 자동화 및 효율화를 위해서는 피킹 단계뿐 아니라, 플레이싱 단계의 자동화 또한 필요하다.

최근에는 비교적 저렴한 카메라와 인공지능 기반의 객체 인식 기술을 결합한 연구들이 활발히 진행되고 있다[14]. 특히 물체의 윤곽 정보를 추출해내는 인스턴스 세그멘테이션 기술은 물체 인식의 정확도를 높이고 다양한 형상의 물체를 구분하는 데에 효과적인 방법으로 주목받고 있다. 그러나, 특이점과 관절의 운동 범위 한계를 고려한 실시간 6-자유도 포즈 데이터(Pose Data) 계산 및 플레이싱에 대한 기술적인 과제가 남아있다. 6-자유도 직렬 로봇은 동일한 말단 자세에 대해 어깨-팔꿈치-손목의 방향 조합에 따라 복수의 해(Left/Right, Up/Down, Flip/No-Flip)가 존재하므로, 이들 중 실제 작업 환경에서 관절 한계·충돌 회피·자세 안정성을 만족하는 해를 일반화하여 선택하기 어렵다. 또한 특이점 근처에서는 수렴이 불안정하여 빈피킹 작업에서 안정성 저하로 연결될 수 있다. 따라서 관절 한계 및 특이점을 고려하여 신뢰성 있는 해를 선택할 수 있는 최적화 기반 역기구학의 적용이 필요하다.

본 연구에서는 전용 3D 비전 시스템을 대체할 수 있는 백만원 이하의 저비용 깊이 인식 카메라(Depth Camera)와 범용 YOLO 인공지능 모델을 활용한 피킹 및 플레이싱 공정 자동화 시스템을 제안한다. 깊이 인식 카메라와 인공지능 객체 인식을 통해 물체의 위치와 방향을 실시간으로 파악하고, 대칭 물체의 방향을 잘못 인식하는 문제를 슬라이싱 기반의 분석 기법으로 해결한다. 또한, 물체를 놓는 트레이의 자세가 달라지더라도 자동으로 이를 감지하고 보정할 수 있도록 적응형 플레이싱 알고리즘(Adaptive Placing Algorithm)을 결합하여 플레이싱을 안정적으로 수행한다. 이러한 방식은 고가의 장비나 복잡한 초기 설정 없이도 다양한 환경에 빠르게 적용할 수 있으며, 설치 및 유지 비용을 낮추고 작업 환경의 변화에도 유연하게 대응할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 제안하는 공정에 사용된 로봇, 깊이 인식 카메라 등 하드웨어 시스템 구성에 대해 기술하였고, 3장은 실시간 인스턴스 세그멘테이션 객체 탐지 알고리즘을, 4장은 적응형 배치 알고리즘을 기술하였다. 5장에서는 협동로봇에 적용한 실험을 통해 제안하는 알고리즘을 검증하였다. 마지막으로 결론을 제시하였다.

2. 공정 시나리오 및 하드웨어

2.1 공정 시나리오

본 연구의 빈피킹 공정은 깊이 인식 카메라와 YOLO 인공지능 모델(YOLOv8m-seg)을 통해 물체를 인식하여 물체의 중심점을

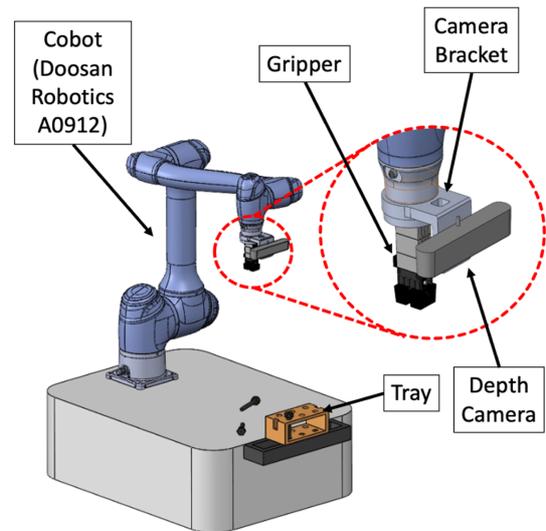


Fig. 1 Hardware system for the bin-picking and adaptive placing algorithm

도출하면 그 중심점의 3차원 좌표를 바탕으로 관절 값(Joint Angle)을 계산한 후 말단 장치가 물체를 잡으면서 이루어진다. 물체를 잡은 후에는 적응형 플레이싱 알고리즘을 통해 트레이의 자세를 고려한 빈 홀을 찾는 과정을 거치게 된다. 빈 홀이 존재하지 않는 경우 트레이를 교체하도록 신호를 보내고, 존재하는 경우 빈 홀에 물체를 배치하면서 공정이 진행되도록 한다.

2.2 하드웨어 구성

본 연구를 위한 주요한 하드웨어의 구성은 Fig. 1과 같다. 전체 시스템은 PC와 제어기, 협동로봇, 협동로봇 베이스, 깊이 인식 카메라(ZED2, Stereolabs), 카메라 브라켓, 그리퍼 그리고 트레이로 구성된다. 사용된 협동로봇은 두산로보틱스 A0912 모델이다. 말단부에는 그리퍼가 장착되어 물체를 파지할 수 있도록 하였다. 깊이 인식 카메라는 3D 프린터로 제작된 카메라 브라켓을 통해 로봇의 플랜지 하부에 고정되어 로봇의 위치 변화에 따른 실시간 시각 정보를 획득한다. 트레이는 실제 산업 환경의 부품 적재 공간을 모사한 요소로 일정한 간격의 홀을 포함한다.

3. 실시간 인스턴스 세그멘테이션 객체 탐지 빈피킹 시스템

3.1 빈피킹 시나리오

빈피킹 공정 순서도를 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 YOLO 인공지능 모델을 이용하여 객체를 탐지한 후 물체의 형상을 나타내는 2D 마스크를 추출하여 3D 포인트 클라우드(Point Cloud)로 변환하고 이를 바탕으로 물체의 중심점을 구한다. 이후 PCA(Principal Component Analysis)를 활용하여 구한 축을 기준으로 물체의 이미지를 슬라이싱하여 가장 넓은 단면을 찾아 헤드 방향을 판정하고, 카메라를 기준으로 한 좌표계를 로봇 좌표계로

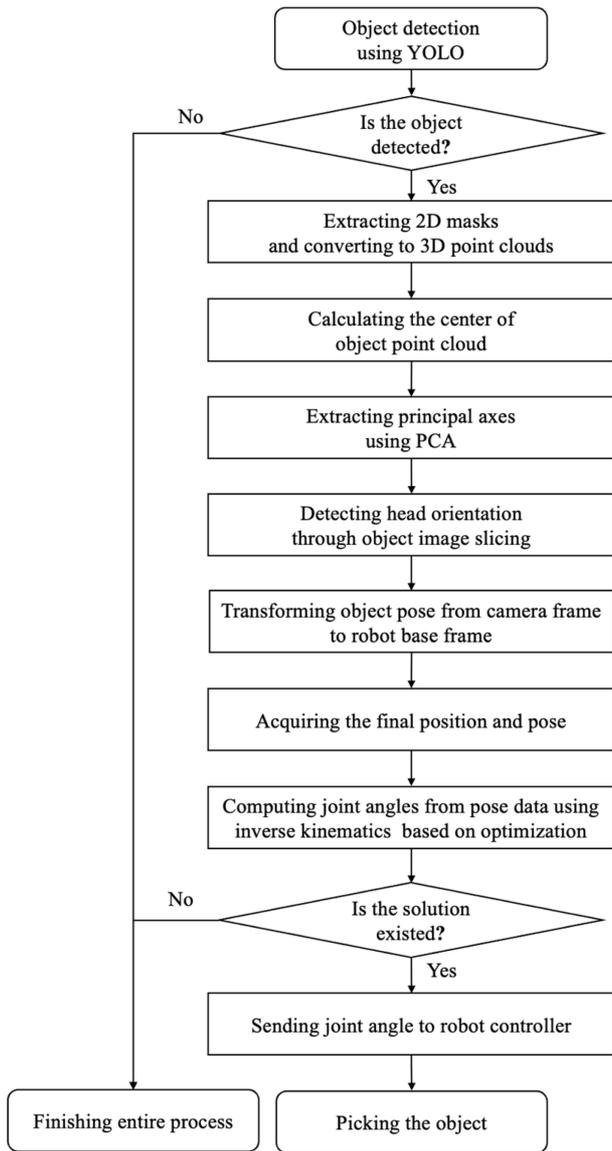


Fig. 2 Bin-picking process flow chart (before adaptive placing process)

변환하여 최종 위치와 자세를 도출한다. 로봇의 빈피킹 동작을 보다 원활하게 수행하기 위해 최적화 기반의 역기구학 계산을 적용한다. 로봇의 동작이 실제 작업 환경에서 안정적으로 수행되기 위해서는 다양한 제약 조건을 고려하는 것이 필요하다. 관절 가동 범위를 벗어나지 않도록 제한하고 로봇 팔과 주변 환경 간의 충돌을 방지하기 위한 회피 조건을 반영하는 것, 그리고 불연속적인 동작을 최소화하여 전체 경로를 부드럽게 움직이는 것이 필요하다. 이를 위해 최적화 기법을 활용하여 역기구학 문제를 해석하고, 각 관절의 값을 산출한다.

