

# 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 42, NUMBER 1

JANUARY 2025

---

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

# 취임사



**안성훈**  
서울대학교

존경하는 한국정밀공학회 회원 여러분,  
2025년 새해를 맞이하며, 제30대 회장으로로서 여러분께 인사드리게 되어 영광입니다. 창립 이후 지난 41년간 학회가 이루어온 눈부신 성장은 전임 회장단, 회원 여러분, 그리고 사무국 직원들의 헌신적인 노력 덕분입니다. 이 자리를 빌려 깊은 감사의 말씀을 전합니다.  
국내외적으로 정치, 경제, 산업 환경이 어려운 가운데, 우리 학회는 정밀공학 분야의 중심축으로서 국가와 사회에 기여해야 할 막중한 책임을 안고 있습니다. 이를 위해 KSPE Vision 2030의 중간 점검을 통해 학회의 발전 방향을 점검하고, 필요시 재정립하고자 합니다. 회원 여러분의 소중한 의견을 청취하며, 아래와 같은 주요 과제를 추진하겠습니다.

## 1. 학술지 개방화와 지식 공유

우리 학회의 학술지인 한국정밀공학회지(J-KSPE), IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology는 국내 최고 수준을 넘어 국제적인 학술적 영향력을 확대하고 있습니다. 올해부터 IJPEM과 IJPEM-GT이 사용하는 EM(editorial management) 시스템을 한국정밀공학회지와 IJPEM-ST에도 도입하여, 학술지 모두 논문 투고와 심사 과정을 국제적 표준에 맞춰 통합하겠습니다. IJPEM-ST로 시작된 학술지의 완전한 오픈 액세스(Full Open Access) 정책을 IJPEM-GT에 적용해 학계뿐 아니라 산업계에서도 누구나 최신 연구와 기술 동향에 쉽게 접근할 수 있게 체계를 개편하겠습니다.

## 2. 산학연 협력 강화

정밀공학은 정밀기계 뿐만 아니라 대한민국의 핵심 산업인 자동차, 반도체, 배터리, 그리고 차세대 산업인 로봇, 국방, 바이오 메디컬 분야와 긴밀히 연계되어 있습니다. 학술대회에서 산업체 세션을 활성화하고, 임원진에 산업체와 연구소의 참여를 확대하여 학문과 산업의 연결고리를 더욱 강화하겠습니다. 정밀공학의 기술과 경험이 산업 현장에 적용될 수 있도록, 산학연이 함께 지식과 경험을 공유할 기회를 늘려나가겠습니다.

## 3. 국제적 협력과 글로벌 도약

우리 학회의 학문적 성과와 산업적 기술은 세계적인 수준에 도달했으나, 이제는 세계 선도 단계로의 진입을 목표로 해야 합니다. 올해 개최되는 PRESM 2025와 ASPEN 2025는 다양한 국가의 연구자들과 최신 연구 동향을 공유하고, 우리 기술과 연구자 역량을 세계적으로 홍보할 수 있는 중요한 기회입니다. 선진국 연구자들과의 협력과 경쟁을 통해 국제적 위상을 높이는 동시에, 개발도상국과의 협력을 통해 국가 간 상호 발전의 발판을 마련하겠습니다.

새로운 도전과 변화의 시기인 2025년, 한국정밀공학회가 또 한 단계 도약하기 위해 회원 여러분의 적극적인 참여와 협조를 부탁드립니다. 모든 회원님들의 발전과 건승을 기원하며, 학회의 비전과 목표를 함께 실현해 나가기를 희망합니다. 소중한 의견과 제안을 아낌없이 나눠주시길 바랍니다.  
감사합니다.

2025년 1월  
사단법인 한국정밀공학회 2025년 회장 **안성훈**

K-Precision, Smart & Green!!

# 이 인사



**민 병 권**  
연세대학교

회원 여러분, 2025년 새해 복 많이 받으십시오.

2024년 한 해 동안 학회와 함께한 소중한 시간을 돌아보며, 회장으로서 이임 인사를 드립니다. 지난 한 해 학회를 위해 일할 수 있었던 것은 세계 큰 영광이자 보람이었습니다. 임기를 무사히 마칠 수 있었던 것은 학회 임직원 여러분의 헌신과 회원 여러분의 적극적인 참여 덕분입니다. 진심으로 감사드립니다.

우리 학회는 지난 40년간 정밀공학 분야에서 선도적인 역할을 해오며, 국내외에 중요한 학술단체로 자리 잡았습니다. 2020년, 학회는 “Vision 2030: 영원히 지속 가능하고 풍요로운 삶을 위한 정밀공학”을 선포하며 미래를 향한 비전을 제시했습니다. 2024년은 비전 실행의 절반을 이루는 중요한 전환점이었습니다.

지난 한 해 동안 학회는 여러 분야에서 의미 있는 결실을 이루었으며 많은 변화가 진행 중입니다. 학회가 발행하는 모든 학술지를 Open Access 저널로 전환하기 위한 작업이 시작되었고, 이를 위해 투고 및 편집 시스템의 개편도 진행 중입니다. PRESM 학술대회에는 더 많은 국가의 연구자가 참여하며 글로벌 네트워크가 확장되고 있습니다. 또한, 학술대회에 산업 세션을 신설하여 산학연의 연구자들이 함께 문제 해결을 논의하는 기회를 만들었습니다. 수년에 걸친 노력 끝에 회계 및 회원 업무의 전산화가 완료되어 운영 효율성과 회원 서비스가 한층 향상되었습니다. 특히, 많은 젊은 연구자가 다양한 학회 활동에 새롭게 참여하며 활력을 더하고 있습니다. 이러한 변화와 성과는 우리 학회의 학문적 위상을 높이고, 정밀공학 발전에 기여할 것입니다.

학회를 진정으로 발전시키는 원동력은 바로 회원 여러분의 열정이라고 생각합니다. 학술대회 발표장의 뜨거운 열기, 세대를 초월한 자유로운 토론, 학술지 편집진의 노력, 그리고 끊임없이 새로운 시도를 이어가는 임원과 직원 모두가 학회의 경쟁력을 뒷받침하고 있습니다. 회장직을 수행하며 우리 학회의 저력을 다시 한번 실감할 수 있었습니다. 앞으로도 한국정밀공학회가 변화를 선도하며 정밀공학 분야의 학문적·산업적 발전에 기여할 것이라고 확신합니다.

지난 한 해 동안 주신 도움과 따뜻한 격려에 다시 한번 깊은 감사를 드립니다. 2025년 한 해가 회원 여러분 모두에게 건강과 행복, 그리고 학문적 성취로 가득한 해가 되시기를 진심으로 기원합니다. 또한, 새롭게 학회를 이끌어갈 신임 회장님과 임직원들께도 많은 발전과 행운이 함께하시길 바랍니다.

감사합니다.

2025년 1월  
사단법인 한국정밀공학회 2024년 회장 민 병 권

K-Precision, Smart & Green!!

## 목차

### 일 반

- 상용 트럭을 이용한 대형 레이더 시스템의 고정 방법과 수송 진동에 대한 안전성 분석  
신동엽, 장수영, 권민상
- 주축 모터의 전기적 특성을 고려한 절삭력 모니터링  
김재은, 오준영, 심범식, 이원균
- 궤도형 로봇의 계단 주행 조건 분석을 통한 객체 인식 알고리즘 기반 계단 자율 주행 시스템 개발  
송민기, 김성재, 서진호
- 상온 보상용 내부 온도 센서가 열전대 온도 지시계의 교정 불확도에 미치는 영향  
강주경, 이영희, 양인석
- 원형 플렉서 힌지의 축방향 연성 계산을 위한 새로운 현상-기반 이론식의 유도과 검증  
문준희, 신현표
- 오염제거장치를 이용한 해양환경에서의 PEMFC의 전기화학적 성능 평가  
권예림, 유호준, 강병규, 홍기원, 권순기, 이상훈, 조구영
- 새로운 소형 버너리그를 이용한 EB-PVD 열차폐 코팅의 열피로 수명 평가  
박수, 김대진, 김준영, 김성주, 석창성
- IPL 소결을 활용한 고안정 열임프린팅 투명전극 제조 공정 개발  
장윤석
- 다천체 분광 관측을 위한 Robotic Fiber Positioner 및 경로 계획 알고리즘 개발  
임현호, 김재우, 황호성, 홍성욱, 이종철, 최영만
- 3D 프린팅 섬 영역 탐지 방법: CPU 기반 접근법  
강영석, 김윤섭, 나승채, 한상조

# JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 42, NUMBER 1 / January 2025

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

## CONTENTS

### REGULAR

- 11 Safety Analysis of Transportation Vibration and Mounting Methods for a Large Radar System with a Commercial Truck  
**Dongyoub Shin, Suyoung Jang, and Minsang Kwon**
- 19 Cutting Force Monitoring Considering Electrical Characteristics of Spindle Motor  
**Jae-Eun Kim, Jun-Young Oh, Beomsik Sim, and Wonkyun Lee**
- 27 Development of an Autonomous Stair Driving System based on an Object Detection Algorithm through Analysis of Stair Traversal Conditions of a Tracked Robot  
**Min Gi Song, Sung-Jae Kim, and Jin-Ho Suh**
- 39 Effect of the Internal Thermometer for Room Temperature Compensation on the Calibration Uncertainty of Thermocouple Indicators  
**Joo Gyeong Kang, Young Hee Lee, and Inseok Yang**
- 47 Derivation and Verification of Novel Phenomenon-based Theoretical Formulas for the Axial Compliance of Circular Flexure Hinges  
**Jun-Hee Moon and Hyun-Pyo Shin**
- 57 Evaluation of Electrochemical Performance of PEMFCs with Decontamination Devices at Marine Environments  
**Ye rim Kwon, Ho Jun Yoo, Byung Gyu Kang, Ki Won Hong, Sun Ki Kwon, Sanghoon Lee, and Gu Young Cho**
- 65 Thermal Fatigue Life Evaluation of EB-PVD TBC Using Newly Developed Small-scale Burner Rig  
**Soo Park, Dae-Jin Kim, Jun-Young Kim, Seoung-Ju Kim, and Chang-Sung Seok**
- 75 Manufacturing Process for Highly Stable Thermal Imprinting Transparent Electrode Using IPL Sintering  
**Yunseok Jang**
- 79 Development of Robotic Fiber Positioner and Path Planning Algorithm for Multi-object Spectroscopy  
**Hyunho Lim, Jae-Woo Kim, Ho Seong Hwang, Sungwook Hong, Jong Chul Lee, and Young-Man Choi**
- 89 Detection Method for Island Regions in 3D Printing: A CPU-based Approach  
**Young Seok Kang, Yeun Seop Kim, Seung Chae Na, and Sang Jo Han**

# 상용 트럭을 이용한 대형 레이더 시스템의 고정 방법과 수송 진동에 대한 안전성 분석

## Safety Analysis of Transportation Vibration and Mounting Methods for a Large Radar System with a Commercial Truck

신동엽<sup>1,#</sup>, 장수영<sup>1</sup>, 권민상<sup>2</sup>  
Dongyoub Shin<sup>1,#</sup>, Suyoung Jang<sup>1</sup>, and Minsang Kwon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한화시스템 기계시스템1팀 (Mechanical system 1, Hanwha Systems)  
<sup>2</sup> 국방과학연구소 레이더전자전센터팀 (Radar R&D, Agency for Defense Development)  
# Corresponding Author / E-mail: dysin90@hanwha.com, TEL: +82-031-8020-7269  
ORCID: 0009-0004-1040-3169

KEYWORDS: Transportation vibration (수송 진동), Large radar system (대형 레이더 시스템), Mounting method (고정 방법)

Military equipment such as large radar system is difficult to transport because protecting each of inner components is mandatory. Therefore, a large radar system is basically transported by military vehicle and consider safety about transportation vibration during design procedure. However, in this paper, a large radar system which includes a large radar and cooling unit is transported by a commercial truck, not military, using different mounting methods so that analyzing acceleration is necessary in terms of verifying safety about transportation vibration. In addition, PSD data which is measured during a variety of transport environment explains that air suspension can absorb vibration efficiently and input vibration is small compared to the MIL-STD-810H, as such most amount of vibration from road can be damped and small energy would be transferred to upper equipment through load path, chassis to equipment. Furthermore, specific mounting method fasten a large radar system effectively. As a result, using a commercial truck with mounting methods during transportation large radar system is totally safe from transportation vibration.

Manuscript received: August 12, 2024 / Revised: October 28, 2024 / Accepted: October 31, 2024

### NOMENCLATURE

$F_c$  = Clamping Force by Mass

$F_p$  = Preload

$k$  = Stiffness of a Large Radar Systems

$c$  = Damping Ratio of a Commercial Truck

$m$  = Mass of a Large Radar Systems

$a$  = Acceleration

$x$  = Displacement of a Large Radar

$y$  = Displacement of Base

$\omega$  = Angular Frequency

$\sigma_{est}$  = Estimated Stress

$\sigma_{an}$  = Analyzed Stress

$G_{per}$  = Percentage Factor of Grms

$G_{rms,test}$  = Grms of Test Results

$G_{rms,ret}$  = Grms of Reference

$\delta_{me}$  = Model Error Factor

$S.F$  = Safety Factor

$M.S$  = Margin of Safety

1. 서론

대형 군용 장비 특히 수십 ton에 달하는 대형 레이더 시스템의 경우 무기체계에서 요구하는 기능 및 성능을 충족하기 위해 군용 차량을 이용하여 운용하고 있다. 하지만 아직 전력화되지 않은 개발단계에서는 민수에서 활용되는 상용 트럭을 이용할 시에 군용 차량에 비해 비용이 적게 들며, 탑재체의 물리적 제원에 따라 선택적으로 차량을 선택할 수 있고 개발기간을 단축할 수 있는 장점이 있어 개발 단계에서 적용 가능성에 대한 검토가 제기되고 있다. 대형 레이더 시스템은 표적을 탐지하고 추적하는 역할을 하는데, 주요 기능을 하기 위해서는 내, 외부를 구성하는 구성품의 구조 안전성이 확보되어야 한다. 특히 이송 시에 노면으로부터 전달되는 수송 진동이 심각할 경우 장비의 파손과 더불어 목표 성능을 구현하지 못할 수 있다. 그러므로 Lee 등은 수송 진동에 대한 장비의 구조적 안전성을 분석하기 위해 구조해석을 활용하거나 해석 방법론에 대해 활발하게 연구되고 있다[1,2]. 또한, Shin 등은 크기가 작은 내부 구성품의 경우 진동 시험을 통해 구조 안전성 분석을 진행하고 있으며[3], 대형 레이더 시스템을 구성하는 장비 중 크기로 인해 진동 시험을 물리적으로 할 수 없는 경우 주행 시험을 통해 구조 안전성 분석이 수행되어 왔다[4,5]. 군수장비 외에 민수에서도 고가의 장비가 이송될 때 수송 진동의 영향성을 줄이기 위한 방진 장비에 대한 연구도 수행되고 있다[6].

본 연구는 군용 차량이 아닌 상용 25 ton 트럭 위에 대형 레이더 시스템을 구성하는 장비 2종을 통상적으로 군용 장비를 조립할 때 사용하는 볼트 체결 방식과 트윈스트라크와 코너캐스팅을 이용한 체결 방식으로 고정하고 이송할 때 수송 진동에 의한 대형 레이더 시스템의 구조적 안전성 분석에 관한 것이다. 기존의 볼트를 활용한 고정 방식에 대한 안정성에 대한 연구는 선행되어 왔고[7] 트윈스트라크와 코너캐스팅 방식에 대한 연구는 트윈스트라크 자체 파손에 관한 연구 또는 컨테이너 운송 모듈에 대한 연구에 집중되어 왔다[8,9]. 따라서 군용 장비의 이송을 위해 트윈스트라크 및 코너캐스팅 방식에 대한 분석 사례가 미비하다.

기존 방식의 경우 조립 여유 공간의 부재로 굉장히 불편한 자세로 작업을 수행해야 하고 체결해야 할 볼트의 수가 많아 작업 시간이 많이 소요된다. 하지만 트윈스트라크와 코너캐스팅은 접근이 쉬운 위치에 배치할 수 있고 수량도 적어 편리하고 빠르게 조립 및 분해가 가능하며 체적을 많이 차지하지 않아 공간적으로 장점을 갖는다. 하지만 군용 장비의 특성상 높은 구조적 신뢰성 및 안전성을 요구하기 때문에 기존의 볼트 체결 방식에 비해 장점을 갖는 트윈스트라크와 코너캐스팅의 적용을 위해서는 안전성에 대한 검증이 이루어져야 한다. 따라서 본 논문에서는 트윈스트라크와 코너캐스팅방식의 안전성을 입증하기 위해 먼저 해석적 방법으로 구조 안전성 및 동적 거동을 예측하였다. 실 주행 조건의 구조 안전성을 검증하기 위해 차량의 차대로부터 힘이 전달되는 경로를 따라 탑재되는 주장비에 가속도 센서를 부착하여 수송 진동 시험을 수행하였다. 구조해석과 주행 시험을 통해 얻은 결과값을 비교 분석하여 수송 진동에 대한 고정 방법의

Table 1 Specification of mounting equipment

	Large radar	Cooling unit
Width (m)	2.9	2.8
Weight (kg)	≤15,000	≤7,000

Table 2 Specification of a commercial truck

Commercial truck				
Weight (kg)	11,750			
Total weight (kg)	40,000			
Length (mm)	12,950			
Width (mm)	2,495			
Height (mm)	3,630			
Axial load rate (kg)	Front	8,000	Rear	11,500

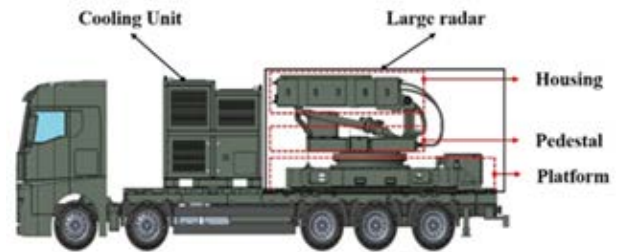


Fig. 1 Construction of a large radar system during transportation

안전성을 입증하고 향후 대형 레이더 시스템의 고정 방법의 하나로 활용할 수 있도록 하였다.

