

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 42, NUMBER 3

MARCH 2025

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim

Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

Hyung Wook Park
UNIST

Kwang-Il Lee
Kyungil University

Seung Hwan Ko
Seoul National University

Moonkyu Kwak
Kyungpook National University

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Jihwan An
POSTECH

Won-Shik Chu
Gyeongsang National University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Maolin Jin
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

Changwoo Lee
Konkuk University

Baeksuk Chu
Kumoh National Institute of Technology

Dong Sung Kim
POSTECH

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Kee Joo Kim
Tongmyong University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Koo Hyun Chung
University of Ulsan

Doo-Man Chun
University of Ulsan

Duhwan Mun
Korea University

MinSoo Park
Seoul National University of Science & Technology

Hyunseop Lee
Dong-A University

Jihong Hwang
Seoul National University of Science & Technology

Yang Jin Kim
Pusan National University

Jonghan Jin
Meter-lab

Yongho Jeon
Ajou University

Jungjae Park
Meter-lab

Members of Editorial Board

Bongchul Kang
Kookmin University

Hyun-Wook Kang
UNIST

Ki Nam Joo
Chosun University

Namkeun Kim
Sogang University

Chang-Ju Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

Segon Heo
Korea Institute of Machinery & Materials

Hyo-Young Kim
Korea Polytechnic University

Jangho Bae
Kyungshung University

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

Sanha Kim
KAIST

Donghun Lee
Soongsil University

Bong-Kee Lee
Chonnam National University

Howon Lee
Seoul National University

Jinah Jang
POSTECH

Sangjin Maeng
Hongik University

Sanghoon Ahn
Korea Institute of Machinery & Materials

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Young-Man Choi
Ajou University

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Gap-Yong Kim
Iowa State University

Beomjoon Kim
University of Tokyo

Woo Kyun Kim
University of Cincinnati

Sangkee Min
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
San Diego State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 42, NUMBER 3 / March 2025

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 March 1, 2025 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Sung-Hoon Ahn (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

- 197 UAV 통신 환경에서 심층 Q-네트워크 기반 무선 자원 할당 기법
한동희, 김주영, 이상홍
- 203 홀로닉 팩토리를 위한 자산관리헬 기반 가상화 모델
강영신, 신승준, 김철호, 박재현
- 215 힘측정 및 가변강성 기능을 갖는 3축 순응 디버링 로봇 툴 설계
김기성, 전정현, 김한성
- 223 Pose 정렬 메커니즘을 활용한 드론 자동 충전 시스템
한다영, 호유진, 봉재환
- 231 공간 난방, 직사드라이, 제습 기능을 적용한 스마트 욕실 시스템의 CFD 기반 성능 평가
김현수, 김정수, 김지훈, 강성욱
- 241 소형 재밍 그리퍼의 설계에 관한 연구
윤진곤, 금재영, 이창기, 윤동원
- 247 제조 환경에서 회귀 분석 기반의 공구 수명 예측 모델 개발
김현철
- 253 딥강화학습과 시뮬레이션을 활용한 제조 레이아웃의 물리적 배치 최적화
최예지, 김민성, 김병수

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 42, NUMBER 3 / March 2025

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

CONTENTS

REGULAR

- 197 Deep Q-network Based Resource Allocation for UAV Communication Systems
Dong Hee Han, Joo Young Kim, and Sang Heung Lee
- 203 Asset Administration Shell-based Virtualized Model for Holonic Factory
Yeoung Sin Kang, Seung-Jun Shin, Cheol Ho Kim, and Jaehyun Park
- 215 Design of a 3-Axis Compliant Robotic Deburring Tool with Force Sensing and Variable Stiffness Capabilities
Gi-Seong Kim, Jeong-Hyeon Jun, and Han Sung Kim
- 223 Autonomous Drone Charging System Using Pose Alignment Mechanism
Da Yeong Han, Yu Jin Ho, and Jae Hwan Bong
- 231 CFD-based Performance Evaluation of Smart Bathroom Systems with Space Heating, Direct Drying, and Dehumidification
Hyun Soo Kim, Jung Su Kim, Ji Hoon Kim, and Sung Wook Kang
- 241 Study on the Design of a Small-Scale Soft Jamming Gripper
Jingon Yoon, Jaeyeong Keum, Changgi Lee, and Dongwon Yun
- 247 Development of a Regression-Based Tool Life Prediction Model in Manufacturing Environments
Hyun Chul Kim
- 253 Optimization of Manufacturing Layout Using Deep Reinforcement Learning and Simulation
Ye Ji Choi, Minsung Kim, and Byeong Soo Kim

UAV 통신 환경에서 심층 Q-네트워크 기반 무선 자원 할당 기법

Deep Q-network Based Resource Allocation for UAV Communication Systems

한동희^{1,*}, 김주영¹, 이상흥¹
Dong Hee Han^{1,*}, Joo Young Kim¹, and Sang Heung Lee¹

¹ LIG넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd.)
* Corresponding Author / E-mail: donghee.han@lignex1.com, TEL: +82-031-8038-0246
ORCID: 0000-0002-9190-005X

KEYWORDS: Radio resource allocation (무선 자원 할당), Power allocation (전력 할당), Deep reinforcement learning (심층 강화 학습), UAV communications (무인기 통신)

In this paper, we propose a deep Q-network-based resource allocation method for efficient communication between a base station and multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in environments with limited wireless resources. This method focused on maximizing the throughput of UAV to Infrastructure (U2I) links while ensuring that UAV to UAV (U2U) links could meet their data transmission time constraints, even when U2U links share the wireless resource used by U2I links. The deep Q-network agent uses the Channel State Information (CSI) of both U2U and U2I links, along with the remaining time for data transmission, as state, and determines optimal Resource Block (RB) and transmission power for each UAV. Simulation results demonstrated that the proposed method significantly outperformed both random allocation and CSI-based greedy algorithms in terms of U2I link throughput and the probability of meeting U2U link time constraints.

Manuscript received: August 20, 2024 / Revised: December 27, 2024 / Accepted: January 6, 2025
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2024

1. 서론

UAV (Unmanned Aerial Vehicle, 무인 항공기) 기반 통신 시스템은 효율적이고 유연한 네트워크 구축이 가능하여 최근 연구가 활발히 진행되고 있다. UAV 통신 시스템은 재난 지역의 긴급 물품 배송, 원격 의료 지원, 산불 감지, 감시 시스템 등 여러 분야에서 활용되고 있으며, 특히 통신 인프라가 제한적인 지역에서 효과적인 통신 수단을 제공할 수 있다는 장점이 있다[1-4]. UAV 통신 시스템은 주로 U2U (UAV-to-UAV, UAV 간 통신) 링크와 U2I (UAV-to-Infrastructure, 지상 인프라 간의 통신) 링크로 구성된다. U2U와 U2I 링크는 각기 다른 목적을 위해 사용되지만, 동일한 주파수 대역을 공유할 때 자원 간섭 문제와 신호 충돌이 발생할 수 있어 효율적인 자원 할당이 필수적이다.

기존 연구들은 다수의 지상 사용자와 다수의 UAV 간의 간섭을 최소화하면서 지상 사용자와 UAV 링크의 통신 품질 균형을

유지하는 방법[5], 다수의 지상 사용자와 다수의 UAV 간 통신 성능 개선을 위해 UAV의 경로 최적화 및 자원 할당 문제를 기계학습으로 개선하는 방법[6], 재해 지역에서의 채널 모델을 구성하고, 제안하는 채널 모델에 UAV의 통신 자원을 할당하는 방법[7] 등에 중점을 두고 있다.

본 연구는 기존 연구들과 달리 일반적인 접근을 통해, 단일 기지국과 U2I 링크 간 사용하는 주파수 대역을 U2U 링크가 공유하는 환경에서 U2I 링크의 Throughput을 최대화하고, U2U 링크의 실시간 데이터 전송을 보장하기 위해 심층 Q-네트워크 기반의 무선 자원 할당 기법을 제안한다. 심층 Q-네트워크 기반 접근은 다양한 환경에서 UAV의 자율적 의사결정을 가능하게 하여, 상호 간의 자원 간섭을 최소화하고 네트워크의 안정성을 높일 수 있다.

본 연구는 UAV 기반 통신 시스템이 높은 Throughput과 낮은 데이터 전송 지연을 통해 재난 대응, 물류 지원, 원격 감시 등의

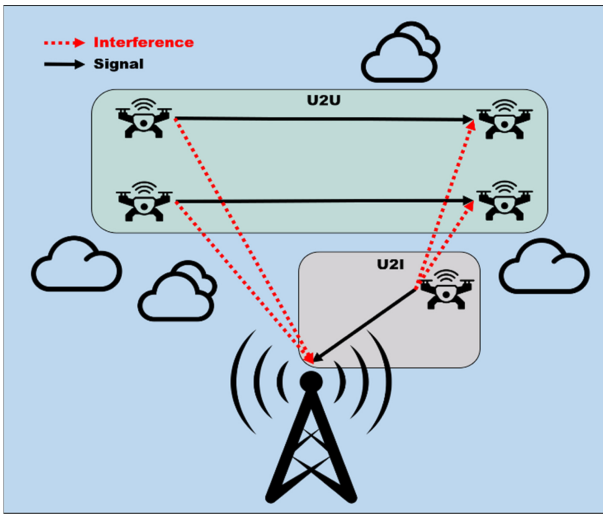


Fig. 1 System model

분야에서 향상된 통신 성능을 제공할 수 있다는 점에서 의의를 가진다. 특히, 심층 Q-네트워크 에이전트의 자율적인 자원 할당을 통해 기지국 의존도를 낮추고 네트워크 성능을 최대함으로써, 보다 다양한 상황에서 UAV의 실용성을 증진시킬 수 있다.

2. 시스템 모델

Fig. 1은 본 연구에서 가정한 단일 기지국과 다수의 UAV가 있는 환경을 나타낸다. 가정한 환경에서 통신 구조는 U2U 및 U2I 링크로 구성되어 있다. 그리고 U2U 링크는 U2I 링크에서 사용하는 RB (Resource Block, 무선 자원 블록)를 재사용한다. 여기서 기지국에 의해 형성된 U2I 링크의 수를 M , U2U 링크의 수를 K 로 정의한다. 이와 같이 정의했을 때 m 번째 U2I 링크의 SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio, 신호 대 간섭-잡음비)과 Throughput 수식은 식(1)과 식(2)와 같다.

$$SINR^I[m] = \frac{P_m^I h_m}{\sigma^2 + \sum_{k \in K} p_k[m] p_k^u \tilde{h}_k} \quad (1)$$

$$C^I[m] = W \cdot \log(1 + SINR^I[m]) \quad (2)$$

여기서 P_m^I 는 m 번째 U2I 링크의 송신부에서 전송하는 전력이다. h_m 은 m 번째 U2I 링크의 채널 이득이다. σ^2 은 잡음 전력이다. $p_k[m]$ 는 k 번째 U2U 링크의 송신부에서 m 번째 RB를 사용하는지 여부이며 0 또는 1의 값을 가진다. p_k^u 는 k 번째 U2U 링크의 송신부에서 전송하는 전력이다. \tilde{h}_k 는 k 번째 U2U 링크의 채널이득이다. $C^I[m]$ 는 m 번째 U2U 링크의 Throughput이다. W 는 부반송파 대역폭이다. $SINR^I[m]$ 은 m 번째 U2I 링크의 SINR을 의미한다.

다음 k 번째 U2U 링크에 대한 SINR과 Throughput 수식은 식(3)부터 식(6)과 같다.

$$SINR^U[k] = \frac{P_k^U g_k}{\sigma^2 + I_k^{U2I} + I_k^{U2U}} \quad (3)$$

$$I_k^{U2I} = \sum_{m \in M} p_k[m] P_m^I \tilde{g}_{m,k} \quad (4)$$

$$I_k^{U2U} = \sum_{m \in M} \sum_{k' \in K, k' \neq k} p_{k'}[m] P_{k'}^U \tilde{g}_{k',k}^u \quad (5)$$

$$C^U[k] = W \cdot \log(1 + SINR^U[k]) \quad (6)$$

여기서 g_k 는 k 번째 U2U 링크의 채널이득이다. I_k^{U2I} 는 k 번째 U2U 링크에 대해 동일한 RB를 사용하고 있는 U2I 링크의 간섭 신호이다. I_k^{U2U} 는 k 번째 U2U 링크에 대해 동일한 RB를 사용하는 U2U 링크의 간섭 신호이다. $\tilde{g}_{m,k}$ 는 m 번째 U2I 링크의 송신단과 k 번째 U2U 링크의 수신단 간 채널이득이다. $p_{k'}[m]$ 는 k' 번째 U2U 링크의 송신단에서 m 번째 RB를 사용하는지 여부이며 0 또는 1의 값을 가진다. $P_{k'}^U$ 는 k' 번째 U2U 링크의 송신단에서 전송하는 전력이다. $\tilde{g}_{k',k}^u$ 는 k' 번째 U2U 링크의 송신단과 k 번째 U2U 링크의 수신단 간 채널이득이다. $C^U[k]$ 는 k 번째 U2U 링크의 Throughput이다. 마지막으로 $SINR^U[k]$ 는 k 번째 U2U 링크의 SINR이다.

3. 심층 Q-네트워크 기반 무선 자원 할당

3.1 심층 Q-네트워크

심층 Q-네트워크는 Q-학습 알고리즘을 기반으로 하는 알고리즘이다[8]. Q-학습 알고리즘은 에이전트가 Q 값 (Q-Value, 상태-행동 쌍에 대한 누적 보상 기대 값)을 추정하는 가치 기반 강화학습이다. 누적 보상 값 수식은 식(7)과 같다.

$$R_{t:T} = r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \dots + \gamma^{T-t} r_{t+T+1} \quad (7)$$

여기서 r_t 는 t 시점에서 환경으로부터 받은 보상 값이다. T 는 환경의 마지막 시점이다. γ 는 보상 감가율(Discount Factor)를 의미한다.

다음 Q 값 수식은 식(8)과 같다.

$$Q(s, a) = \mathbb{E}[R_{t:T} | s_t = s, a_t = a] \quad (8)$$

여기서 s_t 는 t 시점에서 관측한 상태 값이다. a_t 는 t 시점에서 선택한 행동 값이다.

Q-학습 알고리즘은 학습 알고리즘을 이용해 추정된 Q 값을 Q 테이블에 저장하는 구조이다. 하지만, Q-학습 알고리즘은 Q 테이블을 사용하기 때문에 관찰 가능한 상태 값의 수가 많아 질수록 메모리 요구량이 기하급수적으로 증가하는 한계점이 있다.

Q-학습 알고리즘과 달리 심층 Q-네트워크는 심층 신경망을 이용해 근사화한 Q 값을 구한다. 이후 ϵ -greedy 정책에 따라 다음 행동을 선택한다. Fig. 2는 심층 Q-네트워크에서 사용하는 심층 신경망의 구조이다. 심층 Q-네트워크를 UAV 통신 시스템에 적용하기 위해서는 UAV 통신 시스템에서 활용 가능한 상태 공간, 행동 공간, 보상 함수를 필수적으로 정의해야 한다.

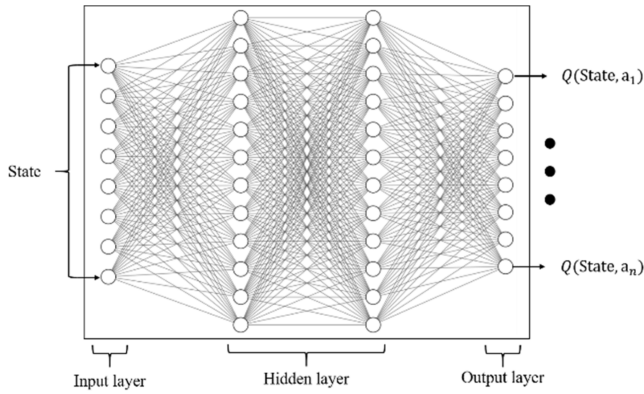


Fig. 2 The structure of Q-network

a_1	RB_1	Power Level ₁ (dBm)
a_2	RB_2	Power Level ₁ (dBm)
...		
$a_{(m \times 3) - 1}$	RB_{m-1}	Power Level ₃ (dBm)
$a_{(m \times 3)}$	RB_m	Power Level ₃ (dBm)

Fig. 3 The example of action space

3.2 상태 공간

본 연구에서 심층 Q-네트워크를 무선 자원 할당 알고리즘에 적용하기 위해 정의한 상태 공간은 식(9)와 같다.

$$S_t = \{H_t, I_{t-1}, G_t, B_{t-1}, U_t, L_t\} \quad (9)$$

여기서 H_t 는 t 시점에서 모든 U2I 링크에 대한 채널 상태 정보이다. I_{t-1} 는 $t-1$ 시점에서 U2U 링크에 의해 발생한 간섭 신호 정보이다. G_t 는 t 시점 U2U 링크의 송신단과 수신단 간 채널 상태 정보이다. B_{t-1} 는 $t-1$ 시점에서 모든 U2U 링크에서 선택했던 RB 정보이다. U_t 는 t 시점에서 U2U 링크에서 제약 시간 만기까지 남은 시간이다. L_t 는 t 시점에서 요구사항 충족까지 남은 데이터 량이다.

3.3 행동 공간

본 연구에서 정의한 행동 공간은 선택 가능한 전력 레벨의 개수와 모의실험에서 형성된 RB의 개수의 조합이다.

$$a = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_{m \times 3}\} \quad (10)$$

행동 공간은 U2U 링크의 송신단에서 선택 가능한 RB의 개수와 전력 레벨의 조합으로 구성된다. Fig. 3은 U2U 링크의 송신단의 에이전트가 선택한 행동에 따라 선택된 RB와 전송할 전력 레벨을 표현한 것이다.

3.4 보상 함수

본 연구에서 심층 Q-네트워크 기반 무선 자원 할당을 적용하기

위해 정의한 보상 함수는 식(11)부터 식(14)와 같다.

$$r_t = \lambda_{U2I} r_t^{U2I} + \lambda_{U2U} r_t^{U2U} - \lambda_p r_t^p \quad (11)$$

$$r_t^{U2I} = \frac{\sum_{m \in M} C_t^I[m, a_t] - \min \sum_{m \in M} C_t^I[m, a]}{\max \sum_{m \in M} C_t^I[m, a] - \min \sum_{m \in M} C_t^I[m, a]} \quad (12)$$

$$r_t^{U2U} = \frac{\sum_{k \in K} C_t^U[k, a_t] - \min \sum_{k \in K} C_t^U[k, a]}{\max \sum_{k \in K} C_t^U[k, a] - \min \sum_{k \in K} C_t^U[k, a]} \quad (13)$$

$$r_t^p = \frac{(T_0 - U_{t,i,j})}{T_0} \quad (14)$$

여기서 r_t^{U2I} , r_t^{U2U} , r_t^p 는 순서대로 U2I 링크의 Throughput, U2U 링크의 Throughput, U2U 링크의 지연 시간 만기까지 남은 시간에 대한 보상 값이다. a_t 는 t 시점에서 심층 Q-네트워크 에이전트가 선택한 행동이다. $C_t^I[m, a_t]$ 는 t 시점에서 선택한 행동 a_t 에 따르는 m 번째 U2I 링크의 Throughput 값이다. $C_t^U[k, a_t]$ 는 t 시점에서 선택한 행동 a_t 에 따르는 k 번째 U2U 링크의 Throughput 값이다. T_0 는 미리 설정한 U2U 링크의 전송 시간 제약 값이다. $U_{t,i,j}$ 은 t 시점에서 i 번째 UAV에서 j 번째 UAV의 U2U 링크의 전송 시간 제약 만기까지 남은 시간이다. λ_{U2I} 는 U2I 링크 보상 가중치이다. λ_{U2U} 는 U2U 링크 보상 가중치이다. 마지막으로 λ_p 는 U2U 링크 제약 시간 보상 가중치이다. 따라서 심층 Q-네트워크의 에이전트는 정의한 r_t^{U2I} , r_t^{U2U} , r_t^p 값에 대해서 λ_{U2I} , λ_{U2U} , λ_p 가중치 값을 고려하여 모의실험에서 계산한 누적 보상 평균 값을 최대화를 목적으로 학습하게 된다.

3.5 심층 Q-네트워크 학습 및 평가

Fig. 4는 본 연구에서 제안하는 심층 Q-네트워크의 학습 구조이다.

학습 알고리즘의 첫 번째로 Online Network와 Target Network를 초기화한다. 다음 환경으로부터 상태 값을 관측하고 Online Network를 이용해 Q 값을 계산한다. 여기서 여러 개의 UAV에서 동시에 상태를 관측하고, Q 값을 산출한다. 다음 ϵ -greedy 정책에 따라 모든 UAV의 U2U 링크 송신단에서 다음 행동을 선택하고, 동시에 환경과 작용한다. 이후 환경으로부터 얻은 다음 상태 값과 보상 값과 함께 상태, 행동, 다음 상태, 보상 값 묶음으로 경험 재현 저장소(Replay Memory)에 저장한다. 경험 재현 저장소에 데이터 묶음이 일정 개수 이상 저장되었다면, 경험 재현 저장소에서 데이터 묶음을 무작위로 추출하여 Online Network를 학습시키는 데 사용한다. 학습시키는 데 사용한 손실 함수는 식(15)와 식(16)과 같다.

$$y = r_t + \gamma \max_a (Q(s_{t+1}, a, \theta^-)) \quad (15)$$

$$Loss(\theta) = \frac{1}{N_E} \sum_{s_t, a_t \in E} (y - Q(s_t, a_t, \theta))^2 \quad (16)$$

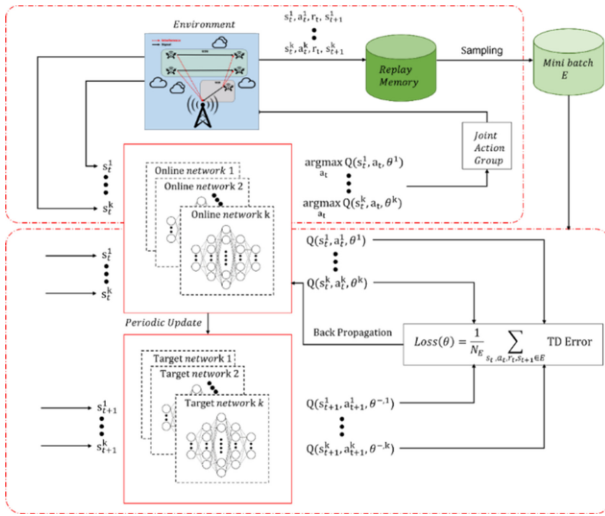


Fig. 4 The structure of DQN for the UAV communications

여기서 $Q(s_{t+1}, a, \theta^-)$ 는 Target Network를 이용해 계산한 Q 값을 의미하고, $Q(s_t, a_t, \theta)$ 는 Online Network를 이용해 계산한 Q 값을 의미한다. E 는 경험 재현 저장소에서 무작위로 추출한 데이터 묶음이다. N_E 는 경험 재현 저장소에서 무작위로 추출한 데이터 묶음의 개수이다. 다음 Online Network를 일정 횟수 이상 학습하면 Online Network의 뉴런 가중치 값 θ 을 Target Network의 신경망 가중치 값 θ^- 으로 복사시킨다. 이와 같은 구조로 학습을 진행하며, 설정한 반복 횟수만큼 학습을 진행하면 학습 알고리즘을 중단시킨다.

평가 알고리즘은 학습 알고리즘과 달리 학습시킨 Online Network만을 이용한다. 첫 번째로 환경으로부터 상태 값을 관측하고 Online Network를 이용해 Q 값을 계산한다. 이후 greedy 정책 기반으로 다음 행동을 선택하고 환경과 상호작용을 하는 구조이다. 설정한 반복 횟수만큼 진행하면 평가 알고리즘을 중단시키고 측정된 값을 평가한다.

4. 모의실험 결과

모의실험은 Tables 1과 2와 같이 설정했다. Fig. 5 는 모의실험 환경 예시 사진이다. Fig. 6은 심층 Q-네트워크의 학습 곡선이다. 2,000번 학습 이후에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

모의실험은 무작위 자원 할당 기법, 채널 상태 기반 탐욕적 할당 기법과 제안하는 심층 Q-네트워크 기반 무선 자원 할당 기법을 대상으로 U2U 링크를 증가시키면서 성능을 비교했다.

무작위 할당 기법은 각 U2U 링크 송신단에서 RB를 무작위로 선택하여 23 dBm 세기 신호를 전송하는 구조이다. 채널 상태 기반 탐욕적 할당 기법은 U2U 링크 송신단에서 선택 가능한 RB에 대해서 채널 상태를 확인 후 SINR 값이 가장 높게 측정되는 RB를 선택하여 23 dBm 세기 신호를 전송하는 구조이다[9].

성능을 평가한 그래프는 3종류이며 Fig. 7은 U2U 링크의

Table 1 Simulation parameter

Simulation size (X, Y, Height) [m]	1300 × 580 × 300
Speed of UAV [km/h]	30
Direction of UAV	Random
Path loss	Free space path loss
Shadowing [dB]	Log-normal with $\sigma^2 = 8$
Small fading	Rician fading
Noise figure σ^2 [dB]	-114
Carrier frequency [GHz]	2
Subcarrier bandwidth W [MHz]	1.5
Infrastructure antenna height [m]	25
Infrastructure antenna gain [dBi]	8
Infrastructure antenna noise figure [dB]	5
UAV antenna gain [dBi]	3
UAV antenna noise figure [dB]	9
U2U link time constraint [ms]	100
U2U link payload [Mbits]	30
Time slot [ms]	2
U2I link Transmit power level P^j [dBm]	23
U2U link Transmit power levels P^u [dBm]	5, 10, 23
Number of U2I links M	20

Table 2 Reinforcement learning parameter

Number of input layer neuron	82
Number of hidden layer neuron	520, 200, 100
Number of output layer neuron	60
Activation function of Hidden layer	Leaky ReLU
Discount factor γ	0.99
Learning rate	0.001
Coefficient of reward function [$\lambda_{U2I}, \lambda_{U2U}, \lambda_p$]	0.1, 0.3, 0.6
Number of time steps per episode	200
Number of episode	50

Throughput 총합 평균, Fig. 8은 U2U 링크의 지연 시간 제약 조건 미 충족 확률, Fig. 9는 U2I 링크의 Throughput 총합 평균이다.

Fig. 7을 통해 제안하는 기법과 채널 상태 기반 탐욕적 할당 기법과 무작위 할당 기법이 거의 비슷한 성능을 볼 수 있다. 이는 제안하는 기법이 학습 과정에서 U2U 링크의 Throughput을 최대화하는 것보다 U2U 링크의 지연 시간 제약 조건을 만족시키는 것과 U2I 링크의 Throughput을 최대화하는 것을 중점으로 학습했기 때문이다. Fig. 8은 제안하는 기법이 다른 기법보다 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. 여기서 채널 상태 기반 탐욕적 할당 기법은 모든 U2U 링크의 송신단에서 상태가 좋은 채널만 선택했기 때문에 간섭 신호가 크게 작용하여, 성능이 다른 기법들에 비해 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 제안하는 기법이

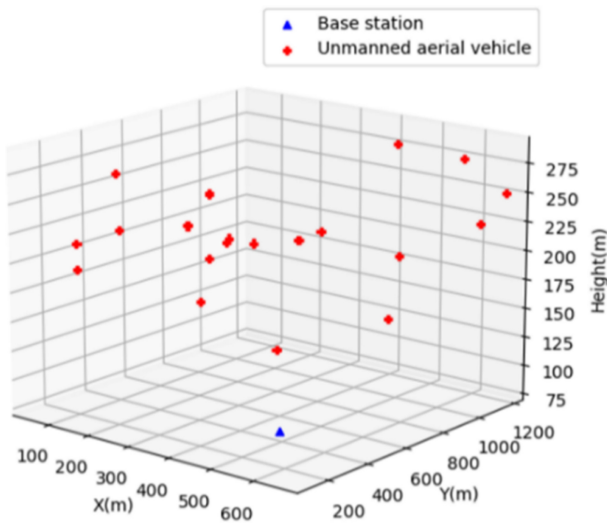


Fig. 5 Example of simulation environment

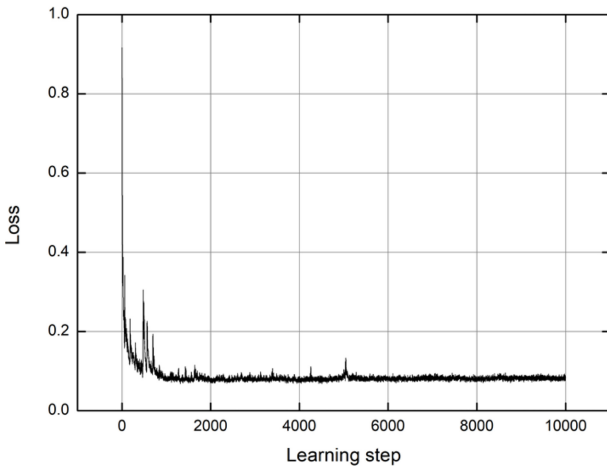


Fig. 6 Deep Q-network learning curve

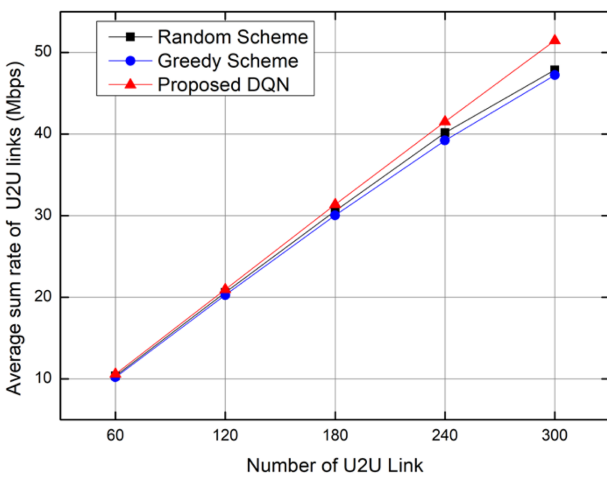


Fig. 7 Average sum rate of U2U links

다른 U2U 링크의 간섭 신호를 고려하여 행동을 선택했음을 알 수 있다.

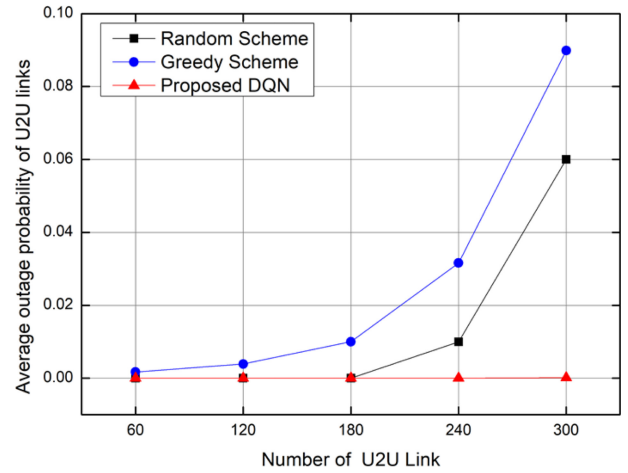


Fig. 8 Average outage probability of U2U links

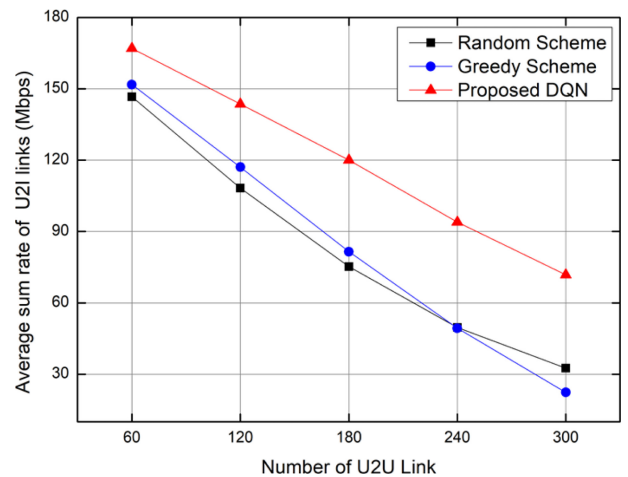


Fig. 9 Average sum rate of U2I links

마지막으로 Fig. 9 또한 제안하는 기법이 다른 기법보다 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 제안하는 기법이 다수의 U2U 링크에서 U2I 링크의 간섭을 고려하여 자원을 행동을 선택했음을 알 수 있다.

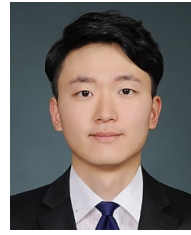
5. 결론

본 연구를 통해 단일 기지국과 다수의 UAV가 있는 통신 환경에서 심층 Q-네트워크를 이용한 무선 자원 할당 기법의 성능의 우수함을 입증할 수 있었다. 제안하는 기법은 개별 강화 학습에 이진트가 다수의 UAV에 분산되어 개별 상태 정보를 입력받아 개별적으로 자원 할당을 하는 구조였다. 하지만 무선 자원을 효율적으로 사용하기 위해서는 다수의 UAV가 개별 상태 정보들을 공유하여 보다 협력적으로 자원을 이용할 필요가 있다. 또한 기존 심층 Q-네트워크는 이산적인 행동 공간을 사용하기 때문에 행동 공간이 증가할수록 차원의 저주(Curse of Dimensionality)에 빠지는 단점이 존재한다. 이에 따라 향후 연구로 본 연구에서 사용한

모의시험 환경에서 멀티 에이전트 강화 학습과 액터-크리틱 기반 강화 학습을 적용하는 방향으로 진행할 필요가 있다.

REFERENCES

1. Xiao, Z., Xia, P., Xia, X. G., (2016), Enabling uav cellular with millimeter-wave communication: potentials and approaches, *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 66-73.
2. Bucaille, I., Héthuin, S., Munari, A., Hermenier, R., Rasheed, T., Allsopp, S., (2013), Rapidly deployable network for tactical applications: aerial base station with opportunistic links for unattended and temporary events absolute example, *Proceedings of the IEEE military communications conference*, 1116-1120.
3. Frew, E. W., Brown, T. X., (2008), Airborne communication networks for small unmanned aircraft systems, *Proceedings of the IEEE*, 2008-2027.
4. Cao, X., Yang, P., Alzenad, M., Xi, X., Wu, D., Yanikomeroglu, H., (2018), Airborne communication networks: a survey, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(9), 1907-1926.
5. Azari, M. M., Geraci, G., Garcia-Rodriguez, A., Pollin, S., (2019), Cellular uav-to-uav communications, *Proceedings of the 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-7.
6. Chang Z., Guo, W., Ristaniemi, T., (2020), Machine learning-based resource allocation for multi-uav communications system, *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on communications workshops*, 1-6.
7. Yao, Z., Cheng, W., Zhang, H., (2021), Resource allocation for 5g-uav-based emergency wireless communications, *International Journal of IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(11), 3395-3410.
8. Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Ridemiller, M., Fidjeland, A. K., Ostrovski, G., et al., (2015), Human-level control through deep reinforcement learning, *nature*, 518(7540), 529-533.
9. Li, R., Zhu, P., Jin, L., (2019), Channel allocation scheme based on greedy algorithm in cognitive vehicular networks, *Proceedings of the 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference*, 803-807.



Dong Hee Han

M.S. Research Engineer, Unmanned/Intelligent robotics systems R&D, LIG Nex1. His research interest is in reinforcement learning for wireless communications.

E-mail: donghee.han@lignex1.com



Joo Young Kim

M.S. Chief Research Engineer, Unmanned/Intelligent robotics systems R&D, LIG Nex1. Her research interest is in machine learning-based autonomous systems.

E-mail: jooyoung.kim@lignex1.com



Sang Heung Lee

M.S. Research Engineer, Unmanned/Intelligent robotics systems R&D, LIG Nex1. His research interest is in machine learning-based autonomous systems.

E-mail: sangheung.lee@lignex1.com

홀로닉 팩토리를 위한 자산관리셸 기반 가상화 모델

Asset Administration Shell-based Virtualized Model for Holonic Factory

강영신¹, 신승준², 김철호³, 박재현^{3,#}
Yeoung Sin Kang¹, Seung-Jun Shin², Cheol Ho Kim³, and Jaehyun Park^{3,#}

¹ 한양대학교 산업데이터엔지니어링학과 (Department of Industrial Data Engineering, Hanyang University)

² 한양대학교 산업융합학부 (School of Interdisciplinary Industrial Studies, Hanyang University)

³ 한국생산기술연구원 지속가능기술연구소 (Research Institute of Sustainable Development Technology, Korea Institute of Industrial Technology)

Corresponding Author / E-mail: jh8145@kitech.re.kr; TEL: +82-41-589-8286

ORCID: 0000-0002-3401-7922

KEYWORDS: Holonic manufacturing systems (홀로닉 제조 시스템), Asset administration shell (자산관리셸), Contract net protocol (계약망 프로토콜), Process planning (공정 계획), Predictive analytics (예측적 분석)

Holonic Manufacturing Systems (HMSs) are regarded as a foundation of cyber-physical production systems as they enable computers to conduct intelligent process planning, scheduling, and control by endowing manufacturing components with autonomy and collaboration. In an HMS, autonomy is realized by specifying holons that represent virtual agents of manufacturing components, while collaboration is facilitated through a communication mechanism that enables data exchange and decision making throughout a holarchy of holons without human intervention. This study presents the development of a virtualized holon model and a predictive process planning procedure using the Asset Administration Shell (AAS), i.e., a standardized model that can identify digital representation of manufacturing components to ensure interoperability. Specifically, an AAS-based information model was proposed to define operator, machine, product, and order holons. In addition, a predictive process planning procedure based on the Contract Net Protocol was developed to automatically allocate tasks while predicting task execution times. This study can contribute to the designing of an AAS-domain specific information model for HMS to increase interoperability in the holon holarchy, exhibiting the feasibility of AAS applications in predictive process planning on HMS.

Manuscript received: August 26, 2024 / Revised: January 12, 2025 / Accepted: January 24, 2025
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2024

1. 서론

제조업에서는 스마트 팩토리의 핵심 목표인 지능화와 자율화를 위하여 자동화 기술과 함께 고도화된 생산시스템을 도입 중이다. 이러한 중요한 흐름 속에서, 홀로닉 제조 시스템(Holonic Manufacturing Systems, 이하 HMS)은 스마트 팩토리 고도화 수준인 사이버-물리 생산시스템의 기원으로 주목받고 있다[1].

HMS는 분산된 홀론들이 자율적이면서도 협력적으로 의사결정하는 생산시스템이다[2]. 홀론은 자신이 할당된 시스템 안에서 의사 결정을 내리는 분산된 구조를 가짐으로써, 높은 유연성, 안정성 및 확장성을 제공하여 스마트 팩토리의 생산 환경 최적화를 가능하게 한다.

홀론은 그리스어인 “Holos”(전체)와 “On”(한 부분)이라는 두 단어의 조합에서 나온 단어로써, 전체 시스템을 이루는 한 부분이라는 의미로 해석된다[2]. 즉, 홀론은 자기 자신에 대한 완전한 정체성을 가지면서도 다른 조직에 종속적이기도 하다. 다만, 홀론은 개념적인 객체이므로, 컴퓨터에서의 구현을 위해서는 객체의 가상화 에이전트 개발이 필수적이다. 이러한 에이전트를 이용하여 홀론들은 홀론 조직체인 홀라키(Holarchy)를 구성하고, 각 홀론의 상태, 성능 및 자원 사용 등의 정보를 효과적으로 관리할 수 있다.

기존 연구에서는 Java Agent Development Framework (JADE),

Java Agent Services, ADaptive holonic COntrol aRchitecture (ADACOR) 등을 이용하여 홀론의 가상 에이전트를 구현하였다. 그러나, 아직 자산관리셸(Asset Administration Shell, 이하 AAS)을 이용한 사례는 없는 것으로 파악된다.

AAS는 제조 공정에서 사용되는 제조 자산의 정보를 일관적이고 디지털적으로 표현하는 디지털 트윈 표현 모델이다[3]. AAS는 자산 데이터의 표준화를 통하여 HMS 내 개별 홀론이 상호 연결되어 통합된 자산 정보를 공유하도록 지원한다. 즉, AAS는 상호운용적 HMS 구현을 가능하게 하는 기술이다. 나아가, 각 홀론은 AAS를 통하여 규격화된 방식으로 자신의 특성, 상태, 행동, 데이터를 표현할 수 있다. 이러한 방식으로 표현된 홀론 정보는 제조 시스템의 구성 요소들을 효과적으로 통합시킴으로써 높은 상호운용성을 보장한다. 더불어, 홀론간 데이터 교환·공유를 통한 홀라키의 최적 의사 결정에 의한 효율성 증대 그리고 실시간 모니터링에 의한 제조 시스템 안정성을 높일 수 있다.

본 논문에서는 HMS를 위한 AAS 기반 홀론 가상화 정보 모델(이하 AAS 홀론 정보 모델)을 설계한다. AAS 홀론 정보 모델은 HMS의 홀론 가상 에이전트 구현을 위한 AAS 규격 기반 정보 모델을 의미한다. 그리고 HMS 의사 결정 메커니즘인 Contract Net Protocol (CNP)을 이용하여 AAS 기반 홀론들이 참여하는 예측적 공정 계획 방법을 설계한다. 사례연구에서는 구축 중인 홀로닉 팩토리를 대상으로 드릴링 공정에서 작업 시간 예측 모델을 이용한 공정 계획 구현 예시를 소개한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구에 대하여 설명한다. 3장에서는 AAS 홀론 정보 모델, 작업 시간 예측 모델 및 예측적 공정 계획 방법을 설계한다. 4장에서는 구현 사례를 소개하며, 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2.1 홀로닉 제조 시스템

HMS는 1998년도에 제안된 개념이지만, 구현이 쉽지 않은 제조 시스템으로 알려져 있다. HMS는 제조 시스템 구성 요소들을 자율적이고 협력적인 단위로 조직화함으로써, 제조 활동의 전체 범위를 통합해야 하기 때문이다[4]. 나아가, HMS에서 각 홀론은 적절한 조치를 취할 수 있는 자율성을 부여해야 하기 때문이다. HMS는 홀론들의 역할이 변형되는 과정에서 안정성과 유연성을 유지해야 하므로 실시간, 분산 제어, 지능적 제어 등의 요구사항이 충족되어야 한다[5].

홀론의 주요 용어는 아래와 같다[6].

- 홀론(Holon): 전체 시스템의 구성 요소로 기능하면서, 동시에 자기 자신만의 정체성을 갖는 구성원임. 제품, 설비, 사람, 정보 등을 홀론으로 만들 수 있음. 정보와 물리적 객체로 연결되는 자율적 구성원인 동시에 상위 수준의 제어로 조정이 가능한 구성원

- 자율성(Autonomy): 외부의 통제 없이 자신의 목적 추구를 위한 자체적 의사 결정이 가능한 능력
 - 협업성(Cooperation): 다른 홀론과의 상호작용을 통하여 홀론 간 협력으로 목표를 달성
 - 홀론조직(Holarchy): 홀론들의 계층 구조로서, 상위 수준의 홀론에 하위 수준의 홀론들이 구성 요소로 기능 가능한 조직
- HMS의 설계는 상하 조직적 구조와 분산 제어를 결합하여 효율적으로 구성되어야 한다. 또한, 일반적으로 홀론 유형은 주문(Order), 제품(Product), 리소스(Resource)로 구성되나, 필요에 의하여 다른 유형의 정의도 가능하다[7]. HMS는 일종의 개념이므로, HMS 구현을 위하여 다중 에이전트 시스템(Multi Agent System)을 구현 기술로 활용한다[8]. 다중 에이전트 시스템은 단일 에이전트의 집합체이다. 단일 에이전트로는 복잡하고 규모가 큰 제조 시스템을 구현하기 어려우므로, 다중 에이전트 시스템하에서 여러 에이전트 간의 협력과 상호작용을 통해 문제를 해결하는 것이 핵심 기술이다[9]. 에이전트 간의 협력과 상호작용은 HMS의 홀론들이 서로 협력하여 제조 시스템을 유연하고 적용할 수 있게 만드는 데 중요한 역할을 한다[10].

다중 에이전트 시스템 기반 HMS 연구는 다음과 같다. Derigent 등은 자율 및 협력 단위의 홀론을 제조 환경에 통합하고, 제조 시스템의 유연성, 상호운용성을 향상 시켜 Industry 4.0에 부합하는 다중 에이전트 시스템 기반 HMS 구축을 연구하였다[11]. Zhang 등은 에너지 소비를 절감을 위한 가상 제조 환경을 위해 Production Agent, Quality Agent, Logistic Agent, Maintenance Agent를 구성하는 연구를 진행하였다[12]. D' Aniello 등은 적응 제조용 클라우드 시스템 구현을 위하여 Task Agent, Master Agent, Printer Agent를 구성하여 연구를 진행하였다[13]. Abid 등은 재구성 가능한 제조 시스템 구현을 위하여 Product Agent, Task Agent, Supervisor Agent, Operation Agent를 구성하였다[14]. Salvador Palau 등은 다중 에이전트 시스템 아키텍처를 기반으로 협업적 예측을 위한 중앙 집중식이면서 분산적인 아키텍처를 제안하였다[15]. Saadat 등은 작업자들을 작업에 동적으로 입찰할 수 있는 인력 할당 시스템 구현을 위한 홀론 기반 에이전트 시스템을 구현하였다[16].