3.2 인스턴스 세그멘테이션 기반 객체 탐지

다양한 형상과 방향으로 놓인 물체들을 정확하게 피킹하기 위해서는 물체를 실시간으로 탐지하는 것이 필수적이다. 이를 위해 YOLO 기반 인공지능 모델을 활용하여 인스턴스 세그멘테이션

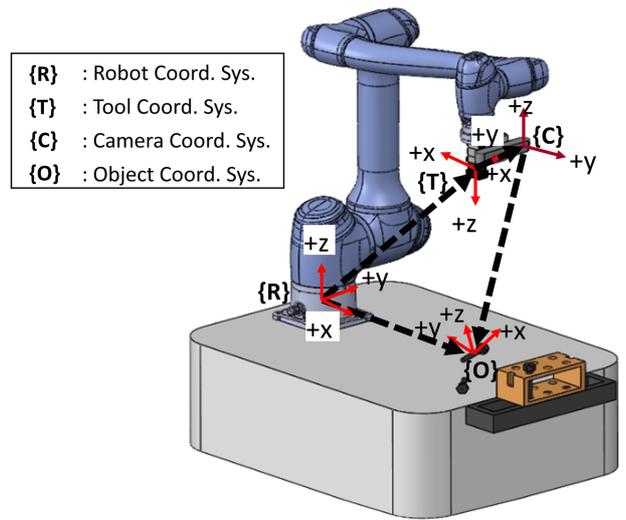


Fig. 3 Coordinate system designation

방식의 실시간 객체 검출 알고리즘을 구현한다. 이 알고리즘에서는 실시간으로 영상을 취득하여 물체에 대한 픽셀 마스크를 추출하고, 이에 대응하는 깊이 정보를 바탕으로 마스크 내부 픽셀들의 3차원 좌표를 수집하여 포인트 클라우드를 구성한다.

수집된 포인트 클라우드에서 무한대 값이나 'NaN' 값과 같은 이상 데이터를 제거한 뒤, PCA를 통해 물체의 방향성을 나타내는 주성분 축을 계산한다. PCA는 분산이 가장 큰 방향을 제1 주성분으로 정의하여 물체의 길이 축을 자동으로 추출하며, 나머지 축은 직교 관계를 통해 구성된다.

이렇게 구성된 길이 축을 기준으로 물체의 형상을 축 후보 방향으로 얇게 슬라이싱한 뒤, 각 슬라이스의 가로 폭을 비교하여 가장 넓은 지점을 찾고, 그 위치를 물체의 헤드 방향으로 판단한다. 이 과정은 볼트처럼 상대적으로 축 방향 길이가 긴 대칭적인 물체에서 자주 발생하는 방향 뒤바뀜 문제를 방지하는 데 효과적이다.

남은 두 축은 길이 축과의 외적을 통해 서로 직교하도록 만들고, 전체 축을 정리하여 오른손 좌표계로 구성한다. 이때, 카메라 좌표계의 Z축이 반대로 설정되는 경우가 있기 때문에, 이를 점검하고 필요시 다시 보정하여 정확한 좌표계를 유지하도록 한다. Fig. 3에서 나타난 것처럼 카메라 좌표계에서 얻은 물체의 포즈 정보를 로봇의 베이스 좌표계로 변환하기 위해, 현재 관절각을 통해 계산한 정기구학 (베이스-툴 좌표 변환)과 툴-카메라 좌표 변환을 결합하여 로봇-카메라 좌표 변환을 구성한다. 카메라-툴 회전 변환을 통해 물체 포즈를 베이스 좌표계로 변환한다. 최종 회전은 로봇 제어기와 호환을 위해 Z-Y-Z 오일러 각으로 표현하고, 실제 피킹 동작 시 충돌 여유와 툴 오프셋(Tool Offset)을 반영한 좌표 값들이 다음 절의 역기구학에 전달된다.

3.3 최적화 기반 역기구학

빈피킹 공정에서는 작업을 수행하는 동안 비전 시스템이 매 순간 목표 위치와 자세를 실시간으로 제공하므로 로봇의 관절

Table 1 D-H Parameters of the Doosan Robotics A0912

D-H	Theta(δ) [Degree]	a [mm]	d [mm]	Alpha(α) [Degree]
Joint 1	θ_1	0	195	0
Link 1	$\theta_2 - 90$	0	39	-90
Joint 2	$\theta_3 + 90$	560	-	0
Link 2	θ_4	0	516	90
Joint 3	θ_5	0	-	-90
End	θ_6	0	124	90

한계나 작업 제약 조건을 고려하여 신속하게 적절한 피킹 자세를 도출할 수 있어야 한다.

전통적인 닫힌 해(Closed-form) 기반 역기구학은 주로 구형 손목 구조나 단순화된 로봇 모델을 전제로 한다. 이로 인해 툴 오프셋이 발생하거나 로봇의 구조가 조금만 달라져도 해가 존재하지 않거나 계산이 불가능한 경우가 생겨나기도 한다. 6-자유도 직렬 로봇은 동일한 말단 자세에 대해서도 어깨-팔꿈치-손목의 방향 조합에 따라 복수의 해가 도출된다. 그러나 이 중에서 어떤 해가 실제 작업 상황에 더 적합지를 일반화하여 선택하기가 어렵다. 더 나아가 관절 제한, 충돌 회피 여유, 자세 안정성과 같은 조건을 수식에 직접 포함하는 것도 매우 제한적이다. 자코비안(Jacobian) 기반의 수치적 역기구학 역시 초기 추정값에 크게 의존하며, 특이점 근처에서는 수렴이 불안정하다. 또한 최소 이동량, 중심 관절 각 기준 구동 등 추가 목적을 동시에 반영하기 어렵다는 한계가 있다. 이러한 제약을 극복하기 위해 본 연구에서는 다양한 목적과 제약 조건을 통합적으로 고려할 수 있는 최적화 기반 역기구학을 적용한다.

로봇의 정기구학은 Table 1의 D-H 파라미터를 바탕으로 구성되며, 관절 각도 벡터 $q = [q_1, \dots, q_6]^T$ 에 대해 말단 포즈 행렬은 식(1)과 같이 나타낸다.

$$T(q) = \begin{bmatrix} R(q)p(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$R(q)$ 는 말단의 방향을 나타내는 3×3 회전 행렬이며, $p(q)$ 는 3×1 말단 위치 벡터이다. 목표 포즈 T^* 는 깊이 인식 카메라로부터 얻은 목표 위치 $p^* = [x, y, z]^T$ 와 목표 방향 R^* 을 나타내는 Z-Y-Z 오일러 각 (ϕ, θ, ψ)를 사용하여 식(2)와 같이 구성된다.

$$R^* = R_z(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi), T^* = \begin{bmatrix} R^* p^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이때 목표와의 차이를 나타내는 포즈 오차는 두 가지로 정의된다. 첫째, 위치 오차는 말단 위치와 목표 위치 사이의 유클리디안 거리로 $e_R(q) = \|p(q) - p^*\|_2$ 로 계산된다. 둘째, 회전 오차는 회전 행렬의 대각합을 이용한 거리 척도로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

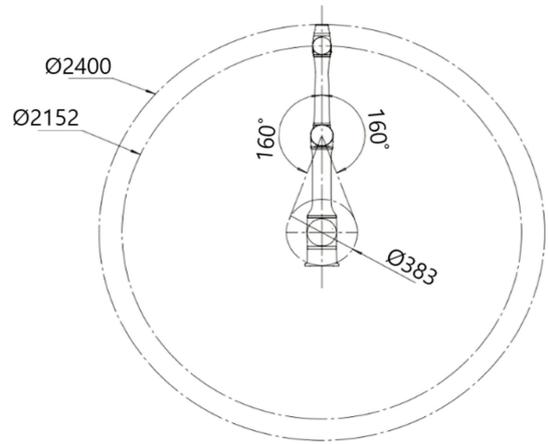


Fig. 4 Work range of the Doosan Robotics A0912

$$e_R(q) = \arccos\left(\frac{\text{tr}(R(q)R^{*T}) - 1}{2}\right) \in [0, \pi] \quad (3)$$

이 식을 통해 두 회전 행렬 $R(q)$ 와 R^{*T} 의 상대적인 차이를 계산하여 회전 각도(θ)를 추출한다. 구체적으로, $R(q)R^{*T}$ 는 목표 방향과 현재 방향 사이의 상대 회전을 나타내는 행렬이며, 이 행렬의 대각합을 이용하면 두 방향 사이의 회전 각도를 계산할 수 있다. 결과적으로 $e_R(q)$ 는 로봇 말단의 방향이 목표 방향으로 얼마나 회전되어 있는지를 나타내는 척도이며, 수치적으로 안전한 계산을 위해 \arccos 의 입력은 $[-1, 1]$ 로 제한한다. 서로 다른 단위에 대해 다음의 목적 함수를 적용했다.

$$\min_q J(q) = \frac{e_p(q)}{2100} + \frac{e_R(q)}{\pi} \quad (4)$$

subject to $q^{\min} \leq q \leq q^{\max}$

여기에서 $J(q)$ 는 최소화하고자 하는 목적 함수이며, $e_p(q)$ 는 위치 오차를 의미하고 분모 2100은 Fig. 4에 나타난 작업 공간의 크기, π 는 최대 회전 각도로, 위치와 회전 오차 간의 단위 차이를 보정한다. 또한 q^{\min}, q^{\max} 는 각 관절의 물리적 회전 한계를 나타낸다. 이 최적화 과정에서 제약 조건을 만족하는 순차 이차 계획법(Sequential Least Squares Programming, SLSQP)을 이용해 결과를 도출한다. SLSQP는 목적함수가 비선형이며 경계조건만 존재하는 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 알고리즘으로, 로봇 관절 제한을 직접 포함할 수 있다. SLSQP 최적화의 반복 조건은 실시간 제어 요구사항과 수렴 안정성 사이의 균형을 고려하여 설정하였다. 우선 최대 반복 횟수는 500으로 설정하였으며, 이는 6-자유도 로봇의 비선형 역기구학 문제에서 수십 밀리초 수준의 실시간 계산 시간을 유지하면서도 충분한 오차 감소를 확보할 수 있는 상한 값이다. 또한 수렴 허용 오차는 1×10^{-4} 로 설정하였다. 이 값은 최적화 과정에서 위치 변화가 약 0.1 mm 이하, 회전 변화가 약 0.1° 이하로 안정되는 시점에서 알고리즘이 종료되도록 설정한 것이다. 6-자유도 로봇의 해 공간을 모두

포함하는 총 8가지의 어깨-팔꿈치-손목 방향 조합과 함께 무작위 초기 자세를 생성하여 각기 다른 시작점에서 시작하여 최적화를 반복 수행하고 그 중 비용 $J(q)$ 가 가장 작은 해를 선택한다. 이후 선택된 최적 관절 값 q^* 에 대해 정기구학식을 다시 적용하여 $T(q^*)$ 와 T^* 사이의 오차를 수치적으로 검증함으로써 정확성을 확보하는 과정을 거친다.