2. 본론

2.1 연구대상

본 연구에 사용된 상용 트럭과 탑재 장비의 제원은 Tables 1, 2와 같다. 탑재 장비는 Table 2의 상용 트럭의 축 별 설계허용하중이 고려되어 배치하였다. 상용 트럭의 후축 허용 축 하중이 전축에 비해 더 높은 허용값을 가지므로 후축에 무거운 대형 레이더를 전축에는 상대적으로 가벼운 냉각장치(Cooling Unit)를 배치하여 무게 배분을 맞추었다. 대형 레이더 시스템이 탑재된 최종 형상은 Fig. 1과 같으며, 대형 레이더는 안테나 하우징(Housing), 안테나 받침대(Pedestal), 안테나 플랫폼(Platform)으로 구분하였다. Fig. 2은 대형 레이더 시제의 고정 방법을 나타낸 것인데, 냉각장치는 볼트 체결 방식인 고정 방법 ①, 대형레이더는 트윈스트라크와 코너캐스팅을 이용한 고정 방법 ②를 적용하였다.

각 고정 방법의 허용하중값과 탑재물의 물리적 제원(크기, 무게)를 고려하여 수량을 선정하였고, 고정 방법 ②의 경우 추천되는 배치 간격을 고려하여 차량의 길이방향으로 2,997 mm와 폭 방향으로 2,246 mm 간격으로 적용하였다. Fig. 3은 고정 방법 ②의 작동원리를 나타낸 것인데 썬기 형태의 잠금핀을

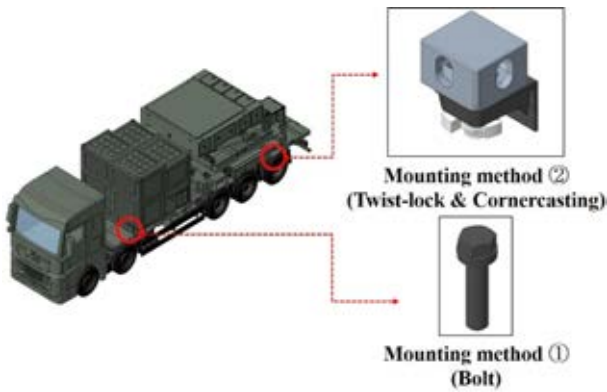


Fig. 2 Mounting methods of a large radar system

Table 3 Specification of mounting methods

	Large radar	Cooling unit
Mounting method	Twist-lock & Cornercasting	Bolt
Quantity	4 EA	28 EA
Allowance	34,000 kg/4EA	9,253kg/EA

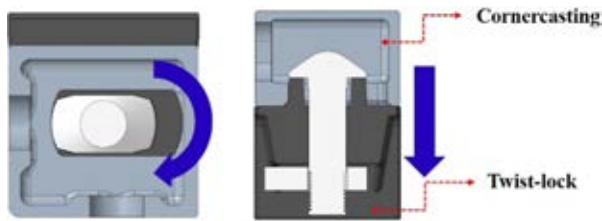


Fig. 3 Mechanism of Mounting method ②

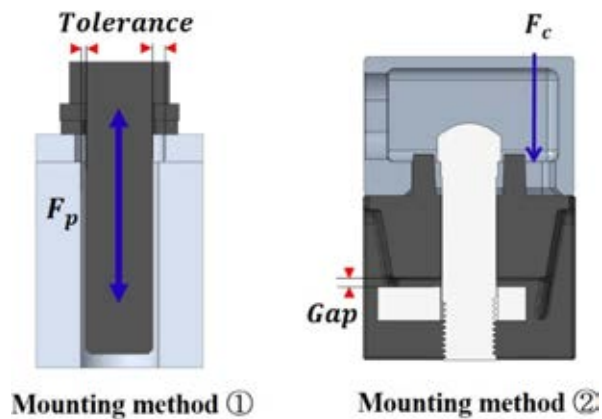


Fig. 4 Schematic of mounting methods

회전 후 코너캐스팅 면에 접촉시키고 풀림을 막기 위해 아래 너트를 돌려 고정시킨다.

Fig. 4는 두 고정 방법의 개념도이다. 고정 방법 ①은 마찰에 의한 체결력( $F_p$ )을 가지며, 모재의 나사 산과 볼트 사이 유격이 방향으로 이송 시 X, Y방향으로 슬립이 발생할 가능성이 있다. 반면 고정 방법 ②는 탑재물의 하중( $F_c$ )에 의한 눌림을 이용해

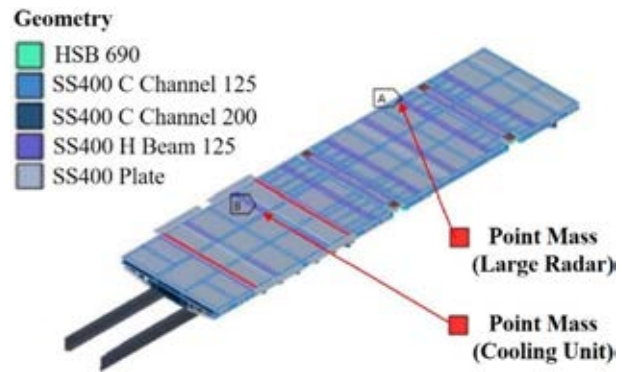


Fig. 5 FE modeling of a large radar system including flatbed on commercial truck

고정하게 되고 트위스트 락과 잠금너트 사이 공간이 존재한다는 점에서 수직방향인 Z 방향으로 진동의 증폭이 발생할 수 있다. 따라서 두 고정 방법이 미치는 영향을 확인하기 위해 구조 해석을 이용해 동특성과 구조 안전성을 확인하고 주행 시험 결과와의 비교 분석을 수행하였다.

### 2.2 유한요소해석

주행 전 두 고정 방법이 적용된 적재함의 구조 안전성을 해석적으로 검증하기 위해 유한요소 모델을 구축하였고, Ansys Mechanical 2022 R2을 사용하여 해석을 수행하였다. 경계 조건은 탑재장비의 접촉면에 대해 접촉 조건을 가정하여 적용하였고, 차대를 구속조건으로 가정하여 진행하였는데, 이는 상용 트럭의 경우 타이어, 에어서스펜션 등의 강성과 감쇠비에 대한 정보가 제한되어있고 탑재장비의 관점에서 차대로부터 외란이 전달된다고 볼 수 있기 때문이다. 탑재장비에 대해서는 각 탑재장비의 무게중심점에 집중 질량을 생성하였고 Fig. 5 와 같이 모델링하였다. 유한요소 모델을 구성하는 절점과 요소는 각각 4,114,225개, 1,025,335개이다.

대형 레이더 시스템을 받치는 트럭의 적재함에 적용된 재질은 2종으로 일반적인 강인 SS400과 대형 레이더가 장착되는 고정 방법 ②의 커버는 고장력강인 HSB690 (KS D 3868)을 적용하였고 물성치는 Table 4와 같다[10].

레이더 시스템의 동적 특성을 확인하기 위해 모드 해석을 수행하였고, 그 결과 Table 5의 고유진동수와 Fig. 6의 모드 형상을 갖는다. 전체모드는 1-3차수인데 집중 하중 형상을 갖는 고정 방법 ②가 적용된 부위에서 나타남을 확인할 수 있었다. 1차 모드에서 18.8, 2차에서 25.9, 3차에서 32.1 Hz를 확인하였다. 나머지 차수는 지역모드임을 알 수 있었다.

랜덤진동해석에 적용한 입력프로파일은 본 연구에 적용되는 차량에 해당하는 프로파일을 적용하였고, 이에 해당하는 주장비 운송 시험 요구 규격은 MIL-STD-810H Method 514.8C-6 Category 4이다[11].

진동해석을 통하여 차량 적재함에 적용되는 최대 응력과 변위를 확인하였다. 해석 결과는 Fig. 7과 Table 6과 같다. 모드 형상에서 보았듯이 고정 방법 ②가 적용된 부위에서 가장 큰



Table 4 Properties of materials for flatbed on commercial truck

	SS400	HSB690
Young's modulus	205 GPa	205 GPa
Poisson's ratio	0.3	0.3
Density	7,800 kg/m <sup>3</sup>	7,840 kg/m <sup>3</sup>
Tensile strength, yield	275 MPa	690 MPa
Tensile strength, ultimate	550 MPa	800 MPa
Applying area	Main frame	Twist-lock cover

Table 5 Modal analysis of a large radar system with flatbed

	Natural frequency	Mode shape
1 <sup>st</sup>	18.8	Global
2 <sup>nd</sup>	25.9	Global
3 <sup>rd</sup>	32.1	Global
4 <sup>th</sup>	35.2	Local

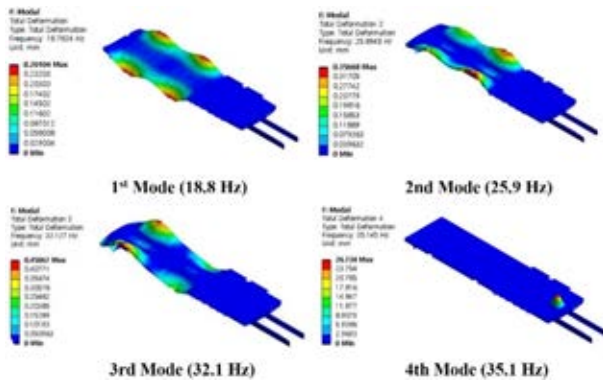


Fig. 6 Mode shapes of a large radar system by modal analysis

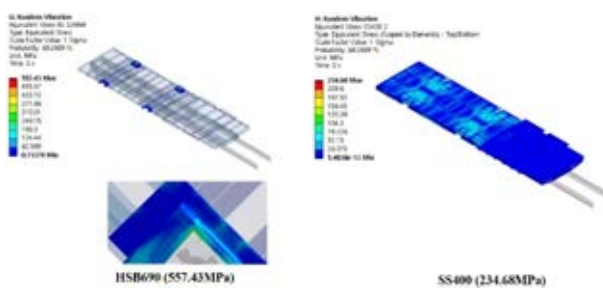


Fig. 7 Maximum stress by random vibration analysis

응력이 발생하였다. HSB690이 적용된 트위스트락 덮개는 Z 방향에서 최대 557.43 MPa, SS400이 적용된 적재함의 메인프레임은 Y 방향에서 최대 234.68 MPa 응력이 발생함을 확인하였다.

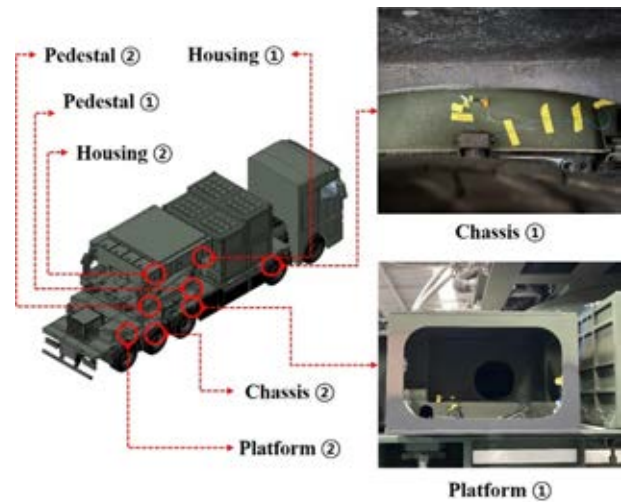
각 소재의 항복 응력 기준으로 안전율을 확인하였고, 모두 1.0을 넘는 것을 확인하였다.

2.3 수송 진동 시험 준비

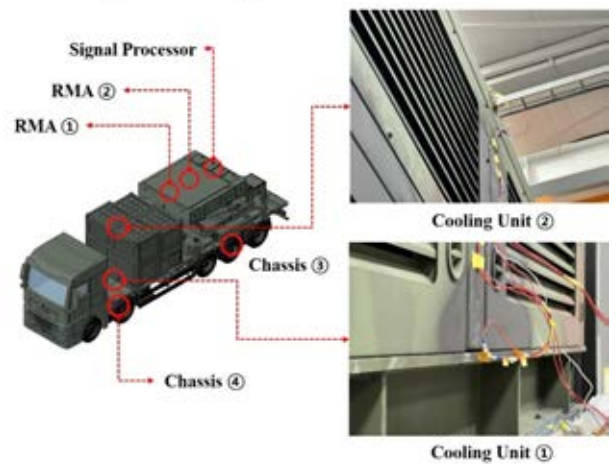
차량 운행 시 노면으로부터 전달되는 진동을 계측하고 고정 방법에서의 응답을 확인하기 위해 가속도 센서를 부착하여

Table 6 Results of random vibration analysis

		Longitudinal	Transverse	Vertical
HSB690	Deformation (mm)	1.82	2.07	1.82
	Stress (MPa)	269	358	557
SS400	Safety	2.56	1.93	1.23
	Stress (MPa)	139	235MPa	215
	Safety	1.98	1.17	1.28



(a) Installation right view of acceleration sensors



(b) Installation left view of acceleration sensors

Fig. 8 Maximum stress by random vibration analysis

가속도를 측정하고 에너지값을 측정하였다. 가속도 센서의 부착 좌표계는 주장비 운송 시험 요구 규격과 동일하게 설정하였다.

Fig. 8은 부착한 가속도 센서의 위치를 나타낸 것이다. 총 15개의 가속도 센서를 부착하였으며, 노면으로부터 인가되는 진동을 확인하기 위해 차대의 4개소에 센서를 부착하였다. 고정 방법 ①, ②의 응답을 확인하고자 냉각장치 ①과 안테나 플랫폼 ①, ②에 센서를 부착하였다.

대형 레이더의 하부에서 상부로 하중 경로를 따라 진동이

Table 7 Transport scenario for driving test

Environment of transportation	
Route	Highway, National highway, Road
Distance	About 150 km
Velocity	0-90 km/h

Table 8 Results of transportation vibration during driving test

Platform ①		
	Grms (30-50 km/h)	Grms (80-90 km/h)
Longitudinal (X)	0.014	0.025
Transverse (Y)	0.015	0.042
Vertical (Z)	0.043	0.086
Maximum value		
	Grms (Measurement)	Grms (MIL-STD)
Longitudinal (X)	0.083 (Cooling Unit ②)	2.24
Transverse (Y)	0.114 (Housing ②)	1.45
Vertical (Z)	0.130 (Housing ①)	1.32

전달될 때 영향성을 확인하고자 안테나 받침대, 안테나 하우징에 부착하였다. 안테나 내부 주요 전자장비인 레이더 모듈 조립체(Radar Module Assembly), 신호 처리기(Signal Processor)에도 센서를 부착하여 인가되는 진동이 내부에 전달되는 특성을 확인하고자 하였다.

Table 7은 주행 시험 시나리오이며, 측정 결과의 정확도를 올리기 위해 다양한 도로 조건(고속도로, 일반국도, 방지터) 등을 포함하였고, 주행 속도는 최고 시속 90 km/h로 수립하였다.

### 3. 수송 진동 시험 결과 및 분석

#### 3.1 시험 결과

준비된 주행 시나리오를 약 2시간 30분가량 시험 후 차량과 탑재장비를 점검 시 영구적인 변형(구성품의 탈거, 깨짐 등)이 없음을 확인하였다.

계측장비(SIEMENS 社의 SCADAS MOBILE SCM05 및 SCM10)를 이용하여 데이터를 획득하고 FFT 변환을 통해 PSD 데이터를 획득하였다. 시험 결과 중 대표적인 값을 추출하여 정리하면 Table 8과 같다.

속도가 증가함에 따라 각 측정 위치에서 PSD 값이 증가하는 경향을 확인할 수 있었는데, 대표적으로 안테나 플랫폼 ①에서 보면 30-50보다 80-90 km/h 구간에서 모든 축에서 증가하였다.

최댓값은 시속 90 km/h일 때 측정되었는데, X축은 냉각장치 ②에서 0.083로 측정되었고, Y축은 안테나 하우징 ②에서 0.114로 측정되었다. Z축은 안테나 하우징 ①에서 0.130으로 측정되었다. 주장비 운송 시험 요구규격 대비 백분율이 각 축별 6.26, 7.85, 5.81%로 매우 낮은 값을 확인하였다.

### 3.2 결과 분석

#### 3.2.1 입력값 비교

수송 진동 시험 결과를 분석하기 위해 주장비 운송 시험 요구규격과 동일하게 5-500 Hz까지 주파수 분석을 하였다. 탑재장비 기준에서는 진동의 입력 값이 차대에서 측정된 값으로 볼 수 있고 이를 비교 분석하였다. 각 그래프의 가로축은 주파수  $f$  (Hz)이며, 세로축은 단위 주파수 당 에너지분포를 의미하는 PSD ( $g^2/Hz$ )를 나타낸다.

Fig. 9에서 보듯이 모든 방향에서 측정값은 주장비 운송 시험 요구규격 대비 현저하게 낮음을 확인할 수 있었다. 차대에 부착한 센서의 위치는 Fig. 8과 같이 시계방향으로 차량의 2축, 4축에 각각 부착하였는데, 그 중 차대 ②는 기준 센서로 설정하여 차대 ①, ③에서 측정된 값을 비교하였다. Fig. 9에 차대 위치에 따른 입력 값을 보면 위치에 따라 PSD 값이 다를 수 있다. 이는 여러 변수가 복합적으로 영향을 미친 것으로 판단된다.

첫째, 트럭의 특성상 차대의 길이가 굉장히 길며, 탑재장비의 하중이 집중 하중 형태로 작용하여 노면으로부터 전달받는 진동에 대한 응답이 다를 수 있다. 둘째, 차량 운동 특성과 주행 경로의 도로 특성에 기인한 것으로 판단된다.