기존 연구들은 다중 에이전트 시스템을 이용하여 목적 지향적인 HMS를 개발하였다는 것에 의의가 있다. 에이전트 기술을 이용하여 각 공장 구성 요소의 가상 객체인 홀론을 구현하고 홀론의 집합체인 홀라키를 구성함으로써 할당·계획·실행을 위한 생산 시스템의 자율성과 협업성을 부여하였다. 이는 HMS 핵심 개념인 공장 구성 요소의 객체화 및 체계화를 통하여 스마트 팩토리에서 지향하는 지능화와 자율화를 달성할 수 있음을 시사한다. 공장 구성 요소들이 데이터를 이용하여 지능적인 의사결정을 수행함과 동시에 데이터 교환을 통하여 자율적 생산 계획·운영·제어를 수행하려면 객체 지향적인 HMS 개념을 적용할 필요가 있다는 것이다.

그러나, 기존 연구들은 공장 구성 요소의 정보 구조를 일관된 방식으로 가상화하지 못하였고, 데이터 교환의 상호운용성을

보장하지 못한다는 한계가 존재한다. 이기종성과 다양성이 존재하는 공장 구성 요소들의 일관적 정보 표현을 위해서는 규격화된 정보 모델을 이용한 홀론 정보 정의가 필요하고, 공장 구성 요소간 막힘없는 데이터 교환을 위해서는 상호운용적인 표준 기반 정보 모델 개발이 필요하다.

2.2 자산관리셸(AAS)

AAS는 유·무형 자산에 대한 정보를 일관적이고 표준화된 데이터 체계로 표현하는 산업용 디지털 트윈 표현 모델이다[17]. AAS는 Industry 4.0 환경에서 공장 안의 제품, 기계 및 시스템의 상호운용성을 보장하며, 통일된 데이터 표현을 기반으로 하여 디지털적 표준화를 가능하게 한다. 이에, 벤더 종속적이던 데이터 표현 및 교환 방식에서 탈피하여 이기종 시스템에서도 쉬운 데이터 교환, 공유 및 개방을 가능하게 한다.

즉, AAS는 자산의 정보와 기능을 디지털화 및 가상화하는 데이터 표준을 제공하고, 자산 간 관계 및 계층을 유연하게 구성하게 해주며, 자산 간 상호운용성을 보장한다. 이를 통하여 데이터 교환 및 공유 과정을 간소화 및 가속화함으로써, 효율적이고 유연한 생산이 가능해지도록 개발된 표준이다[18].

Fig. 1은 AAS 정보 체계를 Unified Modeling Language (UML) 클래스 다이어그램으로 나타낸 것이다. AAS 정보 체계는 대상 자산(주로, 설비)에 대한 식별, 관리, 형식, 보안 및 인증 등 AAS 객체의 메타 정보를 가진 헤더(Header)와 실제 데이터와 정보를 담는 서브모델로 구성되는 바디(Body)로 구성된다. AAS 정보 구조는 모듈식으로 구성되며, 서브모델들의 집합으로 구성된다. 현재 AAS 규격에서는 개념, 메타 모델, 표현 언어 및 변환 규칙을 제공한다[3]. 각 클래스 설명은 아래와 같다.

- Asset Administration Shell: 헤더 영역이며, 대상 자산에 대한 AAS 객체의 식별, 정의, 제어, 형식, 보안, 인증 등 관리를 포함하는 클래스.
- Submodel: AAS가 가지는 정보를 목적별로 그룹화한 클래스. Data element들을 구성 기준에 따라 분류하고 모으는 역할을 수행
- Submodel Element: 서브모델을 구성하는 다양한 Data element를 묶기 위한 추상형 클래스. Property, Range, File, BLOB (Binary Large Object) 등 다양한 데이터 형태가 존재
- Property: 범용적인 데이터 형태(예: String, Integer, Double, Boolean)를 이용하여 자산의 데이터를 실제로 표현하는 클래스
- File: 파일 형태 데이터를 표현하는 클래스

기존 연구는 AAS의 자동화, 상호 연결성, 지능화, 지속가능성을 추구하는 Industry 4.0 시스템 구현을 중심으로 이루어졌다. Park 등은 염색기공 공정을 대상으로 AAS 가상 표현 방식에 맞추어 시스템적 효율 고도화 연구를 수행하였다[19]. Park 등은 전력 기자재를 AAS로 설계하고 상호운용성을 위해 OPC UA를 통한 디지털 트윈을 구현하였다[20]. Tantik 등은 AAS를 이용하여 중앙 원격 유지 보수 플랫폼을 구축하고, 제조 구성 요소의 통신 및 기능성에 대한 통합 데이터 모델로 활용하였다[21].

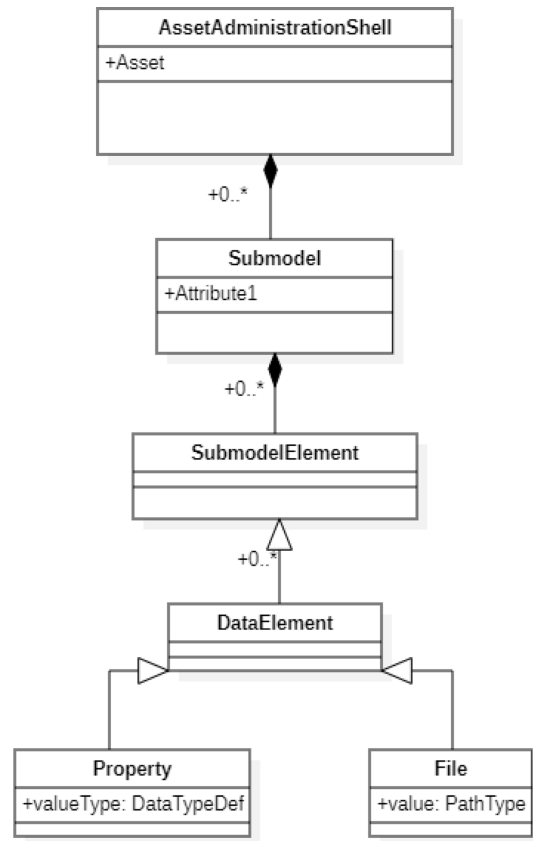


Fig. 1 AAS information structure

Heppner 등은 AAS를 기반으로 공장 구성 요소의 표준화 및 시물레이션 기반 엔지니어링 프레임워크를 개발하였다[22]. Jungbluth 등은 AASX 프로그램을 통해 AAS 정보 모델을 설계하고 공장의 생산, 실행 및 재계획을 수행하는 연구를 진행하였다[23].

기존 연구들은 AAS를 이용하여 제조 자산의 가상화 및 데이터 교환 표준화를 제시하였다는 것에 의의가 있다. 즉, AAS를 이용하면 이기종성과 다양성이 존재하는 공장 구성 요소들에 대해서도 일관적으로 가상화가 가능하고 데이터 교환을 위한 상호운용성을 동시에 확보할 수 있음을 보여주었다. 이러한 장점으로 인하여 AAS를 이용한 적용 영역은 점점 확대되고 있다.

그러나, AAS의 한계는 AAS 정보 모델 개발을 위한 메타 모델, 방법 및 표현 언어 까지만 정의되어 있다는 것이다. 즉, 적용 영역에 대한 AAS를 개발하려면, 적용 영역에 특화된 AAS 정보 모델을 개발해야 한다는 것이다. 이러한 상세 AAS 정보 모델링 작업은 쉽지 않다. 왜냐하면 적용 영역, 시맨틱 기반 정보 모델링 및 AAS에 대한 전문 지식을 가지고 있어야 하기 때문이다. 따라서, HMS의 홀론 정보 표현 및 상호운용성을 위해서는 AAS 기반 가상화 모델 개발이 필요하다. 이를 위해 HMS의 홀론을 AAS로 규격화시킴으로써, 홀론의 에이전트를 구현함과 동시에 상호운용적인 환경에서 계획, 실행 및 제어를 가능하게 하는 HMS 메커니즘 개발이 필요하다. 그러나, 아직까지는 AAS를 HMS에 적용한 사례는 없는 것으로 파악된다.

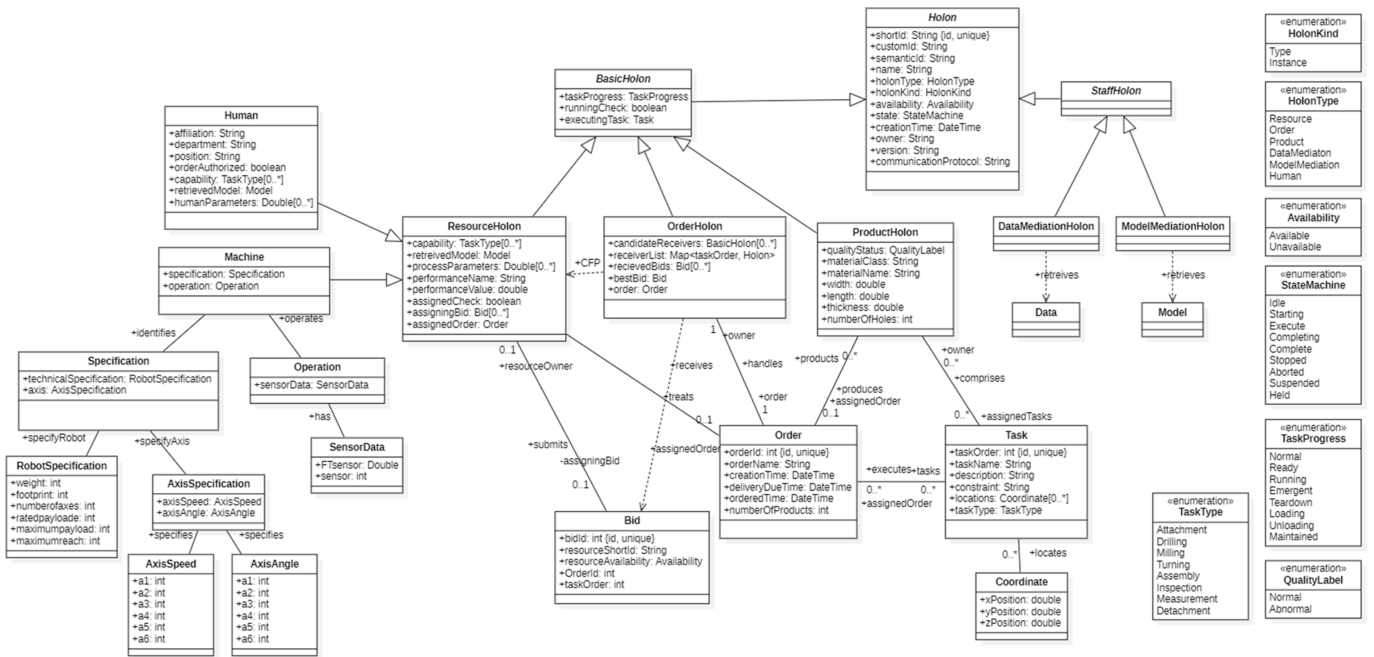


Fig. 2 Class diagram of information structure

3. AAS 홀론 정보 모델 및 예측적 공정 계획 설계

본 장에서는 HMS 홀론의 가상화를 위한 AAS 홀론 정보 모델을 설계한다. 또한, AAS간 메시지 교환을 통하여 최소 작업 시간을 예측한 설비에 작업을 할당하는 예측적 공정 계획 방법을 설계한다. 3.1절에서는 AAS 홀론 정보 모델을 설명하고, 3.2절에서는 설비의 작업 시간 예측 모델과 AAS 정보 모델 통합 방법을 설명한다. 3.3절에서는 CNP를 기반으로 예측적 공정 계획 방법을 서술한다.

3.1 AAS 홀론 정보 모델 설계

AAS 홀론 정보 모델 개발을 위하여 HMS의 체계화된 홀론 조직을 정의하는 것이 선행되어야 한다. 그리고, 각 홀론이 생성하고 저장하는 데이터와 홀론간 교환되는 데이터를 정의하는 홀론 정보 모델을 설계해야 한다. 그 후, 상세화된 홀론 정보 모델을 바탕으로 AAS 정보 및 각 데이터 항목의 매핑 방법을 정의한 AAS 홀론 정보 모델을 설계할 필요가 있다. Fig. 2는 UML 클래스 다이어그램을 이용한 홀론 정보 모델이다. 이는 홀론 정보 모델의 보편적 이해 및 규격화를 위함이다. 홀론이 최상위 클래스이며 기본 홀론(Basic Holon)과 스태프 홀론(Staff Holon)을 하위 타입으로 분기된다.

기본 홀론은 기본적인 제조 구성 요소를 나타내며, 리소스, 제품, 주문 하위 타입으로 분기된다. 리소스 홀론은 다시 머신 홀론과 휴먼 홀론의 하위 타입으로 구성된다. 스태프 홀론은 기본 홀론의 활동과 의사결정을 지원하는 역할을 수행한다. 아래는 각 홀론에 대한 설명이다.

- 홀론(Holon): 하위 홀론의 공통 속성과 오퍼레이션을

포함하는 최상위 추상형 클래스

- 기본 홀론(Basic Holon): HMS 기본 구성 요소의 공통 속성과 오퍼레이션을 포함하는 추상형 클래스
- 리소스 홀론(Resource Holon): 설비, 공구, 유틸리티 등을 나타내는 물리적 자산 클래스
- 주문 홀론(Order Holon): 공정 수행을 위한 주문, 제안 요청 및 작업 할당 등 조정자(Coordinator) 역할을 수행하는 클래스
- 제품 홀론(Product Holon): 제품 관련 정보를 포함하는 제품 클래스
- 휴먼 홀론(Human Holon): 작업자와의 인터페이스 클래스. 작업자가 실제로 홀론화 되는 것이 아닌 작업자와의 데이터 교환을 수행
- 스태프 홀론(Staff Holon): 기본 홀론의 작업을 지원하고 보조하는 추상형 클래스
- 데이터 중계 홀론(Data Mediation Holon): 데이터베이스와 연결되어 기본 홀론의 요청에 따라 데이터를 저장 및 공급해 주는 클래스
- 모델 중계 홀론(Model Mediation Holon): 모델이 저장되어 있는 데이터베이스와 연결되어 기본 홀론의 요청에 따라 모델을 저장 및 공급해 주는 클래스

Fig. 2의 홀론 정보 모델을 기반으로 AAS 홀론 정보 모델을 설계한다. 홀론화 된 개체를 AAS로 대응시키고, 홀론의 데이터 표현 및 교환을 위해 필요한 홀론의 데이터를 구조화한 AAS 정보 모델을 설계한 것이다. Fig. 3은 AAS 홀론 정보 모델의 메타 정보 모델을 보여준다. 이 메타 정보 모델은 AAS 홀론 정보 모델에 필요한 AAS 타입 및 서브모델을 정의한 것이다. AAS는 타입과 인스턴스 종류가 있는데, 타입은 AAS 정보 템플릿을

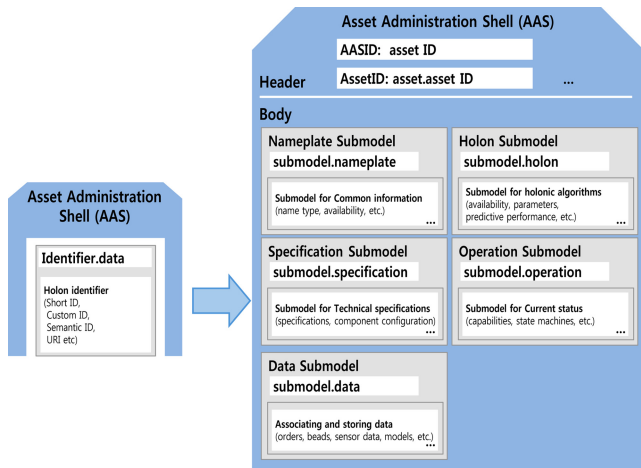


Fig. 3 AAS holon meta information model structure

정의한 것이고 인스턴스는 그 정보 구조 안에 실제 값들이 반영되어 자산을 투영한 객체를 의미한다.

AAS 규격에 따르면, AAS 정보 모델은 자산에 대한 AAS 인스턴스가 생성 가능한 형태로 정의해야 한다. 즉, Fig. 2의 추상형 클래스는 허용하지 않는다. 그래서 추상형 클래스의 속성과 오퍼레이션은 각 AAS 타입 안에 포함시켜야 한다. 이러한 이유로 리소스 홀론은 리소스 자산관리셀(Resource AAS), 제품 홀론은 제품 자산관리셀(Product AAS), 주문 홀론은 주문 자산관리셀(Order AAS)로 대응시킨다. 그리고 각 AAS가 공통으로 가져야 할 서브모델은 아래와 같이 5가지로 구성된다.

- 네임플레이트(Nameplate) 서브모델: 홀론이 가지는 식별자, 명칭, 종류 등 공통 속성에 대한 서브모델
- 홀론(Holon) 서브모델: HMS 및 예측적 공정 계획에 예측 모델, 목표 성능, 예측 성능 값 등을 포함한 서브모델
- 사양(Specification) 서브모델: 홀론의 구성 및 기술 사양(예: 제원, 규격, 성능, 구성)에 대한 서브모델
- 운영(Operation) 서브모델: 홀론의 가용 공정, 역량, 상태, 진척 상황 등을 포함한 서브모델
- 데이터(Data) 서브모델: 홀론 활동에 필요한 데이터(예: 작업, 주문, 비드, 센서 데이터)를 연결하고 저장하는 서브모델

AAS 객체 하위에 5개의 서브모델이 표현되고, 각 속성은 해당 서브모델의 하위 Submodel Element 중 하나의 형태로 속성 명과 값을 갖게 된다. 클래스 기반 홀론 정보 모델(Fig. 2)로부터 AAS 홀론 정보 모델(Fig. 3)로의 변환은 매핑 규칙(Mapping Rule)을 통하여 이루어진다. 홀론 정보 모델의 각 속성은 AAS 서브모델의 속성으로 1대1 대응되어야 하므로 매핑 규칙이 필요하다.

Table 1은 이러한 매핑 규칙을 정의한 테이블이다. 예를 들어, Fig. 2의 Holon 클래스 Short ID 속성은 각 홀론의 식별자이므로, AAS 네임플레이트 서브모델의 속성으로 대응된다. 또한, Resource Holon 클래스의 Performance Value 속성은 목표 성능에 대한 예측 값을 의미하므로, AAS 홀론 서브모델의 속성으로 대응된다.

Table 1 Mapping table for holon attributes to AAS attributes

Class	Attribute	AAS submodel	Target AAS	
Holon	Short ID	Nameplate	All	
	Custom ID	Nameplate	All	
	Semantic ID	Nameplate	All	
	Name	Nameplate	All	
	Holon type	Nameplate	All	
	Holon kind	Nameplate	All	
	Owner	Nameplate	All	
	State	Operation	All	
	Creation time	Operation	All	
	Availability	Operation	All	
	Communication protocol	Operation	All	
	Task progress	Operation	All	
	Running check	Operation	All	
	Product holon	Quality status	Operation	Product
		Number of holes	Operation	Product
Material name		Specification	Product	
Material class		Specification	Product	
Width		Specification	Product	
Length		Specification	Product	
Thickness		Specification	Product	
Order holon	Candidate receivers	Nameplate	Order	
	Receiver list	Operation	Order	
	Received bids	Operation	Order	
	Best bid	Operation	Order	
Resource holon	Performance value	Holon	Resource	
	Performance name	Holon	Resource	
	Assigned check	Holon	Resource	
	Assigning bid	Holon	Resource	
	Assigned order	Holon	Resource	
	Retrieved model	Holon	Resource	
	Capability	Operation	Resource	

Fig. 4는 설계된 AAS 홀론 정보 모델의 실제 표현 방식인 직렬화(Serialization)를 나타낸다. AAS를 표현 언어 중 하나인 XML (eXtensible Markup Language)으로 표현한 것이며, 사람의 가독성을 높이기 위하여 YAML (Yet Another Markup Language) 형태로 변환한 것이다.

3.2 AAS와 작업 시간 예측 모델 통합

HMS에서의 예측적 공정 계획을 위해서는 목표 성능에 대한 예측 모델을 생성하고 이 모델을 AAS와 통합하는 방법이 필요하다. 각 홀론이 목표 성능을 예측하는 모델을 생성하고, 모델을 AAS 속성으로 저장한 후, 그 모델로부터 예측된 값을 공정 계획에

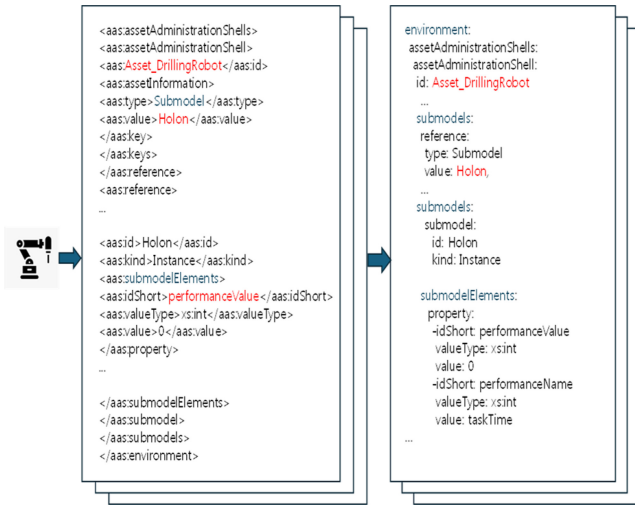
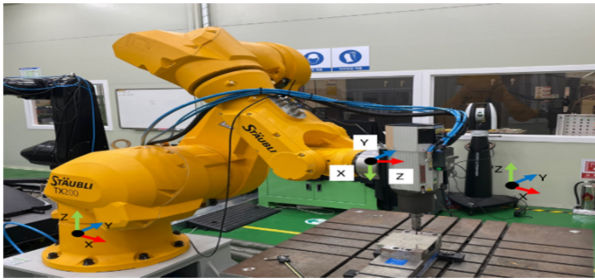
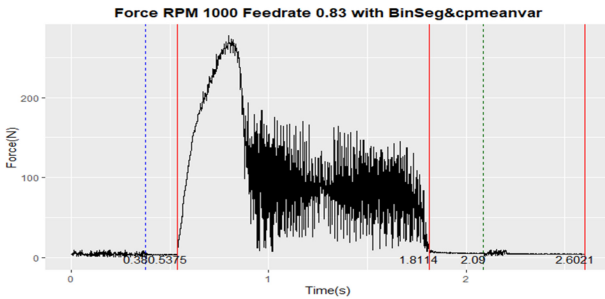


Fig. 4 Example of AAS instance (Drilling robot)



(a) Drilling robot



(b) Cutting force distribution data (Spindle speed: 1000 RPM, Feedrate: 0.83 mm/sec)

Fig. 5 Drilling robot and cutting force data

활용하는 것이다. 본 논문의 목표 성능은 작업 시간(Task Time)으로 설정한다. 그리고 이해를 돕기 위하여 구현 대상인 드릴링 로봇의 절삭력(Cutting Force) 데이터로부터 작업 시간을 예측하는 모델을 기준으로 설명한다.

Figs. 5(a)는 드릴링 로봇을, 5(b)는 수직 드릴링의 절삭 파라미터(주축회전수, 이송 속도)에 대한 절삭력 데이터 예시를 나타낸다. 여기서, 작업 시간 예측 모델은 절삭력 데이터만 수집된다는 가정하에 절삭력 데이터로부터 생성한다. 그리고, 작업 시간은 알고리즘에 의해 탐지된 가공 시작 시각과 종료 시각의 차이로 설정한다. 이러한 데이터를 이용하여 통계 기반 또는 기계학습 기반 예측 모델의 생성이 가능하다. 방법의 선택은 데이터 양 및

품질에 따라 결정될 수 있다.

본 논문에서는 데이터 양이 적은 상황을 가정하여 평균분산 변화점 분석을 이용하여 예측모델을 생성한다. 평균분산 변화점 분석은 시계열 데이터가 정규분포를 따를 때 분포가 얼마나 상이한지를 판단하는 방법으로 평균과 분산의 변화가 모두 유의하게 발생한 지점을 찾아내는 방법이다. 평균분산 변화점 분석에 의하여 절삭력의 미세한 변화를 탐지함으로써 가공의 시작 및 종료 시각을 추출하는 방식이다.

드릴 팁이 공작물과 만나는 순간 절삭력의 미세 변화를 탐지하여 가공 시작 시각을, 드릴 팁이 구멍을 빠져나오는 순간 절삭력의 미세 변화를 탐지하여 가공 종료 시각을 추정하는 방식이다. 이러한 절삭 파라미터와 작업시간의 관계를 수학적 함수 형태로 규명하여 작업 시간 예측 모델을 생성한다.

식(1)은 독립변수에 따른 분산 변화점에 대한 가설을 나타낸다[24]. 가설의 H_0 는 귀무가설로써, 데이터 집합에서 어떠한 유의미한 변화가 없음을 의미한다. 즉, 어떠한 변화점을 가지지 않는 단일 변화점을 가지고 있다는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 H_0 &: y_i \sim N(\mu_{y_i}, \sigma^2), i = 1, \dots, n \\
 H_1 &: y_i^1 \sim N(\mu_{y_i}^1, \sigma_1^2), i = 1, \dots, k_1 \\
 & y_i^2 \sim N(\mu_{y_i}^2, \sigma_2^2), i = k_1 + 1, \dots, k_2 \\
 & \dots \\
 & y_i^m \sim N(\mu_{y_i}^m, \sigma_k^2), i = k_{m-1} + 1, \dots, n
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$y(\text{Working time}) = f(\text{Spindle speed}, \text{FeedRate}) + \varepsilon \tag{2}$$

H_1 는 대립가설로써, 데이터 집합에서 $k_i + 1, i = 1, \dots, m-1$ 을 기준으로 유의미한 변화가 있음을 의미한다. 즉, m 개의 변화점을 가지는 것을 의미한다. k_1, k_2, \dots, k_{m-1} 은 각각 상수 값을 의미하며, $1 < k_1 < k_2 < \dots < k_{m-1} < n-1$ 의 범위를 가지며, $k_i + 1, i = 1, \dots, m-1$ 은 평균분산에서 변화가 일어나는 변화점이 된다. 이처럼 변화점을 판별함으로써, 작업 시작 및 종료 시각의 차이인 작업시간을 추출한다.

Fig. 5(b)에서 파란 점선은 추정 작업 시작 시각, 녹색 점선은 추정 작업 종료 시각을 나타낸다. 각 공정 시 주어지는 주축회전수와 이송 속도를 식(2)에 대응시킴으로써 작업 시간 예측 모델을 생성 가능하다. Fig. 6은 작업 시간 예측 모델과 AAS의 통합 방법을 나타낸다. 로봇 드릴링 공정을 통하여 수집된 데이터를 JSON, CSV, XML 등의 형태로 저장하며, 저장되어진 데이터를 이용하여 식(2)와 같은 수학적 함수 형태의 예측 모델을 생성하고 이 예측 모델은 파일 형태로 표현 및 저장하여 AAS와 통합한다. AAS에서는 이 예측 모델을 홀론 서버모델의 Retrieved Model 속성에 파일 형태로 저장한다. 이후, 공정 계획 절차에서 작업 시간 예측이 필요할 때, 파일 형태의 작업 시간 예측 모델이 호출 되고, 주축회전수 및 이송 속도 입력에 의하여 작업 시간이 예측된다.

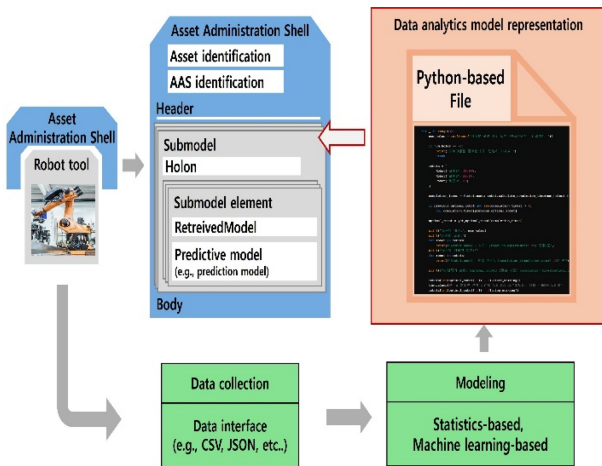


Fig. 6 Process of integrating predictive models into AAS

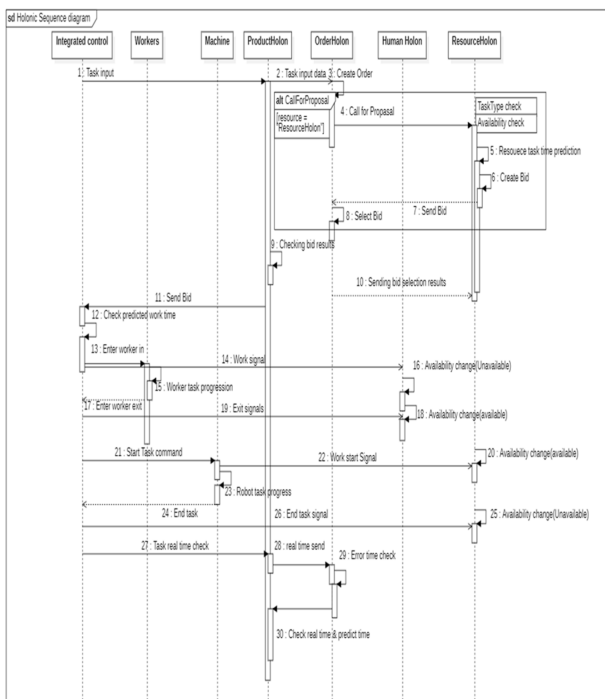


Fig. 7 Holonic predictive sequence diagram

3.3 홀로닉 예측적 공정 계획 설계

홀로닉 공정 계획에서의 중요한 개념은 사람이 아닌 컴퓨터 상에서 홀론들 간 자율적·협업적 의사 결정을 통하여 공정 계획을 결정한다는 것이다. 이 때, 작업 시간 예측을 통하여 예측적 공정 계획 수립을 가능하게 하는 것이다. 공정 수행 이전인 공정 계획 단계에서 공정 시나리오 설정에 따른 예측 작업 시간 도출을 통하여 공정 계획 성능 판단을 가능하게 하는 것이다. 이를 위하여, HMS의 예측적 공정 계획 절차 설계가 필요하다.

본 논문에서는 CNP를 기반으로 예측적 공정 계획 절차를 설계한다. CNP는 HMS의 작업 할당 매커니즘으로서, 요청자(Requester), 매니저(Manager)와 계약자(Contractor)간 작업 요청

(Task Request), 제안 요청(Call-for-proposal), 입찰(Bidding), 평가(Evaluation) 및 수락(Acceptance) 과정으로 구성된다[25]. 이러한 과정을 통하여, 매니저의 제안 요청에 의한 계약자들로부터의 비딩 중에서 가장 높은 효율의 계약자를 선택하여 작업을 할당하게 된다.

Fig. 7은 UML 시퀀스 다이어그램을 이용하여 예측적 공정 계획 절차를 설계한 것이다. 제품 AAS는 요청자 역할, 주문 AAS는 매니저 역할, 리소스 AAS는 계약자 역할을 수행한다. 제품 AAS의 작업 요청 후, 주문 AAS가 제안 요청을 진행한다. 리소스 AAS는 작업 가능성 및 가용성을 판별한 후, 작업 시간 예측 모델을 이용하여 예측된 작업 시간을 비드에 넣어서 주문 AAS로 비딩을 진행한다.

주문 AAS는 여러 개의 비드들 중에서 최소 작업 시간을 제출한 리소스 AAS에게 작업을 할당한다. 작업이 이미 할당된 리소스 AAS 경우는 새로운 작업의 비딩이 불가하다. 이미 작업이 할당된 리소스 AAS의 가용성(Availability) 속성은 가용으로부터 비가용(Unavailable) 상태로 전이된다. 이러한 과정의 반복 수행이 이루어지면, 복수 개 제품에 대한 작업 할당이 이루어지며 작업 시간의 예측이 가능하게 된다. 이와 동시에, 최소 작업 시간을 제출한 리소스 AAS에게만 작업이 할당되므로, 전체 공정의 작업 시간 최소화 방향으로 공정 계획이 수립되는 것이다.

4. 구현

본 장에서는 AAS를 이용한 HMS의 예측적 공정 계획 구현 사례를 설명한다. 4.1절에서는 가상의 구현 시나리오를 소개하고, 4.2절에서는 구현 결과를 서술한다.

4.1 구현 시나리오

구현 시나리오는 제품의 드릴링 가공을 위하여 3개의 드릴링 로봇 중에서 최소 예측 작업 시간을 제출한 로봇에 컴퓨터가 자동으로 작업을 할당하는 것이다.

Fig. 8은 시나리오를 나타내며, 아래는 시나리오에 대한 상세 설명이다. 여기서, 작업 시간 예측 모델은 실제 드릴링 로봇의 데이터를 이용한다. 제품은 2가지 종류이며, 첫 번째 제품은 20개 구멍을, 두 번째 제품은 100개 구멍을 가공한다고 가정한다.

- ① 제품 AAS (Product 1)이 드릴링 가공을 주문 AAS (Order1)에게 요청한다.
- ② 주문 AAS는 리소스 AAS (Machine 1, Machine 2, Machine 3)에게 작업 제안을 요청한다.
- ③ 리소스 AAS들은 주문 AAS로부터 받은 작업 데이터를 기반으로 공정 데이터를 요청한다.
- ④ 리소스 AAS들은 기존 공정 데이터를 참고하여 최적이라고 판단되는 절삭 파라미터를 선택한다.
- ⑤ 리소스 AAS는 작업 시간 예측 모델을 호출하여 절삭 파라미터에 따른 작업 시간을 예측한다.

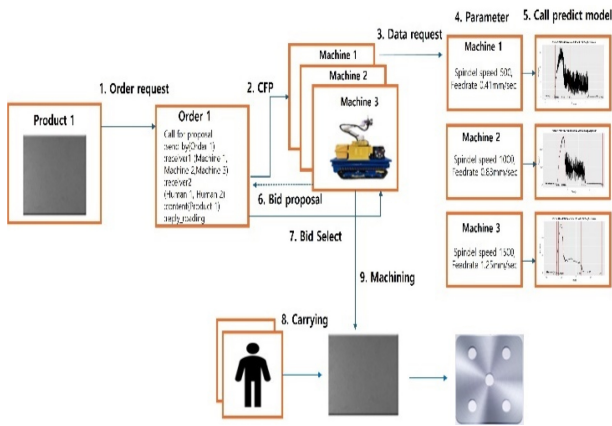


Fig. 8 Implementation scenario

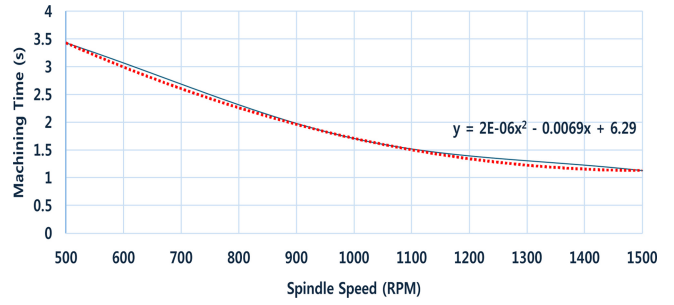


Fig. 10 Fitting of machining time prediction model

Table 2 Comparison of predicted values and real values

Spindle speed [RPM]	Feed rate [mm/rev]	Depth [mm]	Processing time		Difference [sec]	Error rate [%]
			Real value [sec]	Predicted value [sec]		
500	0.41	7.21	3.480	3.433	0.047	-1.3
1000	0.83	7.23	1.744	1.713	0.031	-1.8
1500	1.25	6.96	1.169	1.135	0.034	-2.9

이 절삭력의 변화에 따라 가공이 시작되는 시각과 종료되는 시각을 탐지한다.

$$Force = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} \quad (3)$$

$$F(x) = 2E - 06x^2 - 0.0069x + 6.29 \quad (4)$$

탐지된 가공 시작 시각과 종료 시각의 차를 이용하여 작업시간 값을 도출한다. 그 후, 주축회전수와 이송 속도를 입력 변수로, 작업 시간을 출력 변수로 하는 데이터 셋이 생성되고, 이를 수학적 함수 형태의 관계식을 생성할 수 있다.

식(4)는 주축회전수(x)에 따른 작업 시간을 추정하는 2차 방정식을 나타낸다.

Fig. 10은 예측 모델을 피팅한 그래프이다. 점선은 예측 모델을, 실선은 실제 값을 나타낸다.

Table 2는 예측 모델의 정확도 확인을 위하여 모델로부터 예측된 작업 시간과 실제 작업 시간을 비교한 결과이다. 실제 값 (Real Value)은 위치 센서를 이용한 z축 위치 변화에 따라 작업 시작 시각과 작업 종료 시각을 측정한 작업 시간을 의미한다. 주어진 데이터에서는 작업 시간이 제대로 예측되어짐을 알 수 있다. 그러나, 이 결과는 3가지 가공 조건에 대한 검증 결과이므로, 작업시간 예측 모델이 유효하다고 판단하기에는 한계가 있다.

4.2.2 예측적 공정 계획 구현

구현 시나리오의 실행가능성을 확인하기 위하여 AAS 서버-클라이언트 시제품을 개발하였다. 구현 환경은 Python(프로그래밍 언어), IDLE 4.22.0(통합개발환경), Pyi4.0 Python 기반 AAS 설계 오픈 소스 개발 도구 라이브러리를 사용하였다.

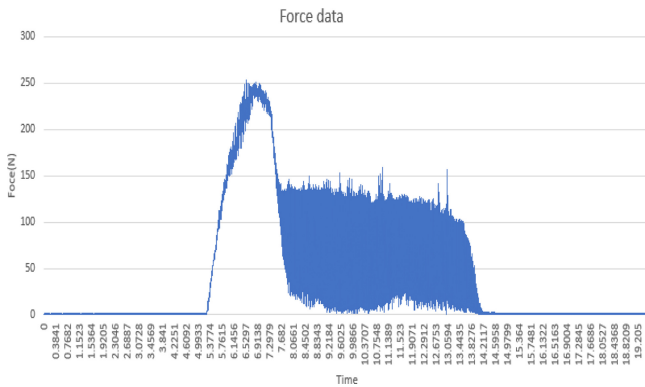


Fig. 9 Time-series cutting force data sample

- ⑥ 각 리소스 AAS는 예측된 작업 시간을 주문 AAS에게 비딩한다.
- ⑦ 주문 AAS는 최소 공정 시간을 비딩한 리소스 AAS를 선정한다.
- ⑧ 작업에 선정된 리소스 AAS에 가공물을 이송한다.
- ⑨ 작업에 선정된 리소스 AAS는 가공 주문에 맞게 가공을 실행한다.

4.2 구현 및 결과

4.2.1 작업시간 예측 모델링

3.2절에서 설명한대로, 작업 시간 예측은 평균분산 변화점 분석 기반 모델을 이용한다. 예측 모델 생성을 위해 사용한 데이터 셋은 KUKA 로봇의 절삭력 센서 데이터를 이용한다.

절삭력 센서 데이터는 시각(Timestamp)에 따른 3축 기준 절삭력(Fx, Fy, Fz)값을 포함한다. 추가적으로, 위치 센서를 이용하여 시각에 따른 3축 위치 값(Px, Py, Pz)을 수집하였으며, 이는 검증을 위하여 사용되었다. 데이터 셋은 다음과 같은 3가지 가공 조건에서 수집되었다: {주축회전수, 이송 속도} = {500 RPM, 0.41 mm/sec}, {1000 RPM, 0.83 mm/sec}, {1500 RPM, 1.25 mm/sec}.

식(3)은 3축 절삭력 값을 합력벡터의 크기로 표현하는 식이다. Fig. 9의 절삭력 그래프는 식(3)을 통하여 도출된 결과 값이다.


```

Enter the number of holes to be processed (enter -1 to exit): 20

Number of Holes: 20
Available Robots: 3
Robot1 - Speed: 17.64 holes/minute
Robot2 - Speed: 28.50 holes/minute
Robot3 - Speed: 50.80 holes/minute

Operable Robots:
Robot1 - Completion Time: 1.13 minutes
Robot2 - Completion Time: 0.70 minutes
Robot3 - Completion Time: 0.40 minutes

Optimal Robot: Robot3 (Completion Time: 0.40 minutes)
Robot3 is operating...

Enter the number of holes to be processed (enter -1 to exit): 100

Number of Holes: 100
Available Robots: 3
Robot1 - Speed: 17.64 holes/minute
Robot2 - Speed: 28.50 holes/minute
Robot3 - Speed: 50.80 holes/minute

Operable Robots:
Robot1 - Completion Time: 5.67 minutes
Robot2 - Completion Time: 3.51 minutes
Robot3 - Completion Time: 1.97 minutes

Optimal Robot: Robot2 (Completion Time: 3.51 minutes)
Robot2 is operating...

```

Fig. 11 Prediction implementation results

AAS 서버는 AAS 인스턴스를 생성하고 저장하며, 클라이언트에서 요청 시 AAS 인스턴스를 전달한다. AAS 클라이언트는 서버로 AAS 인스턴스를 요청한 후, Uniform Resource Identifier (URI)를 이용하여 AAS 인스턴스를 전달받는다. 그리고 AAS 인스턴스를 이용하여 예측적 공정 계획을 실행한다.

Fig. 11은 클라이언트에서의 예측적 공정 계획 실행 결과 화면이다. 4.1절 구현 시나리오와 같이, 제품 AAS 인스턴스 생성을 위하여 20개 구멍과 100개 구멍 가공 제품으로 구분되도록 구멍 개수를 입력한다. 4.1절의 절차에 의하여, 첫 번째 제품은 최소 작업 시간을 제출한 Robot 3에게 작업이 할당된다. 두 번째 제품은 Robot 3이 가동중이므로 제외되고, Robot 1과 Robot 2 중에서 최소 작업시간을 제출한 Robot 2에게 작업이 할당된다.

이러한 과정 중 생성되거나 변경되는 데이터들은 각 AAS 인스턴스의 해당 속성값에 갱신된다. 예를 들어, 각 로봇 AAS 인스턴스는 Performance Value 속성에 해당 작업 예측 시간을 넣게 된다. 또 다른 예로는 로봇 AAS가 첫 번째 제품작업을 할당받게 되면, Availability 속성이 'True'에서 'False'로 갱신된다. 이러한 과정을 통하여 2가지 종류 제품을 가공하기 위하여 가용가능한 로봇들을 찾고 각 제품을 가공하기 위한 로봇들을 찾아냄으로써 예측에 기반한 공정 계획을 구현할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 AAS를 활용하여 HMS 상에서의 예측적 공정 계획을 위한 설계와 구현을 수행하였다. AAS를 이용하여 HMS의 구성 요소들에 대하여 표준화된 가상 모델을 생성하고, 통계적 예측 모델을 활용한 공정 계획 과정을 통하여 공정 시간 최적화

및 자원의 효율적 활용에 대한 방법을 제시하였다.

본 논문의 의의는 다음과 같다. 먼저, AAS를 활용한 HMS의 개발 가능성을 확인하였다. HMS에서는 각 홀론이 에이전트로 구현되어야 하고, 에이전트들에게 자율적이고 협업적인 의사결정 능력을 부여해야 한다. 이러한 맥락에서, AAS 홀론 정보 모델을 이용하여 홀론들의 가상화 에이전트를 정의하고 AAS 기반 에이전트들을 통하여 홀론간 상호작용에 의한 공정 계획 시나리오를 구현함으로써, AAS도 HMS의 에이전트 기술로 활용될 수 있음을 보여주었다. 또한, CNP 기반 예측적 공정 계획 절차를 이용하여 컴퓨터를 이용한 공정 계획 자동화의 가능성을 보여주었다. 이는 사람의 시행착오적 방법이 아닌 컴퓨터의 데이터 기반 예측 방법을 활용함으로써, 생산 일정의 효율적 관리와 생산 리드 타임 단축에 기여할 수 있다.

본 논문의 한계는 다음과 같다. 홀로닉 팩토리 실증 현장이 구축 중인 관계로 실제 장비로부터 많은 데이터를 수집하지 못하여 적은 양의 데이터를 이용하여 작업 시간 예측 모델을 만든 것이다. 즉, 예측 모델을 이용하여 예측적 공정 계획이 가능함을 확인하였지, 모델의 성능과 유효성이 적합하다고 판단하는 것은 무리가 있다. 같은 이유로, 실제 장비로부터 실시간 데이터 수집이 불가하여 동적인 공정 계획 구현 및 검증을 진행하지 못하였다. 또한, 공정 계획 시나리오의 입력 요인인 제품 및 장비 개수가 다양하지 못하여 복잡한 공장 환경 하에서 제안 방법이 유효한지 실증하지 못하였다. 향후, 홀로닉 팩토리 실증 현장의 구축 완료와 함께, 실제 장비의 연결을 통한 데이터 수집 체계를 구현함으로써, 홀로닉 예측적 공정 계획 방법의 고도화 및 성능 검증을 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2025년 한국생산기술연구원의 청정생산시스템핵심기술연구사업의 지원을 받아 수행하고 있는 '미래 산업환경 대응 홀로닉 생산시스템 개발 (No. EO250001)' 과제에서 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Ueda, K., (2016), Cyber-physical systems in manufacturing, *Cirp Annals*, 65(2), 621-641.
2. Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., Peeters, P., (1998), Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA, *Computers in Industry*, 37(3), 255-274.
3. Bader, S., et al., (2022), Details of the asset administration shell Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0(version 3.0 rc02), *Plattform Industrie*, 473.