이와 같은 최적화 기반 접근은 목표 자세가 실시간으로 변하고 작업 제약을 복합적으로 적용해야 하는 빈피킹 환경에서 전통적인 닫힌 해 기반 역기구학 방식보다 더 높은 안정성과 유연성, 그리고 유지보수의 용이성을 제공한다.

4. 적응형 플레이싱 알고리즘

기존의 빈피킹 관련 연구들은 물체를 위치시킬 트레이의 위치 및 자세가 사전에 정의된 곳에 정확하게 정렬되어 있다고 가정하고 피킹 단계에 집중하는 경우가 많았다. 본 연구에서 제안하는 적응형 플레이싱 알고리즘은 물체를 잡은 이후 위치시키는 과정에서 사용자의 실수나 예상치 못한 환경 변화에 대응할 수 있도록 고안되었다. 사전 정의된 위치 및 자세대로 놓이지 못한 트레이의 위치 및 자세 오차, 물체를 규칙적으로 배치하기 위한 홀을 지닌 트레이의 경우 이미 일부 홀에 무작위로 물체가 놓여져 있어서 남은 홀을 찾아서 물체를 플레이싱 해야 하는 상황, 그리고 트레이가 작업 중 다른 장비나 물체로 인해 일부 가려지는 상황에도 대응할 수 있도록 함으로써 빈피킹 이후 공정까지의 자동화를 구현할 수 있다.

본 연구에서는 사전에 정의된 패턴이나 고정된 배열 정보에 의존하지 않고, 실시간으로 검출된 홀을 기반으로 트레이의 패턴을 유추하는 새로운 적응형 플레이싱 알고리즘을 고안하였다. 먼저 HSV (Hue, Saturation, Value) 임계화를 통해 트레이 영상에서 빈 홀 후보를 추출하고, 원형성 지표(Circularity)와 반경 기반 이상치 제거를 수행하여 신뢰성 있는 홀 집합을 구성한다. 이후 중앙값과 평균 절대 편차로 Y축 방향 이상치를 배제한 뒤, K-Means와 실루엣 점수(Silhouette Score)를 활용해 홀들을 행·열 패턴으로 군집화하여 실제 트레이의 격자를 복원한다. 이 과정을 통해 트레이의 위치·자세 오차, 부분 가림, 일부 홀 점유 상황에서도 배치 가능한 빈 홀을 안정적으로 도출한다.

4.1 적응형 플레이싱 시나리오

제안하는 방식은 빈 홀의 검출과 패턴 추출 방식을 통해 위에서 언급한 다양한 상황에서도 더 정확하고 안정적인 플레이싱 작업을 수행할 수 있게 한다. 본 절에서는 제안된 절차를 ROI (Region of Interest) 추출 및 빈 홀 탐색, 그리고 패턴 추출의 두 단계로 나누어 설명한다.

적응형 플레이싱 알고리즘에 대한 순서도를 Fig. 5에 나타내었다. 로봇 제어기로부터 트레이 감지 신호를 받게 되면 카메라를 이용하여 트레이 이미지의 유무를 파악하고 트레이 이미지에서

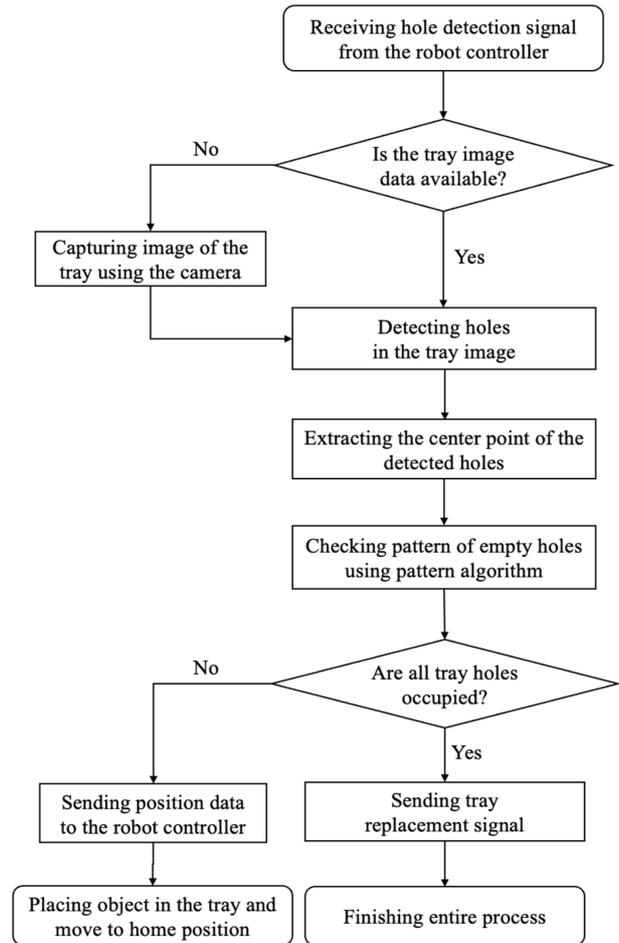


Fig. 5 Adaptive placing process flow chart

빈 홀을 찾는다. 이때 빈 홀이 감지된다면 해당하는 중심 좌표를 추출하며, 추출된 중심 좌표들을 로봇 좌표계로 변환하는 동시에 중심 좌표들을 유무를 0과 1로 구분하여 행렬을 구성한다. 1로 구분된 중심 좌표들은 기구학 계산을 진행한 이후 로봇 제어기로 전송하여 적응형 플레이싱 과정을 진행할 수 있도록 한다.

4.2 ROI 추출 및 빈 홀 탐지

트레이 상의 빈 홀을 탐지하기 위해 먼저 입력 영상을 색상, 채도, 명도를 나타내는 HSV 색 공간으로 변환한다. 이후 미리 설정된 색상, 채도, 명도 임계 값 범위에 해당하는 영역을 추출하여 각 픽셀 좌표를 나타내는 $M(x, y)$ 를 생성한다.

$$M(x, y) = \begin{cases} 1 & \begin{matrix} H_{min} \leq H(x, y) \leq H_{max} \\ S_{min} \leq S(x, y) \leq S_{max} \\ V_{min} \leq V(x, y) \leq V_{max} \end{matrix} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

마스킹 결과에 대해 필터를 적용하여 노이즈를 제거한 후 피킹한 물체의 플레이싱을 진행할 빈 홀 후보를 분리한다. 각 후보 영역은 식(6)과 같이 원형성 지표 C 를 통해 정의된다.

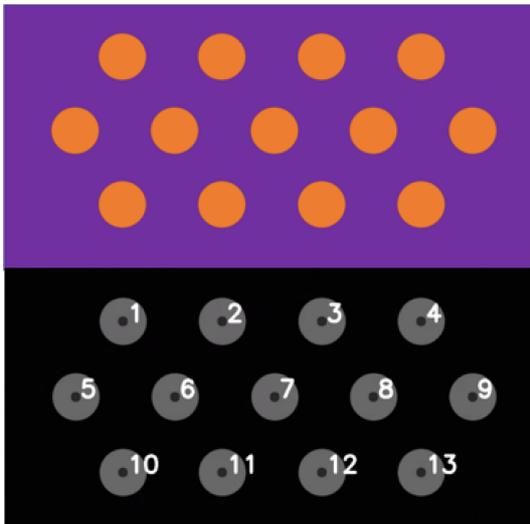


Fig. 6 Detected empty holes using the pattern generation algorithm

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{6}$$

여기에서 A 는 빈 홀 후보 영역의 면적, P 는 둘레를 각각 나타낸다. $C \approx 1$ 에 가까울수록 원형성이 높아 실제 빈 홀일 가능성이 크다. 또한 반경 이상 데이터를 제거하기 위해 평균 반경 \bar{r} 과 표준편차 σ_r 를 이용하여 다음 조건을 적용한다.

$$|r_i - \bar{r}| > k\sigma_r \tag{7}$$

이때 k 는 이상 데이터 판단을 위한 임계 계수로, 보통 2-3 정도로 설정되며, 평균값에서 너무 벗어나는 크기의 조건을 가진 홀은 제거된다. 이를 통해 트레이 상에서 조명이나 가림에 영향을 받지 않는 신뢰도 높은 빈 홀 후보 집합을 확보할 수 있다.