측정된 요소를 물리적으로 분석해보면, 수송 상황에서 물리적 상황에 대한 개념도 Fig. 10과 같다. 여기서  $m$ 은 질량으로 차량 위 탑재되는 장비들의 무게를 의미하고  $k$ 는 강성 값으로 상용 트럭의 강성과 탑재되는 장비의 강성 값의 조합이 된다.  $c$ 값은 차량의 에어서스펜션에 의한 감쇠비이다. 진동의 방정식은 식(1)부터 식(3)과 같이 표현된다.

$$\Sigma F = F_{(x)} + F_{spring} + F_{damping} \tag{1}$$

$$F = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} \tag{2}$$

$$\Sigma F = m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) \tag{3}$$

차량 수송 시 발생하는 진동은 조화가진으로 바닥이 가진되는 함수 식(4)를 대입하여 보면 식(5)이 된다.

$$Y_{(t)} = Y \sin \omega t \tag{4}$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cY \cos \omega t + kY \sin \omega t \tag{5}$$

Fig. 10과 식(5)을 토대로 보면 2가지 결론을 도출할 수 있는데, 첫째 상용 트럭의 에어서스펜션의 감쇠 효과로 인해 전달되는 에너지가 줄어든 것이고, 둘째로 실제 주행 시험 시 장비에 인가되는 진동의 크기가 작다고 볼 수 있다.

#### 3.2.2 응답 비교

Fig. 11은 두 고정 방법이 적용된 위치에서의 응답을 나타낸 것인데, 모든 축에서 100 Hz 이상에서는 차대보다 두 고정 방법에서 얻어지는 PSD 값이 낮기 때문에 고주파 대역에서는 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다. 대부분 100 Hz 이하의 저주파 대역에 많은 에너지가 집중되어 있다. 구조해석 결과를 토대로

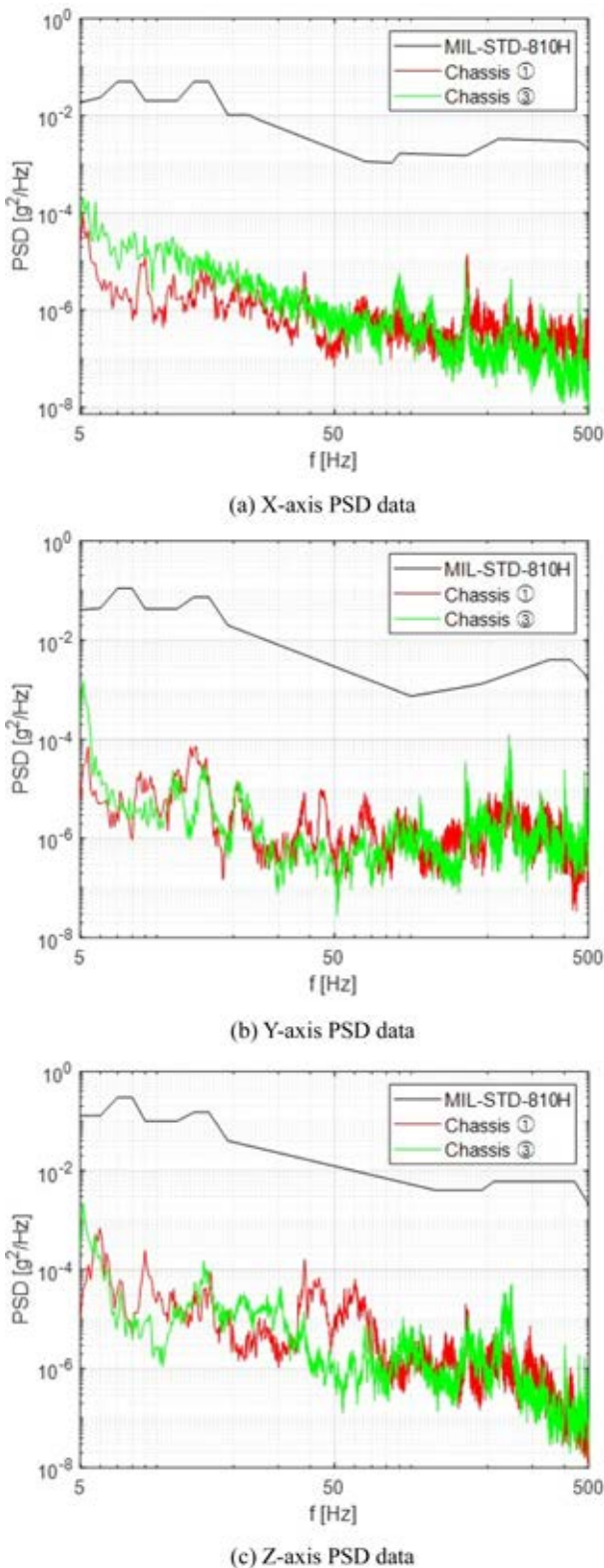


Fig. 9 Comparison input vibration of chassis and MIL-STD

보면 특히 5-10 Hz 영역에서는 차량 현가장치의 진동이 주요한 주파수 성분임을 알 수 있다. 저주파 구간인 50 Hz까지 보면 고정 방법 ②가 적용된 안테나 플랫폼 ①에서는 Fig 4에서 예측된 것과 같이 X, Y축에서 인가된 진동에 동일하게 응답하는 것을

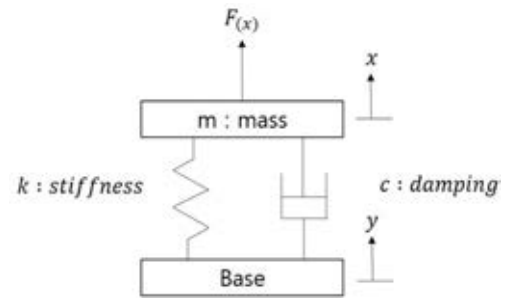


Fig. 10 Schematic of dynamics during transportation

확인할 수 있다.

반면 Z 축에서 30-35 Hz 구간에서 증폭이 되는 것을 볼 수 있는데, 이는 안테나 플랫폼의 고유진동수임을 알 수 있다. 고정 방법 ①이 적용된 냉각장치 ①은 X, Y 축의 저주파 구간에서 측정된 결과를 보면 증폭이 되는 것을 보이는데, 실제 고정 방법 ①이 상대적으로 차량의 전진, 좌우 방향에 대해서 취약함을 의미한다. 이는 볼트의 슬립, 장착 부의 구조에 인한 것으로 판단된다. Z축에서는 동특성의 유의미한 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 일부 구간에서 증폭이 존재하나, 실제 주파수와 가속도를 기준으로 본다면 영향이 크지 않음을 판단할 수 있다.

Fig. 6에서 확인한 모드 해석 결과를 보면 대형 레이더 시스템의 고유진동수와 동적 특성은 Z축에서 확인된다. 실측된 주파수 응답 그래프에서 각 18.0, 25.7, 30.8 Hz로 확인된다. 따라서 해석에 사용된 유한요소모델과 실측모델 사이 오차율은 각 4.00, 20.1, 12.4%의 오차를 갖는다.

### 3.2.3 구조 안전성 분석

차량 노면으로부터 전달되는 진동에 의한 구조 안전성을 확인하고자 역으로 응력 결핍값을 산출하여 분석하였다. 주행 시험 결과 백분율을 식(6)과 같이 정의하고, 모드해석 결과의 동특성과 고유진동수를 실험값과 비교하여 모델 형상 오차를 반영하면 식(7)로 표현된다. 구조물의 내구성 및 구조 안전성 평가 시에

$$G_{per} = \frac{G_{rms,test}}{G_{rms,ref}} * 100 \tag{6}$$

$$\sigma_{est} = \sigma_{an} * G_{per} * \delta_{me} \tag{7}$$

$$M.S = \frac{Yield\ Strength}{S.F * Applied\ Stress} - 1 \tag{8}$$

활용되는 안전 여유도를 등가응력으로 확인하였다. 안전 여유도는 식(8)과 같이 계산하였으며, 이 때 하중의 불확실성을 고려하여 안전율 1.5를 사용하였다.

그 결과 Table 9에 나타내었듯이 안전 여유도가 0보다 매우 높은 값으로 계산되었고, 매우 구조적으로 안전함을 확인할 수 있다.

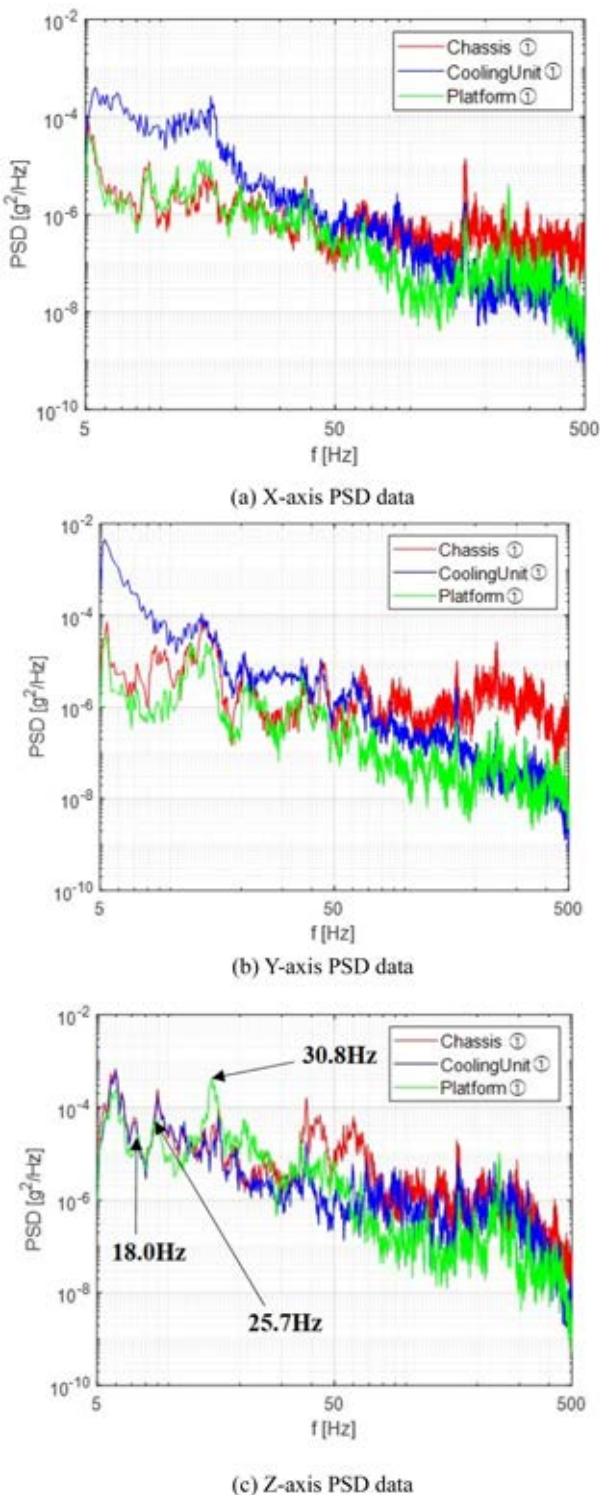


Fig. 11 Comparison vibration response of mounting methods

4. 결론

본 논문에서 주행 중 측정된 데이터를 분석한 결과, 차대에서 측정값을 통해 에어서스펜션에 의한 감쇠로 인해 인가되는 진동이 주장비 운송 시험 요구규격대비 낮고, 실 주행 경로에서 오는 가진 값 자체도 낮음을 확인할 수 있었다. 또한 대형 레이더를

Table 9 Safety analysis from test results

	Longitudinal	Transverse	Vertical	
$G_{per}$	0.063	0.079	0.058	
$\delta_{me}$	1.040	1.201	1.124	
Safety factor	1.5			
HSB690	$\sigma_{est}$ (MPa)	25.4	42.4	48.5
	M.S	26.1	13.5	12.7
SS400	$\sigma_{est}$ (Mpa)	13.1	27.8	18.7
	M.S	20.1	8.22	13.1

고정하는 방법인 코너캐스팅과 트위스트라에서 측정된 진동의 응답을 분석한 결과 유격으로 인한 진동의 증폭이 탑재체에 심각한 영향을 주지 못하는 수준임을 확인할 수 있었다. 이를 통해 상용 트럭을 이용한 대형 레이더의 고정 방법에 대해 안전성을 입증할 수 있었다.

향후 대형 레이더와 같은 대형 장비 이송 시에 상용 트럭과 본 논문에서 제시한 고정 방법을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2024년 정부의 재원으로 국방과학연구소 장사정포 요격체계 탐색개발 레이더 시제 사업(No. 924017201)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Lee, K.-M., Kang, K.-H., Son, D.-H., (2014), Safety analysis of the vehicle-mounted cabinet structure for the transportation vibration, The Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, 911-914.
2. Lee, E.-H., Lim, S., Ra, C., Kim, H.-T., Lee, J.-H., Kang, S.-W., Park, N.-C., (2022), Methodology for determination of main modes for transport vibration analysis of large radar, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 32(4), 375-383.
3. Shin, D.-J., Lee, J.-H., Lee, S.-J., Kang, S.-W., Byun, K.-S., (2018), Specification establishment of transport vibration and shock for large radar and structural stability analysis, Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Autumn Conference, 108.
4. Lee, K. M., Kang, K. H., Jung, H. Y., Yim, S. H., (2015), Vibration analysis of the vehicle-mounted equipment by driving test, Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, 1235-1236.
5. Shin, D.-J., Ahn, S.-H., Lee, J.-H., Ryu, G.-H., (2019), Analysis of transport dynamic property for lowbed trailer and vibration

specification establishment of large radar, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 29(5), 632-638.

6. Jang, S., (2024), Study of container cargo vibration isolator in road transport, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 34(3), 320-329.
7. Seo, K. H., Lim, H. B., Song, B. G., (2010), Stress Analysis of a heavy-duty military-truck frame with swing-bolt type connections, Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, 17(1), 162-176.
8. Lee, D. W., Kim, J. K., Lee, K. H., (2009), Failure analysis of twist lock pin, Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 117-118.
9. Lee, J. C., Lee, J. H., Chun, H. J., Park, S. H., (2010), Design of a container transport module in an automated container-stacking system for mobile harbor, Society of Computational Design and Engineering, 667-671.
10. Korea Agency for Technology and Standards, (2018), KS D 3868, (Report No. KS D 3868), <https://www.standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do?menuId=503&topMenuId=502&ksNo=KSDISO3868&tmprKsNo=KSDISO3868&reformNo=02>
11. Department of Defense U.S.A, (2019), Environmental engineering considerations and laboratory test, (Report No. MIL-STD-810H), <https://evgstrategy.com/wp-content/uploads/2019/03/MIL-STD-810H.pdf>



### **Minsang Kwon**

Principal Researcher in Agency for Defense Development. His research interest is design and material engineering.

E-mail: mekms93@add.re.kr



### **Dongyoub Shin**

Senior Research Engineer in Mechanical System 1 Team, Hanwha systems Co., LTD.

His research interest is design and material engineering.

E-mail: dysin90@hanwha.com



### **Suyoung Jang**

Senior Research Engineer in Mechanical System 1 Team, Hanwha systems Co., LTD.

His research interest is design and material engineering.

E-mail: swim.jang@hanwha.com

## 주축 모터의 전기적 특성을 고려한 절삭력 모니터링

# Cutting Force Monitoring Considering Electrical Characteristics of Spindle Motor

김재은<sup>1</sup>, 오준영<sup>1</sup>, 심범식<sup>1</sup>, 이원균<sup>1,#</sup>  
Jae-Eun Kim<sup>1</sup>, Jun-Young Oh<sup>1</sup>, Beomsik Sim<sup>1</sup>, and Wonkyun Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)  
# Corresponding Author / E-mail: wklee@cnu.ac.kr, TEL: +82-42-821-6575  
ORCID: 0000-0002-3207-5336

KEYWORDS: Cutting force monitoring (절삭력 모니터링), Machine tool (공작기계), Spindle motor current (주축 모터 전류), Spindle motor power (주축 모터 전력)

*The importance of cutting forces in machining has been emphasized for monitoring and optimizing cutting conditions, leading to various methods to detect cutting forces researched. Cutting forces can be directly measured using dynamometer or indirectly estimated using AE sensors and accelerometers, etc. However, these external sensors demand high costs and have accuracy limitations due to environment issues. To compensate for these drawbacks, utilizing internal signals of machine tool has been developed. Among these, using internal electrical signals of machine tool is representative. In commercial machine tools, cutting forces are often estimated through current measurements. However, due to the characteristics of the spindle motor, electrical properties such as slip, power factor, and efficiency vary with the load, resulting in relatively lower accuracy. This study introduces current-based method considering characteristics of motor and power-based method for estimating cutting forces and compare accuracy of those methods with the measurements from dynamometer respectively.*

Manuscript received: August 14, 2024 / Revised: October 21, 2024 / Accepted: October 30, 2024  
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2024

### 1. 서론

공작기계를 통한 절삭 공정 중 발생하는 절삭력은 공정 상태에 대한 다양한 정보를 담고 있어 절삭 과정 중 발생하는 다양한 현상들을 알기 위해서는 절삭력을 감지하는 것이 중요하다. 절삭력을 활용하여 공구 마모, 재료의 표면조도 추정 등 절삭 공정 중 발생하는 물리현상들의 측정과 공구 파손 및 채터와 같은 이상상황발생 감지도 가능하며, 이송 속도 및 절삭 속도의 최적 조건을 선정하는데 활용할 수도 있다. 이처럼 절삭력은 가공 공정과정 중의 전반적인 가공 상태 및 현상들을 나타내는 중요한 지표로 활용되고 있으며, 절삭력 감지를 위한 다양한 방법들이 연구되어 왔다.