4. Colombo, A. W., Schoop, R., Neubert, R., (2006), An agent-based intelligent control platform for industrial holonic manufacturing systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), 322-337.
5. Balasubramanian, S., Brennan, R. W., Norrie, D. H., (2001), An architecture for metamorphic control of holonic manufacturing systems, *Computers in Industry*, 46(1), 13-31.
6. Shen, W., Hao, Q., Yoon, H. J., Norrie, D. H., (2006), Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review, *Advanced Engineering Informatics*, 20(4), 415-431.
7. Leitão, P., Restivo, F., (2006), ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control, *Computers in Industry*, 57(2), 121-130.
8. Shin, S. J., Woo, J., Seo, W., (2017), Development of a data and model-interconnected holonic architecture for intelligent decision-making on cyber-physical production systems, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 43(6), 451-463.
9. Pulikottil, T., Estrada-Jimenez, L. A., Rehman, H. U., Barata, J., Nikghadam-Hojjati, S., Zarzycki, L., (2021), Multi-agent based manufacturing: Current trends and challenges, *Proceedings of the 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 1-7.
10. Giret, A., Botti, V., (2009), Engineering holonic manufacturing systems, *Computers in Industry*, 60(6), 428-440.
11. Derigent, W., Cardin, O., Trentesaux, D., (2021), Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(7), 1797-1818.
12. Zhang, X., Tang, S., Liu, X., Malekian, R., Li, Z., (2019), A novel multi-agent-based collaborative virtual manufacturing environment integrated with edge computing technique, *Energies*, 12(14), 2815.
13. D'Aniello, G., De Falco, M., Mastrandrea, N., (2021), Designing a multi-agent system architecture for managing distributed operations within cloud manufacturing, *Evolutionary Intelligence*, 14(4), 2051-2058.
14. Abid, A., Hammadi, M., Barkallah, M., Choley, J. Y., Louati, J., Rivière, A., Haddar, M., (2018), Generic framework for holonic modelling and multi-agent-based verification of reconfigurable manufacturing systems, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19(0), 1793-1809.
15. Salvador Palau, A., Dhada, M. H., Parlikad, A. K., (2019), Multi-agent system architectures for collaborative prognostics, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(0), 2999-3013.
16. Saadat, M., Saeidlou, S., Tan, M. C., (2017), A holonic workforce allocation model for labour-intensive manufacturing, *Cogent Engineering*, 4(1), 1324747.
17. Adolphs, P., Auer, S., Bedenbender, H., Billmann, M., Hankel, M., Heidel, R., Waser, B., (2016), Structure of the administration shell - Continuation of the development of the reference model for the Industrie 4.0 component, ZVEI and VDI, Status Report.
18. Shin, S. J., Lee, J. H., Park, J., Um, J., (2021), Integrating PMML and PFA with asset administration shell for interoperable smart factories, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 47(3), 242-251.
19. Park, K. T., Cho, H., Kim, S., Kim, H., (2019), Implementation of digital twin and virtual representation for energy efficiency improvement of dyeing and finishing industry, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 45(6), 491-502.
20. Park, K. S., Seong, J., Park, S., (2020), Requirements analysis and AAS design for Energy digital twin, *Journal of the Korean Institute of Smart Media*, 9(4), 109-117.
21. Tantik, E., Anderl, R., (2017), Integrated data model and structure for the asset administration shell in Industrie 4.0, *Procedia CIRP*, 60(0), 86-91.
22. Heppner, S., Miny, T., Kleinert, T., Becker, M., Schmitz, K., Alt, R., (2023), Asset administration shells as data layer for enabling automated simulation-based engineering, *Proceedings of the 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1-7.
23. Jungbluth, S., Hermann, J., Motsch, W., Pourjafarian, M., Sidorenko, A., Volkmann, M., Ruskowski, M., (2022), Dynamic replanning using multi-agent systems and asset administration shells, *Proceedings of the 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1-8.
24. Kim, J. T., (2002), Combination of schwarz information criteria for change-point analysis, *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, 13(2), 185-193.
25. Panescu, D., Pascal, C., (2016), Holonic coordination obtained by joining the contract net protocol with constraint satisfaction, *Computers in Industry*, 81(0), 36-46.



Yeoung Sin Kang

M.S. candidate in the Department of Industrial Data Engineering, Hanyang University. His research interest is Autonomous manufacture.

E-mail: ccr9601@hanyang.ac.kr



Seung-Jun Shin

Professor in the School of Interdisciplinary Industrial Studies, Hanyang University. His research interests include Cyber-Physical Production Systems, Manufacturing Artificial Intelligence, Environmentally conscious Manufacturing and Industrial Standards.

E-mail: sjshin@hanyang.ac.kr



Cheolho Kim

Ph.D. in the Industrial Transformation Technology Department, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is precision engineering.

E-mail: cheolho@kitech.re.kr



Jaehyun Park

B.S. and Ph.D. degrees in the Department of Mechanical Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea, in 2011 and 2017. He is currently a Senior Researcher at Industrial Transformation Technology Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), South Korea. His research interests include precision engineering.

E-mail: jh8145@kitech.re.kr

힘측정 및 가변강성 기능을 갖는 3축 순응 디버링 로봇 툴 설계

Design of a 3-Axis Compliant Robotic Deburring Tool with Force Sensing and Variable Stiffness Capabilities

김기성¹, 전정현¹, 김한성^{2,#}
Gi-Seong Kim¹, Jeong-Hyeon Jun¹, and Han Sung Kim^{2,#}

¹ 경남대학교 대학원 기계융합공학과 (Department of Mechanical Convergence Engineering, Graduate School, Kyungnam University)
² 경남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungnam University)
Corresponding Author / E-mail: hkim@kyungnam.ac.kr, TEL: +82-55-249-2627
ORCID: 0000-0002-1657-9411

KEYWORDS: Deburring (디버링), Compliance (순응), Parallel mechanism (병렬 메커니즘), Force sensing (힘측정), Variable stiffness (가변 강성)

In this paper, a deburring tool with 3-axis compliance is presented for deburring using a robot manipulator. Compliance is provided with beam structures instead of pneumatic pressure, which enables integrated 3-axis force sensing and variable stiffness. Two radial compliances were achieved using 4-PSS (Prismatic-Spherical-Spherical) legs, with P joints composed of cantilever beams. The one axial compliance was configured with two ball bushings and a linear spring. Strain gauges were attached to cantilever beams and a load cell was mounted between the linear spring and the universal joint to perform force sensing. The stability of vibrations and force sensing were verified through deburring experiments using the proposed deburring tool. Additionally, experiments on automatic offset for applying a constant force during deburring were conducted and results were validated by comparing the workpiece before and after the deburring process.

Manuscript received: September 2, 2024 / Revised: December 30, 2024 / Accepted: February 11, 2025
This paper was presented at KSPE Spring/Autumn Conference in 2024

1. Introduction

Through post-machining processes in production, such as deburring and grinding, parts can achieve high value. Therefore, it is essential to perform deburring economically while minimizing scrap and rework [1]. In this context, workers are exposed to high levels of noise and vibration. Furthermore, it is becoming increasingly difficult to find workers willing to perform highly repetitive tasks. To address these issues, specialized CNC (Computer Numerical Control) machines can be used for deburring operations; however, the high investment costs are considered unsuitable for high-mix low-volume processes. The deburring using robot manipulators has been a focus of research for a long time as a cost-effective and suitable

alternative, but transitioning from research to industrial applications has been challenging [2]. The robots are rarely used for contact operations such as machining and finishing. The contribution of robots in machining and finishing applications remains only about 2% [3]. Studies [4,5] on the challenges and obstacles of robotic machining have identified and discussed problems such as complex programming methods, low accuracy, and insufficient rigidity.

In the manufacturing industry, mechanical interaction with the environment or the object being manipulated is required. In this context, robot manipulation is performed within a confined workspace, and interaction forces related to the task are encountered. For tasks requiring constrained manipulation, such as deburring, both the position of the robot's end-effector and the

contact force should be considered. Therefore, the interaction force should be accepted rather than resisted [6]. Robotic deburring is generally performed using a spindle driven by a pneumatic rotary actuator. Typically, robotic deburring is performed in two ways, where either the deburring tool is fixed while the workpiece is manipulated by the robot, or the workpiece is fixed while the deburring tool is manipulated by the robot. Additionally, when the spindle contacts the workpiece during the deburring operation, impact forces are generated, causing impulse peaks in the system and potentially leading to unexpected large vibrations. Therefore, deburring operations using robots with high stiffness can be challenging [7]. In the case of robotic deburring, it is challenging to achieve high precision deburring through position control due to the varying geometric dimensions and material properties of the burr on the workpiece. To address this issue, recent studies have focused on force/position control strategies, and the compliance control of robotic deburring based on force impedance has also been studied [8].

Currently, in some manufacturing industries, robotic deburring operations are enhanced with increased stability due to the compliance provided by commercial robotic deburring tools, such as those from ATI [9] and SCHUNK [10]. Commercial robotic deburring tools provide compliance through a pneumatic system. Additionally, recognizing the importance of force sensing, most of the precise deburring operations are performed by installing commercial force/torque (F/T) sensor between the deburring tool and the robot end-effector. However, the integration of sensors and robotic tools can lead to increased costs, additional interfaces, and more complex control.

Chatter is a vibration that occurs during machining, negatively impacting surface quality and machining efficiency. Studies [11,12] have focused on detecting and predicting chatter, as well as reviewing research and advancements related to chatter stability.

In this paper, a deburring tool with 3-axis compliance was proposed. The compliance is provided by simple beams and springs instead of pneumatic pressure in commercial deburring tools, which enables integrated force sensing and variable stiffness. The hybrid mechanism for 3-axis compliance was designed based on the previous research of compliance devices [13-15]. The mechanism of the proposed deburring tool was explained, and the static analysis was performed. A prototype of the proposed deburring tool was developed, and stability in vibration and force sensing was verified through experiments. An automatic offset was applied to perform deburring with a constant force. Additionally, the experiment results of the automatic offset were presented, and the results were validated by comparing the workpiece before and after deburring.

2. Mechanism of Robotic Deburring Tool

The proposed 3-axis deburring tool mechanism is a hybrid structure consisting of a 2-DOF parallel mechanism and one prismatic joint in series, featuring two radial compliances and one axial compliance, respectively. As shown in Fig. 1, the two radial compliances are achieved by the 2-DOF parallel mechanism. The moving platform is connected to the fixed base by a universal joint and two rotational motions by the universal joint are supported with four PSS (Prismatic-Spherical-Spherical) legs. The P joint of each leg is composed of a cantilever beam (k), and the S-S chain of each leg is constructed using rod-end-bearings. The one axial compliance is achieved by connecting a P joint between the moving platform and a spindle base. For constraining axial rotation, the P joint is constructed with two ball bushings, and a linear spring (k_z) is installed for one axial compliance.

In the deburring operation, the interaction force is generated as F at point Q . The center of the moving platform is denoted as point P , and the center of the universal joint is denoted as point O . The center distances are defined by

$$\overline{PQ} = l_r, \quad \overline{OQ} = l_q \quad (1)$$

The Jacobian matrix with respect to point Q is obtained by

$$J = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{21} & s_{22} & s_3 & s_4 & s_5 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ rs_{11} & rs_{12} & rs_{21} & rs_{22} & rs_3 & rs_4 & rs_5 & s_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

where $s_{11} = +j$, $s_{12} = -j$, $s_{21} = -i$, $s_{22} = +i$, $s_3 = +i$, $s_4 = +j$, $s_5 = s_6 = +k$. Also, for the simplicity of expression, $rs \equiv r \times s$ is defined and r is obtained by

$$\begin{aligned} r_{11} &= [r \ c(-\phi) \ r \ s(-\phi) \ -l_r]^T, \\ r_{12} &= [r \ c(\pi - \phi) \ r \ s(\pi - \phi) \ -l_r]^T, \\ r_{21} &= \left[r \ c\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \ r \ s\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \ -l_r \right]^T, \\ r_{22} &= \left[r \ c\left(-\frac{\pi}{2} - \phi\right) \ r \ s\left(-\frac{\pi}{2} - \phi\right) \ -l_r \right]^T, \\ r_3 &= [0 \ 0 \ -l_q]^T, \\ r_4 &= r_5 = r_3 \end{aligned} \quad (3)$$

where r is distance between point P and S joint in Fig. 1, and $c()$ and $s()$ denote $\cos()$ and $\sin()$ functions, respectively.

The stiffness matrix is obtained as follows.

$$K = J \ k_d \ J^T \quad (4)$$

where $k_d = \text{diag} [k, k, k, k, k, k, k, k]$. k and k_z are defined as the stiffness of the cantilever beams and linear spring. k_l and k_r

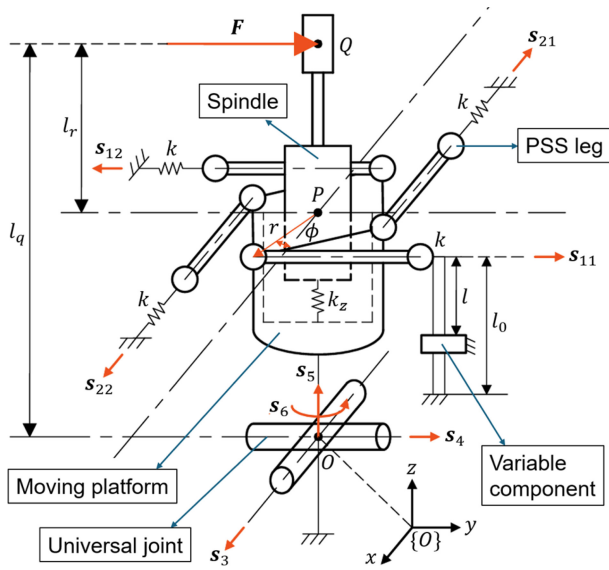


Fig. 1 Kinematic modeling of 3-axis deburring tool

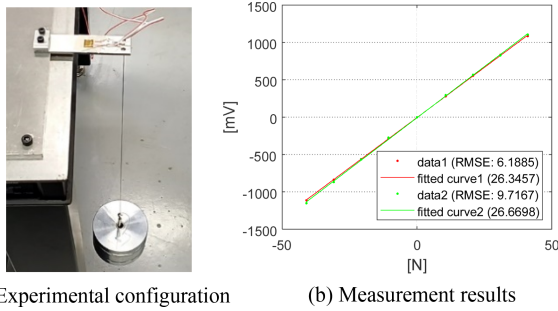


Fig. 2 Joint calibration for each cantilever beam

are defined as the structural stiffness of s_3 , s_4 and s_6 in the universal joint. Furthermore, k_l and k_t are approximated to infinite values compared to k and k_z , the compliance matrix can be simplified as

$$C = \lim_{k_p, k_t \rightarrow \infty} K^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{l_q^2}{2k(l_q-l_r)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{l_q^2}{2k(l_q-l_r)^2} & 0 \\ 0 & \frac{l_q^2}{2k(l_q-l_r)^2} & 0 & \frac{-l_q^2}{2k(l_q-l_r)^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{k_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-l_q^2}{2k(l_q-l_r)^2} & 0 & \frac{1}{2k(l_q-l_r)^2} & 0 & 0 \\ \frac{l_q}{2k(l_q-l_r)^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2k(l_q-l_r)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

In the compliance matrix, the elements other than (1,1), (2,2) and (3,3) elements are relatively very small.

The algorithm of calculating the force vector at point Q is as follows. First, joint forces of the beams and linear spring are measured. The beam and linear spring deflections are calculated. Here, the infinitesimal displacements along the joint axes are defined as $\delta q = [\delta x_{11}, \delta x_{12}, \delta x_{21}, \delta x_{22}, 0, 0, \delta x_5, 0]^T$. The deflections at point Q , δD , can be calculated through the forward kinematics or the Jacobian matrix.

$$\delta D = J^T \delta q \quad (6)$$

where the Jacobian matrix is a non-square matrix and is calculated using the pseudoinverse matrix. When $\delta D = [\delta x, \delta y, \delta z, \delta \theta_x, \delta \theta_y, \delta \theta_z]$ and the interaction force is given as $\delta F = [\delta f_x, \delta f_y, \delta f_z, 0, 0, \delta n_z]$, the relationship between the force and deflection vectors is calculated through the compliance matrix by $\delta D = C \delta F$. Finally, the forces at point Q can be obtained by

$$\delta f_x = \frac{2k(l_q-l_r)^2}{l_q^2} \delta x, \quad \delta f_y = \frac{2k(l_q-l_r)^2}{l_q^2} \delta y, \quad \delta f_z = k_z \delta z. \quad (7)$$

3. Prototype of Robotic Deburring Tool

3.1 Force Sensing

For sensing the interaction force at the end of the proposed deburring tool, it is required to measure the joint forces and calculate the joint deformation. The joints composed of cantilever beams are equipped with strain gauges (CAS AP-11-T30S-120-EC [16]) attached to the beams to measure strain. Additionally, the joint calibration is performed to define the forces generated at the joints, and the interaction forces in the two radial directions are calculated using Eq. (7). The joint composed of linear spring is measured for force using tension/compression load cell (CAS SMNT-25 [16]). Therefore, the interaction force in the one axial direction is calculated using Eq. (7).

3.2 Joint Calibration

Each cantilever beam for force sensing was attached with strain gauge and a half-bridge circuit was utilized. The strain gauges were attached only to the two cantilever beams, excluding the symmetric PSS legs. As shown in Fig. 2(a), weights (1.034 kg each) were incrementally added to the end of the cantilever beam, up to a total of four weights, and the voltage from the strain gauges was measured. Additionally, the weight of the hooks used is 0.05 kg. The inverted cantilever beam was also measured, and the measurement results are shown in Fig. 2(b). The maximum RMSE (Root Mean Square Error) is 9.7167 mV, which is within 1% of the

Table 1 Natural frequency analyzed by FEM

Mode	Natural frequency [Hz]
1	55.15
2	57.35
3	379.0
4	669.79
5	692.68

measurement range. Therefore, the gains $G_{0,i}$ ($i = 1, 2$) for each calibration results are $G_{0,1} = 26.3457$ and $G_{0,2} = 26.6698$ [N/mV], respectively, for force sensing of the deburring tool.

3.3 Natural Frequency

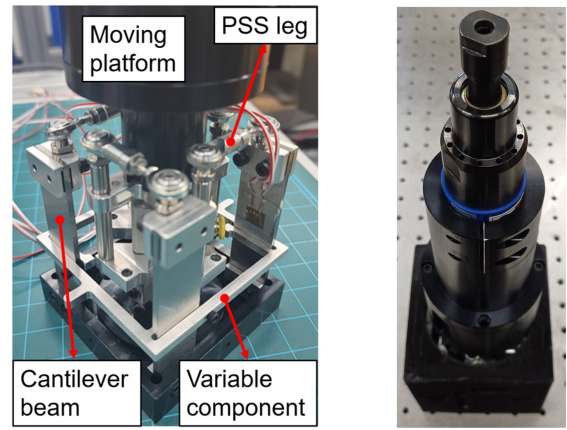
The proposed deburring tool utilizes high-speed rotation for the deburring process, which may result in significant vibrations due to the material of the workpiece, the type of tool tip, and the high-speed rotary actuator used. Although the vibration frequencies in machining are variable, the proposed deburring operation utilizing high-speed rotation generates at least several kHz [17,18]. Therefore, the natural frequency of the proposed deburring tool was analyzed using FEM (Finite Element Method), as shown in Table 1. The proposed deburring tool is stable against the vibrations of the deburring operation, as its natural frequencies up to the 5th mode are below 0.7 kHz.

3.4 Variable Stiffness Capabilities and Prototype

In deburring operations, the interaction force is calculated based on the stiffness of the proposed deburring tool. To vary the two radial stiffnesses, a variable component was equipped to change the effective length of the cantilever beams. The beam stiffness can be significantly varied, as it is inversely proportional to the square of the effective length for the beams. When the beam stiffness is k_0 with the initial beam length l_0 , the gains for force sensing are obtained as follows, based on the variable beam stiffness k corresponding to the variable beam length l , as shown in Fig. 1.

$$G_i = G_{0,i} \frac{k}{k_0} \quad (8)$$

where $k_0 = 72.3$ [N/mm]. As the cantilever beams are assembled with the variable component of the deburring tool, the effective length is reduced. Therefore, the stiffness and gains for force sensing are respectively satisfied by $k_0 < k$ and $G_{0,i} < G_i$. The minimum stiffness was calculated as $k = 116.8$ [N/mm], and the experiments were conducted with this minimum stiffness. According to Eq. (8), the value of G_i was obtained as $G_1 = 42.5294$ and $G_2 = 43.0526$ [N/mV], respectively.



(a) Configuration for the two radial compliances (b) Prototype

Fig. 3 Prototype of the proposed deburring tool

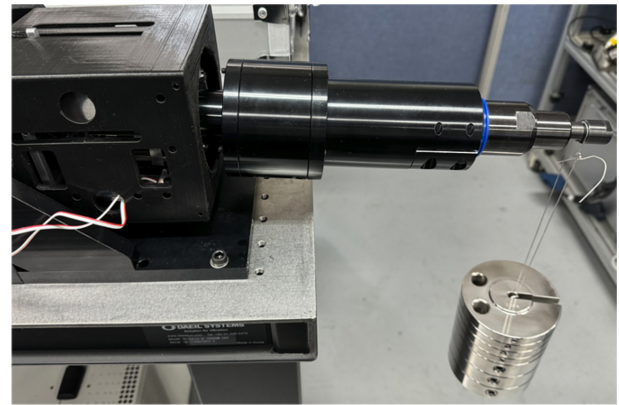


Fig. 4 Configuration for performance evaluation of the prototype

Table 2 Performance evaluation results for the prototype

Item	Reference value [N]	Resultant value [N] (standard error)
Reaction force	50.51	54.50 (0.0320)
Repeatability	-	0.35 (0.0399)
Resolution	0.50	0.44 (0.0199)

As shown in Fig. 3(a), the configuration for the proposed deburring tool is illustrated, and 3(b) presents the prototype of the proposed deburring tool. Additionally, a pneumatic rotary actuator for deburring is mounted on the moving platform.

The resultant values from the experiments in Fig. 4 were compared with the reference values to evaluate the performance, as shown in Table 2. All values in Table 2 represent the averages of 10 measurements. For the reaction force, an error rate of 7.3% was calculated; however, the repeatability is 0.35 N, allowing the error rate to be minimized through error compensation. In the case of resolution, measurements were taken after first hanging 50 N to eliminate mechanical losses, followed by an additional 0.50 N.

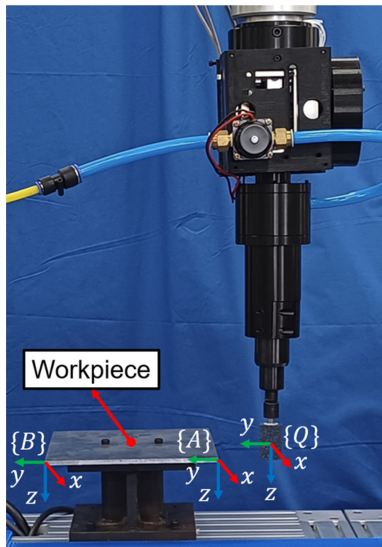


Fig. 5 Configuration for deburring experiments (with the tool rotating in the z-axis direction based on the {Q} frame)

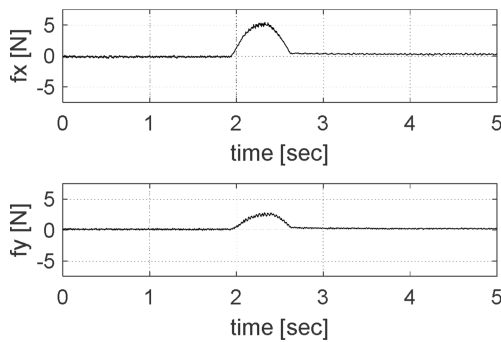


Fig. 6 Experiment result of maximum vibration occurring at minimum interaction force during the point deburring

4. Deburring Experiments

4.1 Measurement Experiments in Two Radial Directions

Deburring experiments were conducted using the prototype of the deburring tool, as shown in Fig. 5. For the deburring experiments, a collaborative robot (UR10e [19]) was position controlled, and the workpiece was composed of a rectangular aluminum plate (material: AL6061). The mounted pneumatic rotary actuator was operated at approximately 20,000 rpm under a pressure of 6 MPa. The tooltip for deburring was equipped with a cylindrical grinding stone. Initially, to focus on the analysis of the two radial directions, the mobility and measurements in the one axial direction were deliberately excluded from the experiment.

Through a simple deburring experiment, it was experimentally demonstrated that a reduction in interaction forces leads to increased vibrations. Therefore, assuming a low force of 5 N, it

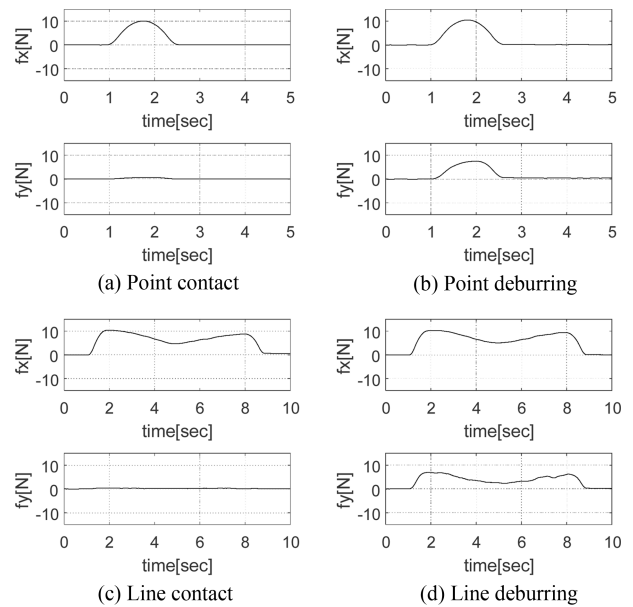


Fig. 7 Experiment results for deburring using the deburring tool prototype (average values of 50 data for reaction forces f_x and f_y on the x- and y-axes based on the {Q} frame)

was confirmed that vibrations of less than 1 N were observed during deburring at a single point, as shown in Fig. 6.

In subsequent experiments, the interaction force of the deburring tool was measured with 1 ms, and the experiment results were recorded every 50 ms by averaging 50 data.

Figs. 7(a) and (b) show the interaction performed at a single point on the workpiece using the deburring tool, while Figs. 7(c) and (d) show the interaction performed along the edge line of the workpiece using the deburring tool. Figs. 7(a) and (c) show the only contact performed on the workpiece using the deburring tool, while Figs. 7(b) and (d) show the deburring operation performed on the workpiece using the deburring tool. As shown in Fig. 7(b), during the deburring operation at a single point, force was applied in the -x-axis direction based on the {Q} frame, resulting in a measured $+f_x$ value as the reaction force. Additionally, the force generated by the deburring operation resulted in a reaction force f_y . As shown in Fig. 7(d), the path for line deburring is defined from the {A} frame to the {B} frame of the workpiece in Fig. 5. The f_x value is affected by the size of the burrs present along the path on the workpiece, and as the burr size increases, f_x value also increases. Therefore, f_y value generated during the deburring operation is also affected by the size of the burrs. In other words, the proposed deburring tool adapts to the size of the burrs and performs the deburring operation with a force proportional to their size. Finally, according to the experimental results, significant vibrations did not occur, and the performance of stable force sensing was verified.

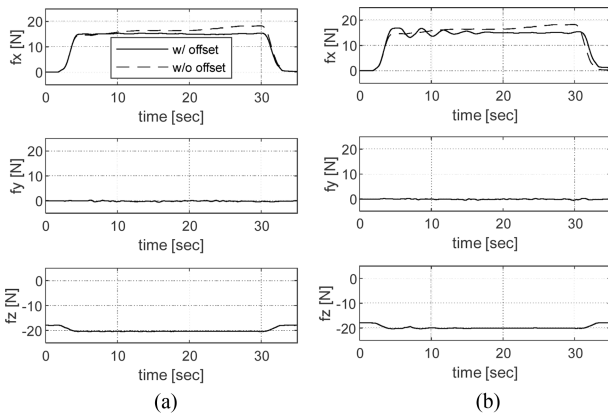


Fig. 8 Experiment results of automatic offset for line contact with (a) $G_p = 1.5$ and (b) $G_p = 5.0$

4.2 Deburring Experiments with a 3-Axis Deburring Tool

In this section, deburring experiments were conducted using the proposed 3-axis deburring tool. In previous experiments, deburring was performed with compliance to the shape of the workpiece, resulting in force sensing that varied depending on the shape of the workpiece. However, when deburring operations require a constant force, automatic offsets should be applied along the working path.

First, the working path was divided into 50 working points between the paths of the line deburring process. At each working point, an automatic offset was applied based on the force measured at the previous working point. The robot's working speed was set to 10 mm/s with an acceleration of 20 mm/s². Additionally, position gain (G_p) was added to the automatic offset, and measurement experiments were conducted along the working path with contact only, as shown in Fig. 8, where f_z is generated as a pre-load of 17.94 N, corresponding to the initial deformation (2.3 mm) of the applied linear spring stiffness ($k_z = 7.8$ [N/mm]). The appropriate G_p is shown in Fig. 8(a). When G_p is large, overshoot and undershoot were observed, as shown in Fig. 8(b). Therefore, it was verified that maintaining a constant force (15 N) was achieved through the automatic offset with an appropriate G_p . Also, the effect of f_z can be identified. Second, the deburring experiment was conducted under the same conditions as before, and the results are presented in Fig. 9. It is noted that a large force occurred during the initial contact due to deburring. Although a constant force was maintained through the automatic offset, it was sustained at approximately 12.5 N rather than the target force of 15 N. Furthermore, the surface condition of the workpiece before and after the deburring process is shown in Fig. 10. The difference in surface roughness from the experiment result of the deburring process is presented in Table 3.

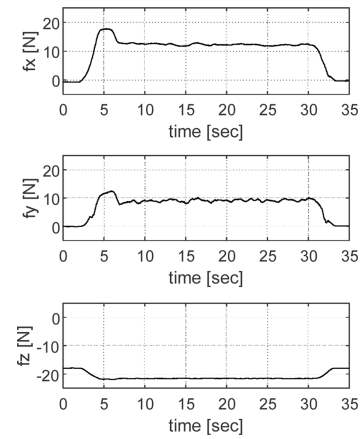


Fig. 9 Experiment result of automatic offset for line deburring

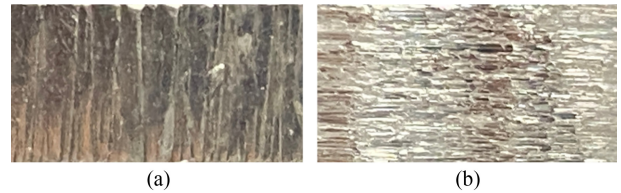


Fig. 10 Comparison of surface conditions (a) before and (b) after deburring in experiment result of the deburring process

Table 3 Surface roughness comparison in the experiment result of the deburring process

Item	Before	After
Surface roughness [μm]	8.75	1.92

5. Conclusions

In this paper, a 3-axis deburring robotic tool with compliance, force sensing, and variable stiffness capabilities were presented and evaluated. The proposed deburring tool is designed with a hybrid structure consisting of a 2-DOF parallel mechanisms and one prismatic joint in series, and the prototype was fabricated. The performance of the prototype was evaluated through experiments. The deburring experiments were conducted using the prototype of the deburring tool, mounted on a collaborative robot. In conclusion, the proposed deburring tool was demonstrated to be stable against vibrations, and its effective force sensing performance was verified. Additionally, an automatic offset for maintaining a constant force during deburring was applied to force measurement experiments for line contact, and differences based on position gain were observed to determine the optimal position gain. Through deburring experiments on the workpiece, it was observed that a slight deviation from the target force occurred, but the ability to maintain a constant force was verified. Finally, the deburring results were validated by comparing the workpiece before and after the deburring process.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the R&D Project (No. S3367855) of the Small and Medium Business Administration (Korea).

REFERENCES

1. Kazerooni, H., (1988), Automated robotic deburring using impedance control, IEEE Control Systems Magazine, 8(1), 21-25.
2. Onstein, I. F., Semeniuta, O., Bjerkeng, M., (2020), Deburring using robot manipulators: A review, 2020 3rd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing systems (SIMS), 1-7.
3. International Federation of Robotics - Statistical Department, World robotics 2014 industrial robots. <http://www.worldrobotics.org/>
4. Karim, A., Verl, A., (2013), Challenges and obstacles in robot-machining, IEEE ISR 2013, 1-4.
5. Posada, J. R. D., Kumar, S., Kuss, A., Schneider, U., Drust, M., Dietz, T., Verl, A., (2016), Automatic programming and control for robotic deburring, Proceedings of the ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics, 1-8.
6. Kazerooni, H., Guo, J., (1987), Design and control of the active compliant end-effector, Proceedings of the 1987 American Control Conference, 845-851.
7. Matour, M. E., Thormann, C., Winkler, A., (2022), Force controlled deburring using a collaborative robot, Proceedings of the 2022 26th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 425-429.
8. Xu, G., Wang, Z., Zhang, J., Yang, B., Wang, Z., Xu, Y., (2020), Compliance control of deburring robots based on force impedance, Proceedings of the 2020 Chinese Automation Congress (CAC), 79-84.
9. ATI Technologies Inc., Material removal tools. https://www.atia.com/Products/deburr/deburring_home.aspx
10. SCHUNK Intec Inc., Machining tools. https://schunk.com/fi/en/automation-technology/machining-tools/c/PUB_8325
11. Basit, A., Khan, N. B., Ali, S., Muhammad, R., Abduvalieva, D., Khan, M. I., Jameel, M., (2024), Chatter detection and suppression in machining processes: A comprehensive analysis, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 18(6), 3751-3771.
12. Zhang, X., Wan, X., Ran, X., (2024), Research progress on the chatter stability in machining systems, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 131, 29-62.
13. Tsai, L. W., (1999), Robot analysis: The mechanics of serial and parallel manipulators, Wiley New York.
14. Kim, H. S., (2014), Kinestatic control using six-axis parallel-type compliant device, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 23(5), 421-427.
15. Kim, H. S., (2018), Design of a 6-axis compliance device with f/t sensing for position/force control, Journal of the Korean Society of Industry Convergence, 21(2), 63-70.
16. CAS, Strain gauge and load cell products. <https://www.caskorea.co.kr/>
17. Xu, W.-X., Zhang, L.-C., (2015), Ultrasonic vibration-assisted machining: principle, design and application, Advances in Manufacturing, 3, 173-192.
18. Brehl, D. E., Dow, T. A., (2008), Review of vibration-assisted machining, Precision Engineering, 32(3), 153-172.
19. Universal Robots GmbH, The robot for deburring experiments. <https://www.universal-robots.com/>



Gi-Seong Kim

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Kyungnam University. His research interest is robotic hand, and force control.
E-mail: shark-cat@daum.net



Jeong-Hyeon Jun

Master's candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Kyungnam University. His research interest is haptics, and tele-operation.
E-mail: jjh990709@naver.com



Han Sung Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kyungnam University. His research interest is autonomous assembly robot system, robotic tools, and parallel robots.
E-mail: hkim@kyungnam.ac.kr

Pose 정렬 메커니즘을 활용한 드론 자동 충전 시스템

Autonomous Drone Charging System Using Pose Alignment Mechanism

한다영¹, 호유진¹, 봉재환^{1,#}
Da Yeong Han¹, Yu Jin Ho¹, and Jae Hwan Bong^{1,#}

¹ 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 (Department of Human Intelligence and Robot Engineering, Sangmyung University)
Corresponding Author / E-mail: drbong@smu.ac.kr, TEL: +82-41-550-5487
ORCID: 0000-0003-1221-6522

KEYWORDS: Drone autonomous charging (드론 자동 충전), Wired charging (유선 충전), Indoor plant factory (실내 식물 공장), Small drone (소형 드론), 3-DOF alignment mechanism (3 자유도 정렬 메커니즘)

Drones are increasingly used in various fields such as agriculture, logistics, and disaster response due to their agility and versatility. In indoor plant factories, small drones are used to monitor crop conditions and collect environmental data. However, small drones require frequent recharging due to their limited battery capacity, making autonomous charging systems essential for uninterrupted operation of drones. This study proposes an autonomous charging station designed for small drones in indoor plant factories. The system employs a wired charging mechanism to enhance charging efficiency, and a 3-degree-of-freedom (DOF) pose alignment system, utilizing an XY plotter and turntable, to correct drone landing errors. The alignment system ensures that drones, landing with random positions and orientations, are automatically adjusted to the correct position for charging. Experiments demonstrated that the charging station successfully aligned and charged drones with a 93% success rate on the first attempt. Even in cases of failure, the system automatically retried until a 100% success rate was achieved. This autonomous drone charging system has the potential to significantly enhance operational efficiency in indoor plant factories and can be adapted for various drone models in future applications.

Manuscript received: October 7, 2024 / Revised: December 17, 2024 / Accepted: January 9, 2025

1. 서론

최근 드론은 다양한 분야의 작업에 활용되고 있다. 드론을 군사 작전이나 재난 현장에 투입하여 인간이 접근하기 어려운 지역에서 정찰 및 생존자 탐색을 수행하기도 하며, 서비스 산업에 활용하여 물품을 배달하기도 한다. 또한 드론은 농업 자동화를 위해 실내의 농업 현장에 투입되어 작물 상태 감시, 환경 데이터 획득, 농약 살포 등의 작업을 수행한다[1,2].

특히 실내 식물공장에서는 작물 상태 감시와 환경 데이터 획득을 위해 경량 드론을 운용한다. 경량 드론은 대부분 저용량 리튬 폴리머 배터리를 사용하며 비행 가능 시간이 30분 내외로 짧다[3,4]. 드론의 비행 가능 시간을 늘리기 위해 드론에 고용량 배터리를 탑재하면 배터리의 무게가 늘어나기 때문에 페이로드가 작은 경량 드론에 고용량 배터리 탑재는 적합하지 않다. 실내

식물공장에서 경량 드론을 사용하기 위해서는 잦은 배터리 교체나 충전이 필요하며 드론의 배터리 교체나 충전을 자동화하기 위해 다양한 충전 스테이션이 개발되었다.

드론의 배터리 교체를 자동화하는 시스템은 기계 요소가 복잡하고 구축하는데 많은 비용이 필요하다[5-7]. 드론의 배터리 충전을 자동화하는 시스템은 충전 방식에 따라 드론을 무선으로 충전하는 시스템과 드론을 유선으로 충전하는 시스템으로 분류할 수 있다.

드론을 무선으로 충전하는 시스템은 코일에서 발생하는 유도 기전력을 이용해 드론을 충전한다. 드론이 충전을 위해 착륙 가능한 영역이 넓어 드론이 착륙 위치를 정확하게 제어하지 않아도 된다는 장점이 있다. 하지만 무선 충전을 위해서는 드론에 유도 기전력을 받을 수 있는 장치를 추가로 설치해야 하며, 유선 충전에 비해 무선 충전 속도나 효율이 떨어진다는 단점도 있다[8-10].

드론을 유선으로 충전하는 시스템은 드론에 충전 단자를 연결해야 하므로 드론이 충전 단자를 연결할 수 있는 위치에 정확하게 착륙해야 한다. 드론이 목표 위치로 정확하게 착륙하기 위해서는 높은 측위 성능과 정확한 모터 제어가 요구되지만 경량 드론은 페이로드의 제약으로 탑재할 수 있는 센서와 제어기에 한계가 있어 착륙 위치를 정확하게 제어하기 어렵다. 임의의 위치에 드론이 착륙하면 드론을 충전 위치로 이동시켜 충전을 시작하는 자동화 시스템이 개발되었으나 착륙한 드론의 자세는 정렬하지 않는다[11,12].

본 연구에서는 실내 식물공장에서 활용하는 경량 드론의 운용환경에 적합한 드론 자동 충전 스테이션을 개발하였다. 실내 식물공장에서 사용하는 경량 드론은 1회 충전 시 운용 가능한 시간이 짧으므로 잦은 충전이 필요하고 드론의 연속적인 작업을 위해서는 충전에 소요되는 시간이 짧아야 한다. 개발한 드론 자동 충전 스테이션은 드론이 착륙 오차 범위 내 임의의 위치와 자세로 착륙하면 드론을 충전이 가능한 위치와 자세로 정렬한다. 정렬된 드론의 충전 단자에 충전선을 연결하는 유선 충전 방식으로 배터리 고속 충전이 가능하도록 하였다.

2. 드론 자동 충전 스테이션

개발한 드론 자동 충전 스테이션은 하드웨어 설치를 위한 프레임, 드론이 착륙하기 위한 상판, 착륙한 드론의 위치와 자세를 영상 기반으로 파악하기 위한 카메라, 드론 정렬을 위한 머니플레이터, 유선 충전을 위한 충전 단자 연결부로 구성되며 Fig. 1 과 같이 배치하였다.

Fig. 1(a)는 드론 자동 충전 스테이션의 각 구성 요소를 거치하기 위한 프레임으로 2020 알루미늄 프로파일을 이용해 제작하였다. Fig. 1(b)는 드론이 착륙하기 위한 상판으로 3 mm 두께의 아크릴 판재로 제작하였다. Fig. 1(c)에는 Pixy 2.1 카메라(Charmed Labs, USA)를 설치하여 상판에 착륙한 드론의 이미지를 획득하고 영상처리를 통해 착륙한 드론의 위치와 자세를 반복해서 측정하였다. Fig. 1(d)는 드론 정렬 머니플레이터로 End-Effector가 평면에서 3 자유도(2병진, 1회전) 운동을 할 수 있도록 개발하였다. 드론 정렬 머니플레이터는 카메라로 측정한 드론의 위치와 자세에 기반하여 드론을 목표 위치와 자세로 옮기는 역할을 수행하였다. 드론 정렬 머니플레이터의 모든 구성 요소는 드론이 상판에 착륙하는 것을 방해하지 않기 위해 모두 상판 아래에 배치하였다. 상판 아래에 위치한 드론 정렬 머니플레이터의 End-Effector가 상판 위에 착륙한 드론을 목표 위치와 자세로 옮기기 위해 전자석을 End-Effector에 배치하였다. 필요에 따라 전자석을 끄고 드론 정렬 머니플레이터만 이동하거나 전자석을 켜고 End-Effector에 드론을 부착하여 함께 이동할 수 있도록 설계하였다. Fig. 1(e)는 유선 충전이 가능한 목표 위치와 자세로 정렬된 드론의 충전 단자에 충전기를 연결하기 위한 충전 단자 연결부다.

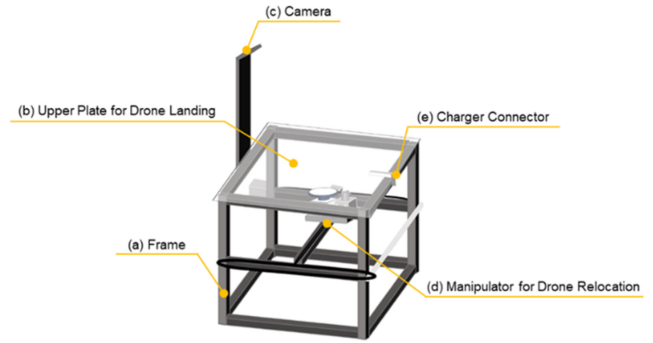


Fig. 1 Conceptual design of autonomous drone charging system

Table 1 Design requirements for autonomous drone charging system

Subject	Requirements
Landing area (Upper Plate Area)	Width: Min. 300 mm Height: Min. 300 mm
Manipulator DOF	3 DOF (2 translation., 1 rotation)
Manipulator workspace	Whole landing area 360°
Payload	Min. 100 g
Camera FOV	Whole landing area
Charging method	Wired charging

드론 자동 충전 스테이션을 Fig. 1과 같이 설계하면서 Table 1의 설계 요구사항을 고려하였다. 충전하고자 하는 소형 드론이 착륙 목표 지점으로부터 반경 150 mm 이내에 임의의 위치에 착륙하는 것을 확인하였고 Fig. 1(b)에 표시한 드론이 착륙하는 상판의 크기는 가로 세로 최소 300 mm가 필요한 것으로 계산하였다. 실제 설계에서는 드론의 크기를 고려하여 드론이 착륙하기 위한 상판의 크기를 가로 세로 400 mm의 정사각형 형태로 결정하였다. Fig. 1(d)의 드론 정렬 머니플레이터는 End-Effector가 드론 자동 충전스테이션의 상판 전체 영역을 병진운동 하고 360° 회전하는 작업영역(Workspace)을 갖도록 설계하였다. 머니플레이터의 End-Effector는 착륙한 드론을 전자석의 자기력으로 부착하여 목표 위치와 자세로 이동시키기 위해 소형 드론 무게 이상의 페이로드를 가져야 한다. 대표적인 상용 소형 드론(DJI Tello, DJI, China)의 무게가 87 g이므로 약 15%의 안전계수를 적용해 머니플레이터의 최소 페이로드가 100 g이 되도록 전자석 등의 부품을 선정하였다. Fig. 1(c)의 Pixy 2 카메라는 드론이 상판 어디에 착륙하더라도 드론을 촬영할 수 있도록 카메라의 Horizontal Field Of View (HFOV)와 Vertically Field Of View (VFOV)가 스테이션의 상판 전체를 포함하도록 하였다. 이를 위해 카메라는 상판에서 320 mm 높이에 30° 기울여 설치하였다.

개발한 드론 자동 충전 스테이션을 이용해 드론을 충전하기 위해서 드론에는 Fig. 2에 표시한 세 가지 요소를 추가로 부착하였다.