4.3 패턴 생성

ROI 추출을 통해 찾아낸 빈 홀 정보를 바탕으로 트레이의 격자 패턴을 만들어낸다. 단순히 홀의 좌표만을 이용하는 경우, 일부 홀이 인식되지 않으면 전체 격자 구조가 적절하게 생성되지 않는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 중앙값과 평균 절대 편차(Mean Absolute Deviation, MAD)를 이용하여 홀을 가로줄(행) 단위로 나누는 방식을 적용한다.

$$MAD = \text{med}(|y_i - \text{med}(Y)|) \tag{8}$$

여기에서 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 는 검출된 홀들의 Y -축 좌표 집합이다.

$$|y_i - \text{med}(Y)| > \lambda \cdot MAD \tag{9}$$

이상 데이터 제거 조건은 식(9)로 정의되며, λ 는 이상 데이터 제거의 민감도를 나타낸다. 이러한 과정을 통해 잡음에 해당하는 홀 좌표는 제외된다. 이후 데이터를 미리 정한 개수의 그룹으로 나눈 뒤, 각 그룹 내의 데이터가 중심점과 가까운 정도를 분류하는

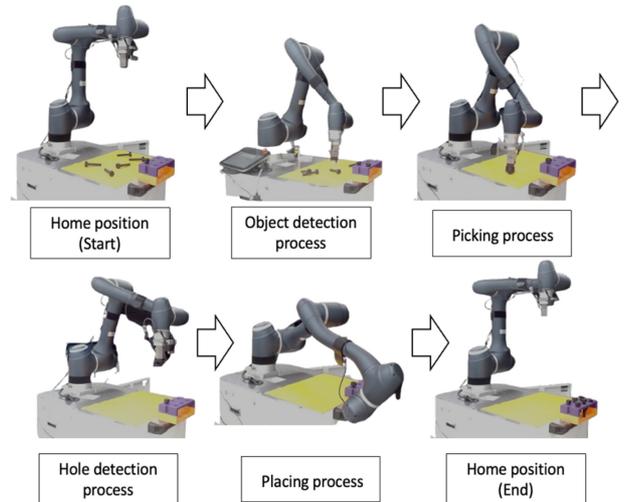


Fig. 7 Sequence of the entire bin-picking and adaptive placing algorithm

K-Means 군집화를 적용하여 홀을 행렬 형태로 정렬하였으며, 최적의 군집 개수는 각 점이 자기 군집 내에서의 일치와 차이를 나타내는 실루엣 점수를 통해 결정한다. 실루엣 점수는 식(10)과 같이 정의된다.

$$S = \frac{b-a}{\max(a,b)} \tag{10}$$

여기서 a 는 해당 점과 같은 군집 내 다른 점들 사이의 평균 거리, b 는 가장 가까운 다른 군집과의 평균 거리이다. 점수 S 가 클수록 더 좋은 군집화 결과임을 의미한다. Fig. 6은 제안된 방식에 따라 빈 홀이 검출되고, 최종적으로 규칙적인 격자 패턴이 생성되는 과정을 보여준다.

5. 실험을 통한 검증

제한한 실시간 인스턴스 세그멘테이션 기반 빈피킹 및 적응형 배치 시스템의 성능을 검증하기 위해 실제 실험 환경을 구축하고 검증 절차를 수행하였다. Fig. 7은 실제 실험 환경에서의 하드웨어 세팅과 빈피킹 및 플레이싱 과정을 보여준다.

5.1 객체 검출 성능

알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 사용된 객체는 볼트이다. 볼트 검출 단계에서는 YOLO 인스턴스 세그멘테이션을 활용하여 영상 데이터에서 볼트에 해당하는 마스크를 실시간으로 추출하였다. 추출된 마스크 내부 픽셀은 깊이 정보와 결합하여 3차원 포인트 클라우드로 변환되었으며 이를 바탕으로 PCA 분석을 통해 길이 방향 축 및 헤드를 판별하였다. 약 9,000장의 테스트 이미지를 대상으로 학습된 모델을 적용한 결과, Fig. 8에 나타난 그래프와 같이 mAP@0.5는 약 93%, mAP@0.5-0.95는 약 87%를

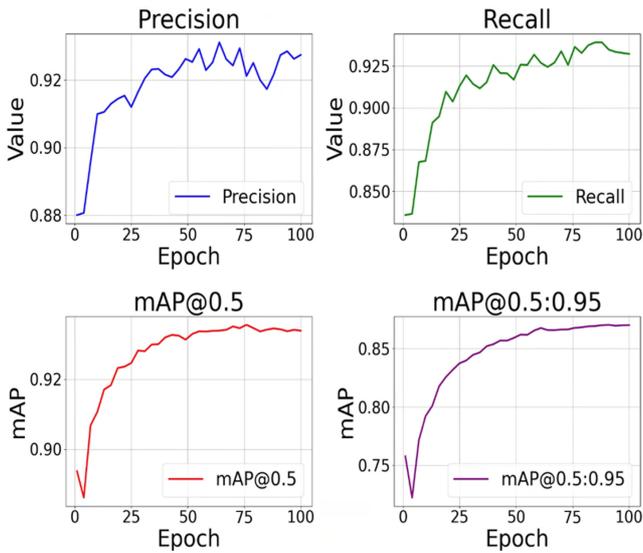


Fig. 8 mAP value using YOLO custom detect model

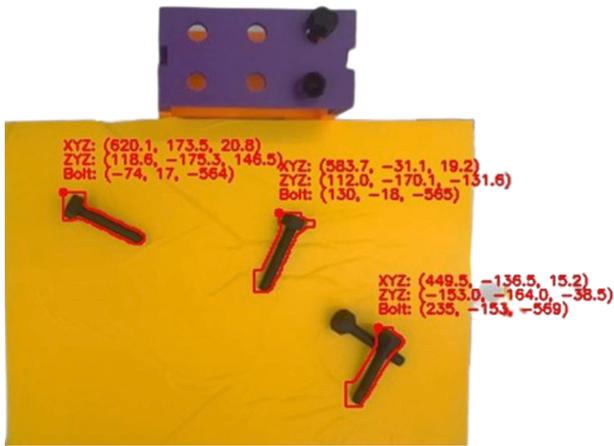


Fig. 9 Bolt detection using the real-time instance segmentation algorithm

기록하였다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 볼트를 안정적으로 인식하였으며 마스크 기반 포인트 클라우드 추출 후 PCA를 통해 객체의 길이 방향 축 및 헤드를 안정적으로 판별할 수 있었다. 특히 슬라이싱 기반 폭 최대 구간 분석 기법을 적용함으로써 대칭 구조를 가진 볼트에서 발생할 수 있는 방향 뒤바뀜 문제를 효과적으로 해결할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5.2 트레이 빈 홀 검출 성능

트레이 상의 빈 홀 검출은 HSV 임계화와 노이즈 제거를 통해 ROI를 추출한 뒤, 원형성 지표 및 반지름 이상 데이터 제거 기법으로 수행한다. 이후 중앙값 + MAD 기반 Y축 간격 분할 및 K-Means실루엣 점수 기반 보정을 통해 행과 열의 정렬을 진행하였다.

100회의 반복 실험에서 홀 검출 성공률은 97%로 나타났다. 또한 트레이 일부가 가려진 환경과 작업자의 실수 등으로 생기는

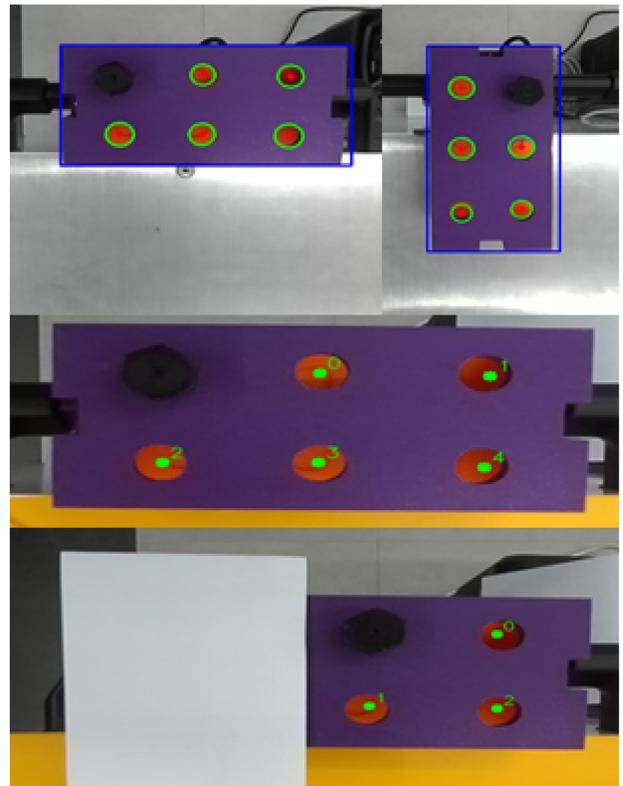


Fig. 10 Experiment on the adaptive placing algorithm (tray with aligned-pattern)

트레이의 변위가 바뀌는 환경(0-90°, 5° 간격)에 대한 실험에서도 각각 96%, 93%의 성공률을 기록하였다. Fig. 10은 가로세로 방향으로 홀이 정렬된 패턴의 트레이에서 홀을 검출하는 장면을 나타내며 제안된 알고리즘이 다양한 자세 및 부분 가림 상황에서도 홀 패턴을 비교적 안정적으로 복원하는 결과를 보여준다.

또한, 지그재그 패턴의 홀 배치 구조를 가진 트레이를 적용하여 실험을 진행하였다. Fig. 11은 트레이가 모두 비어 있는 상황, 일부 홀이 부품으로 점유되어 있는 상황에서의 검출 장면을 나타낸다. 총 100회의 실험 중 빈 홀 검출 성공률은 97%로 측정되었다. 실패 사례는 ROI 검출 실패(약 2%), 패턴 추출 실패(약 1%)로 나타났다.