절삭력을 감지하는 방법에는 대표적으로 공구동력계를 가공기에 설치하여 가공 중에 발생하는 힘을 직접 측정하는 방식이

있다. 공구동력계를 이용한 직접 측정 방식은 높은 정확도와 신뢰성이 보장된다. 그러나 일반적인 공구동력계의 경우 X, Y, Z 방향으로 발생하는 절삭력은 측정 가능하지만, 절삭에 가장 영향을 많이 미치는 접선 방향의 성분은 측정할 수 없다는 한계가 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Kistler 사에서는 스피들에 공구동력계를 부착하여 절삭력을 측정하는 방식으로 접선 방향의 절삭력을 감지하며, Altintas 등은 스피들 내부에 힘센서를 설치하여 접선 방향의 절삭력을 감지하였다[1,2]. 이러한 직접 측정 방법 외에도 간접적으로 절삭력을 추정할 수 있는데, AE (Acoustic Emission) 센서를 통해 측정된 음향 방출 신호를 이용하거나, 가속도 센서를 스피들에 부착하여 절삭력을 추정할 수 있다. 음향 방출 신호의 경우, 넓은 대역폭의 측정이 가능하며 금속 가공 과정에서 발생하는 대부분의 현상 감지가 가능하다는 특징이 있다[3,4]. Hase 등은 선삭 가공 중에 발생하는 음향 방출

신호를 측정하여 절삭 시 발생하는 현상과 음향 방출 신호와의 관계를 연구했으며, 음향 방출신호를 통해 칩 형성 역학과 공구 마모 및 파손을 감지할 수 있음을 보였다[5]. Postel 등은 밀링 스피들 하우징에 가속도 센서를 부착하여 가속도 센서 및 모달 테스트를 통해 절삭력을 구할 수 있음을 보였다[6]. 하지만 음향 방출 신호만을 사용하여 절삭력을 추정하는 방식은 외부 환경의 영향을 많이 받아 신호에 노이즈가 첨가될 가능성이 높으며, 가속도 센서의 경우 넓은 대역폭의 측정이 가능하지만, 민감도가 떨어져 고주파 영역에서는 데이터 손실이 발생할 문제가 있다[7].

이러한 외부 센서를 사용한 절삭력 감지 방법의 경우, 장비 내 구축 비용이 높으며 가공 중 발생하는 칩과 절삭유 사용으로 인해 정확한 측정이 어려워 실제 산업 현장에 적용하기에는 한계가 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 외부 센서를 사용하지 않고 장비 내부 센서와 내부 신호를 이용해 절삭력을 추정하는 연구들이 수행되어 왔다. 장비 내부 신호를 사용하여 절삭력을 추정하는 가장 대표적인 방법은 전기적 신호를 활용하여 절삭력을 추정하는 방법이다. 가공 중 발생하는 전류 신호를 사용하여 절삭 부하를 추정할 수 있는데, 대표적으로 DMG MORI 사의 상용 공작기계에서도 전류를 이용한 절삭력 추정 방식을 통해 실시간으로 절삭 부하를 표시해 준다[8]. Jeong 등은 이송계 PMSM모터의 특성과 Feed Drive System의 구조를 이용하여 전류 d-q변환을 통해 이송계 X, Y, Z축에 걸리는 각 절삭력을 추정하였다[9]. 이송계 모터의 전기적 신호를 이용해 X, Y, Z방향의 절삭력 추정 방법 외에 주축 모터의 전기적 신호를 이용해 접선 방향 성분의 절삭력을 추정하는 방법도 연구되었는데, Li는 터닝센터에서 절삭 과정 중에 주축 모터에서 발생한 전류와 이송속도, 주축 각속도를 ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)를 통해 접선 방향 및 반경 방향 절삭력을 도출하였다[10]. Aggarwal 등은 밀링에서의 주축 스피들 모터 특성에 기반해 전기적 손실 및 기계적 손실을 고려하여 전류 기반 절삭력에서 접선 방향 절삭력 계수 도출 방법을 제안하며, 전류에 선형 회귀를 통해 절삭력과 절삭 계수를 도출하였다[11]. 하지만 AC 모터의 경우, 전류를 이용하여 절삭 토크 및 절삭력을 추정하기에는 AC 모터의 전기적 특성상 한계가 존재하는데, DC 모터와는 달리 슬립이 존재한다는 특성이 있으며, 전류는 절삭 상태의 작은 변화에 둔감한 특성 때문에 전류만을 이용하여 절삭력을 추정하기는 어려움이 있다[12]. Mannan 등은 실험을 통해 절삭 중 스피들 모터에서 출력되는 전력과 절삭 토크는 높은 상관관계를 가지고 있음을 보였다[13]. Stein은 AC 인덕션 모터의 성질을 이용하여 전력을 통해 절삭력을 추정하는 방법을 제시하였으며, HEIDENHAIN 사의 상용 공작기계에서는 스피들 전력을 이용하여 부하를 모니터링한다[14,15].

본 연구에서는 전기적 신호를 이용하여 3가지의 절삭력 추정 방법을 비교하였으며, 각각 기존의 전류만을 이용한 절삭력 추정 방법과 주축 모터의 전기적 특성을 고려한 전류 기반 절삭력 추정 방법, 그리고 주축 전력 기반 절삭력 추정 방법을 공구동력계 측정 결과와 비교하여 각 방법의 정확도를 비교하였다.

3축 수직형 머시닝센터에서 가공 중에 출력되는 전기적 신호를 전류, 전압 측정 모듈을 이용해 수집하였으며, 엔드밀에 비해 비교적 넓은 부하범위의 가공이 가능한 페이스 커터를 사용하여 동일 RPM에서 가공 실험을 수행하였다. 각각의 절삭력 추정 방법 중 기존 전류 기반 절삭력 추정 방법의 경우, 공구동력계로 측정된 절삭력을 통해 주축 모터의 토크 상수를 도출하여 절삭력을 추정하였다. 하지만 실제 부하가 변화하는 가공 상황에서 전류와 토크의 관계가 선형적이지 않아 정확도가 떨어지는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 주축 모터로 사용하고 있는 3상 인덕션 모터에서 부하가 변함에 따라 역률, 슬립, 효율 등의 주축 모터의 전기적 특성이 변화하는 성질을 반영하여 주축 모터의 특성을 고려한 전류 기반 절삭력 추정 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 주축 모터의 전기적 특성을 반영해 슬립과 토크 관계를 통해 절삭력을 추정하는 방법으로 기존의 토크 상수를 도출하여 절삭력을 추정하는 전류 기반 추정 방법에 비해 향상된 정확도를 기대할 수 있다. 주축 전력 기반 절삭력 추정 방법에서는 Blondel's Theorem의 2전력계 측정 방식을 이용해 전력을 도출하고, 주축 RPM과 공구 직경을 이용해 절삭력을 추정하였다[16].

## 2. 주축 모터의 전기적 특성

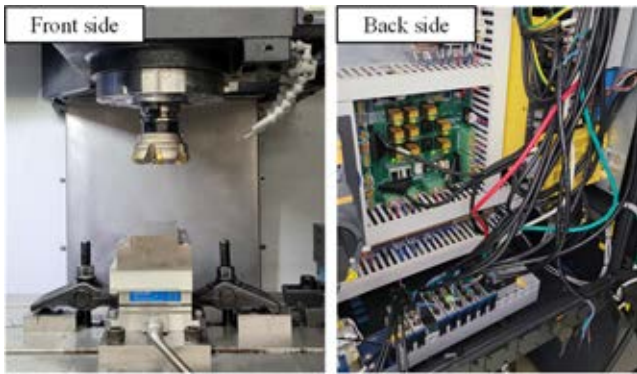
### 2.1 테스트베드 구성

주축 전류 및 전력 모니터링을 위하여 상용 3축 수직형 머시닝센터(DNM4500, DN Solutions)에 테스트베드를 구축하였다. 테스트베드 구성을 Figs. 1(a)에 표현하였고, 그의 도식을 1(b)에 표현하였다. 주축에서 출력된 3상(U상, V상, W상)의 전류 및 전압 측정을 수행하였다. 전류는 24 bit의 분해능을 가진 전류 수집 모듈(NI-9247, National Instrument)을 사용하였으며, 주축에서 출력되는 3상 중 2상(U상, V상)의 전류를 수집하였다. 전압은 24 bit의 분해능을 가진 전압 수집 모듈(NI-9225, National Instrument)을 사용하였으며, U상과 V상 각각의 W상과의 전위차를 수집하였다. 전류 기반 절삭력 추정 결과 및 전력 기반 절삭력 추정 결과 각각을 실제 절삭력 값과 비교하기 위하여 공구동력계(9257A, Kistler)를 설치하였고, 16 bit 분해능을 가진 전압 입력 모듈(NI-9215, National Instrument)을 사용하여 X, Y, Z 방향의 절삭력 값을 측정하였다. 전류, 전압, 절삭력 측정을 위한 측정 모듈들은 모두 NI-DAQ Chassis를 사용하여 동일한 샘플링 타임으로 데이터를 취득하도록 구성하였다.

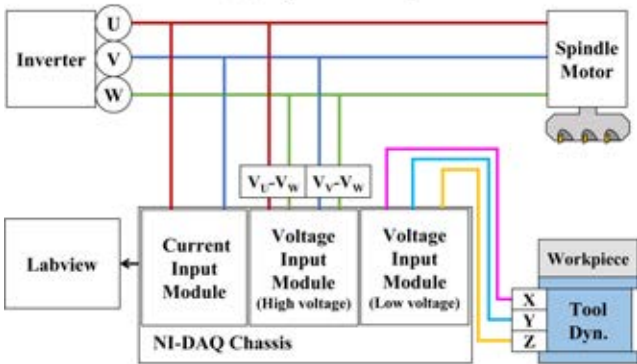
### 2.2 인덕션 모터의 전기적 특성

상용 공작기계에서는 주축 스피들 모터로 인덕션 모터를 주로 사용하는데, 인덕션 모터를 이용해 가공을 진행하며 부하가 가해지면 인덕션 모터의 전기적 특성에 따라 역률, 슬립, 효율 등의 다양한 인자에 변화가 발생한다.

본 연구에 사용된 장비에 장착된 스피들 모터는 최대 출력



(a) Experimental setup



(b) Diagram of testbed configuration

Fig. 1 Testbed configuration

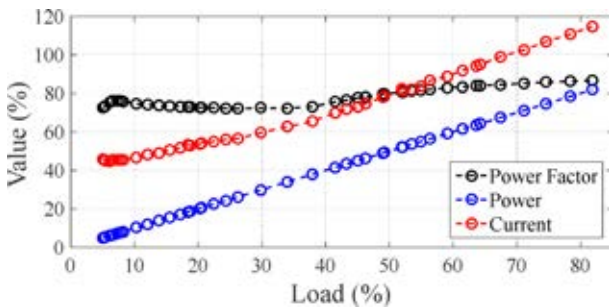


Fig. 2 Relationships of power factor, power, current with load variation in actual cutting conditions

18.3 kW, 최대 토크 118 Nm의 3상 인덕션 모터이다. 교류에서는 직류와는 달리 전류와 전압 간의 위상차에 의해 역률(Power Factor, PF)이 발생하게 되는데, 이는 모터가 사용하는 유효전력과 피상전력의 비율로 표현할 수 있다. 역률 도출 과정은 식(1)을 따르며, 출력 전력  $P_{out}$  을 전류의 실효값  $I_{rms}$  과 전압 실효값  $V_{rms}$  의 곱으로 나누어 역률 PF를 표현할 수 있다.

$$PF = \frac{P_{out}}{\sqrt{3} \cdot I_{rms} \cdot V_{rms}} \quad (1)$$

식(1)을 사용하여 페이스커터(6날 80 φ, Taegutec)를 사용해 S45C 시편을 1,500 RPM으로 가공 깊이와 이송속도를 변경해 전력 부하를 다르게 하여 가공하며 역률을 계산하였다. 계산한

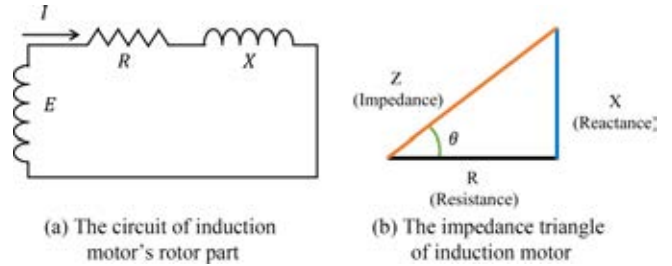


Fig. 3 Electrical characteristics in induction motor

역률과 전력 부하, 전류 부하를 Fig. 2에 나타내었으며, 부하가 변화함에 따라 역률이 변화하는 모습을 확인할 수 있다.

이렇게 모터에 부하가 가해지는 상황에서 부하 토크에 의해 슬립이 발생하게 된다. 인덕션 모터는 동기 속도  $N_s$  에 못 미치는 속도로 구동하게 되는데, 이때 동기 속도와 실제 회전 속도  $N$ 의 비율을 슬립  $s$  이라고 하며, 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (2)$$

인덕션 모터의 2차 회로를 간단히 Fig. 3의 (a)에 나타내었다. 이 때, 2차 회로에 가해지는 전류  $I$ 는 식(3)과 같이 슬립  $s$ , 전압  $E$ , 저항  $R$ , 리액턴스  $X$  성분으로 표현할 수 있으며, 실제 회전 속도가 작아져서 슬립이 커지면 전류가 커진다.

$$I = \frac{E}{\frac{R}{s} + jX} \quad (3)$$

이를 Fig. 3(b)에 표현된 임피던스 삼각형을 이용하여 역률과 슬립의 관계를 살펴보았을 때, 역률은 저항 성분과 리액턴스가 이루는 각  $\theta$ 에 의해 결정되며, 역률은 코사인함수를 이용해 표현할 수 있다. 이 때, 슬립이 증가하게 되면, 리액턴스는 일정하기 때문에  $\theta$ 가 감소하며 역률이 감소하게 된다. 이렇게 역률이 낮을 경우에는 전력 손실이 생겨 에너지 측면으로 보았을 때 효율이 떨어지게 된다. 일반적으로 저역률을 보상하기 위해 커패시터 또는 인덕턴스를 추가하여 PFC (Power Factor Correction) 회로를 구성한다.

역률과 슬립 외에도 부하가 가해지는 상황에서 모터의 효율  $\eta$  또한 변화가 발생한다. 효율은 식(4)와 식(5) 같이 출력 전력에서 스피들 모터의 각속도  $\omega_M$ 을 나눠서 도출하는 전기적 힘에서 기계적 힘  $T_{mech}$ 으로 변환되는 과정에서 발생하는 효율이며, 동손, 철손 등과 같은 전기적 손실이 포함된 값으로 볼 수 있다. 앞서 진행한 실험에서의 부하에 따른 효율을 Fig. 4에 나타내었으며, 부하에 따른 효율 변화를 확인할 수 있다.

$$T_{mech} = \frac{P_{out}}{\omega_M} \cdot \eta \quad (4)$$

$$\eta = \frac{T_{mech} \cdot \omega_M}{P_{out}} \quad (5)$$



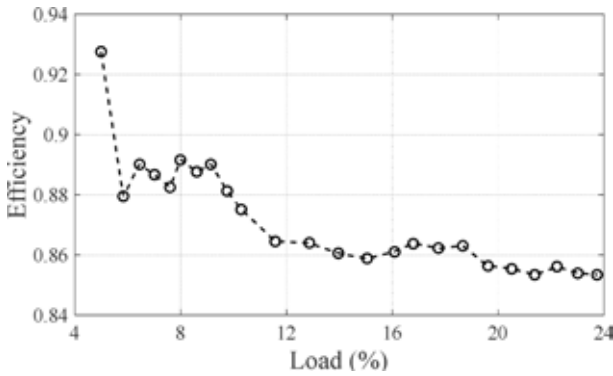


Fig. 4 Relationships of efficiency with load variation

Table 1 Cutting condition of basic experiments

Cutting conditions	
Material	S45C
Tool	Face cutter (Taegutec, 80 φ)
Spindle speed	1,100 RPM
Feed rate	400, 500, 600, 700 mm/min
Axial depth	1 mm
Lateral depth	64 mm

Table 2 Derivation of the torque constant

Feed rate (mm/min)	400	500	600	700	Average
$K_T$	0.984	1.086	1.161	1.206	1.109

### 3. 주축 전기신호 기반 절삭력 추정 방법

#### 3.1 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법

기존 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법의 경우, 식(6)과 같이 가공 중 출력된 전류의 실효값과 토크 상수  $K_T$ 의 곱으로 표현된 절삭토크에 공구 반지름  $r$ 을 나누어 절삭력  $F_{T,I}$ 을 추정하였다.

$$F_{T,I} = \frac{I_{rms} K_T}{r} \tag{6}$$

출력된 전류는 무부하 상태일 때의 전류를 포함하고 있으므로 절삭에 해당하는 전류를 구하기 위해 측정값에서 무부하 상태에서의 전류값을 제거하여 절삭 시의 전류를 구하였다. 실제 기존 전류 기반 추정 방법을 사용하기 위해 Table 1에 나타난 절삭 조건으로 전류 실효값과 공구동력계로 측정된 절삭력을 이용해 토크 상수를 구한 결과, Table 2와 같이 부하에 따라 토크 상수가 변함을 볼 수 있다. 또한, 도출된 토크 상수들의 평균을 대푯값으로 정하여 기존 전류 기반 방법으로 절삭력을 도출한 결과, Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 공구동력계 측정값의 경향을 추종하지만, 정확도가 떨어짐을 확인할 수 있다.