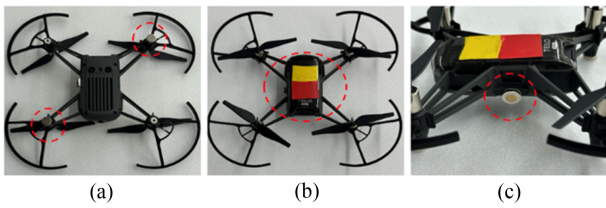


Fig. 2 Additional components attached to drones for autonomous drone charging system

추가로 부착한 세 가지 요소의 총 무게는 2.4 g이었다. 정렬 머니플레이터 전자석의 자기력에 의해 드론이 연결되어 함께 이동하도록 Fig. 2(a)와 같이 자성이 있는 재료를 드론 하단에 부착하였다. 자성이 있는 재료를 드론에 추가로 부착하면서 드론의 하단에 위치한 카메라나 센서 등에 영향을 최소화하도록 배치를 고려하였다. 개발한 드론 자동 충전 스테이션에서 카메라를 이용해 착륙한 드론의 위치와 자세를 추적하고 구동 알고리즘에 활용하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 노란색과 빨간색으로 구성된 인식표를 드론 상단에 부착하였다. 드론의 충전 단계에는 Fig. 2(c)와 같이 자성이 있는 충전 어댑터를 부착하여 드론이 정렬 메커니즘에 의해 충전 단자 연결부의 충전 영역으로 정렬되면 자성이 있는 충전선이 자기력에 의해 드론의 충전 단자와 연결되도록 하였다.

2.1 드론 정렬 머니플레이터

임의의 위치에 착륙한 드론을 충전이 가능한 위치로 정렬하기 위해 드론 정렬 머니플레이터는 평면에서 3 자유도 운동(2자유도 병진 운동, 1 자유도 회전 운동)이 가능하도록 개발하였다. Fig. 3은 드론 정렬 머니플레이터의 구성을 나타낸다. Figs. 3(a)의 XY 플로터가 2 자유도 병진 운동을 구현하고, 3(b)의 회전판이 1 자유도 회전 운동을 구현한다.

Fig. 3(a)로 표시한 XY 플로터는 2개의 모터, 모터에 연결된 풀리, 아이들러, 타이밍 벨트로 구동되는 2차원 직교로봇 형태로 설계하였다. Table 1의 설계 요구사항을 만족하기 위해 XY 플로터는 상판과 평행한 평면에서 움직이며 Workspace는 x축과 y축 방향으로 최대 350 mm 움직이도록 하였다. Fig. 3(b)의 원형 회전판은 XY 플로터에 부착되어 XY 플로터와 함께 병진 운동하며 착륙한 드론의 자세 정렬을 위해 1 자유도 회전 운동을 구현한다. 원형 회전판은 1개의 모터, 모터에 연결된 풀리와 회전판에 연결된 풀리, 타이밍벨트로 구성되었다. 회전판에 연결된 풀리의 직경과 모터에 연결된 풀리의 직경은 4 : 1의 비율로 선정하여 회전판이 드론을 회전시킬 수 있는 충분한 돌림힘을 낼 수 있도록 하였다. Figs. 3(b)의 회전판 위에는 전자석을 고정하기 위한 판을 3(c)와 같은 형태로 제작하여 올렸다. 전자석을 고정하는 판이 회전판과 분리, 결합되므로 충전하고자 하는 드론의 형태와 크기에 맞춰 전자석 고정 판을 교체함으로써 드론 자동 충전 스테이션을 다양한 드론의 충전에 사용할 수 있도록 하였다. 드론 정렬 머니플레이터의 End-Effector에 12 V,

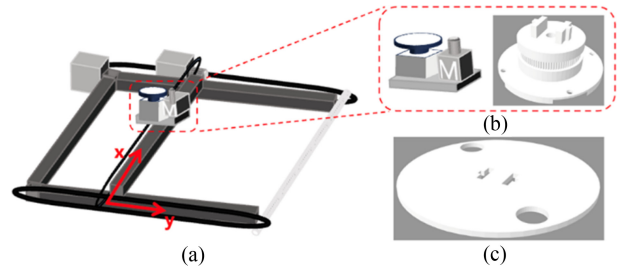


Fig. 3 Detailed structure of drone pose alignment manipulator

660 mA, 250 N 전자석을 사용하여 전자석을 켜면 자기력으로 드론을 부착하여 함께 이동시킬 수 있다.

개발한 드론 자동 충전 스테이션의 상판에는 드론이 착륙해야 하기 때문에 드론 정렬 머니플레이터의 모든 구성 요소를 드론 자동 충전 스테이션의 상판 아래에 배치하여 드론의 착륙에 방해되지 않도록 하였다.

2.2 드론 자동 충전 스테이션 구동 알고리즘

드론 자동 충전 스테이션의 구동은 크게 드론 착륙 감지, 드론 정렬, 충전 단계로 구성된다. 각 단계는 순차적으로 진행되며, 실패 시 재시도 루프를 통해 신뢰성을 확보하였다. Fig. 4는 전체 구동 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

Fig. 4(a)는 드론 착륙 감지 단계이다. 드론 착륙 감지 단계에서는 상판 상단에 설치된 카메라를 통해 드론의 착륙 여부를 지속적으로 모니터링하였다. 카메라는 드론 상단에 부착된 Fig. 2(b)의 인식표를 감지하며, 인식표가 감지되면 드론이 착륙한 것으로 판단하고 다음 단계로 진행하였다. 인식표가 감지되지 않으면 대기 상태를 유지하며 계속해서 드론의 착륙 여부를 모니터링하였다.

드론 정렬 단계는 두 가지 세부 과정으로 구성된다. 먼저, Pixy 2.1 카메라로 촬영한 드론의 인식표 이미지를 Pixy 2의 API를 이용해 처리하고 인식표의 중심 위치와 회전 각도를 추정하였다. 추정한 위치는 최대 1 cm의 오차를 보였고, 추정한 회전 각도는 최대 0.5°의 오차를 보였다. 추정한 드론의 위치와 자세로 드론 정렬 머니플레이터를 이동시키고 전자석을 작동하여 드론과 머니플레이터를 자기력으로 연결하였다. 다음으로 Fig. 4(b)에서 드론과 머니플레이터의 연결이 성공적으로 이루어졌는지 확인하기 위해 머니플레이터를 소폭 이동시키며 카메라로 드론의 위치와 자세를 추적하였다. 만약 드론이 머니플레이터와 함께 움직이지 않으면 자기력을 이용한 연결이 실패한 것으로 판단하고, 머니플레이터가 드론 주변을 탐색하며 재연결을 시도하도록 하였다. 드론과 머니플레이터의 연결이 확인되면 머니플레이터를 통해 드론을 충전 가능한 목표 위치와 자세로 정렬하였다.

충전 단계에서는 목표 위치와 자세로 정렬된 드론의 충전 단자와 충전 단자 연결부의 충전선을 자기력으로 연결하였다. 충전선이 연결되고 충전이 시작되면 드론은 자체적으로 배터리

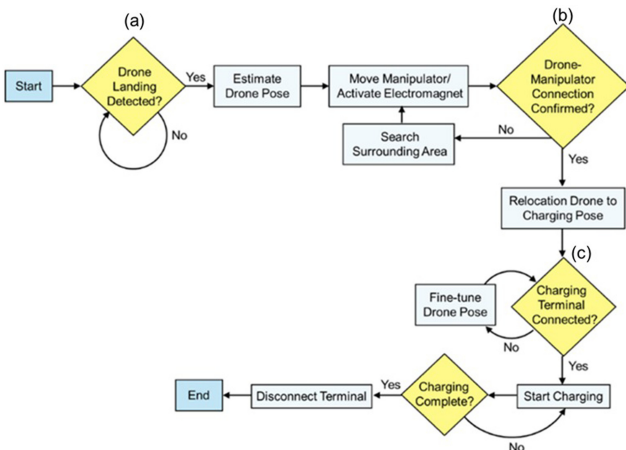


Fig. 4 Algorithm flow chart of autonomous drone charging system

충전 상태 메시지를 스테이션으로 전송하도록 하였다. 드론 자동 충전 스테이션은 Fig. 4(c)와 같이 배터리 충전 상태 메시지를 모니터링하여 충전 진행 상태를 확인하였다. 충전이 시작되지 않을 경우 드론이 연결된 머니플레이터를 좌우 방향(Fig. 6의 x축 방향) 2 cm 범위로 움직이면서 충전이 시작될 때까지 충전선과 충전 단자의 연결을 재시도 하였다. 좌우 2 cm 범위를 탐색했으나 충전이 시작되지 않으면 드론이 연결된 머니플레이터를 상하 방향(Fig. 6의 y축 방향)으로 0.5 cm 움직이고 다시 좌우 2 cm 범위를 탐색하였다. 드론이 연결된 머니플레이터가 상하 방향으로도 최대 2 cm 까지만 움직이도록 설정하였다. 드론의 정렬 위치를 미세 조정하여 충전이 시작될 수 있도록 하는 피드백 루프는 미세조정 범위를 상하좌우 2 cm까지 설정하였으나 설정 방법에 따라 미세조정 범위를 늘릴 수 있다. 충전이 시작될 때까지 드론의 정렬 위치를 미세 조정하는 피드백 루프를 통해 신뢰도 높은 시스템을 구성하고자 하였다.

드론 자동 충전 스테이션의 구동 알고리즘에서 각 단계에 발생할 수 있는 실패 상황에 대응하기 위해 Figs. 4(a)부터 4(c)와 같은 재시도 메커니즘을 구현하였다. 재시도 메커니즘을 통해 충전 과정이 단일 시도에서는 실패하더라도 재시도를 통해 성공하도록 하였으며, 최종적으로 충전 성공의 안정성과 신뢰성을 확보하도록 개발하였다.

2.3 드론 자동 충전 스테이션의 프로토타입

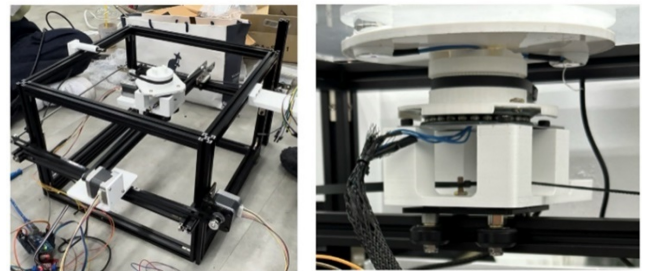
드론 자동 충전 스테이션의 프로토타입은 드론 정렬 머니플레이터에 사용한 XY 플로터에는 두 개의 42각 스테핑 모터(토크 236)를 사용하고 회전판에는 42각 스테핑 모터(토크 140)를 사용해 Fig. 5와 같이 제작하였다.

카메라는 Pixy v2.1를 사용하였고 Pixy 2 오픈 소스 라이브러리를 이용해 드론에 부착한 인식표를 인식하고 위치와 자세를 추적하였다.

드론 정렬 머니플레이터의 End-Effector는 상판의 중심을 기준으로 상하좌우 모두 175 mm까지 이동할 수 있었다. 드론의 착륙 오차가 최대 반경 150 mm라고 했을 때 드론 정렬 머니플



(a) High angle shot image of autonomous drone charging system



(b) Drone pose alignment manipulator: XY plotter (Left), Rotational plate (Right)

Fig. 5 Prototype of autonomous drone charging system

레이터의 Workspace가 드론이 착륙하는 임의의 위치와 자세를 모두 포함하도록 제작하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 드론 자동 충전 스테이션 성능 검증 방법

3.1.1 드론 정렬 머니플레이터의 위치 제어 성능 검증 실험 방법

드론 정렬 머니플레이터가 목표 위치로 정확하고 정밀하게 이동하는지 검증하기 위해 Fig. 6과 같은 실험 환경을 구축하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 상판의 가로 방향을 x축, 세로 방향을 y축으로 정의하고 빨간색 점으로 표시한 네 개의 지점에 드론 정렬 머니플레이터의 회전판 중심이 위치하도록 각 20회씩 이동시켰다. 스테이션 상판에 모눈 패턴이 포함된 투명 시트지를 부착하고 회전판의 중심을 점으로 표시를 하였다. Fig. 6에 빨간색 점으로 표시한 목표 위치와 드론 정렬 머니플레이터의 회전판 중심이 도달한 위치 사이의 오차를 기계적인 방법으로 측정하고 오차의 평균과 분산을 계산하여 위치 제어 정확도와 정밀도를 검증하였다.

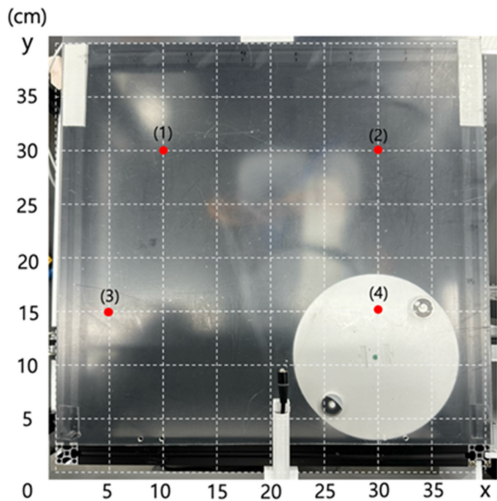


Fig. 6 Experimental environment to verify position control performance of drone pose alignment manipulator



Fig. 7 Experimental environment for payload measurement of drone pose alignment manipulator

3.1.2 드론 정렬 머니플레이터의 페이로드 측정 실험 방법

개발한 드론 자동 충전 스테이션이 실내 식물 공장에서 소형 드론의 충전에 활용될 수 있는지를 검증하기 위해 드론 정렬 머니플레이터가 옮길 수 있는 최대 질량으로 페이로드를 확인하였다. 드론 정렬 머니플레이터의 페이로드는 회전판의 전자석이 자기력으로 옮길 수 있는 상판 위에 위치한 물체의 최대 질량으로 측정하였다. 실험에서는 Fig. 7과 같이 점토를 계량해 상자에 담고 점토의 질량을 늘려가며 드론 정렬 머니플레이터가 특정 질량의 상자를 자기력으로 옮길 수 있는지 반복 실험하였다. 상용 소형 드론의 질량이 87 g이므로 질량을 90 g에서 10 g씩 추가해 실험을 수행하였으며, 최대 질량 근처에서는 1 g 단위로 질량을 증감하며 측정하였다.

3.1.3 충전 단자 연결부의 충전 가능 범위 검증 실험 방법

드론의 충전 단자와 충전선이 연결되기 위해 드론의 위치와 자세를 드론 자동 충전 스테이션의 충전 단자 연결부를 기준으로 어느 범위 내에서 정렬해야 하는지 반복 실험을 통해 확인하였다. 개발한 드론 자동 충전 스테이션의 충전 단자 연결부를 기준으로 다양한 위치 오차와 자세 오차를 갖도록 DJI Tello를 배치하면서 드론의 충전 단자에 충전선이 연결되는지 반복 실험하였다.

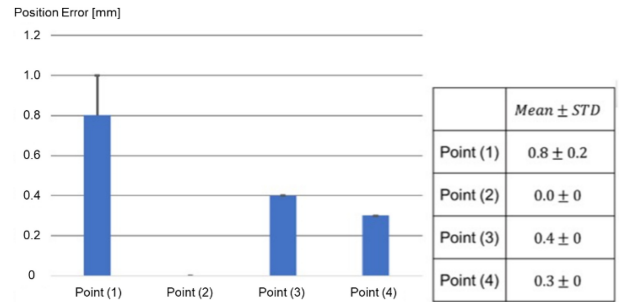


Fig. 8 Mean and standard deviation of position error

3.1.4 드론 자동 충전 스테이션의 충전 성능 검증 실험 방법

드론 자동 충전 스테이션의 충전 성능을 검증하기 위해 사람이 DJI Tello를 드론 자동 충전 스테이션의 상판에 임의의 위치와 자세로 배치하고 Fig. 4의 구동 알고리즘을 통해 드론을 충전하는 실험을 반복하였다. Fig. 4의 구동 알고리즘을 다음의 세 단계로 나누어 각 단계를 30회씩 실행하고 각 단계의 성공과 실패를 구분하여 성공률을 계산하였다.

첫 단계에서는 카메라로 드론의 인식표 정보를 처리해 드론의 위치와 자세를 파악하고 드론 정렬 머니플레이터가 드론의 위치와 자세에 맞게 움직이는 지 확인하였다. 드론 정렬 머니플레이터가 이동해 전자석이 자기력으로 드론을 부착하면 성공한 것으로 판단하였다. 다음 단계에서는 드론 정렬 머니플레이터가 드론을 자기력으로 부착하여 충전 가능 범위로 정렬시키는지 확인하였다. 드론 정렬 머니플레이터가 드론을 충전 단자 연결부를 기준으로 충전 가능 영역에 정렬하면 성공한 것으로 판단하였다. 마지막으로 드론이 충전 가능 범위에 정렬되었을 때 드론의 충전 단자와 충전선이 연결되는지 확인하였다.

3.2 드론 자동 충전 스테이션 성능 검증 결과

드론 정렬 머니플레이터의 위치 제어 성능을 검증하기 위해 목표 위치와 도달 위치 사이의 오차 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 막대 그래프에서 파란색 막대는 20회의 반복 실험 결과에서 계산한 오차 평균을 나타내고 검은색 오차 막대는 오차의 표준편차를 나타낸다. 가로축의 4개 지점은 Fig. 6의 4개 목표 지점을 나타낸다.

Fig. 8의 표에는 각 목표 지점에서 오차의 평균과 표준편차 값을 나타내었다. 평균 오차는 1번 지점에서 0.8, 2번 지점에서 0, 3번 지점에서 0.4, 4번 지점에서 0.3 mm로 나타났다. 또한 1번 지점을 제외한 모든 지점에서 표준편차가 없었고, 1번 지점에서 표준편차가 0.2 mm로 계산되었다. 실험 결과를 통해 드론 정렬 머니플레이터의 위치 제어 정확도와 정밀도가 매우 높음을 확인할 수 있다.

드론 정렬 머니플레이터의 페이로드 측정 실험 결과, 머니플레이터는 자기력을 이용해 최대 472 g의 물체를 안정적으로 이동시킬 수 있었다. 이는 DJI Tello의 무게인 87 g을 충분히 초과하는 페이로드로, 실내 식물 공장에서 사용되는 대부분의 소형

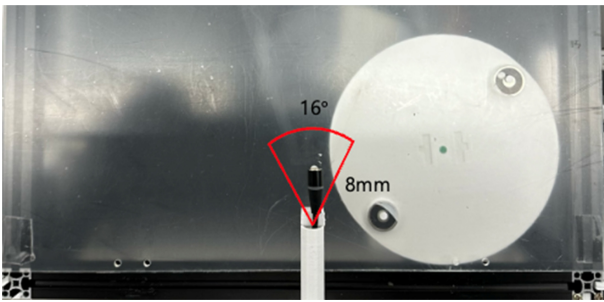


Fig. 9 Mean and standard deviation of position error

드론을 운용하기에 적합한 성능임을 입증하였다.

충전 단자 연결부의 성능평가 실험 결과, Fig. 9의 빨간색 부채꼴 모양과 같이 드론이 충전 단자 연결부를 기준으로 반경 8 mm 이내에 위치하고 시계방향 및 반시계방향으로 ±8° 이내의 자세 오차를 가질 경우 자기력에 의해 드론의 충전 단자와 충전선이 성공적으로 연결되는 것을 확인하였다.

충전 성능을 평가하기 위해 드론이 임의의 위치와 자세로 상판에 착륙한 상태에서 자동으로 충전이 이루어지는 과정을 30 회 반복 실험하였다. 실험 결과, 첫 단계인 드론의 위치 및 자세 인식 성공률은 100%(30회/30회)로 나타났으며, 두 번째 단계인 드론의 충전 가능 위치로의 정렬 성공률은 93%(28회/30회)였다. 두 번의 실패는 모두 드론을 이동시키는 중에 드론과 회전판의 전자석 연결이 끊어지면서 발생하였다. 마지막으로 충전선이 드론의 충전 단자와 연결되는 성공률은 93%(28회/30회)로 측정되었다. 두 번의 실패 모두 드론의 충전 단자와 충전선이 자력에 의해 연결되려 했으나 충전선의 가장자리 형상이 드론의 충전 단자와 충전선의 연결을 방해하여 충전이 시작되지 않았다.

자동 충전을 위한 단일 시도에서 실패한 경우에도 알고리즘에 따른 재시도 과정을 통하면 최종적으로 모든 실험과 모든 단계에서 완전 자동 충전이 가능하였다.

성능 실험 결과를 종합하면, 개발된 드론 자동 충전 스테이션은 높은 위치 제어 정확도와 충분한 페이로드를 갖추고 있으며, 드론이 착륙한 임의의 위치와 자세에서 안정적으로 충전 과정을 자율적으로 완료할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 실내 식물 공장에서 소형 드론을 효율적으로 운용하기 위한 드론 자동 충전 스테이션을 개발하였다. 소형 드론은 제한된 배터리 용량으로 인해 자주 충전이 필요하며, 드론의 충전 과정을 자동화하기 위한 신뢰성 높은 충전 시스템의 개발이 필요하다. 개발한 드론 자동 충전 스테이션에는 유선 충전 방식을 채택하여 충전 효율을 높였고, 드론의 착륙 위치와 자세 오차를 보정하여 충전 가능 영역으로 드론을 정렬할 수 있는 3 자유도 정렬 메커니즘을 설계하였다.

개발된 시스템은 카메라를 이용해 드론의 위치와 자세를 추적하며 드론 정렬 메커니즘을 활용해 임의의 위치와 자세에 착륙한 드론을 충전 가능한 위치로 정렬하였다. 충전 가능한 위치로 정렬된 드론의 충전 단자에는 자기력을 이용해 충전선이 연결되도록 하였다. 구동 알고리즘의 단계별로 재시도 루프를 구성하여 단일 시도에서 충전 과정에 문제가 생기더라도 충전 과정을 자율적으로 반복 시도하여 최종적으로는 충전이 성공적으로 수행되도록 신뢰도 높은 시스템을 개발하였다. 충전 과정을 반복하는 실험을 통해 충전 스테이션의 성능을 검증한 결과, 약 93%의 성공률로 드론을 한 번에 충전선에 연결할 수 있었으며, 실패한 경우에도 재시도 알고리즘을 통해 100% 충전 성공률을 달성하였다.

개발한 시스템은 소형 드론의 자율 충전을 가능하게 함으로써 실내 식물 공장에서 드론 운용의 연속성을 확대하고, 인력 개입을 최소화하여 드론의 무인 운용이 가능하도록 한다. 특히, 드론의 착륙 오차를 보정하는 정렬 메커니즘을 통해 드론의 배터리 충전을 보다 안정적이고 신뢰도 높게 자동화하였다.

향후 연구에서는 다양한 소형 드론 모델에 대한 적용 가능성을 확장하고, 실내 식물 공장을 넘어 다양한 실내 환경에서도 활용할 수 있도록 시스템의 범용성을 높이는 연구가 필요하다. 또한, 드론의 충전 단자 위치가 상이한 경우를 고려하여, 다양한 충전 단자에 대응할 수 있는 추가적인 장치나 알고리즘의 개발이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2023학년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음.

REFERENCES

1. Kim, H., Mokdad, L., Ben-othman, J., (2018), Designing UAV surveillance frameworks for smart city and extensive ocean with differential perspectives, Institute of Electrical and Electronics Engineers Communications Magazine, 56(4), 98-104.
2. King, A., (2017), The future of agriculture, Nature 544.7651: S21-S23.
3. Lee, B., Kwon, S., Park, P., Kim, K., (2014), Active power management system for an unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 50(4), 3167-3177.
4. Sarunic, P., Evans, R., (2014), Hierarchical model predictive control of UAVs performing multitarget-multisensor tracking, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 50(3), 2253-2268.

5. Lee, D.V., Zhou, J., Lin, W.T., (2015), Autonomous battery swapping system for quadcopter, Proceedings of the 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 118-124.
6. Suzuki, K.A.O., Kemper Filho, P., Morrison, J.R., (2012), Automatic battery replacement system for UAVs: analysis and design, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 65(1-4), 563-586.
7. Jung, S., Lee, T., Mina, T., Ariyur, K. B., (2012), Inductive or magnetic recharging for small UAVs, SAE Technical Papers, 2012-01-2115.
8. Choi, C. H., Jang, H. J., Lim, S. G., Lim, H. C., Cho, S. H., Gaponov, I., (2016), Automatic wireless drone charging station creating essential environment for continuous drone operation, Proceedings of the 2016 International Conference on Control, Automation and Information Sciences, 132-136.
9. Rohan, A., Rabah, M., Talha, M., Kim, S.H., (2018), Development of intelligent drone battery charging system based on wireless power transmission using hill climbing algorithm, Applied System Innovation, 1(4), 44.
10. Rangel, R. K., Maitelli, A. L., Freitas, J. L., de Araújo, R. F., (2023), Smart drone, wireless charge station and management system applied to air mobility, Proceedings of the 2023 Institute of Electrical and Electronics Engineers Aerospace Conference, 1-19.
11. Mautz, R., (2012), Indoor positioning technologies, application for venia legendi in positioning and engineering geodesy, Habilitation Thesis, institute of geodesy and photogrammetry, department of civil, Environmental and Geomatic Engineering, ETH Zurich.
12. Kim, Y. K., Jung, H. H., Kim, D. N., Kang, T. C., (2022), Design and implementation of drone station charging bed structure for rotary wing drones, The Journal of Korean Institute of Information Technology, 20(6), 41-50.

**Da Yeong Han**

B.Sc. candidate in the Department of Human Intelligence and Robot Engineering, Sangmyung University. Her research interests are intelligent robotics and robot control system.

E-mail: handayeong02@gmail.com

**Yu Jin Ho**

B.Sc. candidate in Department of Human Intelligence and Robot Engineering, Sangmyung University. Her research interests are autonomous driving and motor control.

E-mail: starlikeu2416@naver.com

**Jae Hwan Bong**

Assistant Professor at Department of Human Intelligence and Robot Engineering, Sangmyung University. His research interests are intelligent robotics, human-robot interface, and machine learning.

E-mail: drbong@smu.ac.kr

공간 난방, 직사드라이, 제습 기능을 적용한 스마트 욕실 시스템의 CFD 기반 성능 평가

CFD-based Performance Evaluation of Smart Bathroom Systems with Space Heating, Direct Drying, and Dehumidification

김현수^{1,2}, 김정수³, 김지훈^{1,#}, 강성욱^{4,#}

Hyun Soo Kim^{1,2}, Jung Su Kim³, Ji Hoon Kim^{1,#}, and Sung Wook Kang^{4,#}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

² 한국생산기술연구원 극한공정제어그룹 (Extreme Process Control R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

³ 대전대학교 IT기계공학과 (Department of IT Mechanical Engineering, Daejin University)

⁴ 창원대학교 스마트오션 모빌리티공학과 (Department of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon National University)

Corresponding Authors / E-mail: kimjh@pusan.ac.kr, TEL: +82-051-510-3031, ORCID: 0000-0003-1703-5720

E-mail: swkang@changwon.ac.kr, TEL: +82-055-213-3681, ORCID: 0000-0001-9334-0503

KEYWORDS: Smart bathroom system (스마트 욕실 시스템), CFD analysis (CFD 해석), Space heating (공간 난방), Direct drying (직사드라이), Dehumidification (제습)

This study presents results of Computational fluid dynamics (CFD) analysis conducted to evaluate performances of various functional products developed for smart bathroom systems. The primary objective was to analyze the efficiency of space heating, direct drying, and dehumidification functions in a winter bathroom environment. Representative bathroom models in South Korea were selected and detailed CFD simulations were performed on these models. Results showed that bathtub models exhibited higher efficiency overall in space heating and dehumidification than shower booth models. This was attributed to differences in bathroom structure and internal air flow. Additionally, the direct drying function showed higher efficiency in bathtub models, determined by the placement of air outlets and inlets. This study provides essential foundational data that can contribute to the design and enhancement of smart bathroom systems' functionality, offering valuable insights for the development of optimized smart bathroom products.

Manuscript received: October 27, 2024 / Revised: January 31, 2025 / Accepted: February 5, 2025

NOMENCLATURE

n_{air} = Air Density
 P = Pressure
 R = Specific Gas Constant for Dry Air
 T = Temperature
 T_D = Dew Point Temperature
 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ = Partial Pressure of Water Vapor (in hPa)
 e = Vapor Pressure, which refers to the partial pressure exerted by water vapor in the air

$X_{\text{H}_2\text{O}}$ = Volume Mixing Ratio of Water Vapor
 $M_{\text{H}_2\text{O}}$ = Molar Mass of Water (in g/mol)
 M_{dry} = Molar Mass of Dry Air (in g/mol)
 q = Specific Humidity (Ratio of Water Vapor to Air Mass)
 mmv = Mass Mixing Ratio
 $C_{\text{H}_2\text{O}}$ = Mass Concentration of Water Vapor (in g/m³)
 H_2O = Molecular Concentration of Water Vapor of Water Vapor (in molecules per cubic meter)

1. 서론

최근 몇 년간의 급격한 사회적, 기술적 변화는 우리의 생활 방식뿐만 아니라 주거 공간의 설계와 사용에도 큰 영향을 미치고 있다. 특히 COVID-19 팬데믹을 겪으면서 많은 사람들이 집에서 보내는 시간이 증가함에 따라 주거 환경에 대한 관심이 더욱 높아졌으며, 욕실은 이제 단순 위생을 유지하는 공간에서 사용자의 건강과 심리적 안정에 중요한 역할을 하는 다기능 공간으로 재조명되고 있다[1]. 이러한 변화는 기술의 발전과 맞물려, 스마트 욕실 시스템이라는 새로운 개념으로 구체화되고 있다. 국내외에서 스마트 욕실 시스템에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 일본의 TOTO사는 자동 변기, 샤워 시스템과 같은 첨단 제품으로 시장을 선도하며, 욕실 내에서의 사용자 경험을 향상시키기 위한 다양한 기술들을 상용화하였다. 미국의 Kohler와 독일의 Grohe 또한 IoT 기반 욕실 시스템을 개발하여, 사용자 맞춤형 온도 제어, 습도 관리, 그리고 음성 인식 기술을 접목한 욕실 솔루션을 제시하고 있다. 반면, 국내에서는 삼성전자와 LG전자가 스마트 홈 기술과 연계한 욕실 환경 제어 기술을 일부 제품에 적용하고 있지만, 욕실 환경 전체를 아우르는 통합적인 시스템에 대한 연구는 상대적으로 부족한 상황이다. 이러한 점에서 본 연구는 국내 아파트 환경을 기반으로 스마트 욕실 시스템의 최적화를 연구한 사례로, 차별성과 신규성을 가지며 실용적인 가치를 제시할 수 있다. 스마트 욕실 시스템은 첨단 기술을 활용해 사용자에게 최적의 환경을 제공하는 혁신적인 시스템이다. 이러한 시스템은 공간 난방, 제습, 직사드라이 기능을 통합하여 사용자의 편의성과 건강을 증진시키고 있다. 공간 난방의 기능은 온도를 신속히 조절하여 쾌적한 환경을 유지하고, 제습 기능은 곰팡이와 세균의 성장을 억제하며, 직사드라이 기능은 샤워 후 물기를 빠르게 제거하여 편리함을 제공한다[2]. 이러한 기능들은 욕실을 단순한 사용 공간에서 벗어나, 개인의 건강과 웰빙을 촉진하는 중요한 생활 공간으로 변모시키는 역할을 하고 있다. 다시 말하면, 스마트 욕실 시스템의 발전은 단순히 편의성을 제공하는 것을 넘어서, 주거 환경의 혁신을 이끄는 중요한 요소로 자리잡고 있는 것이다. 스마트 욕실 시스템은 다양한 공조 및 환기 기술을 통해 실내 환경을 최적화하고, 사용자 맞춤형 서비스를 제공할 수 있는 잠재력을 가지고 있다[3]. 예를 들면, 욕실의 환기 시스템은 실내 공기의 순환을 원활하게 하여 습기와 냄새를 효과적으로 제거하고, 실내 공기의 질을 개선하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 기술적 발전은 기존 욕실이 가진 한계를 극복하고, 사용자의 경험을 중심으로 한 혁신적인 공간으로 재탄생 시키는 데 기여하고 있다고 볼 수 있다. 특히, 욕실 공간은 주거 공간 내에서 가장 극적으로 온도와 습도 변화를 경험하는 곳 중 하나로, 이러한 환경 변화는 사용자의 건강과 안전에 직접적인 영향을 미칠 수 있다[4]. 스마트 욕실 시스템은 이러한 문제를 해결하기 위해 설계되었으며, 사용자의 다양한 요구에 부응하는 맞춤형 환경을 제공하도록 설계되었다. 이는 단순한 기술적 혁신에 그치는 것이 아니라, 사용자의

건강과 안전을 보호하고, 보다 쾌적한 생활 환경을 조성하는 데 중점을 두고 있다. 스마트 욕실 시스템의 개발 과정에서 중요한 과제는 이러한 기능들을 최적화하고 통합화 하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 활용하여 스마트 욕실 시스템의 주요 기능인 공간 난방, 제습, 직사드라이 기능의 성능을 평가하고, 각 기능의 효율성을 분석하였다[5]. 스마트 욕실 시스템의 실제 사용 환경 내 작동 방식과 각 기능 간 상호작용을 규명하는 데 중점을 두었다. 또한, 국내 아파트의 화장실 면적(3-5 m²)을 적용한 후 Bath tub-Type Model 2개와 Shower Booth-Type Model 2개(총 4개)를 생성하여 CFD 시뮬레이션을 수행하였다. CFD 해석을 통해 각 모델의 성능 차이를 규명하고 최적의 환경 제어를 위한 설계 지침을 도출하는 것을 목표로 하였다. 이는 사용자 맞춤형 욕실 환경 구현에 필요한 중요한 기초 자료를 제공하며, 향후 스마트 욕실 시스템의 발전 방향을 제시하는 데 기여할 것이다.

스마트 욕실 시스템의 성능 평가와 최적화 방안은 현대 주거 환경에서 욕실 공간의 역할과 중요성을 재조명하고, 보다 쾌적하고 안전한 생활 공간을 구현하는 데 기초 자료로 활용될 것이다[6,7]. 본 연구에서 제시한 성능 평가와 최적화 방안은 이러한 요구를 충족시키는 데 기여하며, 향후 스마트 욕실 시스템의 개발과 적용에 중요한 기반을 제공할 것으로 기대된다.

이를 통해 사용자들의 생활의 질이 향상되고, 새로운 주거 문화가 정착될 것이다. 나아가, 새로운 스마트 욕실 시스템을 통해 주거 공간의 새로운 패러다임을 제시하고자 한다.

2. CFD 기반 스마트 욕실 시스템의 성능 평가

2.1 스마트 욕실 시스템 성능 평가 개요

스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하기 위해, 제품 설치 가용 공간의 선정이 필수적이다. 국내 화장실의 배관 구조는 층상 배관과 층하 배관(이중 배관, 벽면 배관)으로 구분된다. 층하 배관의 경우 층간 소음 및 비위생적 문제로 인해 최근에는 거의 사용되지 않고 있으며, 대신 신축 아파트에서는 이중 배관과 벽면 배관이 주로 사용되고 있는 추세다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 국내 화장실의 평균 천장 높이와 배관 구조를 고려하여 기능성 욕실 전자제품의 설치 가용 위치를 선정하였다. 해당 설치 위치는 Fig. 1에 제시되어 있다.

스마트 욕실 시스템 환경 구축을 목표로, 본 스마트 욕실 시스템의 성능 평가를 위해 본 연구에서는 CFD 해석을 활용하였다. 연구의 목표는 스마트 욕실 시스템 환경 구축을 위해 코어 하드웨어 개발을 중심으로 진행되었으며, 이를 기반으로 상위 하드웨어, 편의 기능, 상호작용 AI 및 AI 빅데이터를 구현하여 최종적으로 통합된 스마트 욕실 시스템을 개발하는 것이다. 스마트 욕실 시스템은 공간 난방, 제습, 직사드라이 기능을 포함한 다양한 첨단 기능을 통해 사용자의 편의성과 건강 증진을 목표로 한다. 각 기능의 효율성을 평가하기 위해, 본 연구에서는

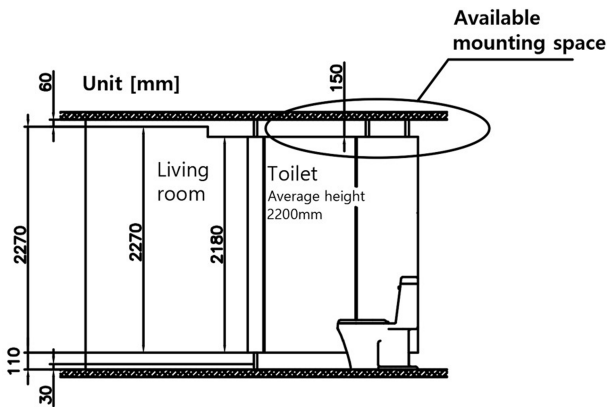


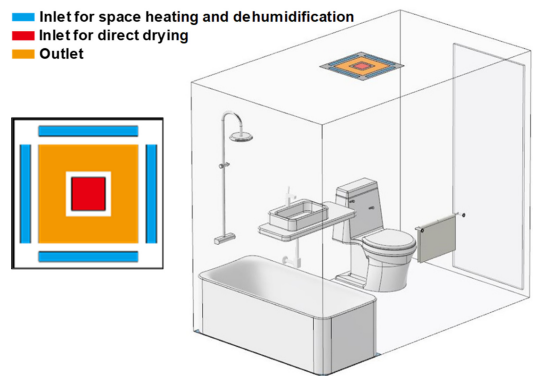
Fig. 1 Product installation space according to ceiling height and structure of domestic bathrooms

욕실 환경 내 열전달, 공기 흐름, 그리고 습도 변화를 시뮬레이션 하였다. 이 과정은 스마트 욕실 시스템의 동작 메커니즘을 명확히 이해하고, 각 기능의 성능을 정량적으로 분석하기 위한 중요한 기반이 된다. 이를 통해, 최적의 환경 제어를 위한 스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하고, 각 기능이 실제 사용 환경에서 어떻게 상호작용하는지를 규명하고자 하였다.

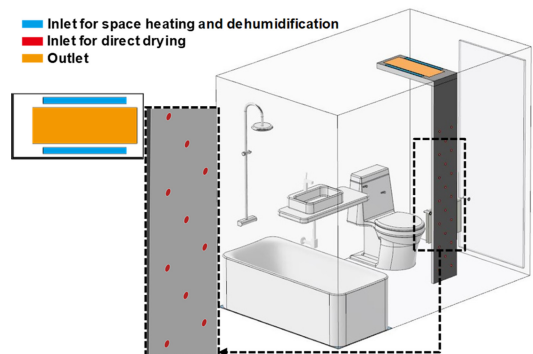
본 연구에서는 스마트 욕실 시스템의 각 기능별 성능을 평가하기 위해 비정상 상태 해석(Transient Analysis)을 수행하였다. 시간에 따라 변화하는 물리적 현상을 정확히 반영하기 위해 Time Scale을 1초 간격(Time Step)으로 설정하였다. 해석 조건으로는 공간 난방 및 직사 드라이에 대해 50초, 제습에 대해서는 100초간의 시뮬레이션 시간을 적용하였다. 이러한 설정을 통해 각 기능의 시간에 따른 공기 흐름, 열전달 특성, 그리고 습도 변화를 정량적으로 평가하였다.

2.2 CFD 해석 모델 및 유체 물성

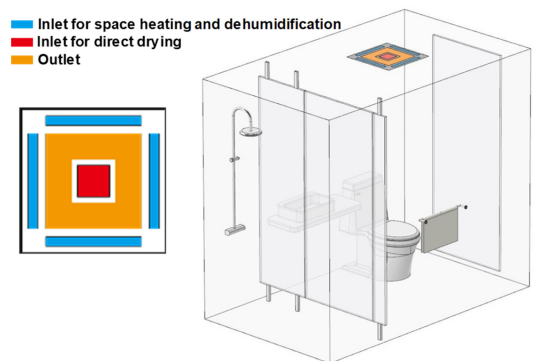
스마트 욕실 시스템의 성능 평가를 위해, 한국의 주거 환경에서 흔히 볼 수 있는 욕실 구조를 반영한 모델을 선정하였다. 총 4개의 케이스(Bathtub-Type 2개, Shower Booth-Type 2개)에 대해 모델링 하였으며, 이들 모델은 서로 다른 욕실 구조와 크기를 반영하고 있다. 각 모델의 경우 Fig. 2와 같으며, 스마트 욕실 제품의 설치 및 운영에 최적화된 형태로 설계되었다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 한국 아파트 욕실의 평균 천장 높이와 배관 구조를 고려하여 구성하였다. 해석에 사용된 Fig. 2의 모델에서 파란색으로 표기된 영역은 공간 난방과 제습을 위한 Inlet을 나타내고, 붉은색으로 표기된 영역은 직사드라이를 위한 Inlet을 나타낸다. 주황색 영역은 3가지 케이스의 Outlet 영역을 시각화하여 공기 흐름 경로를 명확히 나타내었다. 해석에 사용된 유체는 공기와 물이다. 공간 난방과 직사드라이 기능 작동 시 특정 온도의 공기가 Inlet을 통하여 욕실 내부로 공급된다. 또한, 제습 기능의 성능 평가를 위하여 초기 습도를 가정하여 계산하게 되는데 이때 물과 공기 혼합 유체가 필요하게 된다. 이러한 유체들의 물성 값은 Table 1에 정리하였으며, Fluent에서 제공하는 값을 사용하였다.



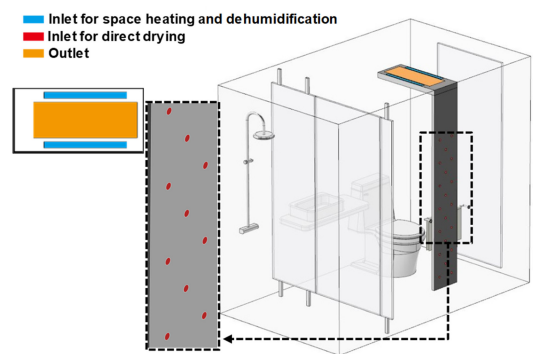
(a) Bathtub-type Case 1: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(b) Bathtub-type Case 2: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(c) Shower booth-type Case 3: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(d) Shower booth-type Case 4: Space heating, direct drying, and dehumidification model

Fig. 2 Four different smart bathroom concept designs and functional inlet/outlet schematics

Table 1 Material properties

Material	Density [kg/m ³]	Thermal Conductivity [W/(m·K)]	Viscosity [kg/(m·s)]	Molecular Weight [kg/kmol]
Air	1.225	0.0242	1.789e-05	28.966
H ₂ O	0.554	0.0261	1.340e-05	18.015

Table 2 Mesh information

Case	Nodes	Elements
Bathtub-type case 1	221,578	1,192,793
Bathtub-type case 2	259,202	1,386,598
Shower booth-type case 3	267,962	1,399,958
Shower booth-type case 4	271,192	1,401,348

2.3 CFD Mesh

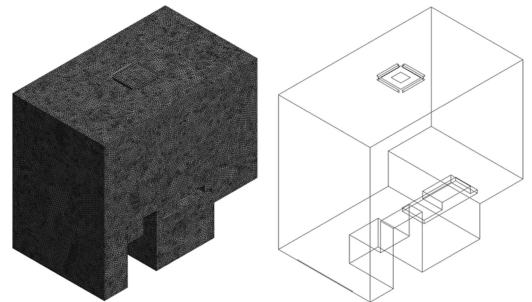
효율적인 CFD 해석을 수행하기 위해 각 케이스에 대해 단순화 작업을 진행한 후, 3D CFD 해석 모델을 구축하였다. 이러한 모델은 실제 욕실 환경에서 발생할 수 있는 다양한 조건을 반영하여 설계되었으며, 단순화된 모델과 Mesh 구조는 Fig. 3에 제시되어 있다.

Grid Convergence Index (GCI) 방법을 적용하여 Mesh의 독립성을 충분히 확보하기 위해 검증을 수행하였고, 그 결과 25 mm Mesh 사이즈에서 해석 결과가 Mesh에 영향을 받지 않는 수준에 도달한 것을 확인하였다. 각 CFD 모델의 노드(Node)와 요소(Element) 수는 Table 2에 정리되어 있다. Mesh의 유형은 Tetrahedron Mesh를 선택하여 복잡한 기하학적 형상을 정확하게 표현하고자 하였다.

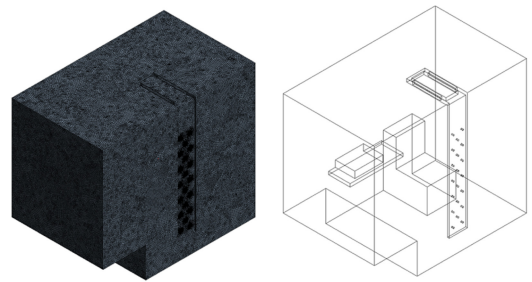
또한, 벽 근처 유동의 정확도를 평가하기 위해 Fluent 소프트웨어에서 벽면 전단응력(T_w) 값을 계산하였으며, 이를 기반으로 아래의 식(1)과 식(2)를 활용하여 y+ 값을 계산하였다. 벽면 전단응력은 유동장과 벽면 간의 상호작용을 나타내는 물리적 값으로, y+ 계산에 핵심적인 요소이다. y+ 값은 다음과 같은 공식으로 계산된다: 여기서, T_w는 벽면 전단응력(Pa), y는 첫 번째 셀 중심까지의 거리(본 연구에서는 0.025 m), ν는 운동 점성 계수(1.7894 × 10⁻⁵ m²/s), ρ는 공기 밀도(1.225 kg/m³)를 나타낸다. 계산된 벽면 전단응력 값과 y+ 값은 Tables 3과 4에 정리되어 있다. 계산된 y+는 150에서 278 사이의 값을 가지며, 이는 기존 연구 결과를 바탕으로 합리적이라고 판단된다[8]. 이러한 y+ 범위는 벽 근처 층류-난류 전이 영역을 효과적으로 해석할 수 있는 조건을 충족하며, CFD 해석 결과의 신뢰성을 보장한다. 또한 이를 통해 Mesh 크기와 난류 모델 간의 균형을 유지하며, 해석 정확도를 높이고 추가적인 계산 비용을 최소화할 수 있었다.