5.3 피킹 및 플레이싱 성공률

Table 2에 제시된 것처럼 100회에 걸친 볼트 피킹 실험을 수행한 결과 볼트만 사용한 환경에서의 무작위 자세 및 겹침의 상황에서 전체 성공률은 95%로 나타났다. 실패 사례는 주로 포인트 클라우드 노이즈에 의한 자세 추정 오차(약 4%)와 로봇 그리퍼의 미끄러짐(약 1%)에서 발생하였다. 플레이싱의 성능은 피킹이 성공한 총 95회의 배치 실험으로 검증했다. 그 결과, 배치 성공률은 96%, 위치 오차는 평균 0.5 mm, 표준편차는 ±0.4 mm로 나타났다.

제안한 빈피킹 및 적응형 플레이싱 알고리즘의 성능을 추가적으로

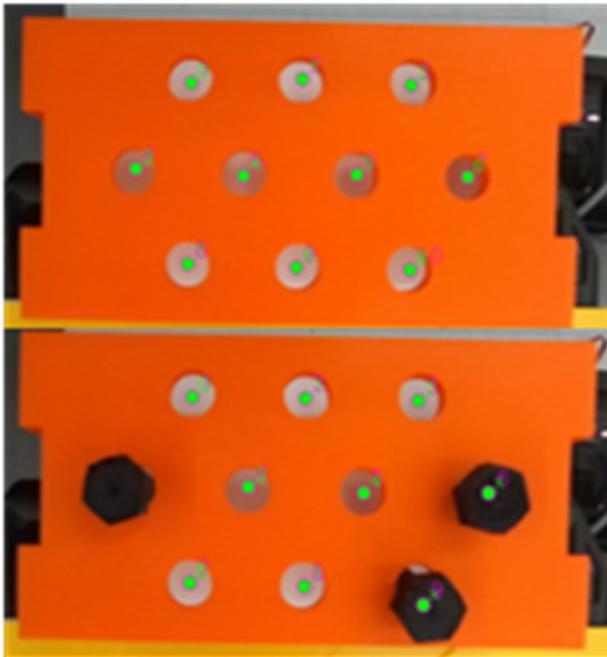


Fig. 11 Experiment on the adaptive placing algorithm (tray with zigzag-pattern)

Table 2 Experiment result of picking and placing

Experimental conditions	Number of experiment	Success rate [%]	Mean error [mm]	Standard deviation [mm]
Picking (only bolts exist)	100	95	-	-
Placing (only bolts exist)	95	96	0.5	±0.4
Picking (various objects exist)	100	91	-	-
Placing (various objects exist)	91	94	0.84	±0.47

검증하기 위하여 피킹하고자 하는 대상 물체가 다양한 크기 및 형상의 물체와 섞여서 무작위로 배치된 환경(크기와 길이가 다른 볼트, 너트, 축)에서도 피킹 및 플레이싱 실험을 진행하였다. 구체적인 실험 장면이 Fig. 12에 나타나 있다. 총 100회의 실험 중 볼트를 인식하지 못한 미검출은 6회, 볼트가 아닌 다른 물체를 인식한 오검출은 3회 발생하였다. 피킹 성공률은 91%, 플레이싱 성공률은 피킹이 성공한 총 91회의 배치 실험을 기준으로 약 94%로 나타났으며, 평균 위치 오차는 0.84 mm, 표준편차는 ±0.47 mm로 나타났다. 볼트만 포함된 환경의 실험 대비 약간 증가한 편차를 보였으나 전체적인 편차는 1 mm 이하의 수준을 유지하고 있다.

이러한 결과는 빈피킹 뿐 아니라 플레이싱 공정의 자동화를 통해 공정 효율을 높일 수 있고 플레이싱 과정에서의 사고나 파손을 미연에 방지하는 것이 가능함을 보여준다.



Fig. 12 Picking and placing experiments in situations where objects of various shapes exist

6. 결론

본 연구에서는 저비용 깊이 인식 카메라와 YOLO 기반 인공 지능 모델을 활용하여 협동로봇 빈피킹 및 플레이싱 공정을 자동화하는 시스템을 제안하고 실험으로 검증하였다. 인스턴스 세그멘테이션을 통해 다양한 형상과 자세의 물체를 실시간으로 인식하였고, 최적화 기반 역기구학을 적용하여 안정적이고 유연한 로봇 동작을 구현하였다. 또한, 트레이 위치 및 자세 오차, 홀 점유, 부분 가림 등 실제 산업 현장의 불확실성에 대응할 수 있는 적응형 플레이싱 알고리즘을 개발하였다. 피킹 대상 물체가 다양한 형상의 물체와 함께 무작위로 배치된 환경에서 91%의 피킹 성공률을 보였고, 플레이싱은 94%의 성공률을 보임으로써 대칭 형상의 물체에서 발생하는 방향 오류와 임의 자세의 트레이와 같은 복잡한 상황에서도 제안하는 알고리즘을 효과적으로 적용할 수 있음을 보였다. 이러한 결과는 고가의 3D 비전 시스템에 비해 설치와 유지 비용을 크게 절감하면서도 중소 제조 환경에 적용 가능한 실용적 대안을 제시하며, 향후 조립, 물류, 서비스 로봇 등 다양한 산업 분야에서 지능형 자동화 공정의 확산과 효율성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Zhuang, C., Li, S., Ding, H., (2023), Instance segmentation based 6d pose estimation of industrial objects using point clouds for robotic bin-picking, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 82, 102541.
- Kwon, D. H., Ha, T. M., Lee, J. S., Jeong, Y. S., Kim, Y. G., Kim, H. G., Song, S. J., Dae Gil, O., Lee, G., Jeong, J. W., (2024), The study of barista robots utilizing collaborative robotics and AI technology, Journal of Drive and Control, 21(3), 36-45.

3. Cho, J., Kang, S. S., Kim, K. K., (2019), Object recognition and pose estimation based on deep learning for visual servoing, *The Journal of Korea Robotics Society*, 14(1), 1-7.
4. Duc Hanh, L., Luat, N. V., Bich, L. N., (2022), Combining 3D matching and image moment based visual servoing for bin picking application, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 16(4), 1695-1703.
5. Ojer, M., Lin, X., Tammaro, A., Sanchez, J. R., (2022), Pickingdk: A framework for industrial bin-picking applications, *Applied Sciences*, 12(18), 9200.
6. Kwon, Y., Lee, D., Kang, H., Choi, J., Lee, I., (2024), Object pose estimation and motion planning for service automation system, *The Journal of Korea Robotics Society*, 19(2), 176-187.
7. Zhao, Y., Yang, J., Wang, S., Li, X., (2023), Towards one shot & pick all: 3D-OAS, an end-to-end framework for vision guided top-down parcel bin-picking using 3D-overlapping-aware instance segmentation and GNN, *Robotics and Autonomous Systems*, 167, 104491.
8. Dolezel, P., Stursa, D., Kopecky, D., (2024), Memory efficient deep learning-based grasping point detection of nontrivial objects for robotic bin picking, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(3), 110.
9. Kozák, V., Sushkov, R., Kulich, M., Přeučil, L., (2021), Data-driven object pose estimation in a practical bin-picking application, *Sensors*, 21(18), 6093.
10. Boschetti, G., Sinico, T., Trevisani, A., (2023), Improving robotic bin-picking performances through human-robot collaboration, *Applied Sciences*, 13(9), 5429.
11. Fu, K., Dang, X., Zhang, Q., Peng, J., (2024), Fast uois: Unseen object instance segmentation with adaptive clustering for industrial robotic grasping, *Actuators*, 305.
12. Dias, J., Simões, P., Soares, N., Costa, C. M., Petry, M. R., Veiga, G., Rocha, L. F., (2023), Comparison of 3D sensors for automating bolt-tightening operations in the automotive industry, *Sensors*, 23(9), 4310.
13. Torres, P., Arents, J., Marques, H., Marques, P., (2022), Bin-picking solution for randomly placed automotive connectors based on machine learning techniques, *Electronics*, 11(3), 476.
14. Chen, Q., Wan, L., Pan, Y.-J., (2023), Robotic pick-and-handover maneuvers with camera-based intelligent object detection and impedance control, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 47(4), 486-496.



Ki-Suk Kim

B.S. candidate in the School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University. His current research interests quadruped walking robot based on SLAM and robot vision using artificial intelligence.
E-mail: kimkisuk@dongyang.ac.kr



Hyun-Pyo Shin

Associate Professor in the School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University. His current research interests include the robot control, design of ultra-precision positioning stages based on flexure hinges and redundantly actuated parallel mechanisms.
E-mail: hpshin@dongyang.ac.kr

창간

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

목적 및 연구 범위

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

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

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

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

한국정밀공학회지 논문투고 및 심사: <https://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 심사위원에 의해 진행되며 심사 및 게재여부 판정 절차는 논문심사규정에 따른다.