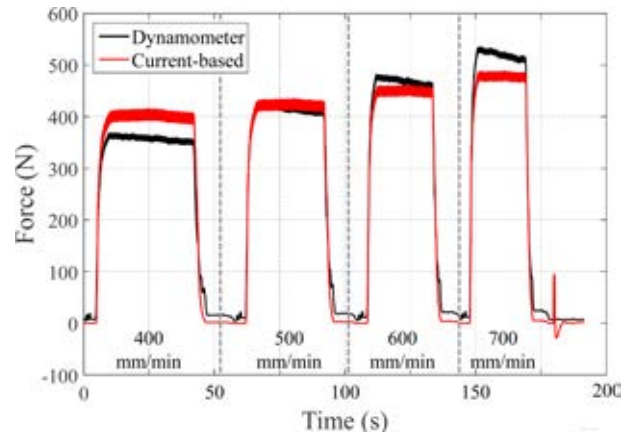


Fig. 5 Cutting force determination in basic experiment using tool dynamometer, conventional current-based method

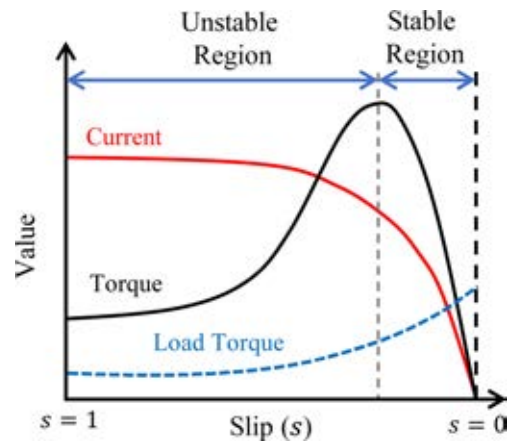


Fig. 6 The relationships of current, torque, load torque with variation of slip in induction motor

이러한 기존 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법의 문제를 보완하기 위하여, 주축 모터의 전기적 특성을 고려한 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법을 제안하였다. 3상 인덕션 모터에서의 슬립에 따른 토크 및 전류의 관계를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 Torque는 모터의 구동 토크를 의미하며, Load Torque는 모터의 회전자에 가해지는 부하 토크를 나타낸다. 구동토크가 최대가 되는 점을 기준으로 구동 시작부터 최대 토크 지점까지의 고 슬립 영역을 Unstable Region, 최대 토크 이후부터 슬립이 0이 되는 지점까지의 저 슬립 영역을 Stable Region으로 구분한다. Unstable Region에서는 슬립이 증가할수록 토크는 감소하는데, 이때 토크가 감소할수록 부하가 추가되고 모터 속도는 감소하여 작동이 불안정한 반면, Stable Region에서는 슬립과 토크가 선형적인 관계를 가지기 때문에 안정적으로 작동할 수 있으며, 모터는 항상 Stable Region에서 작동한다. 절삭 또한 Stable Region의 구동 토크와 부하 토크가 만나는 운전점 부근에서 이뤄지는데, 이때 토크와 슬립이 비례함을 가정할 수 있다. 식(3)의 전류 식에 토크와 슬립이 서로 비례함을 나타낸 식(7)을 대입하면, 인덕션 모터에 흐르는 전류  $I$ 를 식(8)과 같이

Table 3 Cutting condition of experiments

Cutting conditions		
Workpiece	S45C	
Tool	Face cutter (Taegutec, 80 φ)	
Spindle speed	1,500 RPM	
Axial depth	1 mm	
Lateral depth	64 mm	
Feed rate	# 1	20-300 mm/min
	# 2	350-1000 mm/min

정리할 수 있다. 정리된 식을 다시 토크  $T$  에 대한 식으로 정리 하면 저항, 리액턴스, 전압은 일정한 값을 가지기 때문에 하나의 상수로 치환하여 식(9)와 같이 정리할 수 있다.

$$s = cT \tag{7}$$

$$I = \frac{E}{\frac{R}{cT} + jX} \tag{8}$$

$$T = \frac{R}{c\left(\frac{E}{I} - jX\right)} = \frac{IR}{cE - jXI} \approx \frac{I}{k_1I + k_2} \tag{9}$$

이렇게 구한 토크는 절삭토크  $T_c$  와 구동토크  $T_i$  의 합인데, 전체토크를 식(9)와 같이 정리하였고, 구동토크는 일정한 값을 가지기 때문에 상수로 가정하면 절삭토크는 식(10)과 같이 정리 할 수 있다. 따라서, 모터의 전기적 특성을 고려한 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법은 식(11)과 같이 절삭토크에 공구반지름을 나누어 도출할 수 있다.

$$T_c = \frac{I}{k_1I + k_2} - T_i = \frac{I}{(k_1I + k_2)} - k_3 \tag{10}$$

$$F_{T,Current} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{I}{k_1I + k_2} - k_3 \right\} \tag{11}$$

### 3.2 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법

수집된 가공 중 전류, 전압 수집 값을 Blondel's Theorem을 사용하여 식(12)와 식(13)의 과정으로 전력값을 도출하였다. 3 상 회로에서의 전력은 식(12)과 같이 각 상의 전류와 전압의 곱을 합한 것과 같다는 점을 이용하였다. U, W상의 전위차와 V, W상의 전위차를 각각  $V_1, V_2$  로 설정하였을 때, 출력 전력은 U상의 전류  $I_U$  와  $V_1$  의 곱과 V상의 전류  $I_V$  와  $V_2$  의 곱을 합한 것과 같다.

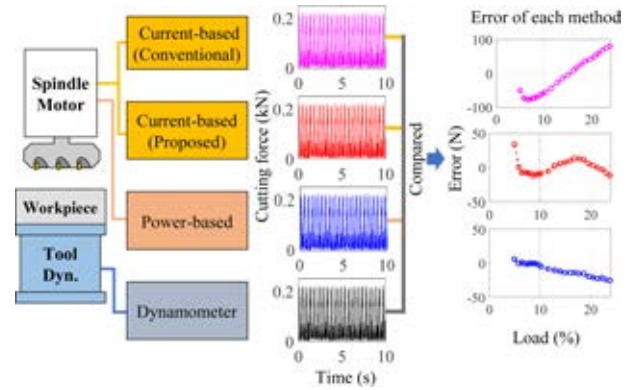


Fig. 7 Diagram for comparing the accuracy of each estimation methods

$$P_{out} = I_U V_U + I_V V_V + I_W V_W \tag{12}$$

$$\begin{cases} V_1 = V_U - V_W \\ V_2 = V_V - V_W \end{cases} \tag{13}$$

$$P_{out} = I_U(V_U - V_W) + I_V(V_V - V_W) = I_U V_1 + I_V V_2$$

도출된 출력 전력은 전류와 마찬가지로 무부하 상태일 때의 전력을 포함하고 있으므로, 출력된 전력에서 무부하 상태의 전력  $P_{air}$  을 제거하여 절삭 시의 전력을 통해 절삭력을 추정해야 한다. 도출된 절삭 시의 전력을 주축 스피indle 모터의 각속도와 공구반지름으로 나누어 절삭력을 추정할 수 있으며, 그 과정은 식(14)의 과정을 따른다.

$$F_{T,Power} = \frac{P_{out} - P_{air}}{\omega_M \cdot r} \tag{14}$$

### 3.3 각 추정 방법의 정확도 비교

앞서 소개했던 기존 주축 전류 기반 추정 방법, 제안된 주축 전류 기반 추정 방법, 그리고 주축 전력 기반 추정 방법 등의 방법으로 도출한 절삭력을 공구동력계 측정값과 비교하여 각 방법의 정확도를 비교하였다. 정확도 비교 방법에 대한 간단한 도식을 Fig. 7에 나타내었다. 실험 조건은 Table 3과 같이 절삭 조건을 구성하였으며, 2.1과 동일한 테스트베드에서 절삭 실험을 하였다. 주축 회전 속도는 장비 기저 속도인 1,500 RPM으로 고정하여 이송속도에만 변화를 주었는데, 20부터 300 까지는 20 mm/min씩, 300부터 1,000 까지는 50 mm/min씩 이송 속도를 증가시켰다.

기존의 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법, 모터의 전기적 특성을 고려한 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법 등으로 추정된 절삭력을 공구동력계로 측정된 절삭력과 비교하여 Figs. 8(a)에 나타내었으며, 각 방법으로 구한 절삭력과 공구동력계 측정값과의 오차를 8(b)에 나타내었다. 인덕션 모터의 경우 저부하 구간에서는 철손이 급격히 증가하여 효율 저하가 발생하게 된다[17]. 기존 주축 전류 기반 방법으로 도출한 절삭력의 RMS 오차는 55.81 N, 모터의 전기적 특성을 고려한 주축 전류 기반 방법의

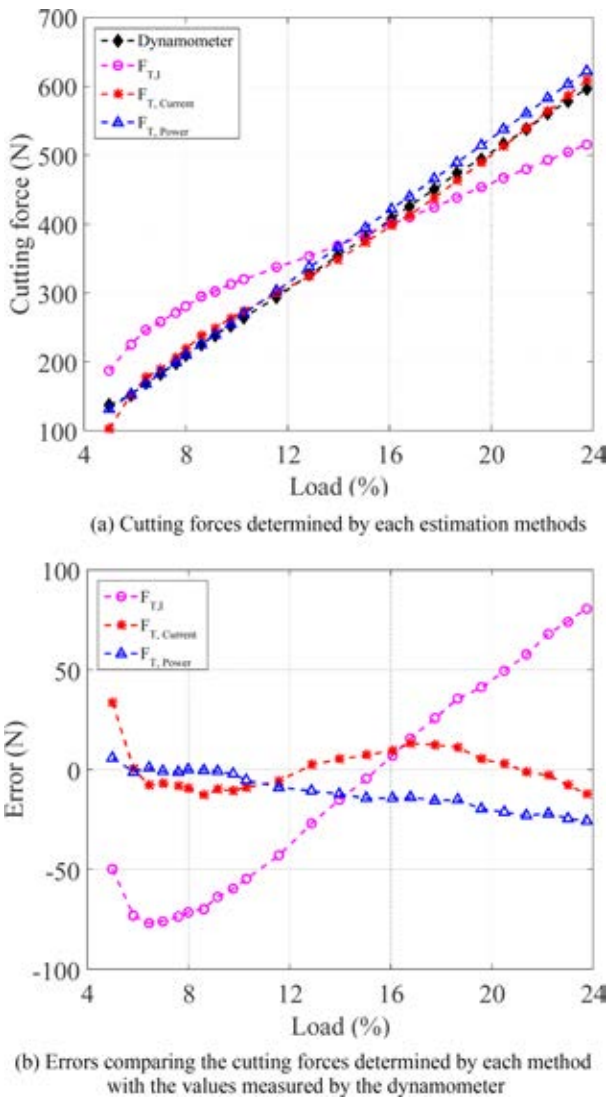


Fig. 8 Comparison of the accuracy of each estimation method

오차는 10.73 N, 그리고 주축 전력 기반 방법의 평균 오차는 13.86 N이며, 오차율은 각각 19.42, 3.73, 4.82% 로 나타났다. 각 방법의 오차율을 비교하였을 때, 모터의 전기적 특성을 고려한 주축 전류 기반 추정 방법과 주축 전력 기반 추정 방법이 비교적 높은 정확도로 절삭력을 추정할 수 있음을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 외부 센서를 사용하지 않고 전기적 신호를 이용해 절삭력을 감지하는 방법을 모색하고, 기존 주축 전류 기반 추정 방법에서 정확도가 떨어지는 문제를 보완하기 위해 스핀들 모터의 전기적 특성을 고려한 주축 전력 기반 절삭력 추정 방법을 제안하였다. 기존 주축 전류 기반 방법, 모터의 전기적 특성을 고려한 주축 전류 기반 방법, 그리고 주축 전력 기반 방법 등의 3가지 방법들로 추정된 절삭력을 각각 공구동력계

결과와 비교하여 각 방법들의 정확도를 비교하였다.

3축 수직형 머시닝센터에 전류 및 전압을 수집할 수 있는 모듈과 실제 절삭력을 측정할 수 있는 공구동력계를 통해 실시간으로 데이터 수집이 가능한 테스트베드를 구성하였으며, 페이스 커터를 이용해 가공실험을 하며 전류, 전압, 공구동력계 측정 데이터를 수집하였다. 수집된 전류 및 전압을 통해 부하가 변함에 따라 역률, 슬립, 효율 등의 모터의 전기적 특성들이 달라짐을 확인할 수 있었다.

기존 전류 기반 방법에서는 절삭 중에도 토크와 전류가 비례한다고 가정하여 식(8)의 과정으로  $F_{T,I}$  를 도출하였다. 하지만 제안된 모터의 전기적 특성을 고려한 전류 기반 방법에서는 전류 - 슬립 관계를 이용해 토크와 슬립이 일정함을 가정하여 절삭력  $F_{T,Current}$  을 도출하였다. 주축 전력 기반 방법에서는 수집된 전류 및 전압을 이용해 전력을 구하여 절삭력  $F_{T,Power}$  을 추정하였다.

각각의 방법으로 추정된 절삭력을 공구동력계 측정 결과와 비교하였을 때, 기존 전류 기반 방법, 제안된 전류 기반 방법, 전력 기반 방법 각각 55.81, 10.73, 13.86 N의 RMS오차를 보이며 각 방법의 오차율은 19.42, 3.73, 4.82%로 나타났다. 각 방법들의 오차율을 비교한 결과, 모터의 전기적 특성을 고려한 주축 전류 기반 절삭력 추정 방법과 주축 전력 기반 절삭력 추정 방법의 정확도가 높음을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2022 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원(No. P0020616, 2022 년 산업혁신인재성장지원사업)과 2021 년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No. 20012834).

REFERENCES

1. KISTLER, Rotating cutting force dynamometers (RCDs), Fz max 20 kN, Mz max 150 Nm / 9170A, <https://www.kistler.com/INT/en/cp/rotating-cutting-force-dynamometers-9170a/P0000633>
2. Altintas, Y., Park, S., (2004), Dynamic compensation of spindle-integrated force sensors, CIRP Annals, 53(1), 305-308.
3. Dornfeld, D., Kannatey-Asibu, E., (1980), Acoustic emission during orthogonal metal cutting, International Journal of Mechanical Sciences, 22(5), 285-296.
4. Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., Dornfeld, D., (2010), Advanced monitoring of machining operations, CIRP Annals, 59(2), 717-739.
5. Hase, A., Wada, M., Koga, T., Mishina, H., (2014), The relationship between acoustic emission signals and cutting

phenomena in turning process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 947-955.

6. Postel, M., Aslan, D., Wegener, K., Altintas, Y., (2019), Monitoring of vibrations and cutting forces with spindle mounted vibration sensors, *CIRP Annals*, 68(1), 413-416.
7. Kuntoğlu, M., Salur, E., Gupta, M. K., Sarikaya, M., Pimenov, D. Y., (2021), A state-of-the-art review on sensors and signal processing systems in mechanical machining processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(9), 2711-2735.
8. DMG MORI, Monitoring Cycles, Easy Tool Monitoring. <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=2693>
9. Jeong, Y.-H., Cho, D.-W., (2002), Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(14), 1559-1566.
10. Li, X., (2005), Development of current sensor for cutting force measurement in turning, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54(1), 289-296.
11. Aggarwal, S., Nešić, N., Xirouchakis, P., (2013), Cutting torque and tangential cutting force coefficient identification from spindle motor current, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 81-95.
12. Kim, H. Y., Ahn, J., Kim, S., Takata, S., (2002), Real-time drill wear estimation based on spindle motor power, *Journal of Materials Processing Technology*, 124(3), 267-273.
13. Mannan, M., Broms, S., Lindström, B., (1989), Monitoring and adaptive control of cutting process by means of motor power and current measurements, *CIRP Annals*, 38(1), 347-350.
14. HEIDENHAIN, User's manual cycle programming, iTNC 530. [https://content.heidenhain.de/doku/tnc\\_guide/pdf\\_files/iTNC530/34049x-05/zyklen/670\\_388-20.pdf](https://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/pdf_files/iTNC530/34049x-05/zyklen/670_388-20.pdf)
15. Stein, J., Wang, C.-H., (1990), Analysis of power monitoring on AC induction drive systems, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 112(2), 239-248.
16. Tektronix, The fundamentals of three-phase power measurements, [https://download.tek.com/document/55W\\_28943\\_0\\_HR\\_Letter.pdf](https://download.tek.com/document/55W_28943_0_HR_Letter.pdf)
17. Hamid, R. H., Amin, A. M., Ahmed, R. S., El-Gammal, A. A., (2006), New technique for maximum efficiency of induction motors based on particle swarm optimization (pso), *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2176-2181.