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{T_w}{\rho}} \tag{1}$$

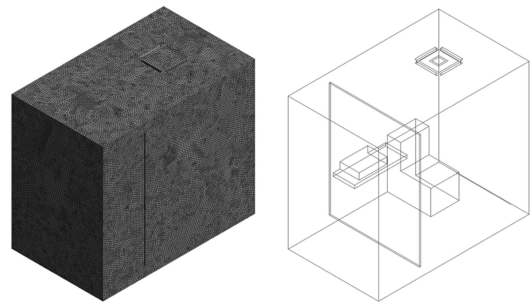
$$y^+ = \frac{u_{\tau} \cdot y}{\nu} \tag{2}$$



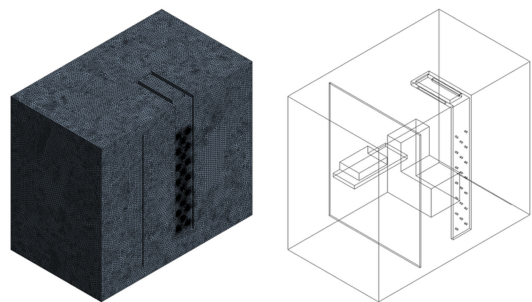
(a) Bathtub-type Case 1: Space heating, direct drying, and dehumidification model



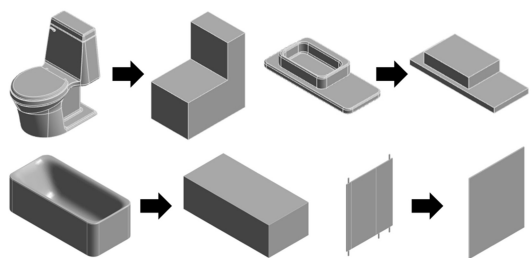
(b) Bathtub-type Case 2: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(c) Shower booth-type Case 3: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(d) Shower booth-type Case 4: Space heating, direct drying, and dehumidification model



(e) 3D modeling simplification

Fig. 3 3D analysis model and mesh

Table 3 Wall shear stress

Case 1 [Pa]	Case 2 [Pa]	Case 3 [Pa]	Case 4 [Pa]
0.011593	0.024933	0.039465	0.010736

Table 4 y+ Values for each case

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
150.42	220.61	277.55	144.76

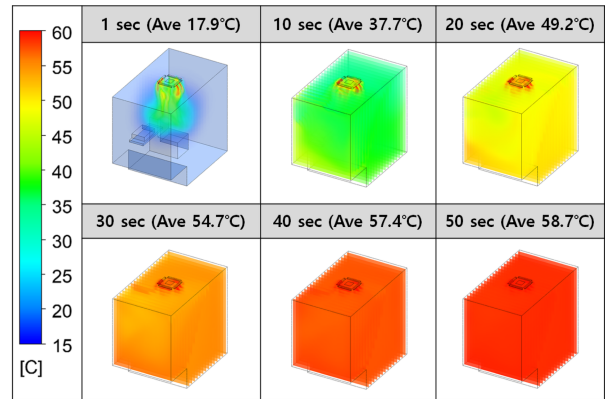
2.4 CFD 해석을 위한 난류 모델 및 가정

앞서 언급한 바와 같이 구축한 CFD 시뮬레이션 모델을 기반으로 해석을 수행하였다. 스마트 욕실 내부 유동을 구현하기 위하여 Ansys의 Fluent 소프트웨어(버전 2024 R2)를 사용하였으며, 난류 모델로는 Realizable k-ε 모델을 적용하였다. k-ε 모델은 실내 공기 유동 및 열 전달 해석에서 가장 널리 사용되는 난류 모델 중 하나로, 계산 효율성과 안정성이 뛰어나며, 복잡한 형상의 내부 유동 문제에 적합하다. 특히, 실내 공기 유동에서 발생하는 벽 근처 층류와 난류 특성을 균형 있게 반영하여 본 연구에 적합하다고 판단하였다. 특히, k-ε 모델은 평균적인 유동 특성을 계산하는 데 효과적이며, 스마트 욕실 시스템이 보유한 기능들과 같이 복잡한 물리적 현상이 아닌 내부 공기 온도 상승 패턴과 습도를 계산하는 데 적합하다.

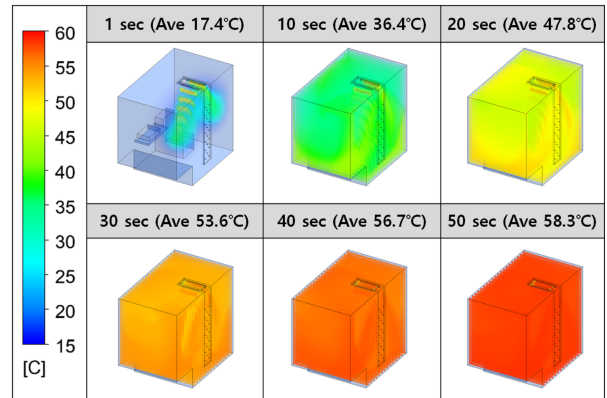
CFD 해석을 효율적으로 수행하기 위하여 본 연구에서는 폐쇄형 욕실 환경(Closed Bathroom Environment)을 가정하여 스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하였다. 스마트 욕실 시스템의 공조 성능, 열 전달, 습도 제어 등 주요 성능 요소를 집중적으로 평가하고, 조건을 단순화하여 해석의 신뢰성을 확보하기 위함이다. 실제 사용 환경에서는 욕실 문틈을 통한 외부 공기 유입과 내부 공기 방출이 발생할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 외부 공기 유입 및 내부 공기 방출을 고려하지 않았다. 이는 욕실 문틈을 통한 공기 유입과 방출은 문틈의 크기, 주변 외부 온도, 외부 공기 유동 방향 등의 비선형적 변수를 발생시킨다. 본 연구의 주요 목적은 욕실 내부 공기 흐름과 열 전달 성능을 평가하고, 스마트 욕실 시스템의 공조 및 습도 제어 성능을 분석하는 것이다. 이를 위해 공기 흐름 경로는 시스템 내부 설비로 제한하였으며, 외부 공기 유입과 방출은 시스템 성능에 대한 직접적인 영향을 배제하기 위해 폐쇄형 도메인(Closed Domain)으로 설정하였다.

2.5 공간 난방 해석 조건 및 결과

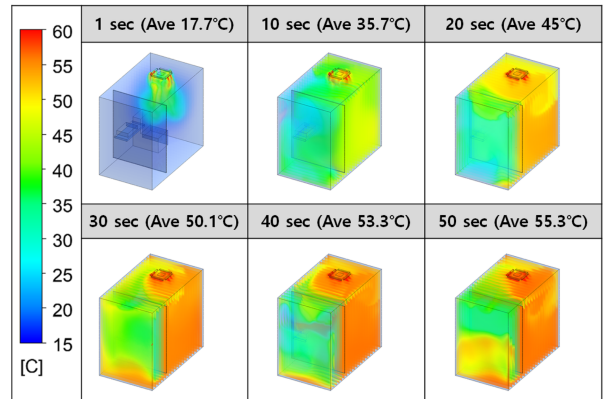
공간 난방 해석은 50초까지 수행하였으며, 욕실 내부의 평균 온도를 계산하였다. 초기 온도 상승 구간을 명확히 파악하기 위해 해석 결과는 1, 10, 20, 30, 40, 50초 시점에서의 온도 분포를 Fig. 4에 나타냈다. 또한, 공간 난방 해석에 사용된 주요 변수들은 Table 5에 정리되어 있다[9,10]. 공간 난방 해석에서 초기 온도는 15°C로 설정되었는데, 이는 겨울철 일반적인 가정집 욕실의 온도를 반영한 값으로, 이는 사람이 샤워나 목욕을 하기에는



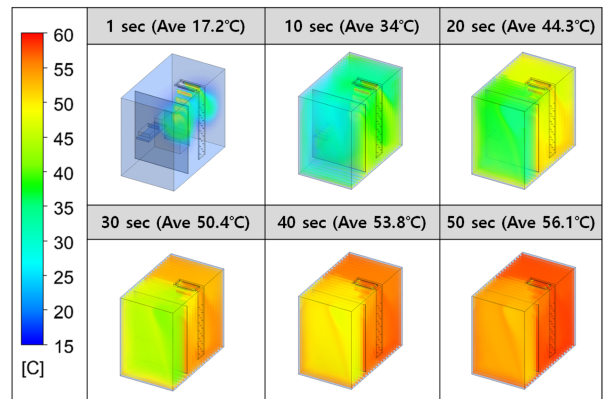
(a) Bathtub-type Case 1: Space heating



(b) Bathtub-type Case 2: Space heating



(c) Shower booth-type Case 3: Space heating



(d) Shower booth-type Case 4: Space heating

Fig. 4 Space heating analysis results: 1 to 50 seconds

Table 5 Space heating variable values

Initial Temperature [°C]	Wind speed [m/s]	Air inlet temperature [°C]	Air angle [°]
15	12	60	45

Table 6 Direct drying variable values

Initial Temperature [°C]	Wind speed [m/s]	Air inlet temperature [°C]	Air angle [°]
25	25	120	90

다소 추운 온도이다, 따라서, 공간 난방 시스템이 초기 온도에서 얼마나 빠르게 쾌적한 온도로 도달하는지를 평가하기 위해 초기 값을 15°C로 설정하였다. 이러한 설정은 실생활 환경을 모사하여, 공간 난방 시스템의 성능을 현실적으로 평가하는 데 중요한 역할을 한다.

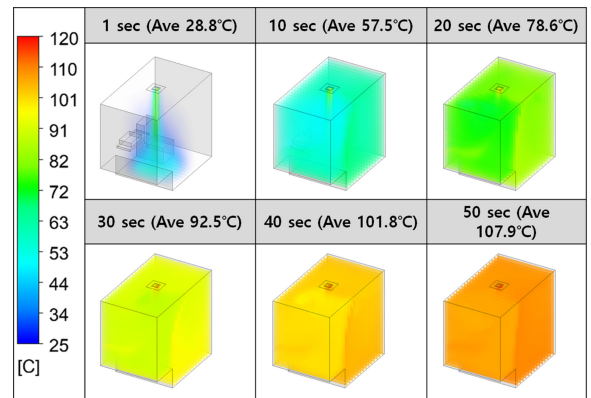
2.6 직사드라이 해석 조건 및 결과

직사드라이 해석에서 초기 온도는 25°C로 설정되었다. 이는 샤워나 목욕 후 욕실 내부의 일반적인 온도를 반영한 값으로, 샤워 후 욕실 온도는 대체로 25°C 수준까지 상승하기 때문이다. 직사드라이 시스템은 사용자가 수건 없이 몸을 말릴 수 있도록 설계되었으며, 25°C라는 따뜻한 환경에서 시스템의 성능을 평가하기 위해 이 온도로 설정되었다. 해석은 50초간 진행되었으며, 시간 경과에 따른 온도 분포는 1, 10, 20, 30, 40, 50초 시점에서 분석되었다. 해석 결과, 직사드라이 시스템은 짧은 시간 내에 샤워 후 물기를 효과적으로 제거할 수 있는 성능을 보였다. 각 시점에서의 온도 분포는 시스템의 효율성을 정량적으로 나타내며, 특히 샤워 직후 빠르게 온도를 상승시켜 사용자에게 쾌적하고 편리한 환경을 제공하는 것으로 나타났다.

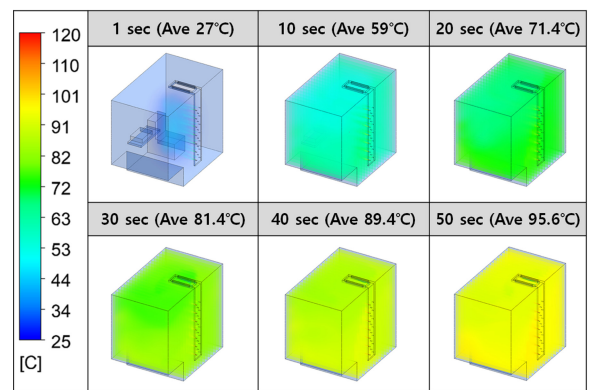
Table 6에는 직사드라이 해석에 사용된 주요 변수 값이 정리되어 있으며, Fig. 5를 통해 시간 경과에 따른 온도 변화와 공기 흐름을 시각적으로 확인할 수 있다. 이를 통해 직사드라이 시스템이 실사용 환경에서 얼마나 효과적으로 작동하는지 평가되었으며, 시스템의 설계와 성능 최적화에 대한 중요한 자료를 제공한다.

2.7 제습 해석 조건 및 결과

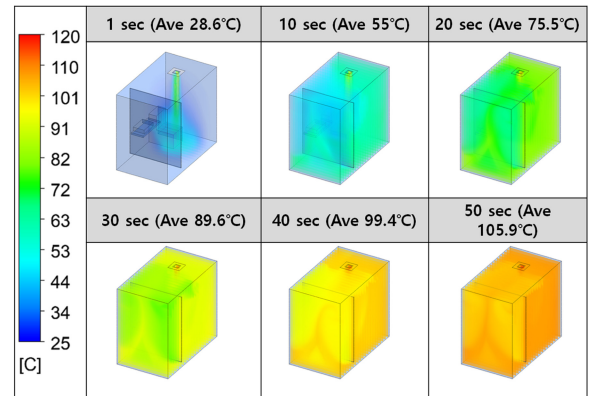
제습 계산에는 Ansys Fluent 소프트웨어의 Species Transport Model이 사용되었으며, 혼합물의 물성값(Mixture Properties)은 Mixture-Template을 적용하여 설정하였다. 제습 시스템의 성능을 평가하기 위해 초기 온도는 25°C로 설정되었으며, 이는 샤워나 목욕 후 욕실 내부의 일반적인 온도를 반영한 값이다. 샤워나 목욕 후 욕실의 온도는 자연스럽게 25°C 정도로 유지되며, 이러한 환경에서 제습 시스템이 작동하여 욕실 내부의 습기 제거, 곰팡이 및 세균 번식 억제, 쾌적한 욕실 환경 유지를 목표로 한다. 해석은 각각 5, 20, 40, 60, 80, 100초



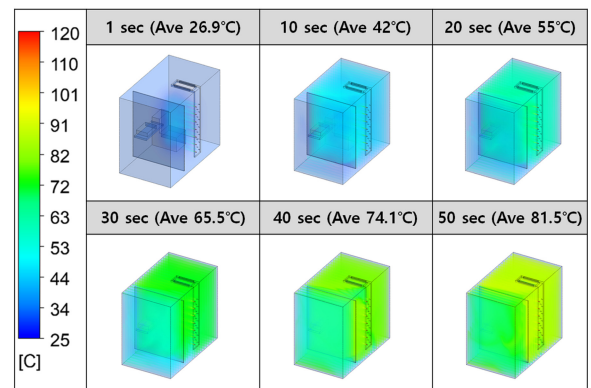
(a) Bathhtub-type Case 1: Direct drying



(b) Bathhtub-type Case 2: Direct drying

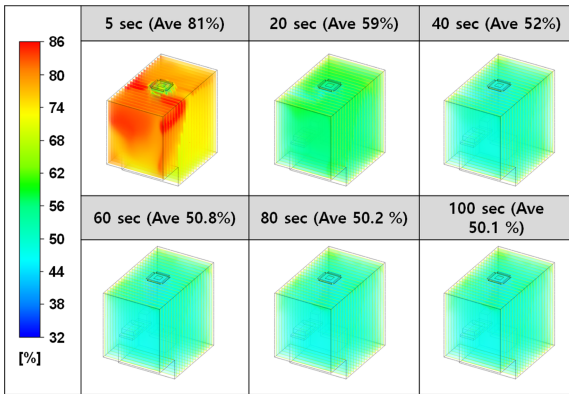


(c) Shower booth-type Case 3: Direct drying

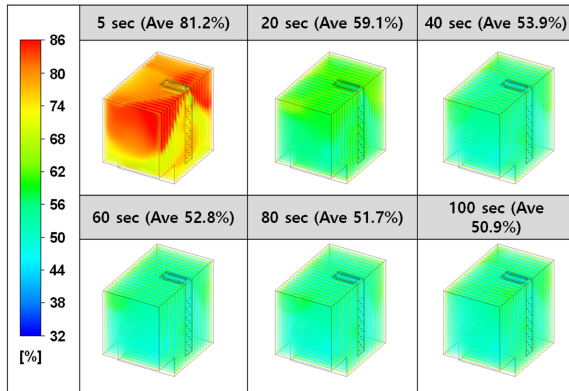


(d) Shower booth-type Case 4: Direct drying

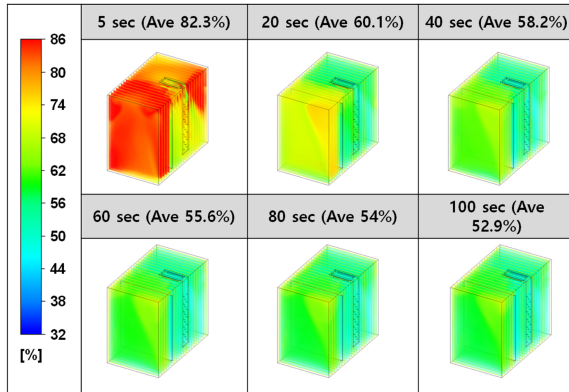
Fig. 5 Direct drying analysis results: 1 to 50 seconds



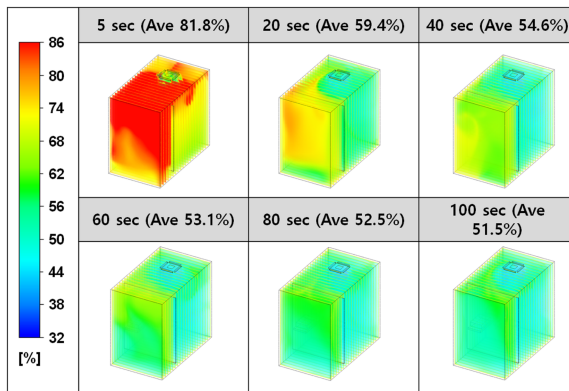
(a) Bathtub-type Case 1: Dehumidification



(b) Bathtub-type Case 2: Dehumidification



(c) Shower booth-type Case 3: Dehumidification



(d) Shower booth-type Case 4: Dehumidification

Fig. 6 Dehumidification analysis results: 5 to 100 seconds

Table 7 Dehumidification variable value

Initial temperature [°C]	Humidity [%]	Wind speed [m/s]	Air inlet temperature [°C]	Air angle [°]
25	90	12	30	45

시점에서 진행되었으며, 시간이 경과함에 따라 제습 시스템의 성능을 확인할 수 있다. 최종 습도는 아래의 식(3)부터 식(9)를 활용하여 산출되었으며, 습도 해석 결과는 Fig. 6에 제시되었다. 특히, 식(9)에서 좌변의 [H₂O]는 공기 중 물 분자의 농도를 나타내는 표시이다. 제습 해석에서 물 분자의 농도는 실내 공기의 습기를 효과적으로 제거하는 시스템 성능을 평가하는 데 필수적인 요소이다. 여기서, 대괄호는 공기 중 물의 몰 농도 (Molar Concentration)를 의미하며, 제습 과정에서 물 분자의 분포를 명확히 정의하기 위해 사용되었다. 이러한 정의를 통해 제습 시스템이 욕실 내부의 습기를 얼마나 효과적으로 제거할 수 있는지를 구체적으로 평가할 수 있다. 제습 해석에 사용된 주요 변수들은 Table 7에 정리되어 있다. 제습 시스템은 샤워 후 욕실 환경에서 곰팡이 및 세균의 번식을 막고, 실내 습도를 적절한 수준으로 유지함으로써 사용자에게 쾌적한 환경을 제공하는데 기여한다[11].

$$n_{air} = \frac{P \cdot 100}{R \cdot (T + 273.15)} \tag{3}$$

$$RH = \frac{e(T_D)}{e(T)} \cdot 100 = \frac{P_{H_2O}}{e(T)} \cdot 100 \tag{4}$$

$$X_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P} \tag{5}$$

$$q = \frac{X_{H_2O} \cdot M_{H_2O}}{X_{H_2O} \cdot M_{H_2O} + (1 - X_{H_2O}) \cdot M_{dry}} \cdot q = \frac{mmv}{1 + q} \tag{6}$$

$$mmv = \frac{q}{1 - q} \tag{7}$$

$$C_{H_2O} = X_{H_2O} \cdot n_{air} \cdot M_{H_2O} \tag{8}$$

$$[H_2O] = X_{H_2O} \cdot n_{air} \cdot N_A \cdot 10^{-6} \tag{9}$$

2.8 해석 결과 비교 및 분석

Fig. 7의 그래프는 Bathtub-Type 모델과 Shower Booth-Type 모델의 Space Heating Efficiency 해석 결과를 기반으로, 욕실 내부 평균 온도 변화를 비교한 결과를 나타낸다. 해석 결과, Bathtub-Type 모델은 Shower Booth-Type 모델에 비해 더 높은 평균 내부 온도를 유지하였다. 이는 Shower Booth-Type 모델의 구조적 특성, 특히 유리문이 존재함으로 인해 특정 영역의 공기 흐름 제한이 발생하고, 온도 상승이 저하된 것으로 분석된다. 이 결과는 욕실 공기 순환과 열 분포가 욕실 구조적 설계에 따라 직접적인 영향을 받는다는 점을 시사한다. 따라서, 스마트 욕실 시스템 설계에서는 구조적 요인과 공기 흐름 경로 최적화를 세심하게 고려해야 한다.

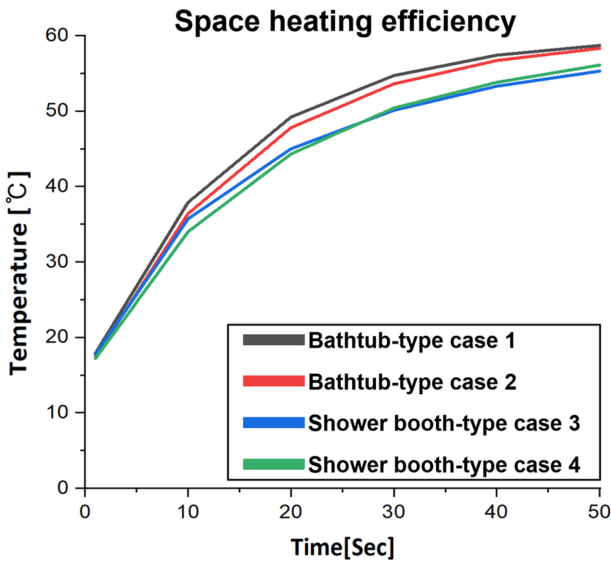


Fig. 7 Comparison of indoor average temperature over time between bathtub and shower booth types - Space heating

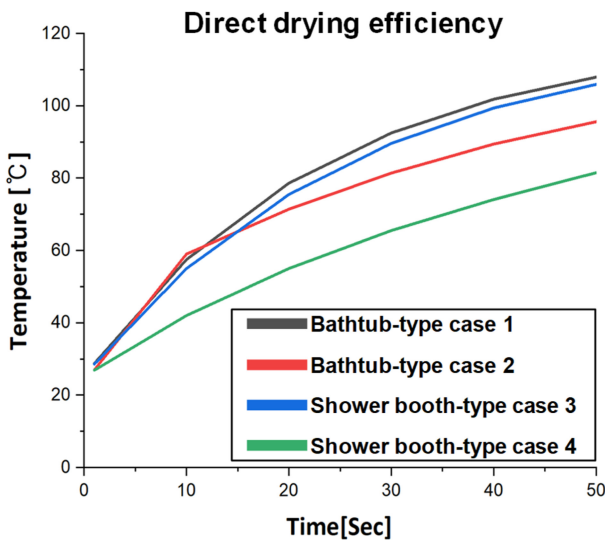


Fig. 8 Comparison of indoor average temperature over time between bathtub and shower booth types - Direct drying

Direct Drying 해석 결과는 Fig. 8 그래프에 제시되어 있으며, 공간 난방 해석 결과와 유사하게, Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델에 비해 내부 평균 온도가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 Shower Booth-Type 모델의 유리문 구조로 인해 공기 흐름 경로가 제한되어 해당 영역의 온도 분포가 상대적으로 낮아진 결과로 해석된다.

제습 해석 결과는 Fig. 9 그래프에 제시되어 있으며, Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델보다 더 높은 제습 효율을 보였다. 이는 Bathtub-Type 구조가 습도 조절에 있어 더 유리한 공기 흐름 환경을 제공했기 때문으로 해석된다.

Table 8에는 공간 난방, 식사드라이, 제습 효율을 종합적으로 비교한 결과가 나타나 있으며, Bathtub-Type Case 1이 모든

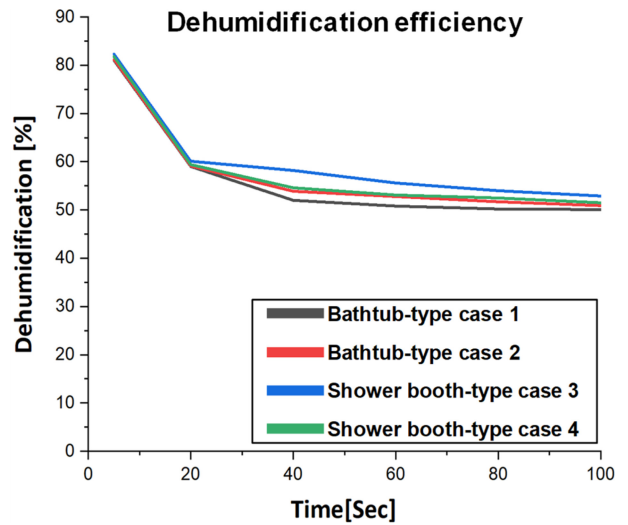


Fig. 9 Comparison of indoor average humidity over time between bathtub and shower booth types - Dehumidification

Table 8 Comparison of results

Case	Space heating efficiency	Direct drying efficiency	Dehumidification efficiency
Bathtub-type Case1	High	High	High
Bathtub-type Case2	High	Medium	Medium
Shower booth-type Case3	Low	High	Low
Shower booth-type Case4	Low	Low	Medium

기능에서 가장 높은 성능을 보인 반면, Shower Booth-Type Case 4는 가장 낮은 성능을 나타냈다. 이러한 결과는 스마트 욕실 시스템 설계에서 구조적 차이가 시스템 성능에 직접적인 영향을 미친다는 것을 보여준다. 따라서, 스마트 욕실 시스템 설계 시 각 기능별 구조적 특성과 공기 흐름 경로를 종합적으로 고려하는 것이 중요하다.

3. 결론

3.1 성능 평가 결과 요약

본 연구에서는 스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하기 위해 공간 난방, 식사드라이, 그리고 제습 기능을 중심으로 각 케이스별 성능을 CFD 해석을 통해 비교하였다. 해석 결과, 각 기능에서 효율성의 차이를 보였으며, 특히 Bathtub-Type과 Shower Booth-Type의 구조적 차이에 따라 성능이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 공간 난방 해석 결과에 따르면, Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델에 비해 평균 온도가 더 높게 유지되었다. 이는 Bathtub-Type 모델에서 공기 순환이 더 원활하게

이루어졌기 때문에 분석된다. 특히, Shower Booth-Type의 경우 유리문이 존재하여 특정 영역에서 온도 상승이 제한되었고, 이로 인해 욕실 전체의 온도 상승 효과가 감소한 것으로 나타났다. 직사드라이 해석 결과 또한 Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델에 비해 더 높은 평균 온도를 보였다. 이는 앞서 언급한 공간 난방과 마찬가지로, Shower Booth-Type의 유리문이 공기 순환을 방해하여 내부 온도가 상대적으로 낮아진 결과로 분석된다. 직사드라이 기능에서 Inlet과 Outlet 배치 및 크기는 온도 상승에 중요한 역할을 하였으며, Bathtub-Type 모델이 이러한 배치에 있어 더 유리한 결과를 나타낸 것으로 해석된다. 제습 해석 결과에서는 Bathtub-Type 모델이 Shower Booth-Type 모델보다 더 우수한 제습 효과를 보였다. 이는 Bathtub-Type 구조가 습도 조절에 있어 더 유리한 환경을 제공했기 때문에 분석된다. 특히, Bathtub-Type Case 1은 습도 제거 성능이 가장 우수하였으며, 이는 Inlet과 Outlet의 효율적인 배치가 제습 성능에 큰 영향을 미친 것으로 해석된다. 종합 평가 결과, 본 연구를 통해 스마트 욕실 시스템의 성능이 구조적 특성에 따라 크게 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다. Bathtub-Type 모델은 공간 난방, 직사드라이, 제습 기능 모두에서 Shower Booth-Type 모델보다 우수한 성능을 보였다. 특히, Bathtub-Type Case 1이 가장 높은 효율성을 나타냈다. 이는 스마트 욕실 시스템 설계 시 구조적 특성과 공기 흐름 경로의 중요성을 강조하며, 최적의 성능을 위해 사용자의 요구와 욕실 구조에 맞는 맞춤형 설계가 필요하다는 것을 시사한다.

3.2 한계점 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 수치적 해석(CFD 해석)을 통해 스마트 욕실 시스템의 성능을 평가하고 주요 설계 가이드라인을 제안하였다. 설계 단계에서 스마트 욕실 시스템의 각 기능들의 성능 평가를 위하여 비정상 상태 CFD 해석을 수행하였다. 다양한 경계 조건과 공기 유동 변화를 동적으로 반영하기 위해 시험적으로 재현하기 어렵고 복잡한 물리적 현상을 수치적으로 접근하였다. 다만, 실험적 검증은 본 연구 범위에서 제외되었으며 해석 결과의 신뢰성 확보하기 위해 기존 문헌과 유사한 수치적 설정과 신뢰할 수 있는 수치적 기법(CFD 해석, 경계 조건 적용 등)을 사용하였다. 다양한 모델과 초기 조건을 명확히 기술하였고, Mesh의 수치적 검증 절차를 통해 해석 결과의 정확성과 재현성을 보장하고자 하였다.

연구 범위의 제한으로 인해 물리적 실험을 통한 결과 검증이 수행되지 못한 점은 향후 연구에서 보완이 필요하다. 즉, 스마트 욕실 시스템의 Prototype 제작 및 물리적 실험 환경 구축을 통해 실제 실험 결과와 CFD 해석 결과를 비교 분석을 통하여 CFD 해석의 신뢰도를 높이고 다양한 스마트 욕실 환경에 대한 확장 적용을 수행할 예정이다. 또한, 폐쇄 환경이 아닌 개방 환경을 고려한 CFD 해석을 통해 스마트 욕실 시뮬레이션을 고도화해야 한다. 최종적으로 전체 시스템의 스마트 욕실 시스템의

에너지 소비량 평가 및 스마트 제어 기술과 결합된 운영 최적화 방안을 수립하여 제시한 시스템의 지속 가능성과 비용 효율성을 향상시키는 것이 필요하다. 이러한 후속 연구는 스마트 욕실 시스템 설계 및 성능 평가의 신뢰성을 높이고, 보다 현실적인 시스템 구현을 위한 실질적인 데이터를 제공할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2025-2026년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

REFERENCES

1. Park, N., Yoon, H., Kim, Y., (2009), A Study on the Types of a Smart Bathroom with a Smart-healthcare System, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 25(10), 3-10.
2. Lee, Y., Min, J., Ahn, N., Lee, J., Kim, H., (2020), Analysis of hygrothermal environment according to the usage pattern of the apartment house, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction (JAIK), 40(2), 374-375.
3. Kwag, B., Kim, T., Kim, G., Ji, W., Park, K., (2021), The Effects of Ventilation Strategies on Indoor Humidity Control in Multi-Family Residential Buildings in South Korea, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 15(5), 572-585.
4. Kim, O., Lee, S., Yang, J., (2012), A Study on the bathroom ventilation efficiency in residence building, Proceedings of the Annual Conference of AIK, 32(2), 295-296.
5. Kim, M., Kim, C., Kim, H., Min, B., Jeong, H., Ryu, J., Moon, S., (2019), Implementation of a convenient bathroom service system using a smartphone and a micro-controller, Proceedings of the KIIT Conference, (4), 291 – 294.
6. Kim, O., Lee, S., (2013), A study on the ventilation performance according to changing partition shape in bathroom, Proceedings of the Annual Conference of AIK, 33(2), 333-334.
7. Kim, J., Ahn, J., (2021), Dynamic simulation of system performance and indoor thermal environment under hybrid desiccant cooling according to outdoor conditions using TRNSYS, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, 45(5), 271-280.
8. Yoo, D., Paik, J., (2020), An evaluation of wall functions for RANS computation of turbulent flows, Journal of Korea Water Resources Association, 53(1), 1-13.
9. Kim, S., Nam, L., Seo, H., Choi, Y., (2001), Study on outlet flow characteristics for the outlet compartment shape of packaged air conditioner, Proceedings of the SAREK Conference, (2), 981-985.

10. Kong, T., Bae, K., Yi, C., Chung, H., Jeong, H., (2000), A study on the effect of room ventilation of natural convection into air conditioner duct, Proceedings of the SAREK Conference, (3), 1247-1252.
11. Lee, H., Kim, J., Lee, D., (2019), Humicon, A high-efficiency dehumidification air conditioning and ventilation system for a comfortable indoor environment, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 48(3), 16-26.

**Hyun Soo Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is CFD simulation and evaluate electric vehicle battery performance.

E-mail: hyun0702@pusan.ac.kr

**Jung Su Kim**

Professor in the Department of IT Mechanical Engineering, Daejin University. His research interest is welding, structural design.

E-mail: ipjskim@daejin.ac.kr

**Ji Hoon Kim**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is computational analysis of molding processes, multiscale microstructure-based modeling, flexible material modeling.

E-mail: kimjh@pusan.ac.kr

**Sung Wook Kang**

Professor in the Department of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon National University. His research interest is finite element analysis, weld simulation, structural/vibration/thermal analysis, structural optimization.

E-mail: swkang@changwon.ac.kr

소형 재밍 그리퍼의 설계에 관한 연구

Study on the Design of a Small-Scale Soft Jamming Gripper

윤진곤¹, 금재영¹, 이창기¹, 윤동원¹,#

Jingon Yoon¹, Jaeyeong Keum¹, Changgi Lee¹, and Dongwon Yun¹,#

¹ 대구경북과학기술원 로봇 및 기계전자공학과 (Department of Robotics and Mechatronics Engineering, Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology)
Corresponding Author / E-mail: mech@dgist.ac.kr, TEL: +82-53-785-6219
ORCID: 0000-0003-2254-5274

KEYWORDS: Soft Gripper (소프트 그리퍼), Jamming gripper (재밍 그리퍼), Membrane morphology (막 형태), Membrane thickness (막 두께), Membrane material (막 재료)

In soft robotics, gripper technology based on granular jamming offers the capability to adapt flexibly to objects of diverse shapes and material properties. Specifically, small-scale jamming grippers can address tasks challenging for conventional grippers either by enhancing gripping performance or by extending functionality when combined with rigid grippers. This study investigated effects of membrane morphology, thickness, and material on performances of small-scale jamming grippers to identify optimal design parameters. Experiments were conducted with three membrane morphologies, two thickness levels, and two material types. Results indicated that a concentric-pocket membrane morphology, a membrane thickness of 1.5 mm, and a soft material such as Dragon Skin 10 achieved a superior holding force of 430.7 gf. These findings indicate that softer materials can improve the membrane's ability to conform to objects, while increasing thickness can minimize deformation due to tensile forces, thereby enhancing gripping stability. Furthermore, experiments demonstrated that this configuration could enable the gripper to safely grasp objects of various shapes and perform additional tasks, such as rotating valves and handles, with effectiveness.

Manuscript received: November 15, 2024 / Revised: December 27, 2024 / Accepted: February 5, 2025

NOMENCLATURE

D [mm] = Diameter of the Jamming Gripper Membrane
H [mm] = Height of the Jamming Gripper Membrane
t [mm] = Thickness of the Jamming Gripper Membrane

1. 서론

소프트 로봇 분야에서 입자 재밍(Granular Jamming)을 이용한 그리퍼 기술은 대상 물체의 다양한 형상과 물성에 유연하게 적용할 수 있는 장점을 지니며, 이를 통해 로봇 공학의 적용 범위를 넓히는 유망한 기술로 각광받고 있다. 공압을 사용하는 다른 소프트 그리퍼와 달리[1,2], 입자 재밍 기술은 탄성 막 내부에 입자를 채운 후 진공 압력을 가하여 입자 간의 상호 잠금

상태를 이용하여 물체를 잡거나 강성을 변화시키는 기술이다[3-6]. 이 기술은 특정 형태의 물체에 구애받지 않고 안정적인 성능을 발휘할 수 있는 장점이 있어, 바다 환경에서 수집을 위한 그리퍼[6,7] 혹은 로봇의 발바닥 패드와 같이 다양한 분야에 적용이 가능하다[8]. 특히 그리퍼 분야에서 기존 강체 손가락 기반 그리퍼가 하기 힘든 문 잠금 장치를 돌리거나 작은 비정형 물체를 잡을 수 있으며[9] 강체 그리퍼의 손바닥에 장착되어 마찰을 올려 성능을 높이는 소형 재밍 관련 연구도 진행되고 있다[10,11].

지금까지 입자의 크기와 모양, 막의 재질 및 형상 같은 설계 요소들이 그리퍼 성능에 미치는 영향을 분석한 연구들이 진행되어 왔으며, 이를 통해 다양한 입자 및 막 사이즈를 결정하고 그리퍼를 구현하는 연구가 보고되었다[12-16]. 예를 들어, Brown 등은 입자 크기와 그리퍼의 크기 및 막 높이에 대해 재밍 과정에서 그리핑 성능에 미치는 영향을 연구하고 종합적인 성능을 평가하였다[17]. 그러나 성능에 영향을 미치는 중요한

요소 중 하나인 막의 형상(Membrane Morphology)에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다[18,19]. 다양한 막 형상에 대한 연구는 진행되고 있으나 막에 대한 재료, 두께와 같은 파라미터를 바꾸어 성능에 미치는 영향에 대한 분석이 이루어지지 않고 있다[18-20].

본 연구는 강체 그리퍼에 장착이 가능한 소형 재밍 그리퍼의 성능을 극대화하기 위해 막의 형태, 두께, 재료와 같은 다양한 변수들이 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 이를 통해 소형 재밍 그리퍼의 성능 향상을 위한 각 설계변수가 성능에 미치는 영향을 확인하고, 다양한 그리핑 환경에서 높은 수준의 성능을 발휘할 수 있는 설계 근거를 확인하고자 한다.

2. 소형 재밍 그리퍼의 형상 및 파라미터

소형 재밍 그리퍼의 막 형상은 3가지 종류로 설계하였다. Fig. 1은 세 가지 막의 형상 및 단면을 나타내었다. Fig. 1(a)는 반구 형상으로, 기존 구형 재밍 그리퍼에서 소형화를 위해 재밍 막을 지지하던 깔대기 형태의 구조물[3,4]을 삭제하고 원기둥과 반구를 합쳐 설계하였다. 다른 두 가지 막 형상은 Howard 등의 논문에서 진화 알고리즘을 통해 물체를 잡는 힘인 유지력을 높이는 특징을 가진 형상을 제시하였고, 이를 기반으로 설계하였다[19]. 제시된 형상은 재밍 그리퍼의 세 가지 작동 메커니즘을 기반으로 다음과 같은 특징을 가진다. 첫번째, 정적 마찰로 인한 유지력(Holding Force)을 높이기 위해 표면 접촉 면적을 최대화하는 구의 곡선에 근접하는 곡선을 가진다. 두번째, 그리퍼가 물체 위에서 누를 때 그리퍼 막 형상의 아랫부분이 물체를 감싸는 것으로 상호 잠금이 일어나 잡는 힘이 발생한다. 세번째, 물체에 대한 진공 흡입 성능을 높이기 위해 그리퍼의 중앙에 포켓 구조로 나타난다. 이러한 특징이 반영된 형상을 Figs. 1(b) 및 1(c) 형상에 나타내었다. Figs. 1(c) 형상은 1(b) 형상과 다르게 동심원 모양의 패턴을 추가하였다. 이 세 가지 형상은 기존 구형 형상과 포켓이 있는 변형된 형상에 대한 성능을 비교하였으며 표면에 마찰을 높이기 위한 동심원 패턴이 있을 때와 없을 때 재밍 그리퍼의 성능을 비교하기 위해 선정하였다.

Fig. 1에서 D, H, t는 각각 재밍 막의 지름, 높이, 두께이다. 세 가지 형상의 막 지름 및 높이는 성능 비교를 위해 동일하게 설계하였다. 크기는 높이가 42, 지름이 28.5 mm 설계하여 작은 크기로 디자인하였다. 재밍 막이 두께와 재료에 대해서 받는 영향을 알아보기 위해 3가지 형상에 대해 두께가 1, 1.5 mm, 막 재료가 서로 다른 2가지 실리콘으로 구성하여 총 12개의 경우에 대해 재밍 그리퍼의 성능을 비교하였다. 이때 막 재료는 기존 재밍 막 제작에 많이 사용하는 실리콘[21] 중 Dragon Skin 10 Medium과 Dragon Skin 20으로 특성은 Table 1과 같다. Dragon Skin 10 Medium은 Dragon Skin 20 비해 표면 경도와 강성이 낮아 더 부드러운 특징을 가진다. 형상, 두께 및 재료가 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 12개의 재밍 그리퍼를 제작하고 재밍 그리퍼의 물체를 들어 올리고 유지하는 힘을 측정하여 성능비교를 4장에서 진행하였다.

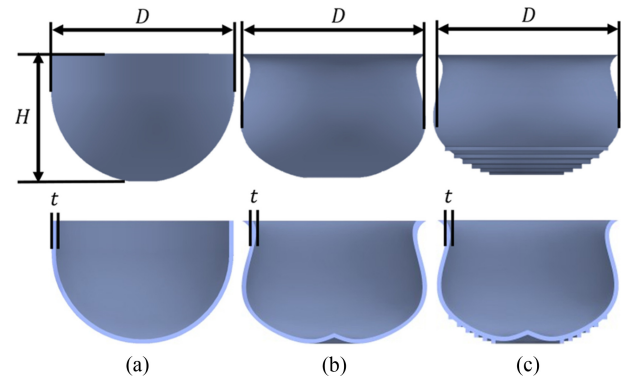


Fig. 1 Membrane morphology of jamming gripper and cross section: (a) Hemisphere shape, (b) Pocket shape, and (c) Pocket shape with concentric ring pattern

Table 1 Properties of dragon skin 10 medium and dragon skin 20

	Dragon skin 10	Dragon skin 20
Shore hardness [A]	10	20
Cure Time (Hours)	5	5
Elongation at Break [%]	1,000	980
Tear strength [pli]	102.5	119
Tensile strength [psi]	525	575

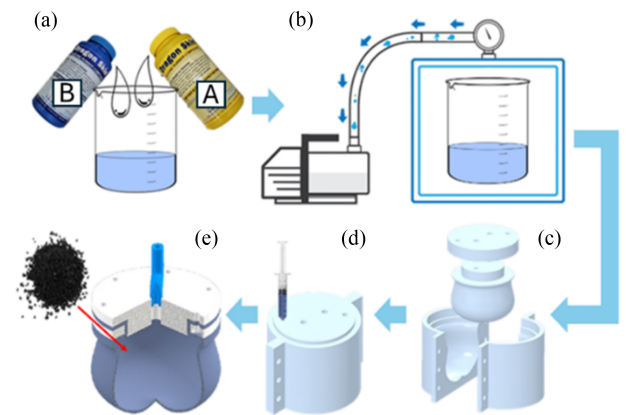


Fig. 2 The fabrication process of the jamming gripper

3. 소형 재밍 그리퍼 제작

Fig. 2는 재밍 그리퍼의 제작과정을 나타낸 그림이다. 먼저, 실리콘 주재(A)와 경화제(B)를 중량비로 1 : 1로 섞어준다(Fig. 2(a)). 다음으로 섞은 실리콘 안의 공기 방울을 10분 동안 진공 탈포를 진행하여 제거한다(Fig. 2(b)). 재밍 그리퍼의 막을 성형하기 위해 3D 프린터(Bambu Lab X1C, Bambu Lab, China)를 이용하여 PLA 재질의 금형을 제작하였다(Fig. 2(c)). 3D 프린팅한 금형을 조립한 후 주입구를 통해 탈포한 실리콘을 주입한다. 이때 실리콘의 주입은 주사기로 천천히 압력을 가하며 유출구에 실리콘이 나올 때까지 진행하였다(Fig. 2(d)). 이후 5시간 동안 실온에서 실리콘을 경화한다. 완전히 경화된 실리콘을 앞서

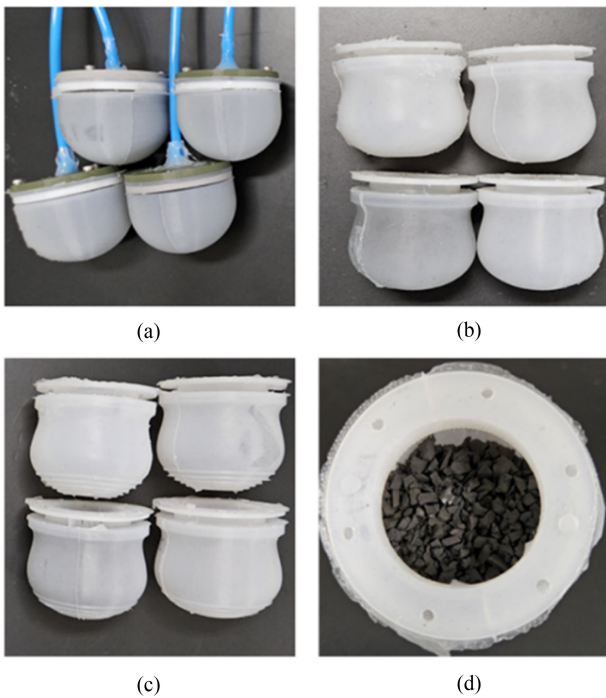


Fig. 3 Fabricated jamming gripper membrane and rubber granular: (a) Jamming gripper of a hemisphere shape, (b) Jamming gripper with small pocket shape, (c) Jamming gripper with small pocket shape and concentric ring pattern, (d) Rubber granular for jamming gripper

제작한 금형에서 분리하고 실리콘 막 내부 공간에 재밍을 위한 입자인 고무 조각을 채워 넣고 3D 프린터로 제작된 부품과 조립하여 재밍 그리퍼를 제작한다(Fig. 2(e)). 3D 프린터로 제작된 부품은 실리콘 막 안의 고무입자가 빠져나가지 않게 하고 진공을 가할 때 밀봉상태를 유지하기 위해 제작된 부품이다. 재밍 그리퍼에서 공기를 빨 때 사용하기 위해 우레탄 튜브를 3D 프린팅 부품과 연결하고 실리콘 접착제인 Sil Poxy (Smooth-On, Inc., USA)로 밀봉하였다. Fig. 3은 실제로 제작된 재밍 그리퍼 및 실리콘 막과 재밍 그리퍼를 채운 고무 입자를 보여준다.