제8조 (저작권)

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

제9조 (자료공개)

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

제10조 (원고작성요령)

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

제11조(게재료)

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

논문집필요령

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

제14조(피조사자 권리 보호)

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

현승공학상

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

유정백합학술상

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

백암논문상

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

Year of Launching

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

Aims and Scope

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

Fee

Subscription Fee:

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

Publication Fee:

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

Contact Us

[04508] 12F, SKY1004 Bldg., 50-1 Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul, Republic of Korea
TEL +82-2-518-2928 / FAX +82-2-518-2937 / paper@kspe.or.kr / <https://www.kspe.or.kr>
Submission to Journal of Korean Society for Precision Engineering: <https://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 2 · February 2026

REGULAR PAPERS

An Angle/Tension Flexible Sensor Based on Hall Effect Sensor and its Applications in Biomedical Engineering

H. Kolivand · A. Sourì · A. Ahmadi 439

Fabrication and Application of Glass Fiber-reinforced Sol-Gel Tools for Optical Glass Polishing

Z. Zhao · J. Lu · Y. Shen · L. Xi 453

Process Optimization for Multi-Pass Grinding of Silicon Nitride Spherical Roller Outer Contour Considering Machining Efficiency and Surface Quality

S. Li · C. Jin · J. Sun · Z. Zhao · C. Zuo · G. Lin · X. Pang 469

Study on the Wear Mechanism and Cutting Performance of Corner-Radius End Mill in Gyroscopic Milling of CFRP/Ti-6Al-4 V Laminated Material

H. Xiao · T. Chen · C. Li · G. Wang · Z. Yu 489

Femtosecond Laser Processing of Micro Textured CFRP Bonding Interfaces and their Adhesive Properties

J. Li · A. Jin · Y. Ding · N.G.R. Broderick · J. Low · L. Yang · M. Zhou · M. Wang · J. Cui 507

Numerical Investigation of Ball Burnishing Process Using a Comprehensive Three-Dimensional Finite Element Model

M. Elsamanty · W.F. Youssef · M. Abdulsalam · A. Ibrahim 529

Formation and Removal Behavior of Oxide Film in Electrolytic In-process Dressing Superfinishing of Cylindrical Rollers

J. Yang · J. Shen · Y. Zhou · X. Hu · B. Lyu 549

Research on the Influence of Micro-Groove Texturing Parameters on Friction Characteristics of Zr-2.5Nb Artificial Joint Surfaces Based on Micro-Milling

X. Zhao · Z. Cao · W. Mei · P. Cai · Q. Wu 575

Real-Time Quality Classification in Free-form Bending of AHSS Panels With Principal Component Analysis and Support Vector Machine Method

H. Lim · C. Park · G. Kim · G. Kim · J. Yoon 595

Design and Performance Analysis of Radial Bending Resonant Piezoelectric Actuator with Staggered Motion Characteristics Inspired by Sea Urchin's Teeth Morphology

G. Wang · Y. Shao · J. Zhuang · X. Wang · F. Liu · J. Li · Y. Tang 617

Error Compensation Method for Galvanometer Scanning Based On Ordinary Kriging Interpolation

Y. Liang · T. Zhang · Y. Rong · Y. Huang 629

Cross-Light Based Normal Vector Measurement and Adjustment of Freeform Surface in Industrial Robotic Drilling

L. Zhou · B. Song · P. Fu · H. Wang · Z. Huang 645

Design Parameter Optimization of a Curvature-Tunable Compliant Finger Gripper Driven by Sliding Actuation

H. Seo · D. Park · T. Seo 657

Effects of Friction Stir Welding of 6061-T6 To 5083-H11 Aluminum Alloys Reinforced with Al₂O₃ on Microstructure, Hardness, and Wear Resistance

M.K. Ivanaki · D. Afshari · E. Poursaeidi 667

Improving the Load Capacity of Aerostatic Bearings with Axial Directed Slot Restrictors

S. Kajiwara · T. Tani · T. Kinugawa · S. Kikutani 681

Simulation and Experimental Analysis of Different Interlayers in Cu-Mg Ultrasonic Welding

L. Zhao · L. Zhang · Z. Abbas · L. Li · J. Zhang · I.A. Soomro 695

Enhanced Mechanical and Moisture Resistance in Aramid/Epoxy Composites with Aluminum and Graphite Fillers for Precision Engineering Applications

M. Puttegowda · B.N. Sharath · P. Shivanna · S.M. Rangappa · S. Siengchin 711

Research on Multi-Error Collaborative Tooth Surface Modification Method for Hypoid Gears Based on Sobol'-LM Fusion Algorithm

J. Li · Z. Wang · M. Chen · Z. Gou · C. Yuan · C. He · Y. Yang · L. Ding 729

Wear Evolution and its Effects in TC4 Grinding with Tetrahedral-Cluster Abrasive Belts Through Experimental and Modelling Analyses

X. Zhao · L. Zou · W. Wang · Y. Liu · Q. Li 751

Atomic Insights into the Material Removal Mechanism of γ -TiAl Alloy During Laser-Assisted Machining Via Molecular Dynamics Simulations

B. Liu · W. Zhang · F. Ren · Y. Ci · Y. He 771

An Improved Faster Region-based Convolutional Neural Network for Detecting Small Object Defects in Laser Powder Bed Fusion

Y. Ma · S. Li · X. Wang · B. Fu · L. Li · Z. Wang 789

Correlation between Process Parameters and Defects in Additively Manufactured Components Using Image Processing and Machine Learning

M. Memari · A. Farzadi · A.K. Fini ·

M. Aliabadi · A. Shamsipoor 807

REVIEW PAPERS

Structure, Modeling, and Control of Morphing Quadrotors: A Review

H. Lou · Q. Wu · H. Wang · M. Li · H. Liu ·

N. Sun 825

Advances in MXene-Polymer Composites: Enhancing Thermal Stability and Flame Retardancy

K. Vijayananth · S.K. Palaniappan · M.K. Singh ·

G.P. Muthukutti · S.M. Rangappa · S. Siengchin 843

Further articles can be found at link.springer.com

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

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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 13 · Number 1 · January 2026

REGULAR PAPERS

The Grinding Efficiency and Surface Roughness Study of WC-10Co-4Cr Coating on the Spherical Plain Bearings Based on the Trajectory Analysis

Z. Jiang · C. Jiang · G. Pu · L. Wang · Y. Zhang · Y. Hao · X. Hong 1

One-Step Process for Fabricating Superhydrophobic Surfaces on Metals and Ceramics

T.-H. Dinh · D.-M. Chun 13

Analysis for Influence of Wire Feeding Angle on Laser Energy Absorption and Deposited Layer Forming Behaviors During Wire Laser Additive Manufacturing

Y. Ai · Y. Wang · Y. Zhang · P. Yuan 29

High-Quality Surface Preparation of Inconel 718 Nickel-Based Superalloy Considering Chemical Mechanical Polishing

Z. Dai · J. Zhou · X. Wang · T. Zhao · L. Guo · Q. Yu 49

Micro/nanostructure-Based Surface Modification After Electropolishing of TiAl6V4 Manufactured by Selective Laser Melting Process: Superhydrophilic, Superhydrophobic, SLIPS

E.-J. Lee · K.-K. Lee · D.-G. Ahn · J.-W. Lee 65

Femtosecond Laser Surface Textured Micro-Crosshatch Patterns for Tribological Enhancement of Gray Cast Iron

D.N. Basha · G.L. Samuel · R. Bathe 77

REVIEW PAPER

Towards Sustainability: Critical Insights into Solid-State Joining Processes for Developing Lightweight Hybrid Structures

S. Kumar · S. Gao · C. Wu · A. Kar · S. Basak 89

REGULAR PAPERS

Comparative Life Cycle Assessment of Different Pre-treatment Scenarios for Diamond Coating Deposition on WC-Co Through HF-CVD

E. Mingione · M. Gianvincenzi · M. Marconi · G. Rubino 117

Applications of Environmentally Friendly Metal Oxides as PEM Fuel Cell Cathode Catalysts

O. Baytar · Ö. Şahin · A. Akdag · G. Canpolat · A. Ekinici 147

Systematic Design Improvement of Spinning Disk-Based Triboelectric Nanogenerators for Enhancing Electrical Output

D. Seo · S. Kim · J. Kong · W. Lee · J. Chung 167

Enhanced Performance of Triboelectric Nanogenerator Based on TiO₂ Nanoparticle/Nylon 66 Composite Nanofibers

C.-J. Moon · G.-J. Choi · S.-H. Sohn · S.-J. Kim · I.-K. Park 181

A Fast NMPC Energy Management Scheme for Fuel Cell Electric Vehicles based on Driving Pattern Classification

X. Liu · J. Gao · S. Hou · R. Lin · H. Chen 195

Crashworthiness Analysis of Front Impact Beam with Various Sectional Shapes for Lightweight Electric Vehicles

M.-G. Jo · T.-W. Lee · Y.-S. Lee · J.-S. Park · J.-W. Wee 211

Flexible, Patternable Graphene/CNT-Coated Heaters with Nylon/Clay Lamination and Strong Adhesion

W. Lim · J. Huh · M. Abdyrahymowa · A. Khadka · H. Gao · B. Joshi · A. Aldalbahy · G. Periyasami · S.S. Yoon 233

SHORT COMMUNICATION

Prediction of the Bead Shape in a Directed Energy Deposition Process Using Machine Learning with Limited Point Data

K.-K. Lee · J. Kim · S.K. Moon · D.-G. Ahn 245

REVIEW PAPERS

A Systematic Review of Prognostics and Health Management in Mobility Batteries

P. Kumar · M. Tanveer · K. Park · I. Raouf · H.S. Kim 257

Functionally Graded Metallic Materials Via Additive Manufacturing: Research Progress on Processing, Challenges, and Applications

R. Jain · B. Sahoo · S. Jain · M. Mohan · M. Choudhary · H. Lee · S.K. Dewangan · S. Samal · B. Ahn · Y. Jeon 281

REVIEW

A Survey of Robotic Grippers Based on Task-Based Hand Motions and Mechanical Dexterity

J. Choi · J. Won · M. Lee · W. Lee · T. Seo 329

CORRECTIONS

Correction: Functionally Graded Metallic Materials Via Additive Manufacturing: Research Progress on Processing, Challenges, and Applications

R. Jain · B. Sahoo · S. Jain · M. Mohan · M. Choudhary · H. Lee · S.K. Dewangan · S. Samal · B. Ahn · Y. Jeon 355

Correction: Stability Enhancement of Reformate-Fueled, Low-Temperature Solid Oxide Fuel Cell with Nickel Thin-Film Anode by Water Bubbling