#### Jae-Eun Kim

Master student in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. Her research interest is real time monitoring.  
E-mail: [jaeunk@o.cnu.ac.kr](mailto:jaeunk@o.cnu.ac.kr)



#### Jun-Young Oh

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is intelligent CNC.  
E-mail: [kingoj0@o.cnu.ac.kr](mailto:kingoj0@o.cnu.ac.kr)



#### Beomsik Sim

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is digital twin.  
E-mail: [bssim@cnu.ac.kr](mailto:bssim@cnu.ac.kr)



#### Wonkyun Lee

Associate Professor in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interests include smart machine tool, robotic machining systems and digital twin.  
E-mail: [wklee@cnu.ac.kr](mailto:wklee@cnu.ac.kr)



# 궤도형 로봇의 계단 주행 조건 분석을 통한 객체 인식 알고리즘 기반 계단 자율 주행 시스템 개발

## Development of an Autonomous Stair Driving System based on an Object Detection Algorithm through Analysis of Stair Traversal Conditions of a Tracked Robot

송민기<sup>1</sup>, 김성재<sup>2</sup>, 서진호<sup>1,3,#</sup>  
Min Gi Song<sup>1</sup>, Sung-Jae Kim<sup>2</sup>, and Jin-Ho Suh<sup>1,3,#</sup>

<sup>1</sup> 국립부경대학교 대학원 지능로봇공학과 (Department of Intelligent Robot Engineering, Graduate School, Pukyong National University)

<sup>2</sup> 국립부경대학교 산업과학기술연구소 선임연구원 (The Industrial Science Technology Research Center, Pukyong National University)

<sup>3</sup> 국립부경대학교 에너지수송시스템공학부 기계시스템공학전공 (Major of Mechanical System Engineering, Division of Energy Transport System Engineering, Pukyong National University)

# Corresponding Author / E-mail: [suhgang@pknu.ac.kr](mailto:suhgang@pknu.ac.kr), TEL: +82-051-629-6189

ORCID: 0000-0002-8673-4528

KEYWORDS: Tracked mobile robot (궤도형 이동 로봇), Stair driving requirements analysis (계단 주행 요구사항 분석), Stair approach (계단 접근), Stair alignment (계단 정렬), Stair Traversal (계단 극복), Autonomous system (자율 시스템)

*In this paper, we propose an autonomous stair-driving system for the stable traversal of stairs by a tracked mobile robot operating in indoor disaster environments. Before developing the system, we conduct dynamic simulations to analyze the requirements for the robot to climb stairs. Simulations are performed under various initial conditions, and based on a detailed analysis of the results, we derive the necessary conditions for the robot's ascent. Using these requirements, we design the autonomous stair-driving system, which includes three main components: stair approach, stair alignment, and stair traversal. First, during the approach stage, we present a strategy for recognizing stairs using an object detection algorithm and generating control inputs for the stair approach motion. Next, in the alignment process, we outline an image processing sequence that extracts the edge contour of the stairs and a method for generating control inputs from the combined contour. Finally, in the traversal sequence, we describe the strategy for driving up the stairs. Additionally, we introduce an integrated ROS system to ensure the sequential execution of each strategy. We also verify the effectiveness of the individual strategies and demonstrate the capability of the proposed system through experiments using mock-up stairs and tracked robots.*

Manuscript received: August 16, 2024 / Revised: October 25, 2024 / Accepted: October 29, 2024

### 1. 서론

현재 세계 각지에서는 다양한 형태의 테러·범죄·전쟁 등의 재난 상황이 끊임없이 발생하고 있다. 이러한 현장에서 적절한 대응을 하기 위해서는 건물 내부의 위험 요인들을 파악하고, 생존자를 식별하는 등의 내부 상황을 명확하게 인식하는 것이 무엇보다 우선시된다. 현재 이를 위해 인적 자원이 투입되고 있지만, 내부의 위험 요소가 파악되지 않은 상태에서 인력을 투입하는

것은 2차적인 피해를 야기한다[1]. 이에 다양한 형태의 원격 이동 로봇을 활용하고자 하는 노력이 지속되어 왔고, 일반적으로 궤도형 로봇의 형태가 재난 상황에 가장 적합하다[2-7]. 이러한 궤도형 로봇을 운용하여 건물 내부를 탐색할 때, 로봇은 최대한 넓은 영역을 탐색할 수 있어야 한다. 일반적인 건물은 계단으로 층계가 연결되어 로봇의 탐색 영역이 확장되기 위해서는 계단을 통과해야 한다. 그러나, 실내·외 환경에서 운용되는 궤도형 로봇에 대해 계단은 극복하기 가장 어려운 장애물 중 하나이고,

이러한 계단을 극복하지 못하는 경우 로봇의 조사 대상 지역이 크게 제한된다.

로봇의 운용 환경에 존재하는 계단을 극복하는 것은 카메라 정보와 같은 제한적인 데이터로 주변 환경을 인식하는 조종자에게 숙련된 조종 기술이 요구된다. 다시 말해, 이는 상당한 경험에 요구되는 어려운 작업으로 계단 주행 성공 여부는 조종자의 숙련도에 좌우된다. 더구나 로봇 조작 미숙은 로봇의 파손으로 이어질 수 있으며 조종자를 훈련시키는 것 또한 금전적·시간적으로 바람직하지 않다[8,9]. 이 밖에도, 로봇 제어 및 센서 데이터 파악을 동시에 수행해야 하는 작업자의 업무 부하가 가중될 수 있다[10,11]. 즉, 이동 로봇이 계단을 주행함에 있어 사람의 실수로 인한 로봇의 파손을 방지하는 것과 동시에 조종자가 조종 외의 다른 임무에 집중할 수 있도록 하는 조치가 필요하다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 기존에 많은 연구들이 수행되었다. 특히 [12-14]에서는 ToF (Time of Flight) 방식의 센서를 사용하여 계단을 인식하거나 주행하기 위한 방법들이 제안되었다. 그러나, IR (Infra-Red) ToF 방식의 센서는 외부 광원, 특히 강한 일광에 의해 센서의 정확도가 영향을 받을 수 있다. 그리고 ToF 센서는 물체의 재질과 색상에 따라 반사율이 달라지는 경향을 보이며, 어두운 색상이나 광택이 있는 표면 등에 대해서는 정확한 거리 측정이 어렵다. 그렇기 때문에 해당 센서를 주된 인식 장치로 사용하는 것은 통제해야 할 요인이 많아 다양한 환경에 적용하기 어려울 수 있다. 또한, 이러한 연구에서 제안되는 접근법들은 전체적인 계단 주행을 위한 전략을 제시하지 않으며, 첩판이 없거나 폭을 모르는 계단과 같이 모든 계단에 적용할 수 없는 한계점을 가진다.

[15-17]의 연구에서는 RGB (Red, Green, Blue) 카메라를 사용하는 방법을 제안하였다. [15]에서는 환경적 영향을 억제하기 위한 Gabor 필터와 영상처리를 통한 계단 윤곽선 추출 및 윤곽선의 중점을 연결하여 로봇이 추종해야 하는 경로를 생성하는 방법을 제안하였다. 하지만, 제안된 영상처리 방법은 조도의 영향을 적응적으로 대응하지 못하며, 외부 광원의 영향으로 영상 데이터의 특정 영역이 포화되는 경우에 부적절한 경로 생성으로 로봇이 파손될 위험성이 존재한다. [16]에서는 원거리 접근, 근거리 접근, 계단 정렬, 계단 극복으로 구성되는 하강 계단 주행 방법을 제안한다. 이때, 원거리 접근에서 사용하는 질감 에너지 측정 기반의 방법은 빛의 각도, 표면 상태, 거리 등에 따라 계단을 오검출할 가능성이 크며, 근거리 접근에서 사용하는 광학흐름 기법은 많은 시간이 소요된다. 이는 신속한 탐색 및 조사가 요구되는 재난 현장에 적합하지 않다.

[18-22]에서는 RGB-D (Red, Green, Blue-Depth) 센서를 사용하여 계단을 주행하기 위한 방법들을 제안하였다. [18]에서는 전역적인 공간에서 계단의 탐색을 수행하기 위해 벽 추종(Wall-following) 기법을 제안한다. 그러나, 해당 방법은 갑작스럽게 벽이 사라지거나, 하행 계단이 등장하는 경우에는 로봇에 상당한 위험이 될 수 있다. [18,19], [21,22]의 연구에서는 계단에 대한 정렬을 수행하기 위해 계단의 첩판에 반사되는 깊이 값을

사용하는 방법을 제안하지만, 이는 산업용 계단과 같이 첩판이 없는 계단에 대해서는 적용할 수 없어 범용성이 떨어진다. 추가적으로, ToF 방식의 깊이 측정 방식을 가지는 RGB-D 카메라는 물체의 가장자리에서 빛의 회절로 인한 구멍 현상(Hole Phenomenon)으로 깊이 측정값에 대한 신뢰성을 기대하기 어렵다[23-25]. 특히, 계단처럼 급격한 곡률이 많은 구조에 대해서는 RGB-D 센서의 불확실성이 증대한다. 이에 따라, 계단의 모서리에 해당하는 깊이 값을 사용하여 계단을 인식하는 것은 불확실성에 의존하는 문제점을 안게 된다. [22]에서는 이러한 구멍 현상을 방지하기 위해 중앙값 필터의 사용을 제한한다. 중앙값 필터는 잡음을 제거하며 데이터의 정보를 완만화하는데 효과적이며, 특히 소금-후추 잡음(Salt-and-Pepper Noise)라 하는 무작위 및 급격한 값의 변화에 강인함을 보인다[26]. 하지만, 중앙값 필터는 필터 자체의 특성으로 유용한 정보가 손실될 수 있다. 또한, 필터 내에서 깊이 유사한 특성을 가지는 경우에는 잘 작동하지만, 특정한 영역에 해당하는 값이 균일하지 못하고 크게 다른 영역에서는 오작동할 위험성이 존재한다[27]. 이러한 문제점으로 RGB-D 카메라의 깊이 값을 기반으로 특정한 동작을 생성하는 것은 많은 어려움이 존재한다.

[28,29]에서는 다중 센서를 사용한 계단 주행 방법을 제안한다. [28]에서는 가속도계, 소나(Sonar), 카메라를 이용하는 전략을 제시하였다. 해당 논문의 저자는 각 센서의 취약점을 기술하고, 이를 회피하여 안정적인 계단 주행을 위해 각 센서의 신뢰도를 평가하여 하나의 센서 데이터를 선택하는 방법을 제안한다. [29]에서는 자이로 센서, 기울기 센서와 2개의 카메라 및 레이다를 사용하고, 각 센서의 정보들을 통합하는 방법을 제안하였다. 해당 연구에서 제안된 방법들은 ToF 방식을 사용하는 센서에 의존성이 높다. 이에 따라, 벽이 없거나 첩판이 없는 계단에는 적용할 수 없으며, 조종자의 개입 없이는 전체적인 계단 주행에 필요한 모든 과정을 자율적으로 수행하기 힘들다.

[10,30]에서는 딥러닝 기반의 객체 분할 및 객체 인식 기법을 적용한 방법을 제안한다. 특히 [10]의 연구에서는 객체 분할 알고리즘과 모방 학습 기반의 행동 복제를 통한 계단 정렬 방법을 제안한다. 하지만, 모방 제어를 통한 계단 정렬 방법은 정밀한 제어를 수행하기 위한 기준 신호를 생성하지 못한다. 또한, 객체 분할 알고리즘은 특정한 영역을 정밀하게 구분할 수 있지만, 이를 통해 처리된 영역에 대해 각도 추정 및 모서리 추출 등의 영상처리를 수행하기 어려운 단점을 가진다. [30]에서는 객체 인식 알고리즘을 통해 계단을 인식하기 위해 총 848장의 사진이 사용되었지만, 이는 다양한 색상·형태·조도 환경의 계단을 안정적으로 인식하기에는 부족하다. 또한, 제안된 방법은 조도의 영향을 적응적으로 처리할 수 없으며, 로봇이 계단에 대해 적절한 위치에 배치된 상황을 가정한다.

따라서 계단 주行的 완전 자율화, 시스템의 범용성, 특정 센서의 사용 등으로 인한 한계점을 종합적으로 해결하고 궤도형 로봇이 안정적으로 계단을 주행하기 위한 방안이 요구된다. 이에 본 논문에서는 궤도형 로봇의 안정적인 계단 주행을 위한

방법에 대한 연구를 제안한다. 본 연구에서는 제시하는 기여는 다음과 같다.

- 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn을 사용하여 기존 연구에서 제시되지 않은 계단 주행 요구사항을 명시적으로 도출하고, 요구사항을 기반으로 계단 접근, 계단 정렬, 계단 극복으로 구성되는 계단 자율 주행 시스템을 제시한다.
- 실내외 계단, 산업용 계단 등 다양한 형태·재질·색상의 계단을 포함하는 14,351장의 데이터 세트를 구축하고, 객체 인식 알고리즘을 학습하여 계단을 인식한다. 이러한 방법을 통해 제안하는 시스템은 다양한 형태의 계단에 적용할 수 있으며, 기존의 방법들보다 보편적인 시스템을 구성할 수 있다.
- 제안하는 계단 접근, 계단 정렬, 계단 극복 단계별 알고리즘은 다음과 같이 구현한다. 접근 동작을 수행하기 위해 계단 인식 정보를 기반으로 기준 신호를 생성하여 제어를 설계한다. 정렬 동작은 계단 인식 정보와 강인한 영상 처리 기법을 통하여 기준 신호 및 제어 입력을 생성한다. 극복 과정에서는 안정적인 계단 주행을 위해 로봇의 Yaw 각도를 유지하기 위한 제어를 설계하며, 각 과정에 대한 전략을 통합하여 전체 계단 자율 주행 시스템을 개발한다.
- 궤도형 로봇에 계단 자율 주행 시스템을 탑재하여, 각 과정에 대한 실험을 통해 제안하는 전략에 대한 유효성을 입증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 궤도형 로봇이 계단을 주행함에 필요한 사항들을 도출하기 위한 동역학 시뮬레이션을 진행하고, 시뮬레이션 결과에 대한 상세한 분석을 기반으로 요구사항을 제시한다. 3장에서는 도출된 사항들을 기반으로 계단 자율 주행 시스템을 설계하고, 시스템의 세부적인 내용을 설명한다. 4장에서는 실험을 통해 제안하는 시스템을 검증하고, 마지막 5장에서 본 논문의 결론과 향후 계획을 서술한다.

## 2. 계단 주행 요구사항 도출

본 장에서는 궤도형 이동 로봇이 계단을 주행함에 있어 필요한 사항들을 파악하기 위한 동역학 시뮬레이션을 진행한다. 또한, 시뮬레이션 결과를 분석하고 이를 기반으로 하여 계단 주행 요구사항을 도출한다.

### 2.1 계단 주행 시뮬레이션

먼저, 궤도형 로봇이 계단을 주행하기 위해 요구되는 사항들을 파악하기 위한 동역학 시뮬레이션을 진행한다. 시뮬레이션은 상용 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn을 사용하여 진행하고, 시뮬레이션에 사용된 궤도형 로봇의 형태는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1과 같이 설계되는 궤도형 로봇의 설계 사양은 Table 1과 같다. 또한, 시뮬레이션에 사용되는 계단의 형상은 Fig. 2와

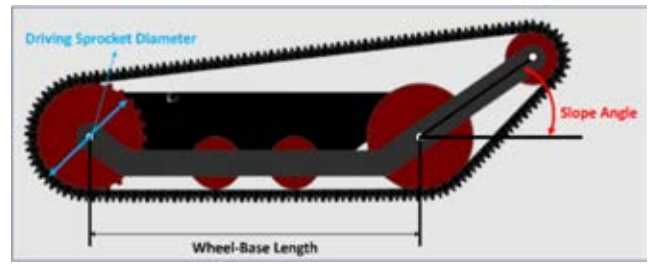


Fig. 1 Tracked mobile robot for dynamic simulation

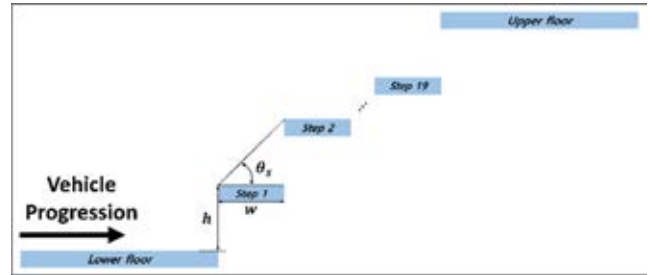


Fig. 2 Stair dimension for dynamic simulation

Table 1 Specification of tracked mobile robot

Design parameters	unit	Value
Wheel-base length	mm	630.00
Driving sprocket diameter	mm	202.00
Track front slope angle	°	35
Total weights	kg	21.584

Table 2 Dimension of stair

Design parameters	unit	Value
Height of step ( $h$ )	mm	185
Width of step ( $w$ )	mm	285
Inclination angle of stair ( $\theta_s$ )	°	32.989
Number of steps	each	20

같으며, 해당 계단의 치수는 Table 2와 같이 일반적으로 실제 환경에서 볼 수 있는 계단의 형상과 유사하게 적용한다.

시뮬레이션은 계단을 주행할 때, 진입 각도의 영향을 분석하고 안정적인 계단 주행을 위한 제약 사항을 파악하기 위해 진행한다. 이를 위해 계단에 대해 로봇의 각도를 0부터 30°까지 5° 간격으로 회전하며 직진 주행을 수행하고, 주행은 Driving Sprocket에 66 RPM (Revolution Per Minute)의 입력을 인가한다. 이때 로봇의 선속도는 약 0.7 m/s이고, 계단을 완전히 주행하기 위해 총 15초간 시뮬레이션을 진행한다. Fig. 3는 시뮬레이션 결과로 Figs. 3(a), 3(b), 그리고 3(c)는 각각 로봇 본체의 Roll, Pitch, Yaw 각도 변화를 나타낸다.

Fig. 3에서 계단에 대한 로봇의 진입 각도에 따라 계단 주행의 결과가 극명하게 달라지는 경향을 보인다.



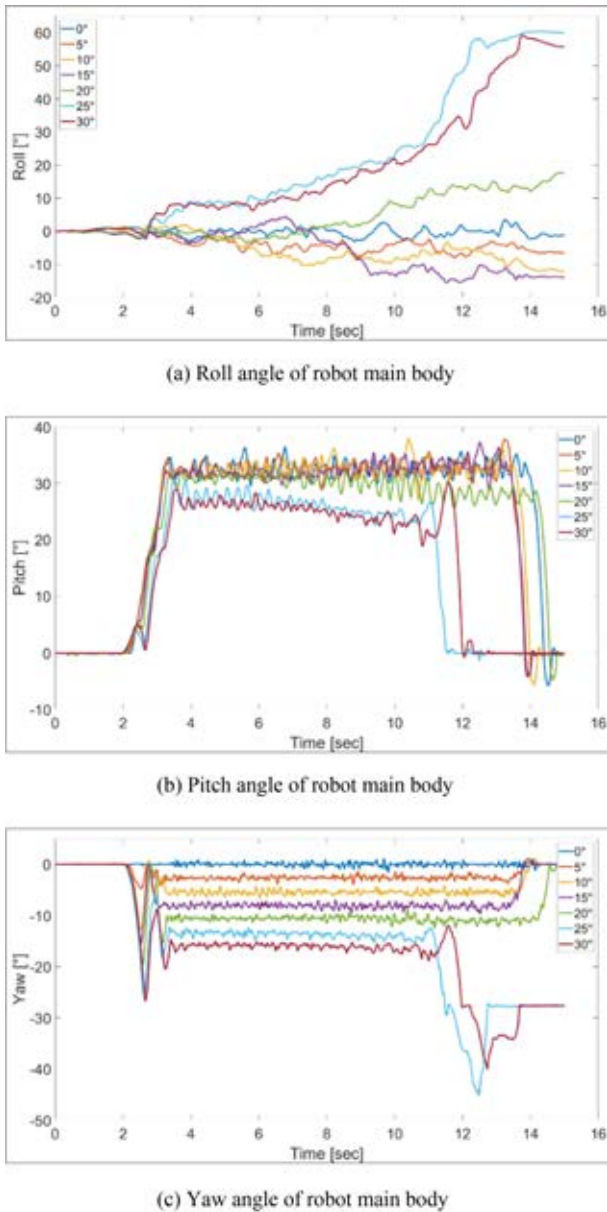


Fig. 3 Variation of 3-axes angles of the robot main body during stair climbing simulations

2.2 요구사항 도출

본 절에서는 앞선 시뮬레이션 결과에 대한 상세한 분석을 기반으로 계단 주행 요구사항을 도출한다. 먼저, Fig. 3에서 제시되는 결과와 같이 계단에 대한 로봇의 진입 각도가 증가함에 따라 주행 특성이 불안정해지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 진입 각도가 25와 30에 해당하는 결과에서 모든 값이 11초 부근에서 크게 변화함을 보이며, 로봇이 계단에서 추락하여 주행에 실패한다. 이는 로봇의 Yaw 및 Roll 각도가 특정한 범위를 초과하면 계단 주행에 실패함을 시사하고, 아래의 Figs. 4(a)와 4(b)는 계단 주행 중 Rolling과 Yawing의 경향성을 보다 명확하게 나타낸다.