4. 파라미터에 대한 재밍 그리퍼의 유지력 실험 및 결과

재밍 그리퍼의 3가지 파라미터에 따른 성능 비교를 위해 소형 공압 시스템 및 물체를 들어 올리고 유지하는 힘을 측정하는 실험을 세팅하였다. Fig. 4는 재밍 그리퍼의 회로 구성 및 공압 라인에 대한 개략도를 나타내었다. 소형 공압 시스템을 구성하기 위해 크기가 지름 27, 길이 58 mm인 공압 모터 펌프(DAP-2758, Motorbank, South Korea)와 소형 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 공압 모터 펌프는 최소 압력 -52 kPa이며 유량은 3.2 L/min의 성능을 가진다. 공압 모터 펌프와 솔레노이드 밸브는 같은 푸시 버튼에 연결되며 푸시 버튼을 누르면 펌프와 밸브에 동시에

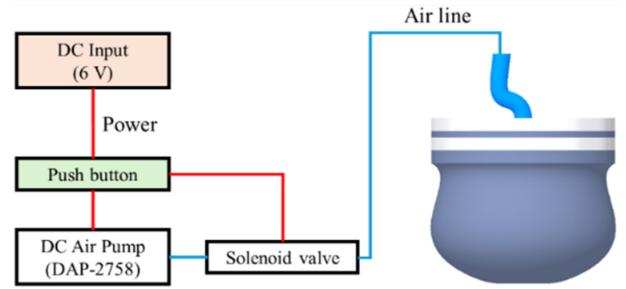


Fig. 4 Circuit and pneumatic line diagram of jamming gripper

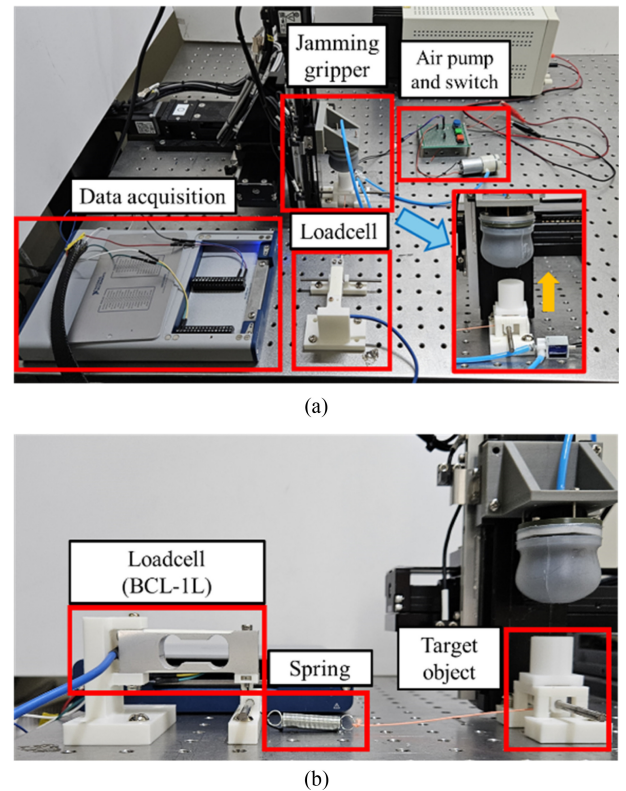


Fig. 5 Experimental setup for measuring holding force of the jamming gripper: (a) Overall experimental setup configuration, and (b) Close-up of the connection between the load cell and the target object

6 V 전원이 공급되는 회로를 가진다. 솔레노이드 밸브는 3 방향 밸브로 재밍 그리퍼와 대기가 평상시 열림 상태이며 재밍 그리퍼와 공압 모터 펌프가 평상시 닫힘 상태로 연결되어 있다. 따라서 전원이 소형 솔레노이드 밸브에 가해지면 밸브가 열리면서 재밍 그리퍼와 공압 모터 펌프가 연결되고 재밍 그리퍼 내부가 음압 상태가 된다. 전원을 끊으면 소형 솔레노이드 밸브가 닫히고 재밍 그리퍼와 대기가 연결되면서 재밍 그리퍼 내부가 대기압 상태가 된다. 이로써 사용자가 재밍 그리퍼의 물체를 잡고 놓는 상태를 제어할 수 있다.

Fig. 5는 재밍 그리퍼가 물체를 들어 올리고 유지하는 힘, 유지력을 측정하는 실험에 대한 세팅이다. 목표 물체(Target Object)를

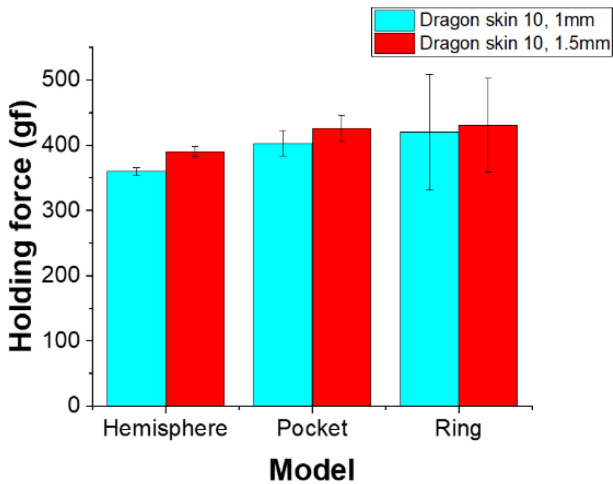


Fig. 6 Comparison of holding force for different jamming membrane thickness

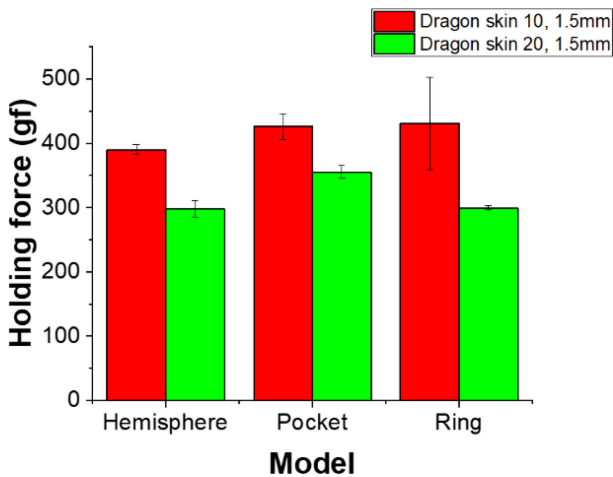


Fig. 7 Comparison of holding force for different jamming membrane material

재밍 그리퍼가 당기면 목표 물체에 연결된 와이어가 도르래를 따라 힘의 방향이 바뀐 후 로드셀(BCL-1L, CAS, South Korea)을 당겨 힘을 측정한다. Fig. 5(b)에서 로드셀과 목표 물체 사이의 와이어에 스프링을 추가하였다. 3축 스테이지에 고정된 재밍 그리퍼가 목표 물체를 잡고 움직이는 동안 스프링이 늘어나 유지력을 천천히 측정할 수 있도록 하여 최고 유지력을 측정하기 쉽게 하였다. 로드셀 데이터는 DAQ (USB-6341, National Instruments Corp., USA)를 통해 컴퓨터로 전송하며 Matlab R2021 (MathWorks, USA)로 데이터를 분석하였다. 위 방법으로 막의 형상, 두께, 재료가 따라 최고 유지력을 5번 반복 측정하고 평균 및 표준 오차를 구하였다.

Fig. 6은 재밍 그리퍼의 막 두께에 따라 비교한 그래프이다. 각 형상 내에서 두께 조건을 제외하고 재료가 Dragon Skin 10일 때 가장 좋은 성능을 보여 이 조건에서 비교하였다. 3가지 형상에서 두께가 1.5 mm일 때 공통적으로 유지력이 더 크게 나왔다. 이때 두께가 1.5와 1 mm 일 때 유지력 차이는 각각 30.1,

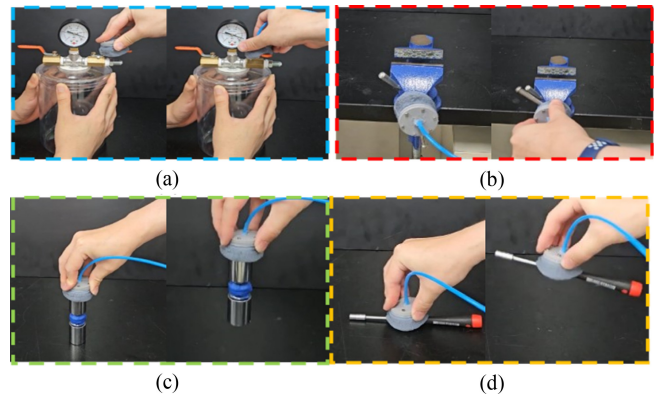


Fig. 8 Various object grasping experiments using jamming gripper: (a) Ball valve, (b) Vise handle, (c) Weight of 400 g, and (d) Socket driver

23.2, 10.1 gf로 2.5-8.4%의 성능차이가 났다. 또한 두께가 1.5 mm 일 때에 형상이 성능에 미치는 영향에 대해 비교하였다. 각각 반구형, 포켓형, 동심원 패턴형에서 유지력은 389.7 ± 8 , 425.9 ± 20 , 430.7 ± 71 gf로 동심원 패턴형이 가장 높게 나왔다.

Fig. 7은 재밍 그리퍼의 재료에 따라 비교한 그래프이다. 각 형상 내에서 같은 재료에서 1.5 mm 두께를 가지는 조건일 때에 대해 비교하였다. 모든 형상에서 부드러운 재료인 Dragon Skin 10일 때 더 큰 유지력을 보였다. 이때 Dragon Skin 10와 Dragon Skin 20일 때 유지력 차이는 형상에 대해 각각 92, 70.8, 131.3 gf로 20-43.9%의 성능차이를 보였다.

이 실험을 통해 재밍 그리퍼의 형상은 포켓 모양에 동심원 패턴이 있는 경우가 가장 높은 성능을 가지는 것을 확인하였다. 이는 반구형상에 비해 포켓 형상이 물체를 감싸기 쉽고, 포켓을 형성하여 물체에 대한 흡입 성능이 더 높기 나타난 것으로 보인다. 또한 동심원 패턴이 있어 물체가 재밍 막 표면에서 미끄러지는 것을 방지하여 유지력을 높였다. 재밍 막의 두께는 1보다 1.5 mm에서 더 높은 성능을 보였다. 막의 재료는 Dragon Skin 10일 때가 Dragon Skin 20일 때보다 큰 힘을 가진다. 막의 재료는 부드러우면 물체를 감싸기 쉽기 때문에 재밍 그리퍼가 물체를 잘 잡는 것으로 보인다. 막의 두께가 두꺼워지면 막의 인장으로 인한 변형이 적어져 잡고 올리는 동안 상호 잠금 상태가 유지하기 쉬워져 성능이 향상되는 것으로 보인다.

재밍 그리퍼는 다양한 형상과 크기의 물체를 안정적으로 잡을 수 있다. 이 연구에서 제시한 재밍 그리퍼가 목표 물체뿐만 아니라 다양한 물체 및 작업에 사용할 수 있음을 확인하기 위해 Fig. 8과 같이 실험을 진행하였다. 포켓형 재밍 그리퍼를 사용하여 Figs. 8(a) 및 8(b)와 같이 좁고 작은 밸브 혹은 핸들을 잡을 수 있으며 이를 돌릴 수 있음을 확인하였다. Figs. 8(c) 및 8(d)와 같이 400 g의 추를 들어 올릴 수 있으며 박스 드라이버와 같은 도구도 쉽게 들어올릴 수 있음을 확인하였다. 따라서 제시한 재밍 그리퍼는 다양한 형상의 물체를 잡고 작업을 수행할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

소프트 로봇 분야에서 입자 재밍을 이용한 그리퍼 기술은 대상 물체의 다양한 형상과 물성에 유연하게 적응할 수 있는 장점이 있다. 특히 소형 재밍 그리퍼는 단독 혹은 강체 그리퍼와 같이 사용함으로써 기존 그리퍼가 하기 힘든 작업을 수행하거나 그리핑 성능을 향상시킬 수 있다.

소형 재밍 그리퍼의 성능 향상을 위해 설계 파라메터가 성능에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 하지만 그리핑 성능에 영향을 미치는 중요한 요소인 막 형태에 대해 두께 및 재료를 변경에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서 여러 재밍 그리퍼의 막 형태에 대해 두께 및 재료가 미치는 영향에 대해 실험적으로 확인하였다.

3가지 막 형상, 2가지 두께, 2가지 재료에 대해 실험한 결과, 동심원 패턴이 있는 포켓 형상, 두께 1.5 mm로 비교적 두꺼울 때, 재료가 Dragon Skin 10으로 비교적 부드러울 때 성능이 좋은 것으로 나타났다. 이는 막의 재료가 부드러우면 물체를 감싸기 쉽기 때문에 물체를 잘 잡으며, 막의 두께가 두꺼워지면 막의 인장으로 인한 변형이 적어져 안정적으로 잡을 수 있어 향상되는 것으로 보인다. 또한 다양한 형상의 물체도 안정적으로 잡고 벨브 혹은 핸들 또한 돌릴 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

향후 제시된 막에 대한 설계 파라메터 이외에도 입자에 관련된 조건도 같이 고려하여 재밍 그리퍼의 성능을 최적화할 것이다. 또한 하이브리드 그리퍼를 구성하여 작은 크기에도 다양한 작업을 할 수 있는 그리퍼를 제작할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Technology Innovation Program (No. 20018110, “Development of a wireless teleoperable relief robot for detecting searching and responding in narrow space”) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

REFERENCES

1. Yoon, J., Yang, J., Yun, D., (2024), A two-chamber soft actuator with an expansion limit line for force enhancement, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(5), 4567-4574.
2. Batsuren, K., Yun, D., (2019), Soft robotic gripper with chambered fingers for performing in-hand manipulation, *Applied Sciences*, 9(15), 2967.
3. Amend, J. R., Brown, E., Rodenberg, N., Jaeger, H. M., Lipson, H., (2012), A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material, *IEEE Transactions on Robotics*, 28(2), 341-350.

4. Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M. R., Lipson, H., & Jaeger, H. M., (2010), Universal robotic gripper based on the jamming of granular material, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(44), 18809-18814.
5. Li, Y., Chen, Y., Yang, Y., Wei, Y., (2017), Passive particle jamming and its stiffening of soft robotic grippers, *IEEE Transactions on Robotics*, 33(2), 446-455.
6. Joseph, T., Baldwin, S., Guan, L., Brett, J., Howard, D., (2023), The jamming donut: a free-space gripper based on granular jamming, *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 1-6.
7. Licht, S., Collins, E., Mendes, M. L., Baxter, C., (2017), Stronger at depth: Jamming grippers as deep sea sampling tools, *Soft Robotics*, 4(4), 305-316.
8. Capalbo, C. E., Tomaino, D., Bruno, F., Rizzo, D., Phillips, B., Licht, S., (2022), A soft robotic gripper with neutrally buoyant jamming pads for gentle yet secure grasping of underwater objects, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 47(4), 975-983.
9. Hauser, S., Eckert, P., Tuleu, A., Ijspeert, A., (2016), Friction and damping of a compliant foot based on granular jamming for legged robots, *Proceedings of the 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, 1160-1165.
10. Kim, D., Choi, S., Song, B., Song, J., Yoon, J., Yun, D., (2024), GripFlexer: Development of hybrid gripper with a novel shape that can perform in narrow spaces, *Proceedings of the 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.
11. Lee, J., Kim, J., Park, S., Hwang, D., Yang, S., (2021), Soft robotic palm with tunable stiffness using dual-layered particle jamming mechanism, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26(4), 1820-1827.
12. Howard, D., O'Connor, J., Brett, J., Delaney, G. W., (2021), Shape, size, and fabrication effects in 3d printed granular jamming grippers, *Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 458-464.
13. Miettinen, J., Frilund, P., Vuorinen, I., Kuosmanen, P., Kiviluoma, P., (2019), Granular jamming based robotic gripper for heavy objects, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 68(4), 421.
14. Jiang, A., Ranzani, T., Gerboni, G., Lekstutyte, L., Althoefer, K., Dasgupta, P., Nanayakkara, T., (2014), Robotic granular jamming: Does the membrane matter?, *Soft Robotics*, 1(3), 192-201.
15. Nishida, T., Shigehisa, D., Kawashima, N., Tadakuma, K., (2014), Development of universal jamming gripper with a force feedback mechanism, *Proceedings of the 2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, 242-246.

16. Amend, J., Cheng, N., Fakhouri, S., Culley, B., (2016), Soft robotics commercialization: Jamming grippers from research to product, *Soft Robotics*, 3(4), 213-222.
17. Howard, D., O'Connor, J., Letchford, J., Joseph, T., Lin, S., Baldwin, S., & Delaney, G., (2023), A comprehensive dataset of grains for granular jamming in soft robotics: Grip strength and shock absorption, *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 1-8.
18. Shahsevani, R., Reitelshofer, S., Alimardani, R., Franke, J. (2019), Soft jamming gripper with the external prominence of membrane for human-robot cooperation, *Proceedings of the 2019 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, 377-383.
19. Howard, D., O'Connor, J., Letchford, J., Brett, J., Joseph, T., Lin, S., Furby, D., Delaney, G. W., (2022), Getting a grip: in materio evolution of membrane morphology for soft robotic jamming grippers, *Proceedings of the IEEE International Conference on Soft Robotics*, 4, 531-538.
20. Fujita, M., Tadakuma, K., Komatsu, H., Takane, E., Nomura, A., Ichimura, T., Konyo, M., Tadokoro, S., (2018), Jamming layered membrane gripper mechanism for grasping differently shaped-objects without excessive pushing force for search and rescue missions, *Advanced Robotics*, 32(11), 590-604.
21. Fitzgerald, S. G., Delaney, G. W., Howard, D., (2020), A review of jamming actuation in soft robotics, *Actuators*, 9(4), 104.



Jigong Yoon

B.S. degree in mechanical engineering from Pusan National University, Busan, South Korea, in 2017, and a M.S. degree in control automation system from Pusan National University, Busan, South Korea, in 2019. He is currently working toward a PhD in robotics engineering with the Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Daegu, South Korea. His research interests include soft robotics and soft grippers.
E-mail: y1k1000@dgist.ac.kr



Jaeyeong Keum

B.S. degree in mechatronics engineering from Korea University of Technology & Education (KOREATECH), Cheonan, South Korea, in 2022. He is currently pursuing an integrated M.S. & Ph.D. course in robotics engineering at the Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Daegu, South Korea. His research interests include mobile manipulators.
E-mail: jykeum@dgist.ac.kr



Changgi Lee

B.S. degree in school of undergraduate studies from Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Daegu, South Korea in 2022. He is currently pushing an integrated M.S. & Ph.D. course in robotics engineering with DGIST. His research interests include mobile robots.
E-mail: dlckdr199@dgist.ac.kr



Dongwon Yun

B.S. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University, South Korea, in 2002, an M.S. degree in Mechatronics Engineering in 2004 from GIST, South Korea, and a Ph.D. degree in Mechanical Engineering from KAIST, South Korea, in 2013, respectively. He was a Senior Researcher for Korea Institute of Machinery and Materials from 2005 to 2016. He joined the Department of Robotics and Mechatronics Engineering, DGIST in 2016. He is a Professor in the department and his research interests include biomimetic robot system, industrial robot system & mechatronics, soft robotics, and sensors & actuators.
E-mail: mech@dgist.ac.kr

제조 환경에서 회귀 분석 기반의 공구 수명 예측 모델 개발

Development of a Regression-Based Tool Life Prediction Model in Manufacturing Environments

김현철^{1,2,#}
Hyun Chul Kim^{1,2,#}

¹ 국립공주대학교 미래자동차공학과 (Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University)
² 국립공주대학교 수소에너지인력양성사업단 (Hydrogen Energy Human Resources Development Group, Kongju National University)
Corresponding Author / E-mail: khc@kongju.ac.kr, TEL: +82-41-521-9273
ORCID: 0000-0003-4634-4522

KEYWORDS: Tool life (공구 수명), Regression (회귀), Machining conditions (가공 조건), Tool wear (공구 마모)

This study aimed to develop a regression-based model for predicting tool life in manufacturing environments, with goals of enhancing productivity and reducing costs. In machining operations, particularly roughing processes, high cutting forces can accelerate tool wear, often leading to process interruptions and increased defect rates. Previous research on tool life prediction has frequently relied on empirical models and statistical methods, which face limitations in reliability across diverse machining conditions. To address this issue, we proposed a data-driven approach that collects tool wear data under varying machining conditions (such as cutting speed, feed rate, and depth of cut) and applied regression models to predict tool life effectively. The model's performance was validated under multiple conditions to assess its predictive accuracy. This study offers a practical tool life management solution for manufacturing settings, optimizing tool usage and enhancing operational efficiency.

Manuscript received: November 12, 2024 / Revised: December 27, 2024 / Accepted: January 4, 2025

1. 서론

절삭가공에서 공구 수명 예측은 제조업의 생산성, 품질, 비용 절감과 직결되는 중요한 연구 주제이다. 현대 제조 환경에서는 고속 가공, 자동화 시스템, 다양한 소재의 등장으로 공구의 마모와 이에 따른 교체 주기가 매우 중요한 요소로 작용하고 있다. 공구가 마모되면 가공 정확도가 저하되고, 제품의 표면 거칠기나 치수 정밀도가 떨어져 불량 발생 가능성이 높아진다. 이는 가공 시간과 비용을 증가시키는 요인이며, 불필요한 공구 교체는 생산성 저하로 이어질 수 있다[1].

특히 황삭가공은 많은 양의 재료를 짧은 시간에 제거하기 위해 높은 소재제거율을 사용하는 공정으로 과도한 절삭력에 의한 공구의 마모가 심하고, 공구 파손이 빈번하게 일어난다[2]. 황삭가공 중 공구가 마모되거나 파손될 경우 작업 중단이 발생하여

생산 공정의 흐름이 끊기고, 이는 생산 비용의 증가와 납기 지연으로 이어질 수 있다. 더욱이, 황삭가공은 일반적으로 절삭력의 변화폭이 커 공구가 갑작스럽게 파손되면서 안전 문제까지 발생할 수 있다. 이러한 이유로 공구 수명을 예측하고 관리하는 것은 황삭가공에서 특히 중요하다.

공구 수명 예측에 대한 기존 연구들은 다양한 방식으로 접근하여, 공구 수명을 연장하고 가공 효율을 높이는데 기여해 왔다. 이들 연구는 주로 공구 마모 예측, 수명 추정, 그리고 가공 조건에 따른 공구 성능 평가에 중점을 두고 있고, 이를 위해 전통적인 테일러(Taylor) 공구 수명 방정식에 기반한 경험적 모델 기반 연구 및 공구 마모 데이터를 기반으로 한 통계적 방법이 주로 연구되어 왔으며, 최근에는 기계학습 및 딥러닝 알고리즘을 적용하여 공구 수명을 예측하려는 시도가 많아지고 있다[3-9]. 이와 함께 학습데이터 확보 및 실시간 모니터링을 위한 공구에 부착된

센서를 통해 온도, 진동, 힘 등의 데이터를 실시간으로 수집하고, 이를 바탕으로 공구 마모 상태를 즉시 평가하여 공구 수명을 예측하는 연구들이 활발히 진행되고 있다[10,11]. 이와 같이 기존 연구들은 경험적 모델, 통계적 방법, 머신러닝 알고리즘 등을 통해 공구 수명을 예측하는 다양한 접근법을 제시해왔다. 공구 수명은 플랭크 마모 등의 방법으로 측정되며, 임계치를 초과하면 한계 수명으로 정의되지만, 실제로 이러한 방식으로 공구 수명을 예측하기는 어렵다. 테일러의 실험적 공구 수명은 절삭 속도에 크게 의존하는 것으로 알려져 있지만, 다양한 가공 조건에 따른 공구 수명을 예측해야 신뢰성을 확보할 수 있다. 또한, 실제 현장에서는 가공 공정 중 모니터링 시스템을 통해 공구 마모를 정확하게 예측하고 공구를 교환하는 경우가 드물며, 대부분 작업자의 경험에 의존해 공구 교환이 이루어지고 있다.

머신러닝과 데이터 기반 분석이 공구 수명 예측의 새로운 돌파구로 주목받고 있으며, 이는 더 많은 데이터를 통해 더 정교하고 신뢰성 있는 모델로 발전할 수 있어 본 연구에서는 현장 데이터를 기반으로 회귀 모델을 이용한 머신러닝 기법을 활용하여 공구 수명 예측 방법을 제시하고 성능을 검증하였다. 이를 통해 제조 현장에서 적용 가능한 실질적인 솔루션을 제공하고, 공구 사용의 효율성을 높여 생산성을 향상시킬 수 있는 방안을 마련하였다.

2. 데이터 수집 및 인자 분석

2.1 데이터 수집

공구의 마모나 결손이 가공하는 제품의 품질에 직접 영향을 주는 것은 물론이다. 최근과 같이 가공의 자동화가 진전하고 또 생산성을 중시하는 상황에서는 공구 수명을 어떻게 적절히 판단하고 관리하는가가 중요한 문제가 된다.

일반적으로 현장에서 공구 수명을 판정하는 항목으로는 표면 조도, 마모, 절삭음, 버, 채터링, 진동, 불꽃 등이 사용되고 있다. 이론적인 ISO 추천기준인 마모량에 따른 수명 판정은 실제 현장에서 사용이 불가능하다. 공구 수명을 판정하는 검출 항목으로서 공구의 절손이나 결손을 자동적으로 판단하는 예는 아직 적지만 이것은 공구 절손과 같은 순간적인 현상에 대응할 수 있는 고신뢰성 시스템이 아직은 충분히 보급되지 않고 있기 때문이다. 이러한 수명 판정은 아직까지 눈, 귀로 판단하는 작업자의 직감력과 경험에 의존하는 방법이 여전히 강하다고 여겨진다.

공구 수명에 영향을 미치는 인자들은 가공 중 발생하는 다양한 물리적, 환경적 요인들로 구성되며, 이들은 공구의 마모와 손상 속도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 특히, 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이와 같이 작업자가 설정하는 직접적인 가공조건 및 공구, 소재 재질, 공구의 기하학적 형상 및 크기 등도 중요한 인자로 고려되어야 한다.

본 연구의 목표는 NC가공에 있어서 현장의 데이터를 축적해

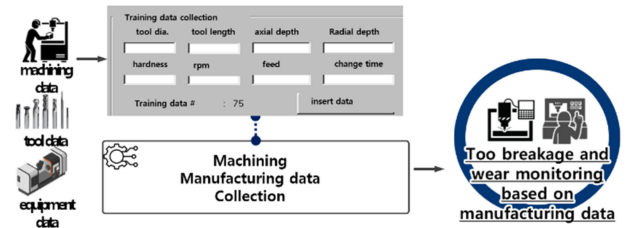


Fig. 1 Machining data collection

Table 1 Statistical description of learning data

	Tool diameter [mm]	Tool length [mm]	Axial depth [mm]	Radial depth [mm]	RPM [rpm]	Feedrate [mm/min]	Change time [min]
Count	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0
Mean	45.49	146.27	2.20	28.53	1197.06	1060.20	28.75
Std	7.23	77.061	0.60	3.19	251.12	238.76	18.36
Min	30.00	110.0	1.0	20.0	800.0	700.0	5.0
25%	40.00	110.0	2.0	30.0	1000.0	900.0	15.0
50%	50.0	110.0	2.0	30.0	1200.0	1000.0	23.0
75%	50.0	110.0	3.0	30.0	1500.0	1300.0	40.0
Max	50.0	350.0	3.0	30.0	1500.0	1500.0	85.0

이 데이터를 이용한 공구 수명을 예측하는 시스템을 개발하는 것이다. 기계가공에 있어서 가공환경은 범위가 너무 방대하기 때문에, 어느 정도 범위를 한정시킬 필요가 있다. 공구 수명이 특히 중요한 가공 공정 중 하나는 절삭량이 많은 황삭가공이며, 본 연구에서는 사출금형의 황삭가공을 대상으로 공구 수명 예측 문제를 다룬다. 사출금형 황삭가공 현장에서는 파삭재 및 공구 소재는 크게 바꾸지 않고, 제품의 형상 크기에 따라 공구의 치수를 변경하여 가공하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 KP4M 소재를 초경 공구로 가공하는 업체에서 황삭가공 공정 중 작업자가 조정 가능한 공구 수명에 직접적인 영향을 미치는 공구 직경, 공구 길이, 축 방향 깊이, 반경방향 깊이, 회전수, 이송 속도를 주요 인자로 설정하고 Fig. 1과 같이 현장에 DB를 구축하여 작업자가 입력한 데이터를 수집하였다. 공구 수명은 작업자가 현장에서 공구를 교환하는 시점을 공구 수명으로 정의하였으며, 현장 기반의 데이터를 총 113개 확보하였다.

2.2 데이터 상관관계 분석

수집된 데이터는 이상치를 제거하고 총 113개로 이 중 102개는 학습에 사용하고 11개는 검증을 위한 데이터로 구분하였으면, 학습 데이터의 통계적 기술량은 Table 1과 같다.

공구교환시간, 즉 공구 수명에 영향을 미치는 인자들의 상관관계 수는 Fig. 2와 같으며 이송속도와 회전수는 강한 양의 상관관계를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이송속도와 회전수는 식(1)과 같이 기술되며, 회전수가 증가할수록 동일한 이송량을 유지할 경우, 이송 속도도 비례적으로 증가하게 된다. 이러한 관계로 인해 이송

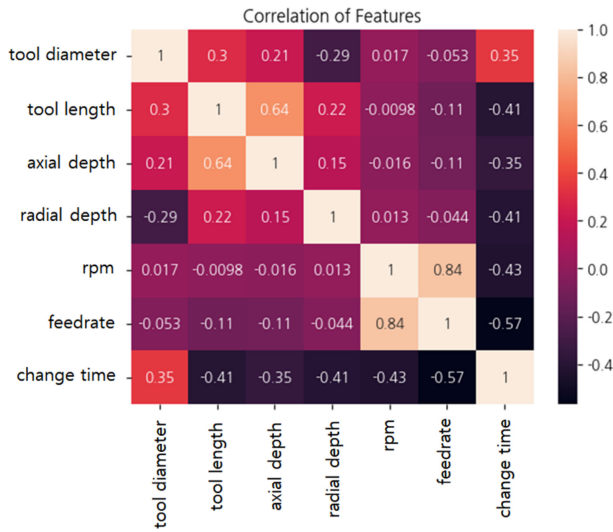


Fig. 2 Correlation between factors

속도와 회전수는 높은 상관관계를 가지게 되고 두 변수를 모두 회귀모델에 사용할 경우 공선성 문제를 피할 수 없게 된다.

$$\text{Feed (mm/min)} = \text{Feed per Revolution (mm/rev)} \times \text{Number of revolution (rev/min)} \quad (1)$$

식(2)의 분산 팽창 계수(Variance Inflation Factor, VIF)를 계산하여 공선성 문제를 진단하였을 때도 회전수와 이송속도는 각각 83, 70의 높은 값을 갖는다는 것을 확인하였다.

$$\text{VIF} = 1 / (1 - R^2) \quad (2)$$

(Where, R^2 : coefficient of determination)

3. 회귀 분석 및 모델 개발

현장 기반으로 확보한 공구 수명 데이터는 연속적인 값을 가지며, 이를 설명하는 가공 조건 변수들도 연속적인 수치형 데이터로 이루어져 있다. 회귀모델은 종속변수와 독립변수 간의 연속적인 관계를 학습하는 데 적합한 통계적 기법으로, 가공 조건과 공구 수명 간의 상관관계를 정량적으로 분석할 수 있는 방법으로 본 연구에서는 공구 수명 예측을 위해 회귀모델을 사용하였다. 회귀 모델의 정확도를 높이기 위해서는 변수들 간의 다중 공선성 문제를 해결하는 것이 중요하다. 공선성이 높을 경우, 변수들 간의 상관관계로 인해 회귀 계수의 추정치가 불안정해지고 모델의 예측 성능이 저하될 수 있다. 이를 해결하기 위해 상관계수, 분산 팽창 계수, 주성분 분석, 정규화 등 다양한 방법들이 제시되고 있지만, 아직까지 이 문제를 완벽히 해결할 수 있는 방법이 제시되고 있지 않다. 본 연구에서는 가공에 대한 이론적 배경 및 통계적 추정치 등을 이용하여 공구 수명에 영향을 미치는 독립적 인자들을 선정해 모델을 구성하고 모델 예측 성능을 높이는 방법을 제시하였다.

Table 2 Regression analysis results considering all factors

Dep. Variable	Change time	R-squared	0.852
Model	OLS	Adj. R-squared	0.842
Method	Least Squares	F-statistic	90.88
No. Observations	102	AIC	701.5
Df Residuals	95	BIC	719.9
	Coef	Std err	P> t
Const	89.6003	10.723	0.000
Tool diameter	1.0519	0.114	0.000
Tool length	-0.1058	0.013	0.000
Axial depth	-6.4502	1.583	0.000
Radial depth	-1.169	0.253	0.000
RPM	0.0202	0.005	0.000
Feedrate	-0.066	0.006	0.000

3.1 회귀 인자 분석

다중 공선성이 있는 모든 인자들을 고려하여 회귀 모델을 적합한 후의 결과는 Table 2와 같다. 결정계수(R-squared) 값이 0.852로 비교적 높은 모델의 예측 성능을 확인할 수 있고, 인자들의 p value가 매우 낮아 유의미한 계수로 추정이 되지만, 회전수와 이송속도의 회귀 계수가 물리적인 관점에서 타당하지 않을 것 확인할 수 있다. 두 변수는 강한 양의 상관관계를 갖고 있음에도 공구 수명에 회전수는 양의 방향으로 이송속도는 음의 방향으로 영향을 미치는 것으로 분석되어 모델의 예측 정확도를 신뢰하기 어렵다고 판단할 수 있다. 따라서 다중 공선성을 줄이고 예측 성능을 높이기 위한 회귀 모델을 구성하는 접근이 필요하다.

3.2 모델 선정

본 연구에서는 신뢰할 수 있는 모델을 구축하고자 인자들의 조합을 모두 고려하여 최적의 모델을 제안하였다. 공구 수명에 영향을 미치는 인자들의 모든 조합을 고려하여 회귀 모델을 적합하고 식(3)의 AIC (Akaike Information Criterion) 및 결정 계수 등을 고려하여 필요한 회귀 모델의 독립 변수를 선택하였다. AIC는 모델의 적합도(L)가 높아질수록 낮아지며, 모델의 복잡도(k)가 증가할수록 높아진다. 즉, AIC 값이 낮을수록 적합도는 높고 불필요한 변수가 적은, 더 간결한 모델이라는 것을 의미한다.

$$\text{AIC} = 2k - 2\ln(L) \quad (3)$$

(k: 모델에서 사용된 독립변수의 개수

L: 모델의 최대우도(Maximum Likelihood))

이를 통해 불필요한 변수를 제거하고, 가공 조건과 공구 수명 간의 관계를 가장 잘 설명하는 인자들만을 포함한 모델을 구축하고자 하였다.

Table 3 Optimal model according to number of factors

Number of factors	Total number of models ($6C_{\text{Number of factors}}$)	Optimal model's AIC	Optimal model's R-squared
1	6	846.374911	0.323
2	15	807.371033	0.547
3	20	737.66595	0.776
4	15	725.029324	0.806
5	6	713.717091	0.829
6	1	701.488	0.852

Table 4 Regression results excluding feed rate

Dep. Variable	Change time	R-squared	0.641
Model	OLS	Adj. R-squared	0.623
Method	Least squares	F-statistic	34.32
No. Observations	102	AIC	789.5
Df Residuals	95	BIC	805.3
	Coef	Std err	P> t
Const	64.3783	16.243	0.000
Tool diameter	1.1872	0.176	0.000
Tool length	-0.0970	0.020	0.000
Axial depth	-5.2698	2.444	0.034
Radial depth	-0.8871	0.390	0.025
RPM	-0.0322	0.004	0.000

Table 5 Regression results excluding spindle speed

Dep. Variable	Change time	R-squared	0.829
Model	OLS	Adj. R-squared	0.821
Method	Least squares	F-statistic	93.36
No. Observations	102	AIC	713.7
Df Residuals	96	BIC	729.5
	coef	std err	P> t
Const	89.1781	11.437	0.000
Tool diameter	1.0958	0.121	0.000
Tool length	-0.1037	0.014	0.000
Axial depth	-6.1713	1.687	0.000
Radial depth	-1.0786	0.269	0.000
Feedrate	-0.0479	0.003	0.000

Table 3은 인자들의 수에 따른 모든 모델들을 회귀 적합 시키고 고려한 인자수에서 AIC 및 R-squared의 결과를 보여준다. R² 값은 모델이 종속 변수의 변동성을 얼마나 설명할 수 있는지를 나타내는 지표로 값이 1에 가까울수록 모델의 설명력이 높다는 것을 의미한다. Table 3에서도 변수 수가 증가하면서 설명력이 높아져 AIC가 낮아 지는 것을 볼 수 있고, 4개 이상의 인자를 고려하면 R-squared 값이 0.8보다 높아져 충분한 설명력을

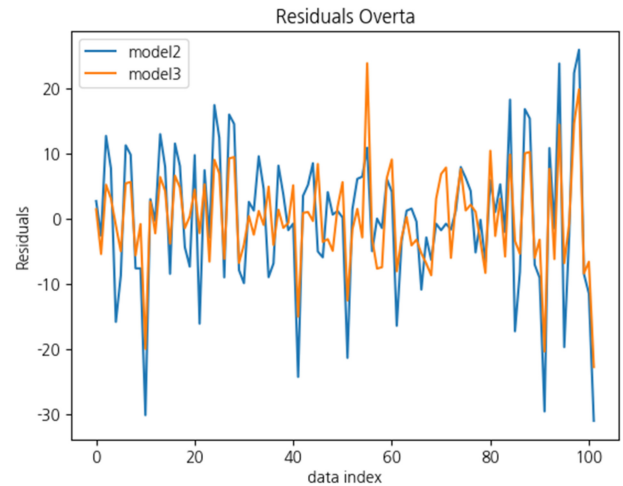


Fig. 3 Residuals of models 2 and 3

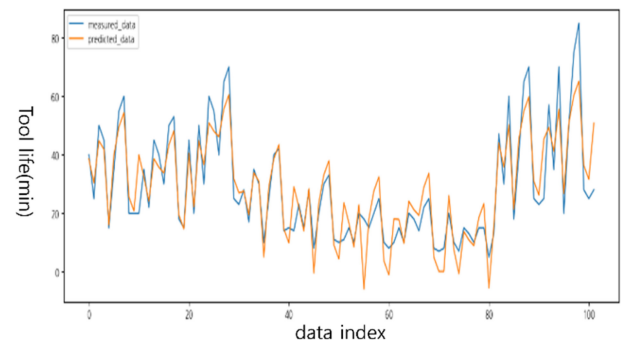


Fig. 4 Predicted values of model 3 vs. measured values

갖는 모델이라고 볼 수 있다. 단순 AIC, R-squared 값만을 가지고 평가하면 6개의 인자를 모두 고려한 모델(Model 1)이 최적의 모델로 평가할 수 있지만, 도메인 지식을 고려하면 앞에서 언급한 것처럼 공선성 문제로 모델의 설명력이 부족한 것으로 평가할 수 있다. 따라서 5개 인자를 고려한 모델 중 상호 상관계수가 높은 회전수와 이송 속도를 각각 제거한 모델을 평가하여 최적의 모델을 선정하였다. Tables 4와 5는 이송속도를 제외한 모델(Model 2)과 회전수를 제외한 모델(Model 3)의 회귀 적합 결과를 보여주며, 회전수에 비해 이송속도가 공구 수명을 예측하는데 중요한 변수라는 것을 보여준다.

4. 모델 검증

모든 인자를 고려한 모델은 통계적으로 높은 설명력을 보였으나, 도메인 지식에 기반하여 물리적 특성을 반영하지 못하는 한계가 있었다. 따라서 상관계수가 높은 변수 중 하나만 고려하여 모델을 선정하였다. 최적 모델의 예측 결과는 실제 값과의 잔차를 Fig. 3에 그래프로 표현하였으며, 회전수를 제외한 모델인 Model 3이 가장 낮은 잔차를 나타냈다. 또한, Fig. 4에 나타난 바와 같이 Model 3의 학습 데이터에 대한 예측값은 실제

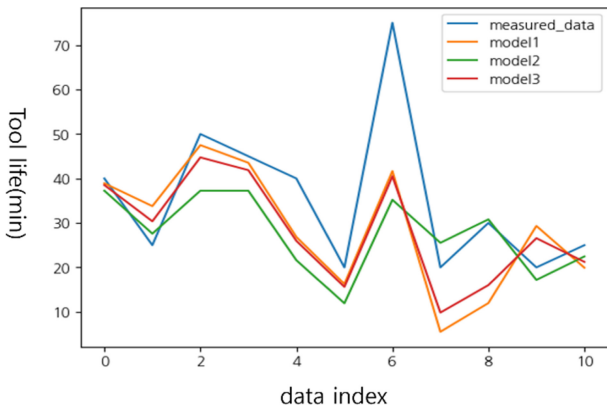


Fig. 5 Predicted values vs. measured values

Table 6 Model evaluation results

Index	MSE	RMSE	MAE	R2
Model 1	184.735	13.592	10.084	0.293
Model 2	206.285	14.363	9.434	0.210
Model 3	166.541	12.905	9.332	0.362

데이터와 높은 일치도를 보였다. 이는 현장 데이터를 기반으로 한 회귀 모델이 제조 공정에서 실질적으로 활용될 가능성을 보여준다.

선정한 모델이 다른 모델에 비해 최적인지 평가하기 위해 검증 데이터를 활용한 모델 평가를 수행하였다. 학습에 사용되지 않은 11개의 검증 데이터에 대해 실제값과 모델의 예측값을 비교한 결과, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 전체적으로 실제값을 잘 추종하는 경향을 보였다. 특히, Model 3은 평균제곱오차(MSE) 166.541, 평균절대오차(MAE) 9.3%로 가장 낮은 값을 기록하였다. Table 6은 각 모델의 예측 성능을 MSE, MAE, R-squared, RMSE 등 다양한 지표로 요약하여 보여준다.

앞에서 선정된 회전수를 제외한 5개의 인자로 구축한 최적화 모델은 검증 데이터 평가에서 가장 높은 예측 정확도를 나타냈다. 이는 모든 변수를 포함한 모델이 통계 지표상 바람직하게 보일 수 있으나, 도메인 지식을 활용해 핵심 변수를 선별함으로써 더 정확한 모델을 도출할 수 있음을 보여준다. 따라서 최적의 모델 구축을 위해 통계적 분석과 도메인 지식을 결합하는 접근이 필수적임을 확인하였다.

5. 결론

본 연구는 가공 조건에 따른 공구 수명을 예측하기 위한 회귀 모델을 개발하고, 이를 다양한 검증 방법으로 평가함으로써 제조 데이터 기반 예측 모델링의 실질적 가능성을 제시하였다. 주요 가공 조건인 절삭 속도, 이송 속도, 절입 깊이, 공구 회전수 등 핵심 인자들이 공구 수명에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 도메인 지식과 통계적 방법을 결합한 변수 선택이 모델 성능 향상에 미치는 영향을 확인하였다.

특히, 모든 변수를 포함한 모델보다 일부 핵심 변수를 선별한 모델이 실제 검증 데이터에서 더 높은 예측 정확도를 보였다. 이는 단순히 통계적 설명력에 의존하지 않고, 제조 공정의 물리적 특성을 반영한 변수 선택이 예측 성능과 실질적 활용 가능성을 높이는 데 기여한다는 것을 시사한다.