S. Ji · W. Kim · S. Han · S. Jeong · T. Park 357

Further articles can be found at link.springer.com

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

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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 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 제1차 이사회 회의록

◎ 일 자 : 2026년 1월 9일(금)

◎ 장 소 : 학회 회의실

◎ 참석자 : 이상원, 오정석, 안형준, 최영재, 곽문규, 김남근, 김보현, 문두환, 김양진, 김태곤, 김산하, 김영진, 박 근, 윤준영, 윤희택, 이현택, 주백석, 권지연, 김충수, 안상훈, 유주성, 이지혜, 이현섭, 이현욱, 정재일, 이동윤, 이주연, 허세곤, 김창주, 남정수, 맹상진, 송지현, 김건희, 장원석, 조정대, 강현욱, 김해진, 박영빈, 박인규, 안지환, 이광일, 이동훈, 이윤석, 천두만, 강태준, 김무림, 김종백, 김현준, 박석희, 이문구, 이봉기, 장진아, 정영훈, 주기남, 최정욱, 한민우, 류시형, 김동성, 박형욱, 이동진, 전용호, 차석원, 홍성태, 이재열, 이동원
재적 110명 중 75명(위임 9명)참석

I. 주요보고사항

1. 2026년 이사회 및 각급 회의 일정 안내
2. 주무관청-과천과학관 2026년 임원 취임 승인(2026.1.2) 및 법인등기 업무 진행 보고
3. [과총] 2026년 평의원회 개최 (2026.1.21(수), 이상원 회장 참석 예정)
4. 학회 회원현황 보고(2026.1.8기준) 총 회원수 3,317명(정회원 1,739명, 학생회원 1,111명 등)
5. 2025년 12월말 수입 지출 현황 보고
6. IJPEM-GT, IJPEM-ST: Senior Editor 및 Editorial Board 추가 위촉
7. 국제학술지 2027년 OUP-OA 전환 TF 구성 및 업무분장 (위원장: 이동윤)
8. JKSP E 편집장 위촉(연임): 김보현(송실대), 2026.1.1-2028.12.31(3년)
9. JKSP E 편집위원회 회의 개최: 2026년 1월 30일(금) 14:00, 온라인(ZOOM)
10. IJPEM-ST 등재 및 Index 준비현황 보고: KCI 등재후보학술지 선정
11. 2026 춘계학술대회(2026.5.13(수)-14(금), 제주신화월드)
12. PRES M 2026 제1차 조직위원회 (2026.6.28-7.3, Marina Bay Sands EXPO, Singapore)
13. 윤리위원회 개최 결과 보고

II. 승인 및 의결사항

1. 신입회원 인준(안)
2. 2026년 각급 위원회 및 연구회 구성(안)
3. 인사위원회 의결사항에 따른 사무국 취업규정 개정(안)
4. (가칭) AI위원회 설립(안)
5. (가칭) AI포럼 행사 개최 승인(안)

신입회원인준명단

•정회원•

회원번호	이름	소속	회원번호	이름	소속
202611255	정석환	단국대학교	202611254	박성욱	삼성전기

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

LIG넥스원(주)
한국화낙(주)

(주)스맥
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)위즈옵틱스
(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)
맥스트레이딩
(주)팀솔루션
(주)에임즈
참테크
하비스탕스(주)

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강봉철
국민대학교

강성목
대구가톨릭대학교

강현욱
UNIST

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김남근
서강대학교

김동성
POSTECH

김무림
한국로봇융합연구원

김산하
KAIST

김양진
부산대학교

김창주
한국기계연구원

김효영
한국공학대학교

문두환
고려대학교

박민수
서울과학기술대학교

박정재
(주)미터랩

박형욱
UNIST

손정우
국립금오공과대학교

안지환
POSTECH

이광일
경일대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

이현욱
한국철도기술연구원

전용호
아주대학교

정구현
울산대학교

조영학
서울과학기술대학교

주백석
국립금오공과대학교

진종한
(주)미터랩

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

맹상진
홍익대학교

박석희
부산대학교

안다훈
서울과학기술대학교

안상훈
한국기계연구원

윤해성
한국항공대학교

윤헌준
송실대학교

이봉기
전남대학교

이원균
충남대학교

이현택
인하대학교

이호원
서울대학교

장진아
POSTECH

주기남
조선대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

한민우
동국대학교

허세곤
한국기계연구원

김갑용
Iowa State University

김범준
University of Tokyo

김우균
University of Cincinnati

민상기
University of Wisconsin-Madison

Simon Park
VinUniversity

Patrick Kwon
San Diego State University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 2/ February 2026

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

월간 · 제43권 제2호 [통권 제419호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2026년 1월 25일

발행일 2026년 2월 1일

발행인 이상원

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

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

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

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

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

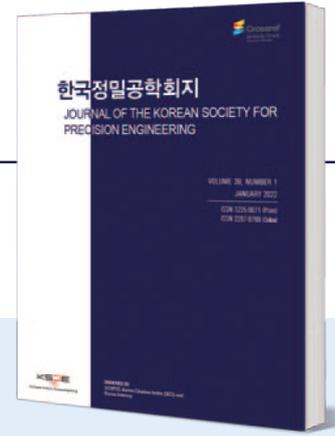
국내학술대회(춘·추계) / (02)393-0725 / conf@kspe.or.kr

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	
2022: 재료성형 공정에서의 고효율 금형 기술	
2023: 스마트/디지털 헬스케어 기술	
2024: 가공된 기능성 재료 기술	
2025: 레이저를 이용한 가공 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

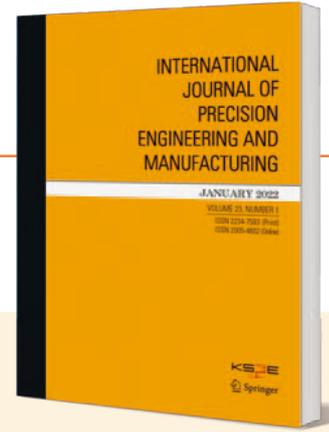
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality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

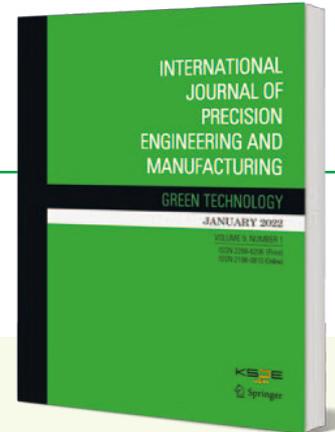
- Precision Manufacturing Processes
- Measurements and Control
- Robotics and Automation
- Manufacturing System
- Design and Materials
- Machine Tools
- Nano/Micro Technology
- Bio Health
- Additive Manufacturing

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

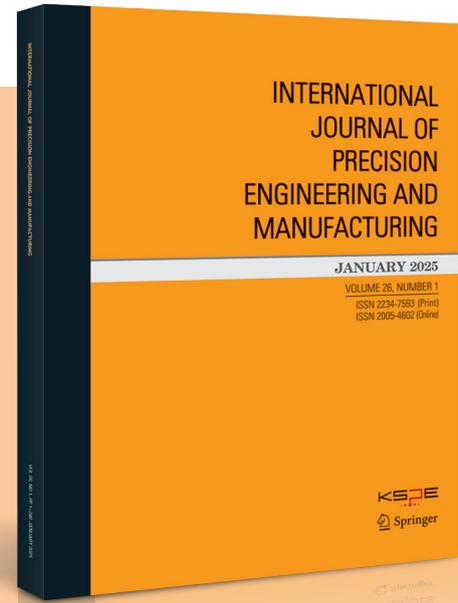
INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING

About IJPEM

IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 26 years and aims to disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to the international precision and manufacturing engineering community. The journal is indexed in SCIE (Impact factor 3.6) and downloaded more than 148,000 times a year around the world

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

Humanoid Robots and Physical AI for Manufacturing



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

- Embodied AI for factory-level decision making and control
- Humanoid robots for precision manipulation and tool use
- AI-based learning from human demonstrations in industrial tasks
- Perception and action integration in complex factory environments
- Dexterous manipulation with vision and tactile feedback for contact-rich tasks
- Safe and adaptive human-humanoid collaboration
- Integrating physical AI with digital twin, mixed reality, and large language model (LLM)
- Applications of physical AI in flexible and modular manufacturing systems
- Design, modeling, and control of anthropomorphic mechanisms
- Deployment strategies of humanoid robots in legacy factory systems
- Case studies and real-world demonstrations of humanoid systems in production

Guest editors

Jongeun Choi
(Yonsei University, Korea)
Huitaek Yun
(KAIST, Korea)
Jingang Yi
(Rutgers University, USA)

Submission Procedures

Deadline for Submission Date:
February 28, 2026
Publication Date:
September 1, 2026
Volume, Number:
Vol. 27, No. 9

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 4th industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)** is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. **The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:**

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

IJPEM-ST covers various kinds of papers:

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

• Publication Date (Scheduled)

Vol. 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: <http://jkspe.kspe.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 | Tel: +82-2-518-2928

광·전자 웨이퍼 소재 100년 전문기업을 추구한다!

사업 내용

- LEDs용 사파이어웨이퍼 가공
- 전력반도체용 SiC 웨이퍼 가공
- InP 등의 화합물반도체 웨이퍼 가공
- 광 통신용 Faraday Rotator Chip 기판 가공

회사 특징

- 고부가가치 웨이퍼의 재활용 가공기술
- 웨이퍼 연마 및 장비 관련 특허기술
- High Purity Material 수입판매 : Ga, As, Sb, In, P, Ge, Ti, etc

주요 제품 및 역량

- LEDs 용 사파이어웨이퍼
 - 직경 : 2~8inch
 - Type : SSP, DSP, Window
 - Grade : Prime, Reclaim, Dummy
- 전력반도체 용 SiC 웨이퍼
 - 직경 : 4~12inch
 - Type : N-type, SI Type
 - Grade : Prime, Reclaim, Dummy
- 광통신용 쿼츠웨이퍼
 - 직경 : 2~12inch
 - Type : SSP, DSP, Window
 - Grade : Fused, Synthetic



ENDO ROBOTICS

A compatible platform
for commercial diagnostic endoscopy.