Fig. 4와 같이 계단에 대한 진입 각도가 증가함에 따라 Roll

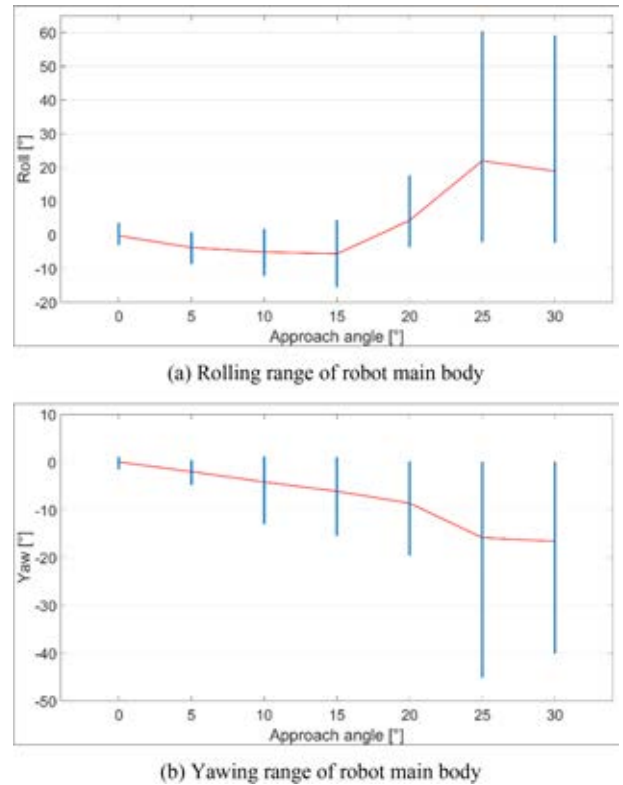


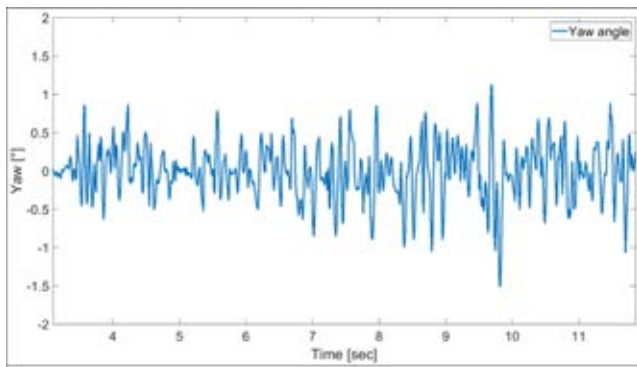
Fig. 4 Range of roll and yaw angle of robot main body (Red line: Average value, Blue line: Range of value)

및 Yaw 각도의 평균값 및 범위가 비선형적으로 증가함을 보인다. 진입 각도가 25°를 초과하는 경우에는 그 범위가 급격하게 증가함을 보이고, 이는 로봇이 조향 능력을 잃어 제어 불능 상태에 빠짐을 의미한다. 이러한 분석을 기반으로 계단에 대한 로봇의 초기 진입 각도가 주행 성능에 상당한 영향을 미치고, 계단 주行的 성공 여부에 크게 기여함을 알 수 있다. 이는 계단에 진입하기 전, 로봇의 진입 각도가 보정되어야 함을 의미한다.

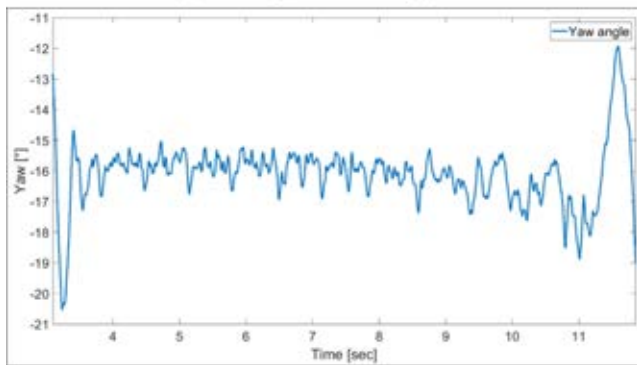
다음으로, 실질적인 계단 주행 과정에서 진입 각도가 0°에 가깝게 보정된다고 하더라도 안정적인 주행을 수행할 수 있는 것은 아니다.

Figs. 5(a)와 5(b)는 각각 0°와 30°에서 진행한 시뮬레이션에서 로봇의 Yaw 각도를 표현한 그림으로, Fig. 5(a)는 진입 각도가 0°인 상황이지만, 계단을 주행을 수행하는 약 3초부터 약 14.5초까지 로봇의 방향각이 유의미하게 진동하는 것을 확인할 수 있다. 이때, 계단 주행 과정으로 판단되는 해당 시간 범위 내에서 방향각은 최대 1.11685에서 최소 -1.50973°까지 2.62658°의 범위에서 흔들린다.

Fig. 5(b)는 진입 각도가 30°인 상황으로 초기에 계단에 진입하는 과정에서 방향각에 큰 폭의 변화가 발생함을 보인다. 또한, 계단에 진입한 것으로 판단되는 4초부터는 0°에 나타난 경향과 유사하게 특정한 범위 내에서 방향각이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 계단에서 전복을 시작하는 시점으로 판단되는 11초부터는 경향성을 벗어나 크게 변화하는 것을 볼 수 있다.



(a) Yaw angle of robot body at 0°



(b) Yaw angle of robot body at 30°

Fig. 5 Yaw angle of the robot body during actual stair traversal

이를 시작하는 시점에서 방향각은  $-18.8859^\circ$ 이고, 계단을 주행 중에 해당 값과 가장 차이가 큰 값은  $-15.0328^\circ$ 이다. 이는 계단 주행 중에 방향각이  $3.8531^\circ$ 의 범위에서 흔들리는 것을 의미하고, 이러한 범위를 벗어나는 경우 궤도형 로봇이 전복하여 계단 주행에 실패할 가능성이 증대한다.

즉, 방향각이  $2.62658^\circ$ 의 범위내에 존재하는 경우에는 전복이 발생하지 않고,  $3.8531^\circ$ 의 범위에서 벗어나는 경우에는 전복이 발생하는 것을 의미한다. 이러한 분석을 통해 궤도형 로봇이 계단을 안정적으로 주행하고, 계단 주행에 성공하기 위해서는 방향각의 제어가 요구된다. 즉, 궤도형 로봇의 안정적인 계단 주행을 위해 가장 필수적인 요구사항은 로봇의 방향각을 일정하게 제어하여  $2.62658^\circ$ 의 범위내에 유지되어야 함을 의미한다.

마지막으로, 이처럼 도출된 3개의 요구사항을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 계단 주행 전, 안정적인 계단 주행을 목적으로 계단에 대한 궤도형 로봇의 진입 각도를  $0^\circ$ 에 가깝게 보정한다.
- 2) 계단 주행 중, 계단 극복 성공을 목적으로 궤도형 로봇의 Yaw 각도를 일정하게 유지한다.
- 3) 계단 극복 과정에서 작업자의 업무 부하 감소를 목적으로 전체적인 계단 주행 업무 자율화한다.

다음 장에서는 위와 같이 도출된 요구사항을 기반으로 계단 자율 주행 시스템을 개발한다.

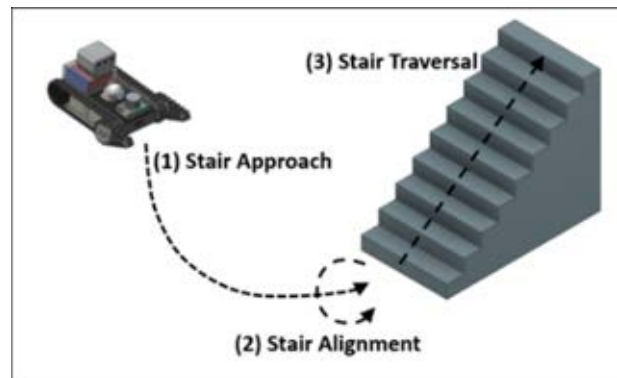


Fig. 6 Proposed autonomous stair driving system scheme

### 3. 계단 자율 주행 시스템

본 장에서는 앞서 도출한 요구사항들을 기반으로 계단 자율 주행 시스템을 설계하고, 구현하기 위한 전략들을 제시한다. 먼저, 해당 연구에서는 앞서 제시한 요구사항들을 모두 충족하며 계단을 극복하기 위해 Fig. 6과 같은 시스템을 제안한다.

Fig. 6은 본 연구에서 제안하는 계단 자율 주행 시스템의 개략도를 나타낸다. 그림과 같이 제안하는 시스템은 (1) Stair Approach, (2) Stair Alignment, (3) Stair Traversal 단계로 구성된다. 해당 장에서는 각 과정에 대한 독립적인 전략을 제시하고, 이를 통합하여 전체적인 계단 자율 주행 시스템을 개발한다.

#### 3.1 계단 접근 알고리즘

해당 절에서는 (1) Stair Approach를 수행하기 위해 고려되는 사항들과 계단 접근 동작을 구현하기 위한 전략을 제시한다. 먼저, 앞선 도출된 요구사항 3)을 충족하기 위하여 궤도형 로봇은 자율적으로 계단을 인식하고, 인식된 계단에 접근해야 한다. 이에 본 연구에서는 RGB-D 센서를 사용한 계단 접근 전략을 제안한다.

우선, 계단에 접근하는 동작을 수행하기 위해서 극복하고자 하는 계단을 인식하는 과정이 요구된다. 기존 객체 인식을 위한 다양한 방법들이 제안되었고 [31], 본 연구에서는 인식 성능과 연산 속도를 고려하여 YOLO (You Look Only Once) v5 모델을 사용한다[32]. 해당 모델을 통한 계단 인식을 위해 학습을 진행하고, 학습에 사용되는 데이터 세트는 총 14,351개의 계단 사진으로 구성되며, 계단 사진에는 실내외 계단, 산업용 계단 등 다양한 형태·재질·색상의 계단이 포함된다. 이때, 학습 데이터에 대한 과적합을 방지하고, 안정적인 학습을 수행하기 위해 전체 데이터 세트를 8:2의 비율로 학습 데이터와 검증 데이터로 구분한다. 학습을 진행한 결과, mAP0.5 (Mean Average Precision)가 0.962를 달성함을 확인하였다. 또한, Fig. 7과 같이 학습된 가중치를 적용하는 경우 크기, 모양, 색상과 같은 계단의 물리적인 속성과 무관하게 계단을 안정적으로 인식할 수 있음을 보인다.

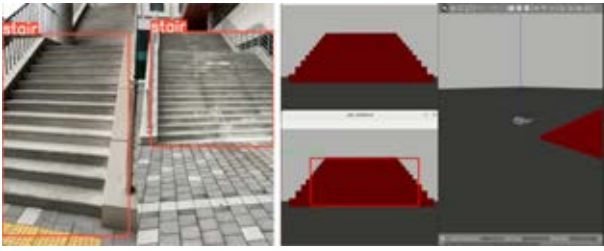


Fig. 7 Stair detection results using trained model (Left: Real world, Right: Simulation world)

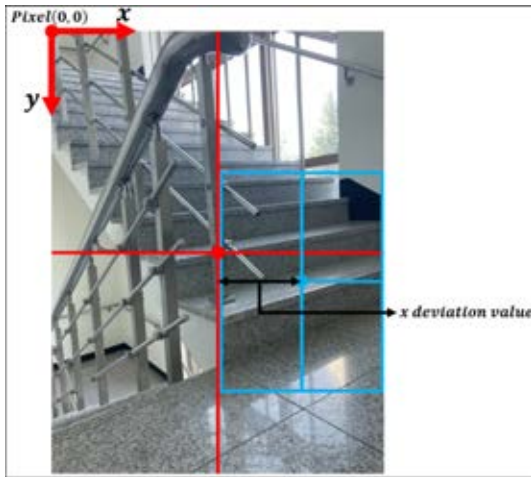


Fig. 8 Coordinate of RGB field

다음으로, 인식된 계단에 대한 접근을 수행하기 위해 인식된 계단 영역을 사용하여 오차 신호를 생성하고, 이를 기반으로 하여 계단 접근을 위한 제어 입력을 생성한다. 이를 위해 Fig. 8과 같이 픽셀 좌표계를 정의한다.

Fig. 8과 같이 RGB 영역에서 좌측 상단의 점을 좌표계의 원점  $pixel(0,0)$  으로 설정하고, 카메라 영역의 중심점을  $cam_c = pixel(x_c, y_c)$ , 인식 영역의 중심점을  $det_s = pixel(x_s, y_s)$  으로 정의한다. 여기서  $x_c, y_c, x_s, y_s$  는 각 중심점의 픽셀 좌표를 의미한다. 여기서  $x_c$  를 기준 신호,  $x_s$  를 현재 상태로 사용하여 식(1)과 같이 오차 신호를 정의한다.

$$x_{dev} = x_c - x_s \tag{1}$$

식(2)에서  $x_{dev}$  는 Fig. 8에서 ‘x Deviation Value’로 표현되는 값을 의미하고, 이를 오차 신호로 사용하여 계단에 접근하기 위한 제어 입력을 생성한다. 이때, 미끄럼 조향을 하는 궤도형 로봇의 경우 좌·우 바퀴의 속도 차를 기반으로 주행 방향을 조절한다. 즉, 궤도형 로봇이 계단에 접근하기 위해서는 전진 동작과 회전 동작에 대한 입력을 구분할 수 있고, 좌·우 바퀴에 인가되는 제어 입력을 식(2) 및 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_l = \omega_{throttle} - \omega_{steer} \tag{2}$$

Table 3 Gain design parameters

Design parameter	Description
$a_1$	Sets the maximum range of control gain
$a_2$	Sets the convergence value of control gain
$a_3$	Sets the change magnitude of control gain

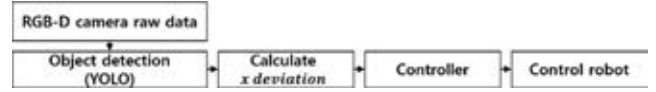


Fig. 9 Stair approach strategy scheme

$$\omega_r = \omega_{throttle} + \omega_{steer} \tag{3}$$

식(2)와 식(3)에서  $\omega_{throttle}$  는 계단에 접근하기 위한 전진 주행을 구현하는 항이고,  $\omega_{steer}$  는 계단 방향으로 조향 방향을 결정하는 항을 의미한다. 여기서  $\omega_{throttle}$  는 고정된 값을 사용하고,  $\omega_{steer}$  는 아래와 같이 계산된다.

$$\omega_{steer} = k_{approach} \cdot x_{dev} \tag{4}$$

$$k_{approach} = a_1 + a_2[1 - \exp(-a_3 \cdot x_{dev}^2)] \tag{5}$$

식(4)에서  $k_{approach}$  는 계단 접근 과정에서 방향각을 제어하기 위해 사용되는 제어 이득을 의미하고, 해당 제어 이득은 식(5)을 통해 정의된다. 해당 식에서  $a_1, a_2, a_3$  는 사용자가 결정하는 설계 매개변수를 의미하며, 각 변수의 역할은 Table 3과 같다[33].

이와 같은 방법으로 제어 입력을 생성하여 계단의 중심선에 근접하게 조향 각도를 설정할 수 있으며, 계단에 대한 접근을 수행할 수 있다. 추가적으로, 계단 접근 과정을 종료하고 계단 정렬 과정으로의 전환을 위해 RGB-D 카메라의 깊이 정보를 사용한다. 즉, 인식 영역 내부에 존재하는 최소 깊이 값  $depth(\min(det_s))$  과  $x_{dev}$  의 값이 사전에 설정한 임계값보다 작으면 해당 과정을 종료한다. Fig. 9는 제안하는 계단 접근 전략을 개략적으로 나타낸다.

### 3.2 계단 정렬 알고리즘

해당 절에서는 요구사항 1)을 충족하는 것을 목적으로 Fig. 7의 (2) Stair Alignment 과정의 전략을 제시한다. 해당 계단 정렬 과정에서는 계단을 바라보는 방향에 따라 계단 모서리 윤곽선의 각도가 다르게 보임을 사용한다. 그러나, 카메라 센서로부터 얻는 정보에는 사용하지 않는 불필요한 정보가 포함되는 것이 일반적이다. 이는 영상처리에 악영향을 줄 수 있어 제거하는 것이 이상적이다. 이를 위해 앞서 제시한 객체 인식을 수행하여 인식 영역만을 추출하고, 이를 통해 계단 손잡이, 창문, 기타 불필요한 정보들을 배제시킬 수 있다.