또한, 교차 검증을 통해 모델의 일반화 성능을 확보함으로써 다양한 가공 조건에서도 신뢰성 있는 공구 수명 예측이 가능함을 입증하였다. 이러한 연구 결과는 공구 수명 예측 및 관리 시스템 개발에 기여할 수 있으며, 제조 현장에서 공구 수명을 최적화하고 생산성을 향상시키는데 직접적으로 활용될 수 있을 것이다.

향후 연구에서는 더 다양한 가공 조건과 공구 유형을 반영한 데이터 확장 및 고도화된 예측 기법을 도입하여, 보다 정교하고 포괄적인 예측 모델을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2021R111A3048752)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00394769)

REFERENCES

- Li, W., Liu, T., (2019), Time varying and condition adaptive hidden markov model for tool wear state estimation and remaining useful life prediction in micro-milling, Mechanical Systems and Signal Processing, 131, 689-702.
- Yang, M. Y., (1997), The Theory and Practice of Cutting Processing.
- Cook, N. H., (1973), Tool wear and tool life, Journal of Engineering for Industry, 95(4), 931-938.
- Park, J.-J., (1990), Adaptive observer and computer vision for online flank wear estimation, University of Michigan.
- Lee, S.-H., Kim, B.-S., Kang, T.-H., Song, J.-Y., Kang, J.-H., Seo, C., (2004), Development of reliability prediction program for tool life, Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2004, 317-322.
- Chen, Y., Jin, Y., Jiri, G., (2018), Predicting tool wear with multi-sensor data using deep belief networks, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99(5), 1917-1926.
- Sun, H., Cao, D., Zhao, Z., Kang, X., (2018), A hybrid approach to cutting tool remaining useful life prediction based on the wiener process, IEEE Transactions on Reliability, 67(3), 1294-1303.

8. Kim, B. S., Kang, T. H., Lee, S. H., Kang, J. H., Song, J. Y., (2005), Development of a tool life prediction program for increasing reliability of cutting tools, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 14(3), 1-7.
9. Wang, M., Zhou, J., Gao, J., Li, Z., Li, E., (2020), Milling tool wear prediction method based on deep learning under variable working conditions, IEEE Access, 8, 140726-140735.
10. Chen, Y., Jin, Y., Jiri, G., (2018), Predicting tool wear with multi-sensor data using deep belief networks, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99(5), 1917-1926.
11. Liu, Y., Hu, X., Sun, S., (2019), Remaining useful life prediction of cutting tools based on support vector regression, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012021.

**Hyun Chul Kim**

Professor in the Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University. His research interest is intelligent manufacturing system and precision machining.

E-mail: khc@kongju.ac.kr

딥강화학습과 시뮬레이션을 활용한 제조 레이아웃의 물리적 배치 최적화

Optimization of Manufacturing Layout Using Deep Reinforcement Learning and Simulation

최예지¹, 김민성¹, 김병수^{1,*}
Ye Ji Choi¹, Minsung Kim¹, and Byeong Soo Kim^{1,*}

¹ 서울과학기술대학교 인공지능응용학과 (Department of Applied Artificial Intelligence, Seoul National University of Science and Technology)
* Corresponding Author / E-mail: bskim@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-9779
ORCID: 0000-0003-2534-7353

KEYWORDS: Facility layout planning (시설 배치 계획), Manufacturing optimization (제조 최적화), Deep Q-Network (딥 Q-네트워크), Deep reinforcement learning (딥강화학습), Simulation (시뮬레이션)

Facility Layout Problem (FLP) aims to optimize arrangement of facilities to enhance productivity and minimize costs. Traditional methods face challenges in dealing with the complexity and non-linearity of modern manufacturing environments. This study introduced an approach combining Reinforcement Learning (RL) and simulation to optimize manufacturing line layouts. Deep Q-Network (DQN) learns to reduce unused space, improve path efficiency, and maximize space utilization by optimizing facility placement and material flow. Simulations were used to validate layouts and evaluate performance based on production output, path length, and bending frequency. This RL-based method offers a more adaptable and efficient solution for FLP than traditional techniques, addressing both physical and operational optimization.

Manuscript received: December 30, 2024 / Revised: January 21, 2025 / Accepted: February 5, 2025

1. 서론

FLP (Facility Layout Problem)는 시설의 위치를 결정하는 최적화 문제로 주어진 지역 내에 여러 개의 시설을 어떻게 배치할지를 결정하는 데 중점을 둔다[1]. 이는 개별 공정과 장비의 배치 최적화, 작업자의 동선과 작업 공간 설계, 물류 이동 경로 최적화, 그리고 제조 레이아웃 최적화 등 여러 가지 문제를 포함한다. 초기 레이아웃 설계는 공정 흐름, 작업자 동선, 물류 이동 경로 등을 최적화하여, 공정의 생산성을 극대화하고 운영 비용을 절감하는 데 기여한다. 고품질의 레이아웃 솔루션은 불필요한 이동과 낭비를 최소화하고, 작업 환경을 개선하며, 전체적인 비용 절감 효과를 가져오기 때문에 FLP는 제조업에서 경쟁력을 강화하는 필수적인 요소로 인식되고 있다[2].

전통적인 FLP 방법은 선형 계획법, 유전 알고리즘과 같은 메타

휴리스틱 기법 등이 주로 사용되었다[3-6]. 이러한 방식들은 특정 상황에서 효과적이거나, 복잡하고 동적인 환경에서는 그 한계가 분명하다. 선형 계획법은 대규모 데이터의 처리에 제한적이며, 비선형 문제를 해결하기 어렵다[5]. 따라서 안전 거리, 장비의 크기, 장비의 회전 등을 모두 고려해야 하는 실제 상황에서 비효율적으로 적용될 수 있다. 메타휴리스틱 기법은 다양한 탐색 전략을 사용하지만, 무작위성을 기반으로 하여 최적화를 수행하기 때문에 해결 방안을 찾는 데 시간이 가변적이며, 항상 일정한 결과를 보장하지 않는다[7]. 복잡한 공정 흐름과 다양한 제약 조건을 고려해야 하는 FLP는 비선형성이 강하고, 문제의 규모가 커질수록 계산 시간과 복잡성이 기하급수적으로 증가한다. 이와 같은 이유로, 전통적인 접근법만으로는 현대 제조 환경의 복잡성을 충분히 다룰 수 없다는 한계를 지니고 있다.

이러한 한계점을 극복하기 위해 최근에는 강화학습(Reinforcement

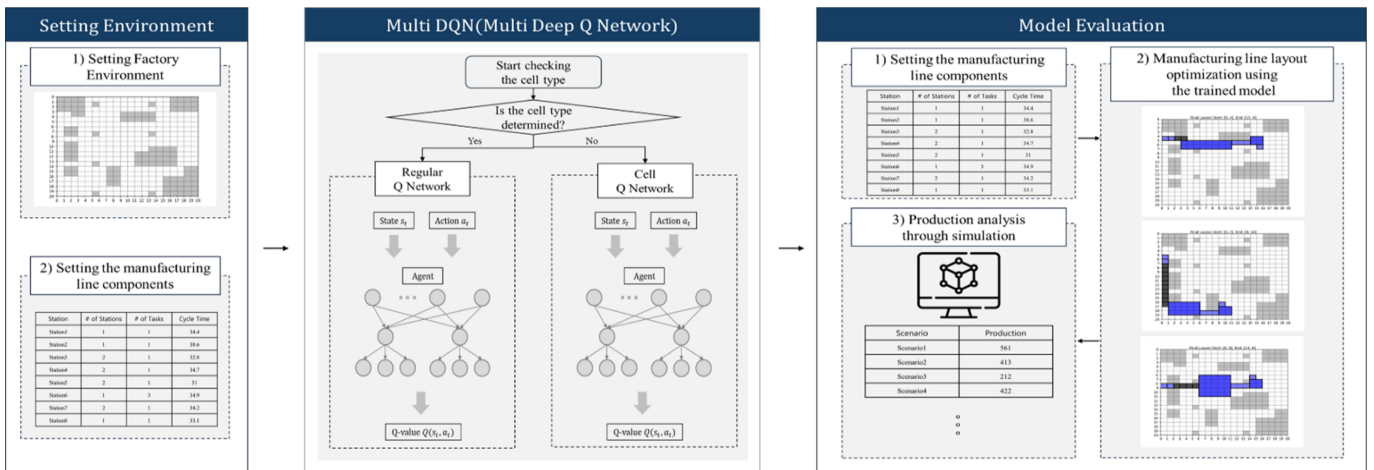


Fig. 1 Overall flowchart of proposed work

Learning)을 활용한 FLP 접근법이 주목받고 있다[8,9]. 강화학습은 에이전트가 환경과 상호작용하며 최적의 정책을 학습하는 방법으로, 최적화가 복잡하고 동적인 시스템에서 효과적인 방법으로 평가받고 있다. FLP 문제를 강화학습으로 해결하는 과정은, 주어진 시설 배치와 제약조건 하에서 에이전트가 각 시설의 위치를 선택하고 이동 경로를 결정하는 것으로 정의할 수 있다 [9]. 이때 에이전트는 목표를 달성하기 위해 자원을 효율적으로 배분하고, 각 시설 간의 물류 흐름을 최적화하며, 주어진 시간 내에 최상의 레이아웃을 도출하는 것을 목표로 한다. 그러나 주로 사전에 정의된 설비를 최적의 위치에 배치하여 물류 효율성, 공간 활용성 등을 극대화하는 데 중점을 두고 있다[10-12].

따라서 본 논문에서는 DQN (Deep Q-Network)[13]을 활용하여 FLP 문제 중에서도 제조라인의 물리적 배치 최적화와 셀 생성 및 배치를 통합적으로 고려하는 접근법을 제안한다. 이를 통해 각 셀의 크기, 종류, 입력/출력 위치와 같은 물리적 제약 조건까지 반영하여 최적의 레이아웃을 도출하고자 한다. 특히, 다중 네트워크 구조를 활용하여 두 가지 과제를 동시에 해결하는데 초점을 맞추고 있다. 첫 번째 과제는 제조라인 구성 요소를 배치하면서 공정 내의 불용공간과 겹치지 않도록 최적의 위치를 찾는 것이며, 두 번째 과제는 각 구성 요소에 적합한 셀의 크기와 종류를 결정하는 작업이다. 이 두 과제는 상호 연관된 문제로, 셀 배치의 공간적 제약과 특성을 반영하면서 전체 레이아웃을 최적화해야 한다. 본 연구는 이러한 다중 과제를 동시에 수행할 수 있는 접근법을 제안하며, 효율적이고 최적화된 제조라인 배치를 도출하는 것을 목표로 한다.

이 두 과제는 각 단계에서의 의사결정이 이후 단계에 영향을 미치는 동적인 환경에서 진행되므로, 단순히 공간적 데이터를 학습하는 CNN (Convolutional Neural Network) 기반 접근법만으로는 해결하기 어렵다. 강화학습은 순차적 의사결정 문제를 효과적으로 처리할 수 있는 학습 능력을 제공하며, 셀 생성과 배치 작업의 상호작용을 반영하여 전체 레이아웃을 최적화할 수 있다. 본 연구는 이러한 강화학습의 장점을 활용하여 다중

과제를 동시에 수행하고, 효율적이며 최적화된 제조라인 배치를 도출하는 것을 목표로 한다.

이후, 강화학습을 통해 도출된 제조라인 레이아웃의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 활용한다. 이를 통해 학습 결과로 생성된 레이아웃의 생산량을 분석하며, 제안된 알고리즘의 실질적인 성능을 평가한다. 전체적인 흐름은 Fig. 1과 같다. 이러한 접근 방식은 기존의 전통적 방법론이 가지는 한계를 극복하고, 현대 제조 환경에서 적용 가능한 최적의 솔루션을 제시한다.

2. 관련 연구

2.1 강화학습 기반 FLP 접근법

강화학습을 적용한 FLP 연구는 주로 사전에 정의된 설비나 단위를 효율적으로 배치하여 물류 동선 최적화, 공간 활용 증대, 생산 흐름 개선을 목표로 한다. Lee et al.[10]은 강화학습을 기반으로 한 인공지능 공간 배치 시뮬레이터를 개발하여 사전에 정의된 방의 구성요소들을 최적의 위치에 배치함으로써 공간 활용성을 극대화하고 물류 효율을 개선하는 방법론을 제안하였다. 유사하게, Choi et al.[11]은 생산 시뮬레이션과 강화학습을 결합한 접근법을 통해 공장 레이아웃과 생산 흐름을 최적화하고자 하였다. 이 연구는 특히 시뮬레이션 결과를 강화학습의 보상 체계에 반영하여 설비 배치의 효율성을 높이는 데 중점을 두었다. Klar et al. [12]에서는 시뮬레이션 기반 심층 강화학습을 활용한 다목적 공장 레이아웃 계획을 통해 배치 효율성과 다양한 목적을 동시에 달성하는 방안을 제시하였다. 이 연구는 공장 레이아웃의 다양한 목표를 다룰 수 있는 강화학습 모델의 전이 가능성(Transferability)을 검증하였다.

이와 비교하여, 본 연구는 제조라인의 각 구성 요소를 학습 과정에서 동적으로 설계하고 배치하는 새로운 접근법을 제시한다. 기존 연구들은 단일 네트워크 구조를 활용하여 사전에 정의된 설비를 배치하는 데 초점을 맞춘 반면, 본 연구는 다중 네트워크 구조를 활

용하여 학습을 통해 셀의 크기와 종류를 유연하게 결정하며, 각 구성 요소 간의 상호작용을 반영하여 배치를 최적화한다. 따라서 단일 목표가 아닌 다중 과제를 동시에 해결하는 데 중점을 두어, 셀 배치의 물리적 제약 조건과 공간 활용성을 동시에 고려한다.

2.2 강화학습과 DQN

강화학습은 에이전트가 환경과 상호작용하며 최적의 행동을 학습하는 기계 학습 기법이다. 에이전트는 주어진 상태에서 행동을 선택하고, 보상을 기반으로 정책을 개선하며 장기적인 보상을 극대화하기 위해 다양한 시나리오를 탐색한다. 주요 구성 요소는 상태(State), 행동(Action), 보상(Reward)으로, 상태는 환경의 현재 정보를 나타내고, 행동은 에이전트가 선택할 수 있는 옵션을, 보상은 행동 결과에 대한 피드백을 의미한다[12]. 이러한 구조는 복잡하고 동적인 환경에서도 효과적으로 작동하며, 게임, 로봇 제어, 자율주행 등 다양한 분야에서 성공적으로 활용되고 있다.

이 중 DQN은 Q-Learning[14]과 심층 신경망을 결합하여 복잡한 상태 공간에서도 최적의 행동 정책을 학습할 수 있는 강화학습 알고리즘이다[13]. 전통적인 Q-Learning의 메모리 및 계산 비용 문제를 해결하기 위해[15], DQN은 심층 신경망으로 상태를 입력 받아 Q값을 예측한다. 또한, 학습 안정성과 효율성을 높이기 위해 경험 리플레이를 활용하여 상관성을 줄이고 다양한 데이터를 학습하며, 타겟 네트워크를 통해 Q값의 변동을 완화해 안정적인 학습을 지원한다. DQN은 강화학습의 대표적인 알고리즘으로, 복잡한 환경에서의 효율적인 문제 해결에 널리 사용되고 있다[16].

2.2.1 Multi DQN (Multi Deep Q-Network)

본 연구에서는 제조라인 최적화 문제를 해결하기 위해 기존 DQN 구조를 확장하여 네트워크를 추가로 설계하였다. 이는 해당 문제가 단일 네트워크로는 다루기 어려운 복잡한 상태와 행동 공간을 포함하고, 두 가지 상호 연관된 과제를 동시에 해결해야 하기 위함이다. 기존 Q-Learning은 테이블 기반 접근법으로 대규모 상태 공간에서 비효율적이다[14]. 또한, 일반적인 DQN은 단일 네트워크 구조로 인해 여러 작업을 동시에 학습하려고 하면 네트워크의 학습 과정에서 충돌을 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 각 과제에 맞는 독립적인 네트워크를 추가하여, 구성 요소의 배치와 셀 종류 결정을 병렬적으로 학습할 수 있도록 하였다. 이를 통해 각 과제의 특성을 효과적으로 반영하면서 제조라인 최적화 과정에서 발생하는 물리적 제약 조건과 상호작용을 동시에 고려할 수 있도록 하였다.

Multi-DQN 알고리즘은 제조 라인의 구성 요소를 배치하는 작업(Task)과 셀의 종류를 결정하는 작업이라는 두 가지 주요 작업을 학습하기 위해 설계되었다. 이를 위해 두 개의 별도 Q-네트워크(Regular Q-Network, Cell Q-Network)와 그에 상응하는 타겟 네트워크를 활용하여 각 작업에 맞는 상태와 행동 공간을 독립적으로 학습한다. Regular Q-Network는 구성 요소 배치를 위한 최적의 행동을 학습하며, Cell Q-Network는 각 셀의 종류를 결정하는 데 사용된다.

Algorithm 1 Multi DQN

Initialization

Initialize Replay Buffers:

- Regular Task Replay Buffer $D_{Regular}$ with capacity N
- Cell Task Replay Buffer D_{Cell} with capacity N

Initialize Networks:

- Regular Q-network $Q_{Regular}$ with weights $\theta_{Regular}$
- Cell Q-network Q_{Cell} with weights θ_{Cell}
- Target Regular Q-network $Q_{Regular}^T$ with weights $\theta_{Regular}^T$
- Target Cell Q-network Q_{Cell}^T with weights θ_{Cell}^T

Set exploration parameters $\epsilon = 1.0$, $\epsilon_{min} = 0.1$

Set $t = 0$

Training Loop

- 1: for $t < t_{max}$ do
- 2: If $t \neq 1$ then $s_t = s_{t+1}$
- 3: else get the initial observation s_t
- 4: end if
- 5: Determine Task Type $task\ type$ based on environment conditions
- 6: If $\mu < \epsilon$: then
- 7: Select a random action a_t
- 8: else
- 9: Select a_t based on the task:
- 10: $a_t \begin{cases} \operatorname{argmax}_a Q_{regular}(s_t, a; \theta_{Regular}), & \text{if Regular Task} \\ \operatorname{argmax}_a Q_{Cell}(s_t, a; \theta_{Cell}), & \text{if Cell Task} \end{cases}$
- 11: Execute action a_t , observe $a_t, r_t, done$
- 12: Store experience $e_t = (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}, done)$ in
- 13: $D_{Regular}$ if Regular Task, D_{Cell} if Cell Task
- 14: Sample mini-batch:
- 15: If $len(D_{Regular}) \geq batch_size$ then
- 16: sample from $D_{Regular}$
- 17: If $len(D_{Cell}) \geq batch_size$ then
- 18: sample from D_{Cell}
- 19: Compute Target Q-values y :
- 20: $y = r + \gamma \max_{a'} Q_T(s', a'; \theta_T)(1 - done)$
- 21: where $Q_T \in (Q_{Regular}^T, Q_{Cell}^T)$ $\theta_T \in (\theta_{Regular}^T, \theta_{Cell}^T)$
- 22: Compute Loss L :
- 23: $L = \frac{1}{batch\ size} \sum (y - Q(s, a; \theta))^2$
- 24: where $Q \in (Q_{Regular}, Q_{Cell})$, $\theta \in (\theta_{Regular}, \theta_{Cell})$
- 25: Train and update Q network's weights
- 26: Minimize L using Adam optimizer
- 27: Every C steps, copy:
- 28: $\theta_{Regular}^T \leftarrow \theta_{Regular}$, $\theta_{Cell}^T \leftarrow \theta_{Cell}$
- 29: Update exploration rate:
- 30: $\epsilon = \max(\epsilon_{min}, \epsilon \times decay\ rate)$

해당 구조는 각 작업의 특성을 효과적으로 반영하면서도, 단일 네트워크로 해결할 수 없는 멀티태스킹 문제를 해결하도록 설계되었다. 각 Q-Network는 개별적인 Replay Buffer를 사용하여 학습되며, 특정 작업이 수행된 경우 해당 작업의 Replay Buffer만 업데이트된다. 즉, 타임스텝 t 를 두 과제가 공유하며, 매 스텝마다 하나의 과제만 선택되어 실행된다. 또한, 현재 구조에서는 매 타임스텝마다 두 개의 Q-Network를 모두 업데이트하는 방식을 사용하여 특정 과제의 선택 빈도가 낮더라도 지속적인 학습이 이루어지도록 설계되었다. 또한, ϵ -탐욕 정책과 Kaiming He 초기화, 규제화를 통해 안정적이고 효율적인 학습을 지원한다[17].

2.3 시뮬레이션

DES (Discrete Event Simulation, 이산 사건 시뮬레이션)는 복잡한 시스템의 동작을 시간에 따라 분석하고 예측하는 방식이다[18]. DES는 시스템을 여러 하위 모듈로 분해하여 각 모듈의 상태와 이벤트를 정의하고, 이들의 상호작용을 규명함으로써 전체 시스템의 동작을 정밀하게 표현한다. 또한 이벤트 발생 시점과 이벤트 간 상호작용을 중심으로 시스템의 동태를 파악하기 때문에 복잡한 비연속 시스템의 시간적 변화와 동작을 효과적으로 모델링할 수 있다.

본 연구에서는 PyDEVS 라이브러리를 활용해 DES 기반 시뮬레이션을 수행하였다. PyDEVS는 제조 공정, 자원 할당, 물류 흐름 등을 모델링하는 라이브러리이다[19]. 강화학습 결과로 도출된 제조 라인의 생산량을 시뮬레이션 하여 최적의 레이아웃 배치를 평가하고 검증하는 데 사용되었다. 이를 통해 강화학습 에이전트가 학습한 결과의 실질적인 효율성을 분석하였다.

3. 방법론

3.1 Multi DQN 학습

Multi DQN을 사용하여 제조라인의 물리적 배치 최적화에 관한 두 가지 과제를 동시에 학습하였다. 첫 번째 과제는 제조라인의 구성요소를 최적의 위치에 배치하는 과제이고, 두 번째 과제는 각 셀의 종류를 지정하는 과제이다. 각 과제는 서로 독립적으로 진행되지만, 동시에 학습하여 두 과제를 함께 해결할 수 있도록 설계되었다.

첫 번째 과제에서 에이전트의 목표는 각 구성요소를 배치할 때 불용공간을 최소화하고 구성요소가 서로 겹치지 않도록 최적의 위치를 선택하는 것이다. 두 번째 과제에서는 에이전트가 각 셀에 배치할 작업과 라인의 종류를 결정하여 전체적인 제조라인의 효율성을 극대화하는 데 초점을 둔다.

학습은 환경의 각 시작점에서 10,000 번씩 수행되었으며, 불용공간과 겹치지 않는 배치를 찾는 목표를 두고 환경을 구성하였다. 이 과정에서 각 과제의 상호작용을 고려하여 두 가지 과제를 동시에 최적화하는 방법을 학습하였다. 학습 과정에서는 Table 1에 정리된 알고리즘의 주요 하이퍼파라미터를 사용하였

Table 1 Parameters in algorithm 1

Parameter	Value	Description
N	10,000	Replay buffer capacity
α	0.001	Learning rate
γ	0.99	Discount factor
ϵ	1.0	Initial exploration rate
ϵ_{min}	0.1	Minimum exploration rate
Decay rate	0.995	Exploration decay rate
C	100	Target network update frequency
Batch size	32	Number of samples in mini-batch

Table 2 Architecture of algorithm 1

Layer	Input Size	Parameter
Input Layer	20×20	
Fully Connected (fc1)	20×20	$20 \times 20 \times 64 + 64$
Dropout 1 ($p = 0.3$)	64	
Fully Connected (fc2)	64	$64 \times 32 + 32$
Dropout 2 ($p = 0.3$)	32	
Fully Connected (fc3)	32	$32 \times \text{Action Dim} + \text{Action Dim}$

Table 3 Manufacturing line data

Station	# of Stations	# of Tasks	Cycle time
Station 1	1	1	34.4
Station 2	1	1	38.6
Station 3	2	1	32.8
Station 4	2	1	34.7
Station 5	2	1	31
Station 6	1	3	34.9
Station 7	2	1	34.2
Station 8	1	1	33.1

다. 또한, 학습 과정에서 사용하는 네트워크의 구조는 Table 2에 나타나 있다. 해당 모델은 입력 데이터의 차원을 줄이고 주요 특징을 추출하기 위해 Fully Connected 레이어와 Dropout을 결합하여 구성하였다. fc3 레이어의 경우에는 각 과제의 행동 차원에 따라 Output이 달라지게 된다.

3.1.1 데이터셋

제조라인의 각 스테이션에 대한 정보는 중요한 데이터로 활용되며, Table 3은 각 스테이션의 번호, 스테이션의 개수(# of Stations), 작업 수(# of Tasks), 그리고 사이클 타임(Cycle Time)을 포함하고 있다. 예를 들어, Stations 1, 2, 6, 8은 각각 1개의 스테이션으로 구성되어 있으며, 이를 1×1 크기의 스테이션으로 지정할 수 있다. 반면, 스테이션의 개수가 2개 이상인 다른 스테이션들은 동일한 개수를 가진 스테이션 번호들과 함께 하나의 Cell로 지정할 수 있다.

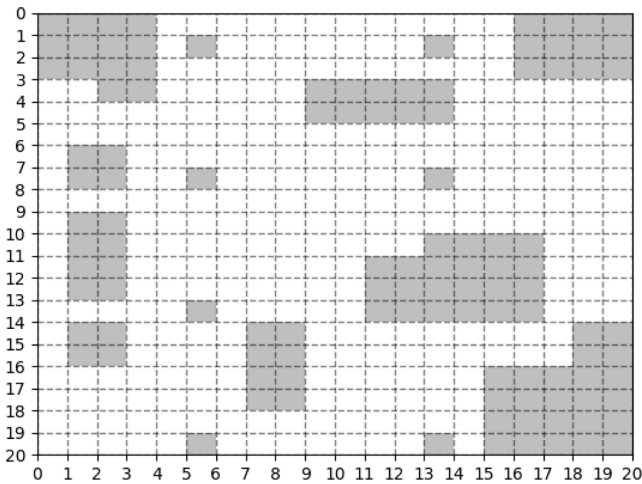


Fig. 2 Factory environment

이러한 데이터를 기반으로, 스테이션 개수가 2개 이상인 경우에는 하나의 Cell로 통합될 수 있다. 이때 에이전트는 4가지 Cell 유형 중 하나를 선택하는 두 번째 과제를 수행한다. 이는 각 Cell 유형이 가지는 특성에 따라 공간 효율성과 작업 흐름이 달라지기 때문에, 에이전트는 최적의 Cell 유형을 선택하여 제조라인의 효율성을 극대화하도록 학습된다. 반면, 스테이션 개수가 1개이거나 이미 Cell의 종류가 지정된 경우에는 해당 구성요소를 불용공간과 겹치지 않도록 배치하는 과제 첫 번째 과제를 수행한다. 이 과정에서 불용공간과의 겹침을 피하며 최적의 배치를 찾아내는 것이 핵심이다.

3.1.2 환경(Environment) 설정

공정 내부의 크기는 20×20 크기의 격자(Grid)로 설정하였다. Fig. 2는 해당 격자 내에서 기둥, 계단과 같은 불용공간에 대한 정보를 입력 받아 회색으로 시각화한 결과이며 흰색으로 표시된 공간은 가용공간을 나타낸다.

3.1.3 상태(State) 설정

강화학습에서 상태는 에이전트가 특정 시점에서 환경을 인식하고 표현하는 정보를 의미한다. 해당 알고리즘에서는 두 가지 과제에 대한 상태를 각각 다음과 같은 벡터 형태로 나타낸다:

- 1) 제조라인의 구성요소 배치 시: [x, y, w, h]
 - 현재 위치(x, y): 에이전트의 현재 위치를 좌표 형태로 나타낸다.
 - 다음 에이전트 크기(w, h): 다음으로 배치해야 할 제조라인 구성요소의 크기를 나타낸다.
- 2) 셀 종류 결정 시: [x, y, t, l]
 - 현재 위치(x, y): 에이전트의 현재 위치를 좌표 형태로 나타낸다.
 - Task 개수(t): 각 셀에 배치할 작업의 수를 나타내며 Table 3의 # of Tasks 항목과 대응된다.

- Line 개수(l): 각 셀에 배치된 라인의 개수를 나타내며 Table 3의 # of Stations 항목과 대응된다.

학습 시 초기 좌표 값은 환경 초기화 시 기본값인 (0,3)으로 설정되며 임의의 시작점 지정도 가능하다. 평가 시에는 특정 시작점을 입력하면 해당 시작점에서의 최적의 배치 결과를 도출한다. 좌표값은 에이전트의 위치를 나타내며 이는 현재 제조라인 구성요소가 어디에 위치하고 있는지를 나타낸다.

본 연구에서는 불필요한 데이터 처리를 줄이고 효율적인 학습을 유도하기 위해 과거 배치된 구성요소의 정보를 포함하지 않고 현재 상태에서 최적의 행동을 학습하도록 설계하였다. 에이전트는 불용공간 즉, 장애물의 위치와 이미 지나온 위치에 구성요소를 배치할 경우 지속적으로 음의 보상을 받도록 되어 있어, 자연스럽게 올바른 배치를 학습하게 된다. 또한, 셀 종류 결정 시 상태 벡터에 포함되는 Line 개수(l)은 해당 Cell을 구성하는 Station 개수와 동일한 값으로 지정된다. 이는 주어진 Station 개수만큼 병렬로 Cell을 구성하기 때문에 Line 개수는 자동으로 해당 Station 개수와 일치하도록 설정된다. 이와 같은 상태 정의를 통해 에이전트가 현재 환경과 다음 행동을 위한 정보를 학습할 수 있도록 한다.

3.1.4 행동(Action) 설정

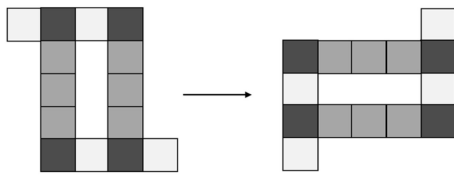
강화학습 환경에서 에이전트는 주어진 과제를 달성하기 위해 다양한 행동을 수행하며 학습을 진행한다. 각 행동은 에이전트가 환경 내에서 상호작용하며 목표를 이루기 위한 선택지로 정의된다. 본 연구에서는 제조라인 구성요소 배치와 셀 종류 지정이라는 두 가지 과제에 대해 서로 다른 행동을 정수형 스칼라 값으로 설정하였다.

첫 번째 과제인 제조라인 구성요소 배치 과제에서는 에이전트가 다양한 위치와 방향으로 이동하거나 구성요소의 속성을 조정하는 행동을 수행해야 한다. 이 과제에서는 총 10가지 행동(0-9)이 정의되며, 이는 항상 일정하게 유지된다. 8가지 행동은 Fig. 3(a)에 나타난 상, 하, 좌, 우 이동 로직에 기반하며, 이는 에이전트가 제조 라인의 구성요소를 적절히 배치할 위치를 탐색하도록 돕는다. 추가적으로, Figs. 3(b)의 현재 Cell을 90° 회전시키는 행동과 3(c)에 나타난 1×1의 Conveyor를 추가하는 행동도 포함한다. Fig. 3(c)에서는 개념적인 이해를 돕기 위해 임의로 추가한 Conveyor를 오른쪽에 배치하였지만 이는 단순히 1×1 크기의 구성요소를 추가하는 방식으로 적용된다. 추가된 Conveyor는 새로운 구성 요소로 간주되며, 이후 타임 스텝에서도 동일하게 10가지 행동 중 하나를 선택하여 수행된다. 이러한 행동 설정은 주어진 환경에서 가능한 최적의 배치 방법을 최대한 많이 찾기 위함이다.

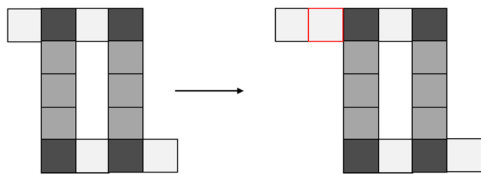
두 번째 과제인 셀의 종류 지정 과제에서는 Fig. 4와 같이 에이전트가 선택할 수 있는 4가지 행동(0-3)이 존재한다. 제조라인에서의 Cell은 Parallel Cell, Block Cell, Two-sided Wingbody Cell, One-sided Wingbody Cell로 분류한다[20]. 이는 각 셀을 미리 정의된 유형 중 하나로 지정하는 선택지를 의미한다. 셀의 크기는

UP		DOWN	
1	2	1	2
LEFT		RIGHT	
1	2	1	2

(a) Directional movement



(b) Rotate a cell



(c) Add a conveyor

Fig. 3 Action system for task 1

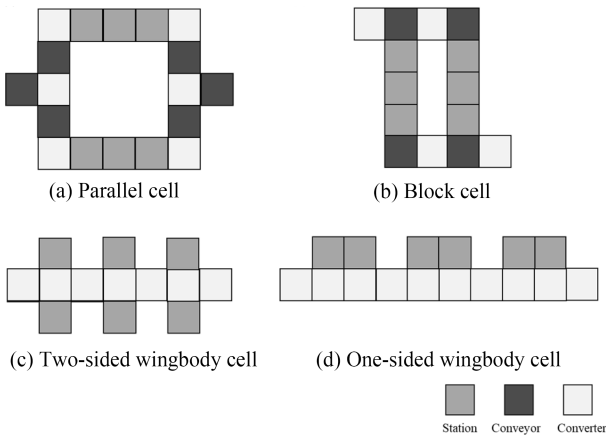


Fig. 4 Action system for task 2

작업(Task) 수와 라인(Line) 개수에 따라 결정되며, 에이전트는 해당 정보를 기반으로 적합한 셀 유형을 선택하는 행동을 수행한다.

3.1.5 보상(Reward) 설정

본 연구에서는 첫 번째 과제와 두 번째 과제 그리고 에피소드 종료 시점에서의 보상 체계를 설계하여 에이전트가 효율적으로 학습할 수 있도록 유도하였다.

첫 번째 과제의 보상 체계 r_t 는 식(1)과 같이 다음 두 가지 조건으로 구성된다.

$$r_t = \begin{cases} -5 \cdot n_{restricted}, & \text{Overlap with restricted area} \\ -10, & \text{Conveyor added or cell rotated} \\ -10, & \text{Occurrences of Turns} \end{cases} \quad (1)$$

- 불용공간과 겹치는 경우: 장애물 또는 기존 배치와 겹치는 칸 수에 비례하여 음의 보상 부여
- 컨베이어가 추가되거나 셀의 회전이 일어난 경우: 추가 작업으로 인한 비효율성을 억제하기 위해 음의 보상 부여
- 꺾임 발생: Directional Movement 중 이전 행동과 달라졌다면 음의 보상 부여

해당 체계는 제조라인 배치를 최적화하고 자원을 효율적으로 활용하기 위해 설계되었다. 이를 통해 에이전트는 불필요한 구성요소 추가 또는 회전을 줄이고, 제한된 공간 내에서 최적의 배치를 학습할 수 있다.

적절한 셀의 종류를 결정하는 두 번째 과제의 보상 체계 r_c 는 다음 식(2)와 같다.

$$r_c = \begin{cases} +10, & \text{if valid move exist} \\ -10, & \text{if no valid moves} \end{cases} \quad (2)$$

- 유효한 이동 체계가 존재하는 셀의 종류를 선택한 경우: 선택한 셀이 이동가능한 구조를 가진 경우 즉, 선택한 셀에서 유효한 Directional Movement가 존재한다면 양의 보상 부여
- 유효한 이동 체계가 존재하지 않는 셀의 종류를 선택한 경우: 선택한 셀에서 유효한 이동 체계가 존재하지 않을 경우, 즉, 선택한 셀에서 유효한 Directional Movement가 존재하지 않는다면 음의 보상 부여

이 보상 체계는 에이전트가 유효한 이동 체계를 가진 셀을 선택하도록 학습하고, 비효율적인 선택을 최소화하는 방향으로 최적화를 진행할 수 있도록 설계되었다.

마지막으로, 에피소드 종료 조건은 크게 2가지로 구분되며 이에 대한 보상 체계 r_t 는 두 개의 과제에 동일하게 식(3)으로 적용된다.

$$r_t = \begin{cases} -100 \times n_{unplaced}, & \text{Episode ends : Placement failure} \\ 100, & \text{Episode ends : Placement success} \end{cases} \quad (3)$$

- 배치 실패로 에피소드가 종료된 경우: 배치하지 못한 구성요소의 수에 비례하여 음의 보상 부여
 - 배치 성공으로 에피소드가 종료된 경우: 높은 기본 보상 제공 첫 번째 과제 수행 중 특정 위치에서 수행할 수 있는 모든 행동이 불가능한 경우, 배치 실패로 간주하여 에피소드를 종료한다. 이는 Fig. 3에서 정의된 모든 이동 방식 및 Cell 회전이 불용공간과 충돌하거나, Conveyor 추가 개수가 10개를 초과하여 더 이상 배치가 불가능한 상황을 의미한다. 반면, 모든 구성 요소가 정상적으로 환경 내에 배치 완료된 경우, 해당 에피소드는 성공적으로 종료된다. 이를 통해 불필요한 추가 행동을 방지하고, 최적의 배치를 신속하게 학습할 수 있도록 설계하였다.
- 총 보상 계산은 아래의 식(4)와 같다.

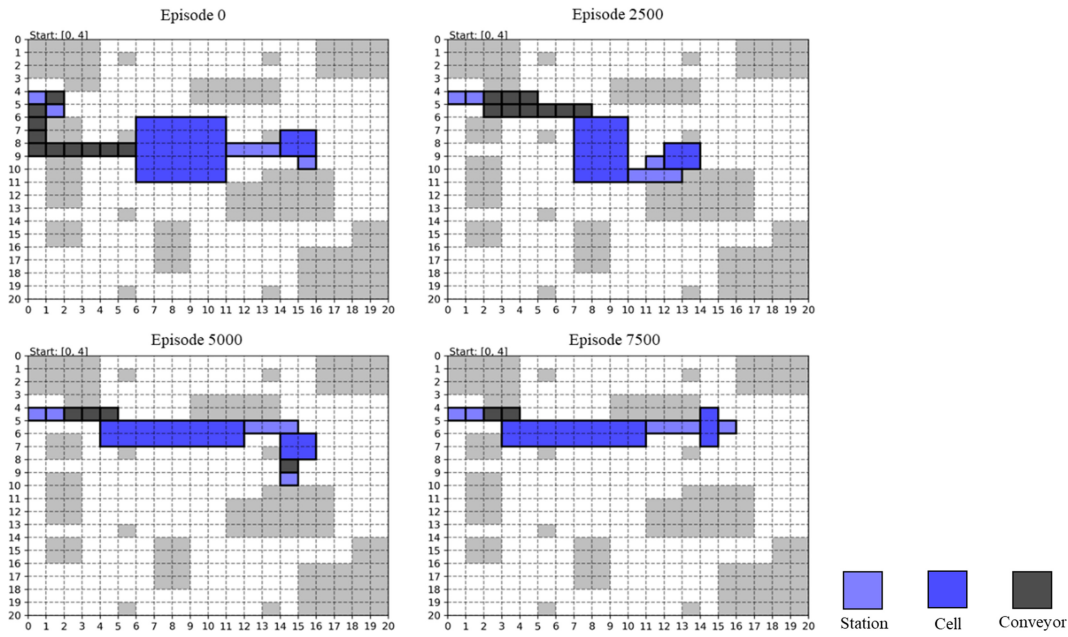


Fig. 5 Learning process at the starting point(0, 4)

$$Total\ Reward = \begin{cases} r_t & \text{if done} = True \\ r_r & \text{if task 1} \\ r_c & \text{if task 2} \end{cases} \quad (4)$$

해당 보상 체계는 에이전트가 각 과제의 목표를 효과적으로 달성할 수 있도록 설계되었으며, 배치 실패를 줄이고 효율적인 셀 선택과 배치를 학습하도록 유도한다.

4. 실험 결과

4.1 Multi DQN 학습 결과

본 연구에서는 20×20 크기의 그리드 환경을 구성하여, 불용공간을 제외한 각 시작점에서 10,000번의 에피소드를 학습하였다. 강화학습의 유효성을 평가하기 위해 1,000번마다의 성공한 에피소드 개수와 시작점(0, 4)에서 약 0, 2,500, 5,000, 7,500번 에피소드일 때의 배치 결과를 시각화 하여 분석하였다(Fig. 5).

Fig. 6에 따르면 각 시작점에서의 성공적인 에피소드 수는 시간이 지남에 따라 점진적으로 증가하는 추세를 보인다. 이는 모델이 초기에는 랜덤한 경로를 탐색하면서 비교적 낮은 성공률을 보였으나, 점차 최적의 경로를 학습함에 따라 성공률이 꾸준히 개선되었음을 보여준다. 특히, 에피소드 7,500 이후에는 대부분의 경우에서 성공 수가 800-900 사이로 수렴하며 안정적인 성과를 보인다.

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이, 에피소드 0에서는 경로가 불규칙하고 불필요한 Conveyor가 추가된 것을 확인할 수 있다. 그러나 학습이 진행됨에 따라 경로가 점차 단순화되고 최단 경로로 수렴하는 양상을 보인다. 최종적으로 에피소드 7,500에서는 거의

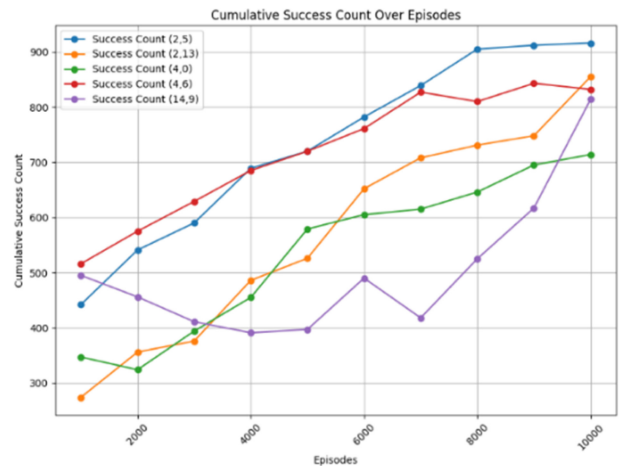


Fig. 6 Cumulative success count over episodes

최적의 경로가 도출되어, 불필요한 Conveyor 추가나 꺾임 없이 적절한 배치가 이루어졌다. 따라서, Multi-DQN 모델이 학습 과정을 통해 제조라인 경로 탐색 문제를 효율적으로 해결하며, 안정적으로 최단 경로를 학습하였음을 확인하였다.

4.2 시뮬레이션 기반 검증

강화학습 이후 최적화된 제조라인의 각 요소 정보를 저장한 다음, 이를 기반으로 시뮬레이션을 통해 생산량 분석을 진행하였다. 제조라인 각 요소의 사이클 타임을 기준으로 총 6시간의 전체 생산량을 도출하였다. 불용공간을 제외한 모든 시작점에서 학습한 후, 시뮬레이션을 통해 각 시나리오의 생산량을 분석하였다. 분석 결과, 해당 데이터셋은 Cycle Time이 긴 Station들이 강화학습 단계에서 병렬 Cell로 배치되어 작업이 동시에 이루어질 수 있도록 설계되었기 때문에 생산량 관점에서 유효한 차이가

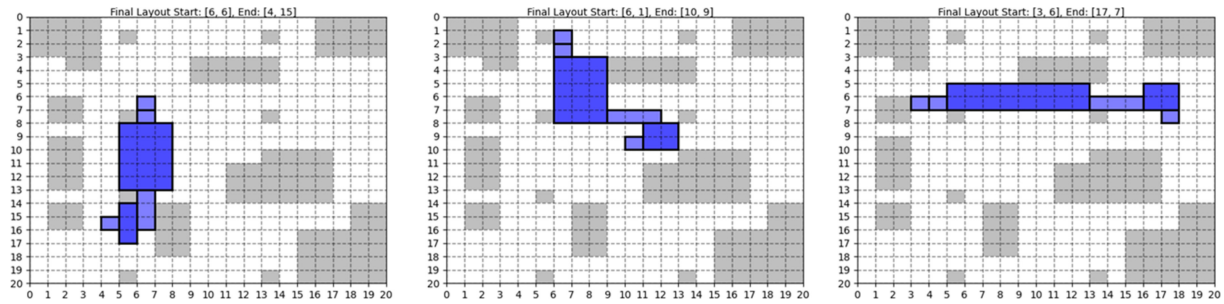


Fig. 7 The top three scenarios

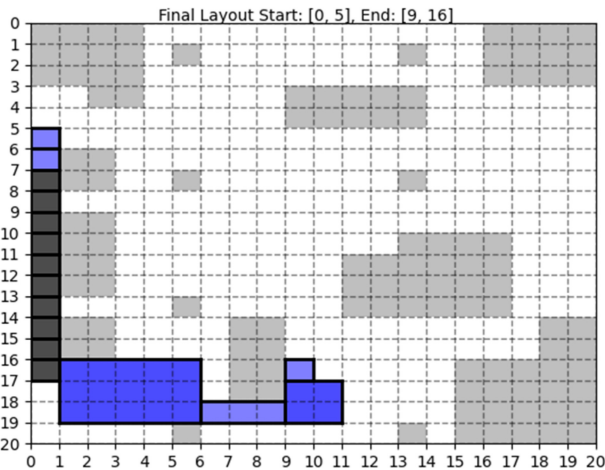


Fig. 8 Most inefficient layout

Table 4 Indicator analysis

Start Point	Production #	# of Conveyors	# of Turns	Space usage
(2,8)	414	2	0	0.090
(3,6)	416	0	1	0.090
(4,8)	414	0	0	0.118
(6,1)	416	0	2	0.087

나타나지 않았다. 따라서 Table 4와 같이 모든 최종 시나리오 결과를 바탕으로 경로의 꺾임 횟수와 추가된 Conveyor 개수, 공간 차지율을 함께 분석하여 추가적인 효율성 평가를 수행하였다.