ENDOROBOTICS CO., LTD

RoSE Platform Design



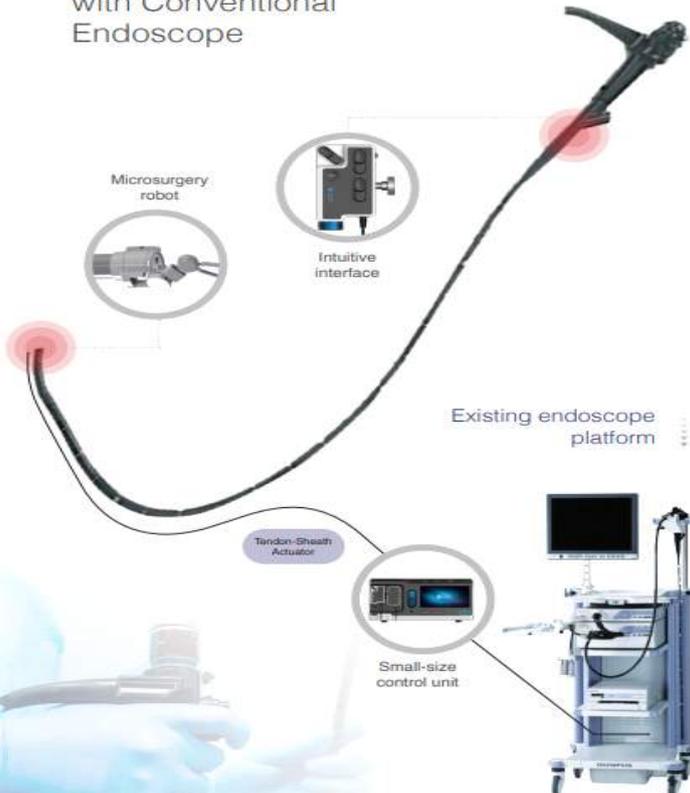
- A** Controller A for main operator
- B** Controller B for assistant operator
- C** Slot to insert the cartridge
- D** 8-inch touchscreen displaying information on the product and the procedure and enabling manipulation of the control unit



RoSE Platform

Endoscopic
Surgical Robot
Interoperable
with Conventional
Endoscope

Conventional
diagnostic 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 mil(\$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

오늘을 지키는 기술, 세상을 향한 혁신

GO FORWARD

FORWARD

Leading Innovation Group

LIG



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

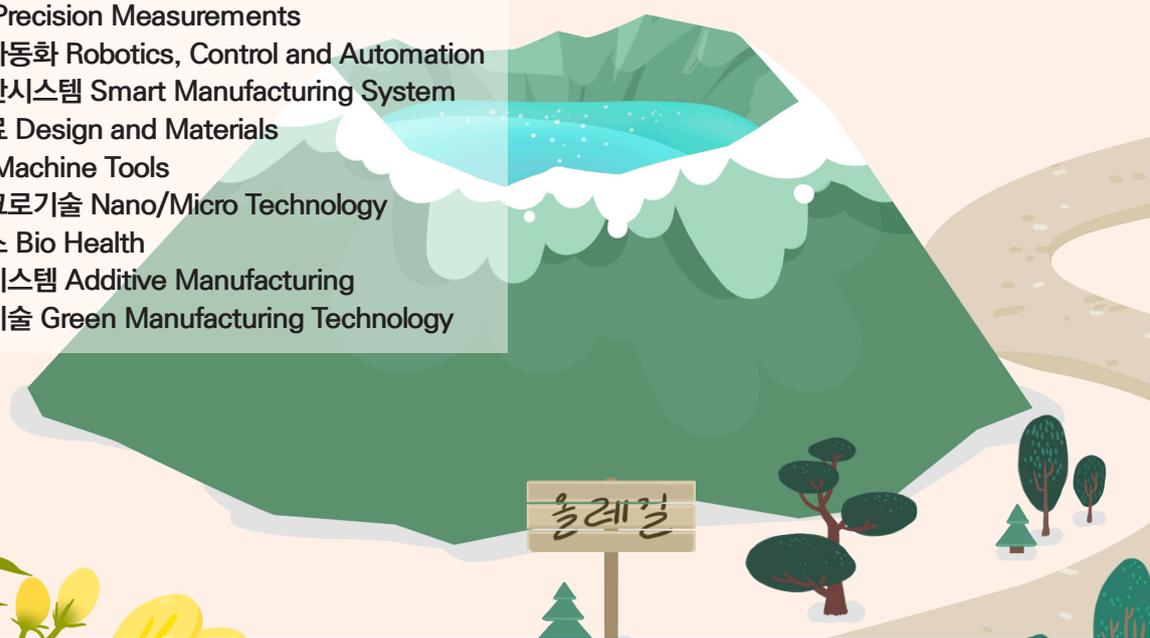
초록채택 통지
2026. 3. 21.
Fri

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



올레길

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

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*ecision *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

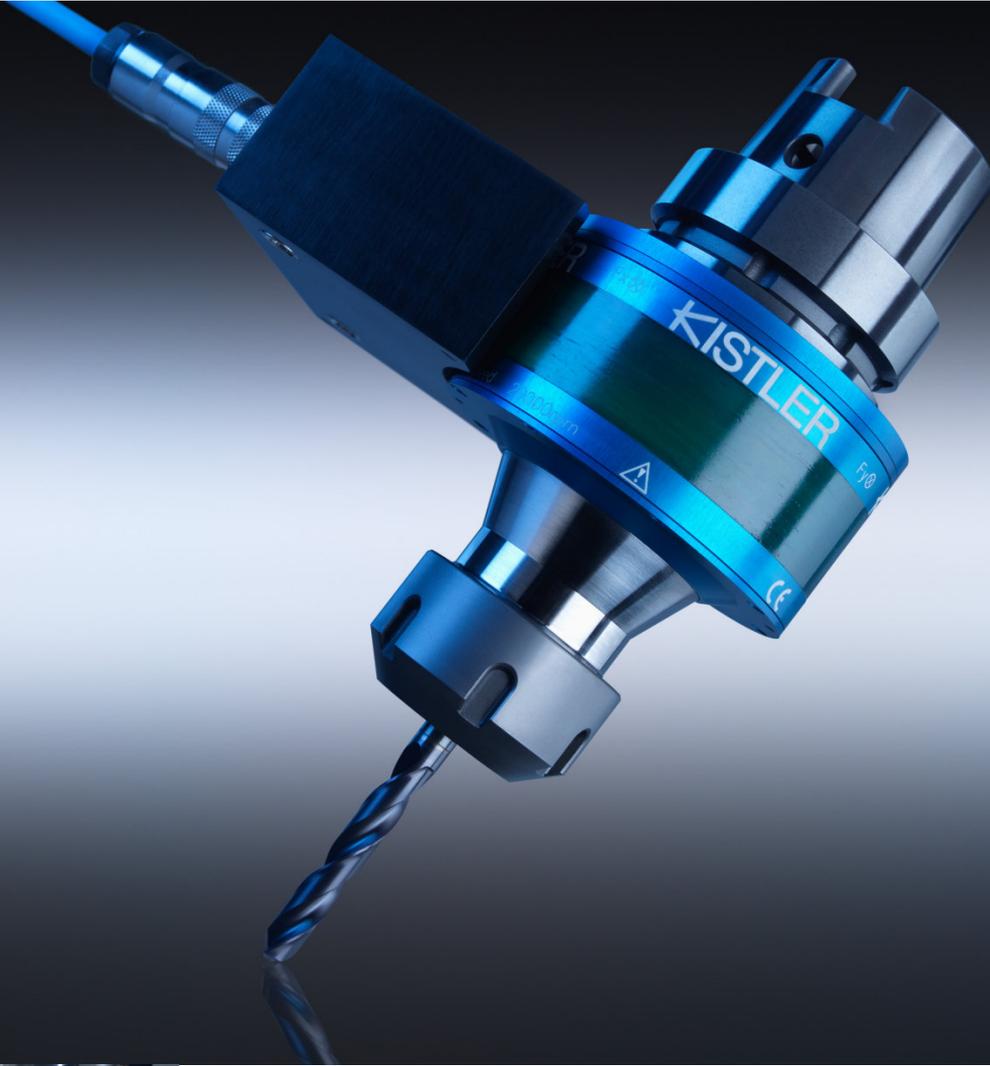
한국정밀공학회

2026 KSPE 2026
Autumn
Conference
추계학술대회

2026. 11.11(수)-13(금)
창원 CECO (경상남도 창원시)

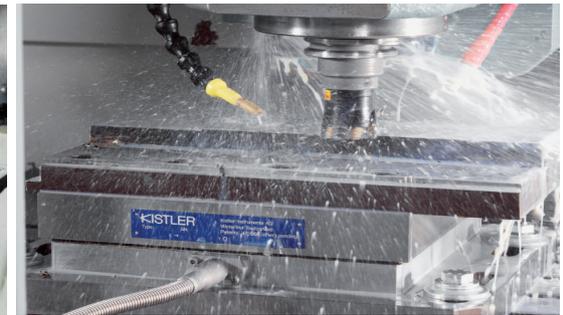
KSPE 신한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering





절삭력측정을위한공구동력계

Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement



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

담당자: 최 장원 과장 , 010-2675-9466 www.kistler.com