네 가지 관점에서의 상위 3가지 시나리오를 Fig. 7에 나타냈다. 이러한 시나리오에서는 경로 복잡성이 낮고 꺾임 횟수가 적으며, 최소화된 Conveyor 추가가 특징이다. 도출된 최적의 시나리오 중 가장 비효율적이라고 판단한 시나리오는 Fig. 8이다. 생산량 측면에서는 큰 차이가 없었지만 추가된 Conveyor 개수가 10개로 공간 차지율이 가장 높게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 강화학습과 시뮬레이션을 활용하여 셀 종류 최적화와 제조라인의 배치 최적화를 시도하였다. 강화학습은

레이아웃 설계에서 공간 활용성과 물리적 경로의 효율성을 극대화하는 데 중점을 두었으며, 시뮬레이션은 실제 제조 환경에서 다양한 제약 조건과 물리적 제약을 반영한 결과를 제공하였다. 이를 통해 복잡한 제조 환경에서도 실질적인 성능을 보장할 수 있는 레이아웃을 설계하였다.

다만, 본 연구에서는 강화학습 모델이 특정 환경에 맞춰 학습되었기 때문에, 환경이 바뀔 경우 다시 수행해야 하는 일반화 성능의 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해 향후 연구에서는 매 에피소드마다 다른 환경을 입력하거나, Dense Block을 사용하여 네트워크의 표현력을 향상시키는 방법, 또는 환경에 대한 사전 학습을 먼저 진행하는 방법을 고려하고자 한다. 추가로 특정 데이터셋을 기반으로 모델 학습을 진행했기 때문에 두 과제 간 데이터 불균형 문제가 두드러지지 않았다. 향후 더 다양한 데이터셋을 활용한 학습을 진행할 경우, 과제 간 선택 빈도를 조정하거나 Q-Network의 업데이트 방식을 개선하는 방안을 고려할 예정이다.

본 연구에서는 강화학습과 시뮬레이션이 별도로 수행되었기 때문에, 두 프로세스 간의 실시간 상호작용이 제한적이다. 향후 연구에서는 강화학습과 시뮬레이션을 실시간으로 통합하여 단일 프레임워크 내에서 물리적 최적화와 논리적 최적화를 동시에 달성하는 방법론을 제안할 예정이다. 강화학습의 보상 체계는 시뮬레이션 결과를 즉각 반영하여, 공간 활용성과 물류 경로 최적화 뿐만 아니라, 제조 공정의 실제 성능까지 포함하는 다각적 관점에서의 최적화가 가능하도록 설계할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Pérez-Gosende, P., Mula, J., Díaz-Madroñero, M., (2021), Facility layout planning, An extended literature review, International Journal of Production Research, 59(12), 3777-3816.

2. Drira, A., Pierreval, H., Hajri-Gabouj, S., (2007), Facility layout problems: A survey, *Annual reviews in control*, 31(2), 255-267.
3. Steinbrunn, M., Moerkotte, G., Kemper, A., (1997), Heuristic and randomized optimization for the join ordering problem, *The VLDB journal*, 6, 191-208.
4. Singh, S. P., Sharma, R. R., (2006), A review of different approaches to the facility layout problems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 425-433.
5. Luenberger, D. G., Ye, Y., (1984), *Linear and nonlinear programming*, Springer.
6. Nordin, N. N., Lee, L. S., (2016), Heuristics and metaheuristics approaches for facility layout problems: A survey, *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*, 2(3), 62-76.
7. Yang, X.-S., (2011), Metaheuristic optimization: Algorithm analysis and open problems, *International Symposium on Experimental Algorithms*, 21-32.
8. Ikeda, H., Nakagawa, H., Tsuchiya, T., (2022), Towards automatic facility layout design using reinforcement learning, *FedCSIS (Communication Papers)*, 11-20.
9. del Real Torres, A., Andreiana, D. S., Ojeda Roldán, Á., Hernández Bustos, A., Acevedo Galicia, L. E., (2022), A review of deep reinforcement learning approaches for smart manufacturing in industry 4.0 and 5.0 framework, *Applied Sciences*, 12(23), 12377.
10. Lee, S. H., Ji, S. Y., (2021), Development of an AI-based spatial arrangement simulator using reinforcement learning, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 37(11), 43-53.
11. Choi, H., Yu, S., Lee, D., Noh, S. D., Ji, S., Kim, H., Han, J., (2024), Optimization of the factory layout and production flow using production-simulation-based reinforcement learning, *Machines*, 12(6), 390.
12. Klar, M., Schworm, P., Wu, X., Simon, P., Glatt, M., Ravani, B., Aurich, J. C., (2024), Transferable multi-objective factory layout planning using simulation-based deep reinforcement learning, *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 487-511.
13. Mnih, V., (2013), Playing atari with deep reinforcement learning, *arXiv:1312.5602*.
14. Sutton, R. S., Barto, A. G., (2018), *Reinforcement learning: An introduction*, MIT Press.
15. Watkins, C. J., Dayan, P., (1992), Q-learning, *Machine Learning*, 8, 279-292.
16. Arulkumaran, K., Deisenroth, M. P., Brundage, M., Bharath, A. A., (2017), Deep reinforcement learning: A brief survey, *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(6), 26-38.
17. Farebrother, J., Machado, M. C., Bowling, M., (2018), Generalization and regularization in dqn, *arXiv:1810.00123*.
18. Zeigler, B. P., Muzy, A., Kofman, E., (2018), *Theory of modeling and simulation: Discrete event & iterative system computational foundations*, Academic Press.
19. Van Tendeloo, Y., Vangheluwe, H., (2015), Pythonpdevs: A distributed parallel devs simulator, *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium*, 91-98.
20. Choi, S. H., Kim, B. S., (2024), Intelligent factory layout design framework through collaboration between optimization, simulation, and digital twin, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-15.



Ye Ji Choi

M.Sc. candidate in the Department of Applied Artificial Intelligence, Seoul National University of Science and Technology. Her research interests are Reinforcement Learning, Simulation and AI.

E-mail: yeji11138@naver.com



Minsung Kim

Undergraduate student in the Department of Applied Artificial Intelligence, Seoul National University of Science and Technology. Her research interests are Digital Twin, Simulation and AI.

E-mail: ideagalaxy@seoultech.ac.kr



Byeong Soo Kim

He received his BS, MS and Ph.D. in electrical engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea, in 2010, 2012 and 2018, respectively. Currently, he is an Assistant Professor of the Department of Applied Artificial Intelligence at Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech). Before joining the faculty at SeoulTech in 2022, he worked as a Staff Engineer at Samsung Electronics from 2018 to 2020, then as an Assistant Professor in the School of Software Convergence at Myongji University from 2020 to 2022. His research focuses on digital twin, data-driven modeling, modeling & simulation (M&S) of discrete event systems, convergence of artificial intelligence & simulation, and smart manufacturing. He is also interested in convergence research of various ICTs in the era of the fourth industrial revolution.

E-mail: bskim@seoultech.ac.kr

창간

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

목적 및 연구 범위

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

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

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

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

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

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고자)

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

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

제4조 (연구범위)

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

제5조 (투고 구분)

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

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

제6조 (접수)

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

제7조 (심사 및 게재 결정)

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

제8조 (저작권)

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

제9조 (자료공개)

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

제10조 (원고작성요령)

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

제11조(게재료)

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

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문집필요령

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고 및 접수)

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

제3조 (심사위원 선정)

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

제4조 (심사 방법)

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

제5조 (심사 기간)

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

제6조 (저자수정기한)

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

제7조 (게재 판정)

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

제8조 (특집논문심사)

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제9조 (비밀유지)

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

제10조 (이의제기)

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

제11조 (심사료)

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

제 1 장 총칙

제1조 (목적)

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

제2조 (윤리규정 적용범위)

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

제3조 (부정행위의 범위)

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

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

제 2 장 저자

제4조 (저자의 정직성)

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

제5조 (저자의 기준)

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

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

제6조 (저자의 준수사항)

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

제7조 (편집위원 준수사항)

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

제8조 (심사위원 준수사항)

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

제 4 장 검증 절차와 기준

제9조 (윤리위원회)

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

제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

제14조 (피조사자 권리 보호)

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

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

제16조 (조사결과의 보고)

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

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

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

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

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

회원(사) 구성

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

관련정부기관과의 관계

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

주요활동현황

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

발간자료

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

발행규정

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

부문위원회 활동

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

특별회원사 가입

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

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

생산기술상, 정밀기술상

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

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

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

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

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

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

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

KSPE Young Researcher Award

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

특별상

가헌학술상

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

현송공학상

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

유정백합학술상

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

백암논문상

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

Year of Launching

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

Aims and Scope

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

Fee

Subscription Fee:

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

Publication Fee:

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

Contact Us

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

Rules for Submitting and Publishing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submitter

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

Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

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

Article 4 Scope of Research

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

Article 5 Categorization of Submissions

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

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

Article 6 Submission

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

Article 7 Review and Decision to Publish Paper

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

Article 8 Copyright

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

Article 9 Disclosure of Materials

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

Article 10 Manual of Style

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

Article 11 Publication Fees

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

Guidelines for Manuscript Writing

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

Author's Check List

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

Rules for Reviewing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submission and Reception

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

Article 3 Selection of Reviewers

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

Article 4 Review Procedure

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

Article 5 Review Period

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

Article 6 Deadline for Author's Revision

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

Rules for Reviewing Papers

Article 7 Decision over Publication

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

Article 8 Review of Special Papers

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

Article 9 Confidentiality

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

Article 10 Objection

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

Article 11 Review Fee

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 1 Overall Rules

Article 1 Purpose

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

Article 2 Application Area of Code of Ethics

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

Article 3 Scope of Misconduct

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

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

Chapter 2 Author

Article 4 Honesty of Author

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

Article 5 Authorship

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

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 6 Compliance of Authors

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

Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

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

Article 8 Compliance of Reviewers

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 4 Verification Process and Standard

Article 9 Ethics Committee

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

Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

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

Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

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

Article 12 Reporting Research Misconduct

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions

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

Article 14 Protection of Rights of Examinee

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

Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation

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

Article 16 Report of Investigation Result

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

Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

Title	Korean
	English
Authors	

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

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

**Corresponding
Author's
Signature**

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

**Corresponding
Author**

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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 26 · Number 3 · March 2025

REGULAR PAPERS

Influence of Hot Isostatic Pressing on Different Crack Modes of Laser Powder Bed Fusion-Processed CM247LC: Alternative Process Parameters Considering Post-processing

J. Koo · J.E. Kim · U. Auyeskhani · S. Park · I.D. Jung · N. Kim 513

Robotic Assembly of Shaft Sleeves in Different Sizes Based on Deep Reinforcement Learning

X. Ma · D. Xu 527

A Performance Evaluation of Precise Micro Turning Process using TOPSIS-GRA-ANN

V. Chavan · B. Rajiv 539

Design and Characteristics Study of Longitudinal–Torsional Piezoelectric Ultrasonic Transducers

D. An · Y. Huang · J. Li · W. Huang 559

Robust Design of a Elastomeric Surface with Dimpled Pillar Pattern for Directional Friction of a Robot Gripper

W. Lee · J. Choi · M. Lee · T. Seo 569

Tracking and Stiffness Control Based on Sliding Modes Design for a Wrist-Elbow Rehabilitator

A. Camacho-Ramirez · J.C. Avila-Vilchis · M. Jiménez-Lizárraga · B. Saldivar · A.H. Vilchis-González · J.M. Jacinto-Villegas 583

Priority Analysis and Optimization for Accuracy Allocation of Precision Grinding Machine Considering Manufacturing Accuracy and Cost

X. He · K. Zhang · R. Li · W. Tang · Y. Peng 599

Study on Optimization Method for CNC Machining Plastic-Shaped Appliances Based on ICOA Algorithm

G. Chen · B. Zhou · X. Zhao · Z. Zhang · Q. Yan · J. Mao 613

Development of a Novel Type of Modularized Fast Tool Servo Devices for Manufacturing Complex Optical Surfaces

R. Wang · B. Liu · H. Meng · X. Zhou 635

Study on Arc Behavior and Weld Formation of Magnetically Controlled Narrow Gap TIG Welding

H. Zhao · S. Zhang · X. Yu · Y. Li · J. Miao · X. Xu · Y. Chang 651

The High Cycle Bending Fatigue Property of Quenched Crankshaft Based on the Stress Field Intensity Method and the Multi-physics Field Coupling Numerical Simulation Approach

S. Shen · Q. Gao · H. Hu · Y. Xu · S. Sun 663

Micro Drilling 3D Printed Cobalt Chromium Molybdenum for Biomedical Applications: An Experimental Study on the Tool Wear and Machinability

M.A. Abdul Patar · M.A. Suhaimi · S. Sharif · A.S. Mohruni · Z. Kejia 675

Ultrasonic Properties of Multi-material SS420-IN718 Structures Fabricated Using Laser Directed Energy Deposition

Z. Miles · B. Aydogan · G. Huanes-Alvan · H. Sahasrabudhe · S.K. Chakrapani 689

Investigation of Galvanometer Scanner Failure During the Laser Processing of High Reflectivity Materials and Concrete Composite Materials

M.M. Lian · S. Baek · D. Lee 701

Experimental Study of Multidimensional Ultrasonic Vibration-Assisted Milling of SiCp/Al Composites

S. Liang · J. Sang · B. Su · Y. Zhang · Z. Cai · G. Liu · D. Xiang 711

A Method to Enhance the Depth-to-Diameter Ratio of Micro-Holes Drilled with EDM Using the Pressure Difference Created at the Hole Entrance

Y. Chen · D. Mi · W. Natsu 727

REVIEW PAPERS

Review on Transformable Wheel: Mechanism Classification and Analysis According to Mechanical Complexity

I. Park · H. Yoon · S. Kim · H.S. Kim · T. Seo 737

Smart Mechanical Structures and Design for Advanced Adhesives: A Review

J. Kim · G. Choi · S. Park · M. Kim · K. Kim · H.-S. Jung · M.K. Kwak · J.G. Ok · H.E. Jeong 757

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 12 · Number 2 · March 2025

REGULAR PAPERS

Machining and Sustainability Performance Comparison for the Milling Process of Al6082 Alloy Under Various Minimum Quantity Lubrication Conditions

Y.F. Yapan · K. Türkeli · U. Emiroğlu · E. Bahçe · A. Uysal 409

Flux Filling Rate Effect on Weld Bead Deposition of Recycled Titanium Chip Tubular Wire

A.M. Moreno-Urbe · J.G. Fagundes Jr. · I.L. Criscuolo · T. Hassel · A.Q. Bracarense 431

Application of Nanofluid Composite Electrostatic Spraying in Machining of Aluminum Alloy: Effects of External/Internal Fluids

Y. Su · J. Liu · J. You · Q. Yang · Z. Liu 441

Integration of Cu-Doped TiO₂ Nanoparticles on High Surface UV-Laser-Induced Graphene for Enhanced Photodegradation, De-icing, and Anti-bacterial Surface Applications

J.U. Lee · B.-S. Kang · Y.-W. Ma · R. Aguiar · B.-S. Shin · P.C. Lee 459

Influence of Mechanochemical Effect on Deformation Behavior of Aluminum Cutting Layer Under Electrostatic Catalysis

Y. Wang · W. Wang · Y. Xia · X. Hu · R. Zhang · M. Wang · X. Xu 473

Machining-Induced Damage and Corrosion Behavior of Monel-400 Alloy Under Cryogenic Cooling Conditions: A Sustainable Initiative

A. Demirbaş · U. Kökçü · S. Morkavuk · K. Giasin · E. Kocaman · M. Sarıkaya 493

Enhancing Bond Strength Between Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic and Aluminum Alloys Through Laser Surface Treatment

H. Wang · S.C. Woo · J.H. Kim · C.-K. Sim · S.-K. Cheong · J. Kim 509

Deposition Stability and Forming Characteristics in Laser-Arc Hybrid Additive Manufacturing of Aluminum Alloy Through Beam Oscillation

Y. Meng · Q. Yu · X. Wu · Y. Ye · J. Liao · X. Guo · A. Deng · H. Chen 521

Multiphysics Simulation of Continuous Liquid Interface Production (CLIP) 3D Printing Technology

D.J. Kaijage · B.J. Lee 541

Bipolar Current Collectors of Carbon Fiber Reinforced Polymer for Laminates of Structural Battery

B.J. So · Y. Han · G. Shin · H.J. Kim · J.H. Lee · J.G. Jeon · T.J. Kang 553

Combinatorial Deposition of Pinhole-Free and High-Performance, Nanothin Electrolyte for Hydrogen-Fueled, Low-Temperature Solid Oxide Fuel Cells Supported on a Porous Substrate

S. Ji · G.Y. Cho · H.G. Seo · N. Park · M. Kim · W. Kim · S.W. Cha 565

Techno-Economic Analysis of Grid-Connected Highway Solar EV Charging Station

D. Eom · J. Choi · J. Song · B. Park · S.J. Kim · S. Park 573

Numerical Investigation of In-Line and Staggered Trap Channels in the Serpentine Flow Field of PEMFCs

B.H. Nguyen · H.C. Kim 591

Environment-Friendly, High-Performance Lignin-Derived and Polyvinyl Alcohol Blended Resin for All-Green Natural Fiber-Reinforced Composite

D.H. Pham · B. Kumar · J. Kim 607

Laser-Ablated Interlaced Micropatterns on CFRP and Ti-64 Plates to Improve Single-Lap Adhesive Joining Strength

S.-F. Tseng · Y.-S. Chen · T.-W. Gao 621

Optimization of Fiber Radiation Processes Using Multi-Objective Reinforcement Learning

H.K. Choi · W. Lee · S.M.M. Sajadieh · S. Do Noh · S.B. Sim · W.c. Jung · J.H. Jeong 637

REVIEWS

Application of Hybrid Nanofluids in MQL Assisted Machining Operations: Exploring Synergies and Establishing Guidelines

J.V. Abellán-Nebot · K.H. Ameen · A.M. Khan · R. Mondragón 657

Bacterial Nanofactories: An In-Depth Insight to Potential Green Technology

A. Singh · A. Gautam · N. Tyagi · H. Dabral · M.C. Joshi · P.K. Verma · A. Singh · H.R. Kushwaha **691**

Recent Progress of Chatter Detection and Tool Wear Online Monitoring in Machining Process: A Review and Future Prospects

F. Qin · H. Cao · G. Tao · H. Yi · Z. Chen **719**

Recent Progress in Self-powered Graphene-Based Triboelectric Nanogenerators

F. Salemi · F. Karimzadeh · M.H. Abbasi · F. Moradi · J. Kim **749**

CORRECTION

Correction: Multiphysics Simulation of Continuous Liquid Interface Production (CLIP) 3D Printing Technology

D.J. Kaijage · B.J. Lee **781**

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 3 · Number 1 · January 2025

REGULAR PAPERS

Development of a Defect Diagnosis Algorithm for Blow-molded Transparent Plastic Bottles based on Convolutional Neural Networks (CNN)

Young Woon Choi · Sang Won Lee 1

Operation Status Diagnosis of an Underwater Cutting Robot Using Adaptive Weighted Parallel 1D-DenseNet

Sangwook Park · Bongcheol Kim · Byeong Guk Kang · Jonghwan Lee · Dongjun Hyun · Ikjune Kim · Hyunseok Oh · Duhwan Mun 7

Advanced Machine Learning Techniques for Predicting Z-Axis Belt Wear in Wafer Transfer Robots

MD Saiful Islam · Young Kyoung Ji · Kihyun Kim · Hyo-Young Kim 17

Thin Film Thickness Analysis Using a Deep Learning Algorithm with a Consideration of Reflectance Fluctuation

Joonyoung Lee · Jonghan Jin 31

Real-time Defect Detection in Wire-laser Directed Energy Deposition Process Using U-Net-based Semantic Segmentation

Yeong-Seo Kim · Seung-Mun Lee · Ju-Chan Yuk · Suk-Hee Park 39

In Situ Machine Tool Walking on Large Workpieces: Improvement of Machining Accuracy by Compensating Orientation Dependent Position Error

Chang-Ju Kim · Dae-Hyun Kim · Seung-Kook Ro 53

Heated Syringe Extrusion for Soft Gripper Fabrication in Additive Manufacturing

Kwang Yeol Yu · Woo Jin Jeong · In Hwan Lee 59

REVIEW

A State-of-art on Damage Detection of Composite Structure Using Lamb Wave and Deep Learning Techniques

Olivier Munyaneza · Do-Gyeong Yuk · Jung Woo Sohn 65

A Review on Deployable Structures in Space Industry

Suyeon Seo · Min-Woo Han 83

INDUSTRY CASE STUDY

The Development of REST API Gateway Application Using Unified CNC Interface Platform

Yeong-Deuk Kim · Dong Yoon Lee 97

2025년 제1차 이사회 회의록

◎ 일 자 : 2025년 1월 10일(금), 학회 회의실

◎ 장 소 : 학회회의실

◎ 참석자 : 안성훈, 오정석, 최영재, 김보현, 문두환, 고승환, 김창주, 김태곤, 이창우, 김남근, 김산하, 김해진, 김효영, 박영빈, 손정우, 안형준, 윤현준, 윤희택, 이동훈, 이현택, 주백석, 천두만, 김충수, 김현준, 박석희, 박 준, 안상훈, 이지혜, 이현섭, 이현욱, 주기남, 한민우, 류시형, 이동윤, 허세곤, 맹상진, 송지현, 전용호, 차석원, 심창섭, 조정대
재적 100명 중 81명(위임39명)참석

◎ 전차회의록 : 2024년 제9차 회의록 확인 및 추인

I. 주요보고사항

총무

- 2025년 이사회 및 각급 회의 일정 안내
- 주무관청-과천과학관 2025년 임원 취임 승인(2024.12.24) 및 법인등기 업무 진행 보고
- 2025-2026 평의원 선출 선거 실시 공지
 - 평의원 선거 기본사항 (정관 제22~25조, 시행규칙 제22~25조, 평의원선거관리규정)
 - 선거관리위원회 및 평의원 선거 주요일정 안내

재무

- 2024년 12월말 수입 지출 현황 보고
- 특별회계 [고유목적사업 적립금] 장기성 예금 갱신 및 신규가입 보고
- 기부금 지정 수입 및 지출보고 (2025년 1분기 수입: 1,000,000원)

편집

- IJPEM-GT OA 저널 준비 TF 팀 구성 및 준비위원 선정
- JKSPE 2024년도 인세 보고
- IJPEM 신임 Editorial Board Meeting 개최보고: 2025.1.8(수) 15:00

사업

- 2025 춘계학술대회(2025.5.14(수)-16(금), 제주신화월드)
 - 학술대회 조직위원회 구성, 등록비, 주요일정 논의
 - 임원간담회 → 만찬개최 운영(안) 검토, 등록비 연계 논의
 - 구두발표, 포스터발표 운영 방식 및 Plenary 초청강사 초청 검토
 - 일반참가자-학부생 등록비 신설: 8만원(명찰, 식사2일 제공)
- PRESM 2025 제1차 조직위원회 (2025.7.6-7.11, Chiang Mai Marriott Hotel)
 - Abstract 제출, Focus session 신청일정 및 주요일정 논의
 - Plenary 초청강사 후보(안) 검토
 - 치앙마이 메리어트 계약사항 검토 → 2025.1.13까지 1차 Deposit 입금요청
 - 2026년 개최지 논의 → 일본 삿포로

위원회

- 부문위원회 [적층제조시스템 부문위원회] 동계강습회 개최 결과 보고
 - 일시: 2024년 1월 19일-20일, 부산대학교 기계관 2층, V-space 강의실, 참가인원 31명
- [ASPEN위원회] ASPEN2025 개최 공지
 - November 25-28, 2025, Fullon Hotel Tamsui Fisherman's Wharf, New Taipei City, Taiwan
- [포상위원회] 논의사항 보고
 - 2025년 상반기 외부상 추천자
 - 2025년 내부상 한국정밀공학회상 회원대상 공지

II. 주요승인사항

1. 신입회원 인준(안) → 승인
2. 2025년 각급 위원회 및 연구회 구성(안) → 승인
3. 인사위원회 의결사항보고 → 승인
 - 1) 사무국 직원 승인(안): 길상원 주임 → 변경: 대리1호봉
 - 2) 2023년 성과급 지급(안): 연봉의 10% 지급
4. [바이오헬스]부문위원회 심포지엄 개최(안) → 승인
 - 1) 주제: 2025년도 한국정밀공학회 바이오헬스부문 춘계 워크샵
 - 2) 일시: 2025년 3월 7일(금) 15:00-18:00
 - 3) 장소: 서울성모병원 성의회관 12층 세미나실(장소변경가능)
 - 4) 주관: 한국정밀공학회 바이오헬스 부문위원회 (담당: 조원우(연세대 의공학부) 부문이사)
5. 국제학술대회 PRES2026 개최(안): 2026년 7월 5일(일)-10일(금), 일본-삿포로 → 승인

차기일정(회의)

1. 2025년 제2차 이사회: 2.14(금) 16:00 학회 회의실

신입회원인준명단

• 정회원 •

회원 번호	이름	소속	회원 번호	이름	소속
202510361	김미소	KAIST	202510363	김영민	충남대학교
202510365	송시한	(주)와이자원			

2025년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

안성훈(서울대학교)

수석부회장

이상원(성균관대학교)

부회장

오정석(한국기계연구원)
이영수(삼성전자)

김구민(경북대학교)
이인환(충북대학교)

김호찬(국립경국대학교)
최영재(한국생산기술연구원)

류상문(DN솔루션즈)

박상후(부산대학교)

감사

이경창(부경대학교)

현승민(한국기계연구원)

총무이사

김동성(POSTECH)

김보현(숭실대학교)

문두환(고려대학교)

추원식(경상국립대학교)

재무이사

고승환(서울대학교)

김창주(한국기계연구원)

김태곤(한국생산기술연구원)

이창우(건국대학교)

편집이사

강봉철(국민대학교)
김산하(KAIST)
김효영(한국공학대학교)
안형준(숭실대학교)
이광일(경일대학교)
이호원(서울대학교)
천두만(울산대학교)

강현욱(UNIST)
김석민(중앙대학교)
박근(서울과학기술대학교)
오기용(한양대학교)
이동원(전남대학교)
정구현(울산대학교)
황지홍(서울과학기술대학교)

곽문규(경북대학교)
김양진(부산대학교)
박영빈(UNIST)
윤준영(연세대학교)
이동훈(숭실대학교)
정훈의(UNIST)

김남근(서강대학교)
김영진(KAIST)
손정우(금오공과대학교)
윤현준(숭실대학교)
이윤석(서울대학교)
주백석(금오공과대학교)

김동립(한양대학교)
김해진(연세대학교)
안지환(POSTECH)
윤희택(KAIST)
이현택(인하대학교)
진종한(썬미터랩)

사업이사

강윤정(제주대학교)
김종백(연세대학교)
박용재(강원대학교)
안상훈(한국기계연구원)
이원균(충남대학교)
장진아(POSTECH)
최정욱(중앙대학교)

강태준(인하대학교)
김진호(영남대학교)
박준(한국광기술원)
엄광문(건국대학교)
이지혜(한국기계연구원)
정영훈(경북대학교)
한민우(동국대학교)

권지연(동국대학교)
김중수(Eloj Materials (EML))
서진호(부경대학교)
윤주성(경남대학교)
이현섭(동아대학교)
정재일(국민대학교)

김우림(한국로봇융합연구원)
김현준(경북대학교)
송용남(고려대학교)
이문구(아주대학교)
이현욱(한국철도기술연구원)
조영삼(원광대학교)

김승중(고려대학교)
박석희(부산대학교)
신형정(KAIST)
이봉기(전남대학교)
임지석(영남대학교)
주기남(조선대학교)

기획홍보이사

노유정(부산대학교)

류시형(전북대학교)

이동윤(한국생산기술연구원)

이주연(서울과학기술대학교)

허세곤(한국기계연구원)

국제이사

김미소(성균관대학교)
박형욱(UNIST)
차석원(서울대학교)

김영범(한양대학교)
송지현(단국대학교)
허윤정(경희대학교)

남정수(한국생산기술연구원)
이동진(건국대학교)
홍성태(울산대학교)

노준석(POSTECH)
전용호(아주대학교)

맹상진(홍익대학교)
조영태(장원대학교)

대의협력이사

권석진(한국철도기술연구원)
성대운(현대자동차)
장원석(한국기계연구원)

김건희(한밭대학교)
송시한(주와이지-원)
조영환(LIG넥스원(주))

김경동(한국공작기계산업협회)
심창섭(한국산업기술평가관리원)
조정대(한국기계연구원)

김민찬(DN솔루션즈)
이강재(DN솔루션즈)
최정오(LG전자)

김종혁(현대위아)
이재열(한국로봇융합연구원)
한국현(주삼영기계)

특별회원사

다아아몬드

신도리코(주)
(주)이수페타시스
화전기공(주)

(주)키슬러코리아
(주)케이씨텍

(주)DN솔루션즈
한국화낙(주)

LIG넥스원(주)
현대위아(주)

(주)스맥
(주)화신정공

골드

(주)마리알로
(주)프로토텍

(주)어드밴테크코리아
핵사곤

(주)에이스나노켐

(주)엔도로보틱스

지앤피테크놀로지(주)

실버

(주)와이지-원

(주)웨이퍼펍

한국공작기계산업협회

패밀리

BIOPAC Systems KOREA
에이비씨무역
(주)비솔
(주)이엠엘
(주)달텐코리아

디케이에스에이치코리아(주)
위즈옵틱스
(주)스팀솔루션
(주)캐리마
테크엘케이(주)

리파인(주)
(주)넥스페이스
(주)스포스
(주)케이랩스
QED Technologies

맥스트레이딩
(주)디엔디이
(주)에이엠코리아
하비스탕스(주)
오엠에이이엔지(유)

삼성SDI
(주)미터랩
(주)에임즈
한국데베소프트

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

박형욱 UNIST	이광일 경일대학교	고승환 서울대학교	곽문규 경북대학교
조영학 서울과학기술대학교	안지환 POSTECH	추원식 경상국립대학교	강성목 대구카톨릭대학교
김무림 한국로봇융합연구원	이창우 건국대학교	주백석 금오공과대학교	김동성 POSTECH
손정우 금오공과대학교	김기주 동명대학교	이창환 서울과학기술대학교	정구현 울산대학교
천두만 울산대학교	문두환 고려대학교	박민수 서울과학기술대학교	이현섭 동아대학교
황지홍 서울과학기술대학교	김양진 부산대학교	진중환 (주)미터랩	전용호 아주대학교
박정재 (주)미터랩			

Members of Editorial Board

강봉철 국민대학교	강현욱 UNIST	주기남 조선대학교	김남근 서강대학교
김창주 한국기계연구원	허세곤 한국기계연구원	김효영 한국공학대학교	배장호 경성대학교
윤해성 한국항공대학교	김산하 KAIST	이동훈 송실대학교	이봉기 전남대학교
이호원 서울대학교	장진아 POSTECH	맹상진 홍익대학교	안상훈 한국기계연구원
최동휘 경희대학교	최영만 아주대학교	최정욱 중앙대학교	최진승 건국대학교
김갑용 Iowa State Univ.	김범준 Univ. of Tokyo	김우균 Univ. of Cincinnati	민상기 Univ. of Wisconsin-Madison
Simon Park Univ. of Calgary	Patrick Kwon San Diego State Univ.		

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 42, NUMBER 3/ March 2025

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

월간 · 제42권 제3호 [통권 제408호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2025년 2월 25일

발행일 2025년 3월 1일

발행인 안성훈

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

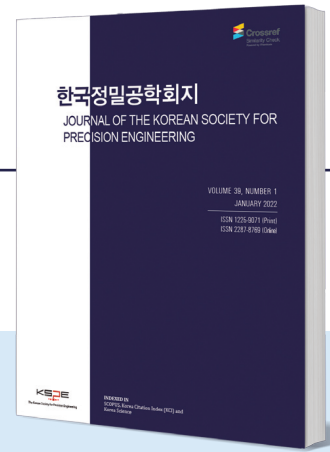
국내학술대회(춘·추계) / (02)393-0725 / conf@kspe.or.kr

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

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

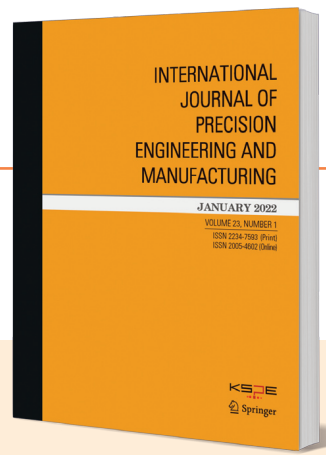
1. Full Open Access
2. Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

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



2023 Impact Factor: 2.6

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
2000년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행
ISSN 2234-7593(Print) / 2005-4602(Online)

INTRODUCTION

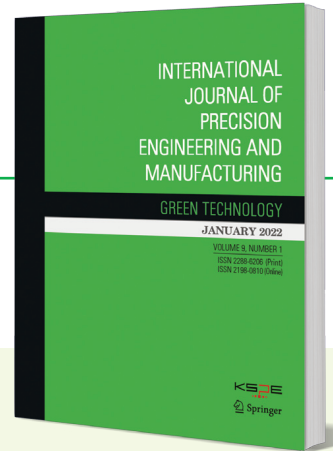
1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

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



2023 Impact Factor: 5.3

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

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY

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 2023 impact factor is 5.3, which ranks it top 9.5% (17/180) journal in the category of Engineering-Mechanical and top 23.5% (16/68) journal in the category of Engineering-Manufacturing.

Impact Factor

5.3 by JCR in 2023



Topics of the Special Issue cover novel research contributions of “**Green**” precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Autonomous Manufacturing with Green Technology

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- ◆ **AI-driven Process**
- ◆ **Digital Twin**
- ◆ **Automations in Green Manufacturing**
- ◆ **Environment-conscious Intelligent Manufacturing**

Guest Editors

- Professor Martin B.-G. Jun
Purdue University, USA
- Professor Young Tae Cho
Changwon National University, Korea
- Professor Sanha Kim
KAIST, Korea
- Professor Seok Kim
Changwon National University, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date:
November 30, 2024
Publication Date: **May 1, 2025**
Volume, Number: **Vol. 12, 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. 3 No. 1 January 1, 2025
Vol. 3 No. 2 July 1, 2025

• Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

Editorial Board

Editor-in-Chief

Sang Won Lee / Sungkyunkwan University, Korea

Co-Editors-in-Chief

Jay Lee / University of Maryland, USA

Jun Ni / University of Michigan, USA / Shanghai Jiao Tong University, China

Editors

Hyeong-Joon Ahn / Soongsil University, Korea

Hae-Jin Choi / Chung-Ang University, Korea

Chih-Hsing Chu / National Tsing Hua University, Taiwan

Martin B.-G. Jun / Purdue University, USA

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Seungchul Lee / POSTECH, Korea

Sangkee Min / University of Wisconsin-Madison, USA

Seung-Ki Moon / Nanyang Technological University, Singapore

Duhwan Mun / Korea University, Korea

Simon Park / University of Calgary, Canada

Editorial Board

Seung-Kyum Choi / Georgia Institute of Technology, USA

Haseung Chung / Michigan State University, USA

Youngkuk Jeong / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Yongho Jeon / Ajou University, Korea

Jay-I. Jeong / Kookmin University, Korea

Hyungjung Kim / Seoul National University, Korea

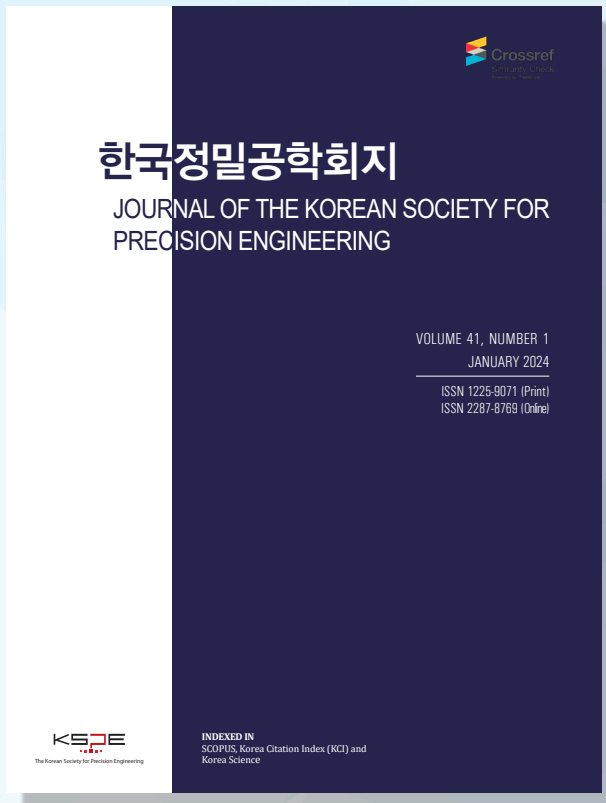
Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

David Rosen / Agency for Science, Technology and Research, Singapore

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea



SCOPUS, KCI 등재 학술지

학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

Scope

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

학술대회 Full Paper
논문을 투고 시 게재료가
면제됩니다.

논문 본문을 영문으로
작성하여 투고 시, 게
재료가 청구되지 않습
니다.

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

Editorial Board

• Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim(Soongsil University)

• Editors

Hyung Wook Park (UNIST)

Kwang-Il Lee (Kyungil University)

Seung Hwan Ko (Seoul National University)

Moonkyu Kwak (Kyungpook National University)

Younghak Cho (Seoul National University of Science & Technology)

Jihwan An (POSTECH)

Won-Shik Chu (Gyeongsang National University)

Sung-Mook Kang (Daegu Catholic University)

Maolin Jin (Korea Institute of Robotics & Technology Convergence)

Changwoo Lee (Konkuk University)

Baeksuk Chu (Kumoh National Institute of Technology)

Dong Sung Kim (POSTECH)

Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology)

Kee Joo Kim (Tongmyong University)

Chang-Whan Lee (Seoul National University of Science & Technology)

Koo Hyun Chung (University of Ulsan)

Doo-Man Chun (University of Ulsan)

Duhwan Mun (Korea University)

MinSoo Park (Seoul National University of Science & Technology)

Hyunseop Lee (Dong-A University)

Jihong Hwang (Seoul National University of Science & Technology)

Yang Jin Kim (Pusan National University)

Jonghan Jin (Meter-lab)

Yongho Jeon (Ajou University)

Jungjae Park (Meter-lab)

AWARDS

JKSPE Awards

– 한국정밀공학회지에 발표된 논문 중 가장
탁월한 가치의 논문저자에게 포상

INDEXED IN

- SCOPUS
- Korea Citation Index (KCI)
- Korea Science

Submission to JKSPE Search for JKSPE

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



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



paper@kspe.or.kr
<http://www.kspe.or.kr>



12F, SKY1004 Bldg., 50-1
Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,
04508, Republic of Korea

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



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

FOR WORLD

Leading Innovation Group

LIG

KSPE 2025 **SPRING** CONFERENCE

2025 한국정밀공학회 춘계학술대회

2025.5.14.Wed. - 5.16.Fri.
제주신화월드 (제주서귀포시)

200단어
초록 마감

2025. 3. 10.
Mon

초록채택
통지

2025. 3. 21.
Fri

사전등록
마감

2025. 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



주최 : KSGE 사단
법인 한국정밀공학회

문의 : 한국정밀공학회 사무국 Tel (02)518-0722, (02)393-0725 E-mail conf@kspe.or.kr Homepage <http://www.kspe.or.kr/event/>

PRESM 2025

July 6 Sun — **11** Fri, 2025

Chiang Mai Marriott Hotel, Chiang Mai, Thailand

Important Dates

Deadline for Abstract Submission
of Regular Session:

February 3 (Mon), 2025

Date for Acceptance Notification:
(Mail from the PRESM Secretariat)

March 31 (Mon), 2025

Deadline for Early Registration/
Presenter Registration:

May 1 (Thu), 2025

Full Paper Submission (Optional):

May 1 (Thu), 2025

Awards & Honors

- Best Paper Awards
- Young Researcher Awards
- Outstanding Presentation Awards

Participating Journals

1

International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing (IJPEM)
*SCIE, SCOPUS / Impact Factor 2.6 (2023)

2

International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing-Green
Technology (IJPEM-GT)
* SCIE, SCOPUS / Impact Factor 5.3 (2023)

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



Chiang Mai University
(CMU, Thailand)



Science and Technology Park,
Chiang Mai University (STeP, Thailand)



The Japan Society for
Precision Engineering (JSPE, Japan)



Taiwan Society for
Precision Engineering (TSPE, Taiwan)

Secretariat

Homepage www.presm.org | Email presm@kspe.or.kr | Tel +82-2-383-0725



한국정밀공학회

Korean Society for Precision Engineering

2025년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2025

KSPE 2025
Spring
Conference

춘계학술대회

KSPE 시정
합한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2025.
5.14(수)-16(금)

제주 신화월드
(제주도 서귀포시)

International Conference on
PRrecision Engineering and Sustainable Manufacturing

PRESM 2025

2025.7.6(일)-11(금)

Chiang Mai Marriott Hotel
Chiang Mai, Thailand

KSPE 시정
합한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회

2025

KSPE 2025
Autumn
Conference

추계학술대회

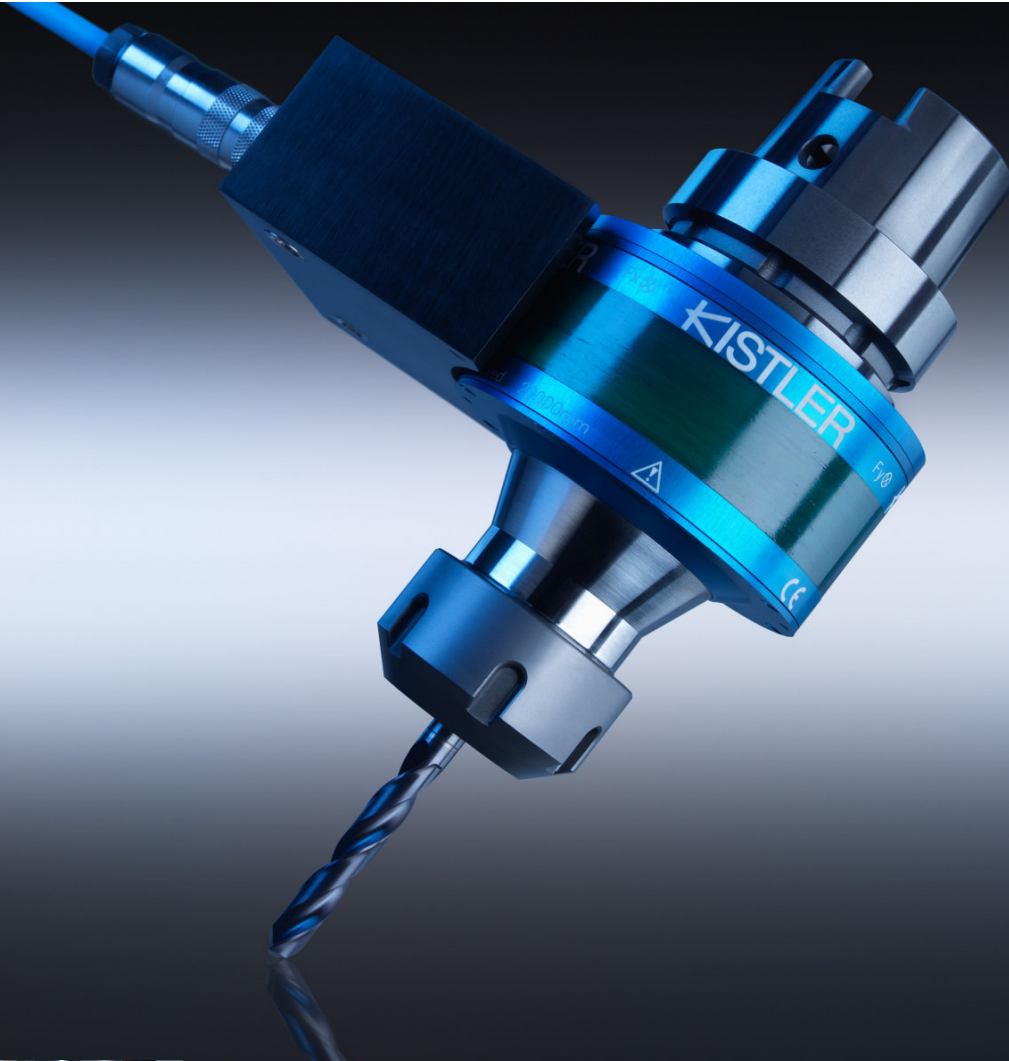
KSPE 시정
합한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2025.
11.12(수)-14(금)

여수 EXPO
(전라남도 여수시)

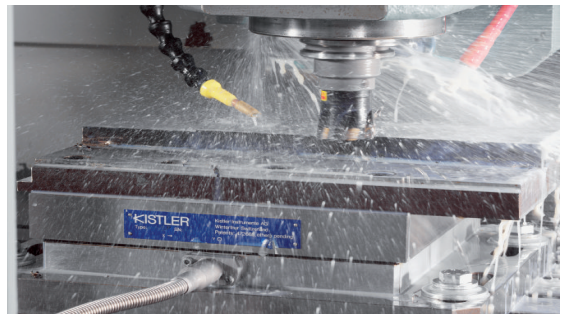
KISTLER

measure. analyze. innovate.



절삭력측정을위한공구동력계

Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement



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

담당자: 최 장원 과장 , 010-2675-9466 www.kistler.com