다음으로 추출된 영역에 대해서 영상처리를 수행함으로써 계단 외 요소로부터 발생하는 잡음을 억제한다. 앞선 과정을 통해 계단을 제외한 요소들을 대부분 제거할 수 있지만, 일부 포함되는

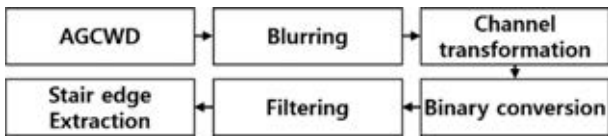


Fig. 10 Image processing sequence

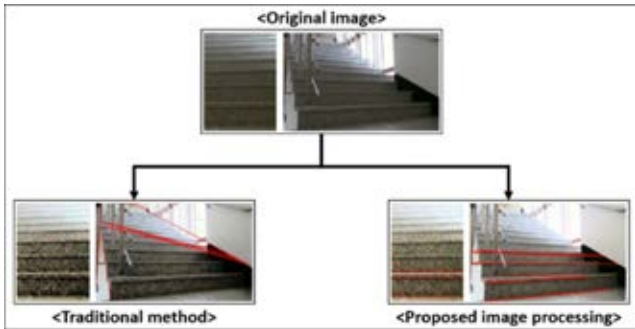


Fig. 11 Stair edge contour extraction results

요소들과 조도와 같은 환경적 영향이 계단 모서리 추출에 영향을 줄 수 있다. 또한, 계단의 재질이나 색상과 같은 물리적인 속성이 영상처리에 지대한 영향을 미치기 때문에 강인한 영상처리 기법이 요구된다. 본 연구에서는 이러한 영향에 대응하기 위해 Fig. 10의 순서를 따르는 영상처리 기법을 적용한다.

일반적으로 영상처리를 진행함에 가장 큰 영향을 주는 요인은 주변 환경의 조도이고, 이러한 영향을 억제하기 위해 감마 보정 작업이 요구된다. 그러나, 로봇이 운용되는 환경의 조도 상태는 미리 알 수 없어 일정한 감마 보정을 적용하는 것은 시스템의 강인성에 문제를 야기한다. 즉, 이는 주변 환경의 조도에 맞추어 적응적인 처리가 요구됨을 의미한다. Fig. 10에서 표현된 AGCWD (Adaptive Gamma Correction with Weighting Distribution)을 통해 적응적으로 주변 조도의 영향을 억제한다[34]. 또한, 계단은 다양한 재질로 구성될 수 있고, 재질의 종류에 따라 안정적으로 모서리 윤곽선을 추출하는 데 영향을 줄 수 있다. 이는 블러링 (Blurring) 작업을 통해 억제할 수 있고, 이러한 작업은 특히 대리석과 같이 무늬가 존재하는 계단에 효과적으로 작용한다. 이후 단일 채널 변환과 이진 변환을 수행하고, 실질적인 계단 모서리의 윤곽선을 추출하기 위한 필터링(Filtering)을 수행한다. 필터링 작업은 일반적인 직선 추출을 위해 많이 사용되는 Canny 필터와 Hough 변환으로 구성한다[35,36].

Fig. 11은 제안하는 일련의 영상 처리 방법을 통한 계단 모서리 추출의 결과를 나타낸다. 해당 결과와 같이 제안하는 영상처리 과정을 통해 안정적으로 계단 모서리 윤곽선을 추출할 수 있음을 보인다. 이때, 추출되는 윤곽선을 아래에서부터  $L_i(i=1, 2, \dots, n)$  로 정의한다.

다음으로, 추출된 윤곽선으로부터 제어 신호를 생성하기 위한 각도 추정을 진행한다. 이는 추출된 윤곽선을  $L_i$ 의 양 끝점을  $P_{i,1} = (x_{i,1}, y_{i,1})$  과  $P_{i,2} = (x_{i,2}, y_{i,2})$  로 정의하여 아래의 식 (7)을 통해 수행될 수 있다.

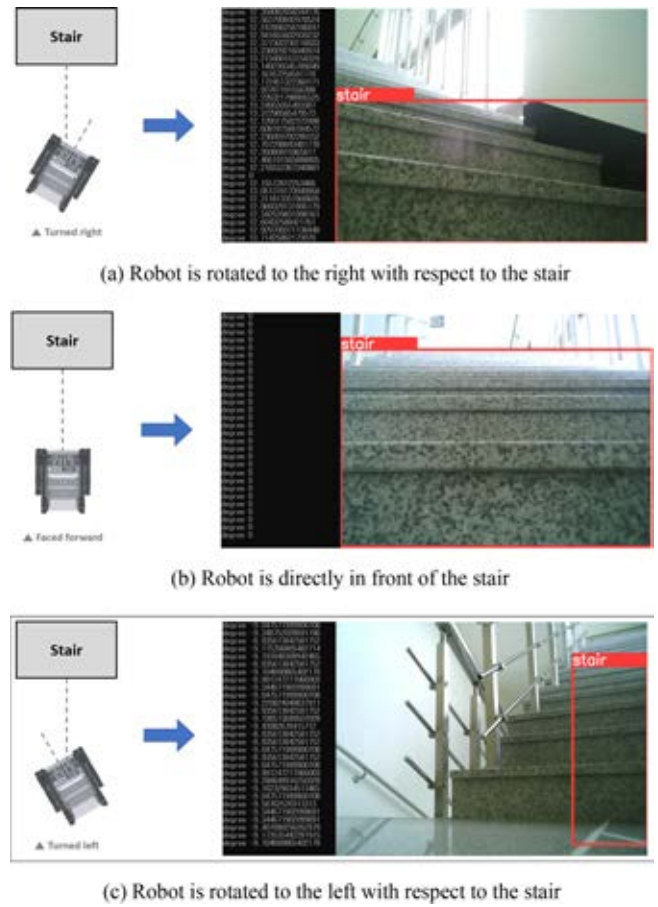


Fig. 12 Stair edge contour degree estimation results

$$\theta_{i, stair} = \arctan\left(\frac{y_{i,2} - y_{i,1}}{x_{i,2} - x_{i,1}}\right) \quad (6)$$

또한, Fig. 11과 같이 추출되는 다수의 윤곽선에서 계단의 하단부에 존재하는 윤곽선은 명확한 기울기를 가진다. 하지만, 상단부에 존재하는 윤곽선은 로봇의 자세와 무관하게 0°에 가까워진다. 즉, 화각의 하단부에 위치하는 윤곽선은 뚜렷한 경향성을 보이지만, 상단부에 위치하는 윤곽선을 그렇지 못하다. 이러한 사항을 고려하여 윤곽선 각도에 식(7)과 표현되는 지수가중이동 평균을 적용하여 결합한다[37].

$$\theta_{stair} = \alpha \cdot \theta_{1, stair} + \dots + \alpha(1 - \alpha)^{n-1} \cdot \theta_{n, stair} \quad (7)$$

식(7)에서  $\theta_{1, stair}$  는 각 윤곽선의 각도를 의미한다. 여기서  $i = 1$  은 최하단,  $i = n$  은 최상단에 존재하는 윤곽선을 의미한다.  $\alpha$  는 사용자가 설정하는 가중치를 의미하고, 0.5와 1사이의 값을 가지도록 설정한다. 이러한 과정을 통한 계단의 모서리 각도 추정 결과는 Fig. 12와 같다. Figs. 12(a), 12(b) 그리고 12(c) 는 각각 로봇이 계단에 대해 우측으로 회전, 정면, 좌측으로 회전된 상태로 배치된 경우에 대한 결과를 나타낸다.

앞선 과정들을 통해 결합된 계단 각도 추정치를 사용하여 식 (8)과 같이 오차 신호를 정의한다.

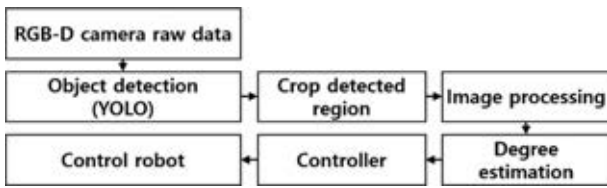


Fig. 13 Stair alignment strategy scheme

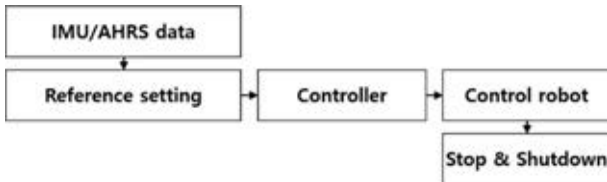


Fig. 14 Stair traversal strategy scheme

$$e_{align} = \theta_{ref\_align} - \theta_{stair} \quad (8)$$

식(8)에서  $\theta_{ref\_align}$  는 계단에 정렬하기 위한 기준 신호를 의미하고, 계단을 정면으로 바라본 때 윤곽선의 각도인  $0^\circ$ 를 사용한다. 위와 같이 생성되는 오차 신호를 기반으로 식(9)를 통해 조향 신호를 만들 수 있다.

$$\omega_{steer} = k_p \cdot e_{align} + k_I \int e_{align} + k_D \frac{d}{dt} e_{align} \quad (9)$$

식(9)에서  $k_p$ ,  $k_I$ ,  $k_D$  는 각각 비례, 적분, 미분 제어 이득을 의미한다. 해당 식을 통해 생성되는 조향 제어 입력을 식(2)과 식(3)에 대입하고,  $\omega_{throttle} = 0$  으로 설정하여 순수 회전 동작을 구현할 수 있다.

본 절에서 제시한 전략을 통해 계단 앞에 존재하는 궤도형 로봇이 계단에 정렬하는 동작을 수행할 수 있다. 추가적으로 계단 정렬 과정을 종료 및 계단 극복 과정 실행을 위해 계단 모서리의 각도인  $\theta_{stair}$  를 사용한다. 즉,  $\theta_{stair}$  값이 사용자가 설정하는 임계값보다 작아지면 본 과정이 종료된다. Fig. 13은 제안하는 계단 정렬 전략이 수행되는 과정을 도식적으로 표현한다.

### 3.3 계단 극복 알고리즘

본 절에서는 (3) Stair Traversal 과정의 전략과 이를 구현함에 고려되는 사항들을 제시한다.

Fig. 14는 계단 극복 알고리즘을 도식적으로 표현한 그림이다. 해당 과정을 수행하며 요구사항 2)를 충족해야 하며, 이는 로봇이 직진 주행을 하며 방향각을 유지하기 위한 제어가 요구됨을 의미한다. 먼저, 방향각에 대한 제어 신호를 생성하기 위해 오차 신호를 식(11)과 같이 정의한다.

$$e_{traversal} = \theta_{ref\_traversal} - \theta_{current} \quad (11)$$

식(11)에서  $\theta_{ref\_traversal}$  는 극복 과정에서 사용되는 기준 신호를 의미하며, 이는 앞선 정렬 과정이 종료된 시점에서의 로봇의

Yaw 각도를 사용한다. 또한,  $\theta_{current}$  는 현재 로봇의 Yaw 각도를 의미한다. 이처럼 정의되는 오차 신호를 기반으로 식(12)와 같이 제어 입력을 생성할 수 있다.

$$\omega_{steer} = \text{sat}(k_p \cdot e_{traversal}) \quad (12)$$

식(12)는 계단을 주행하며 로봇의 방향각을 제어하는 입력을 의미하며, 해당 입력을 통해 요구사항 2)을 충족할 수 있다. 그러나, Fig. 6(b)와 같이 짧은 시간에 방향각이 큰 폭으로 변화되는 것은 안정적인 주행에 문제가 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 과도한 회전을 방지하기 위해 식(13)과 같이 동작하는 포화 함수를 사용한다.

$$\text{sat}(input) = \begin{cases} upper\ input, & input > upper\ input \\ input, & else \\ lower\ input, & input < lower\ input \end{cases} \quad (13)$$

식(13)에서  $upper\ input$ 과  $lower\ input$ 는 각각 입력값을 포화시키는 상한값과 하한값을 의미한다.

추가적으로, 본 절에서 제시한 계단 극복 과정의 진행 상태를 판단하고, 전체적인 계단 자율 주행 시스템을 종료하기 위해 로봇의 Pitch 각도를 사용한다. 즉, 사용자가 사전에 설정하는 특정한 임계값보다 측정되는 로봇의 Pitch 각도가 작아지면 로봇이 계단을 벗어난 것으로 판단할 수 있다. 이러한 조건을 평가하여 계단 극복 과정을 종료한다. 또한, 계단 극복 과정은 본 연구에서 제안하는 계단 자율 주행 시스템의 마지막 단계로 전체적인 계단 주행 시스템을 종료한다. 또한, 제안하는 각 과정에 대한 전략들은 ROS (Robot Operating System)을 통해 구현된다[38].

## 4. 계단 자율 주행 시스템 검증 실험

본 장에서는 제안하는 시스템의 유효성을 검증하기 위한 실험을 진행한다. 먼저, 실험을 진행하기에 앞서 실험을 진행하는 환경과 조건에 대해 설명한다.

Fig. 15는 계단 자율 주행 시스템을 구현하기 위한 하드웨어적 구조를 나타내는 그림으로, 제안하는 시스템을 구현하기 위한 최소한의 장비로 구성된다. 다음으로, 실험에는 모형 계단을 사용하고, Fig. 3에서 표현되는 계단의 치수는 Table 4와 같다.

본 연구에서는 시스템의 유효성을 검증하기 위해 Table 4의 치수를 가지는 계단에 대한 실험을 진행한다. 해당 조건에서 앞서 제안한 각 과정의 세부 전략들에 대한 실험을 수행하여 제안하는 계단 자율 주행 시스템의 효용성을 입증한다.

먼저, 제안하는 계단 접근 전략의 안정성 및 유효성을 검증하기 위한 실험을 진행한다. 실험은 모형 계단에 대해 궤도형 로봇을 임의의 위치에 배치하고, 계단 접근 알고리즘을 실행하여 진행한다. Fig. 16은 계단 접근 과정의 실험 결과를 나타낸다. 해당 그림과 같이 임의의 초기 조건으로 배치된 로봇이 계단에 대해 안정적으로 접근 동작을 수행할 수 있음을 보인다. 또한,

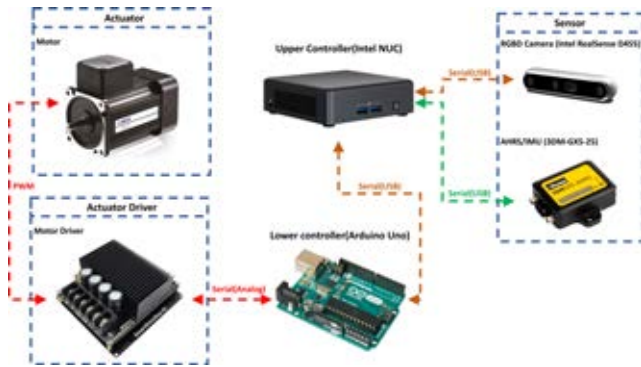


Fig. 15 System hardware architecture

Table 4 Dimension of mock-up stair

Parameters	unit	Value
h	mm	80
w	mm	80
$\theta_s$	o	45



Fig. 16 Stair approach sequence results

접근 과정에서 로봇이 계단의 중심선에 근접하게 이동함을 확인할 수 있고, 이는 후속되는 정렬 및 극복 과정을 수행함에 있어 기본적인 요건을 충족하는 것을 의미한다.

다음으로, 앞서 제시한 계단 정렬 전략을 검증하기 위한 실험을 진행한다. 해당 실험에서는 로봇을 계단의 정면에 임의의 자세로 배치하여 제안하는 계단 정렬 알고리즘을 실행한다. 이때, 정렬 과정의 정확성을 평가하기 위한 정량적인 지표를 설정할 수 없기에 알고리즘이 종료된 시점에서 로봇의 방향각의 수렴 정도를 평가한다.

Fig. 17은 계단 정렬 동작을 수행하는 동안 측정되는 로봇의 Yaw 각도를 표현한다. 해당 그림은 로봇의 초기 자세에 무관하게 계단에 대한 정렬을 수행할 수 있음을 보인다. 해당 결과와 같이 정렬 과정이 수행된 후, 정상 상태에서 로봇의 Yaw 각도는 최대 0.018634 rad의 범위를 갖는다. 즉, 로봇의 정렬 과정을 수행하는 경우 1.07° 이내의 정밀도를 가짐을 의미한다. 이는

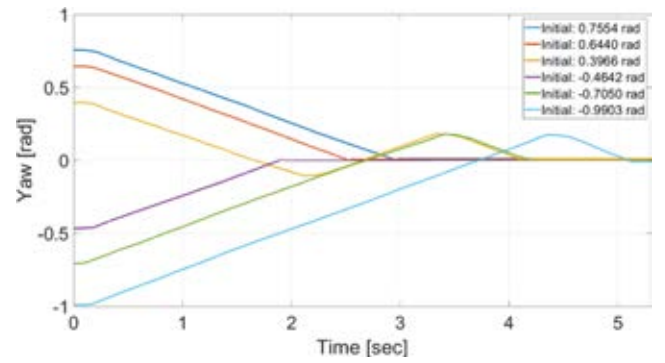


Fig. 17 Stair alignment sequence results

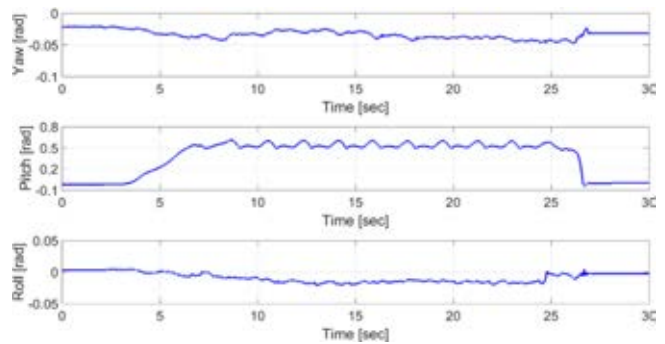


Fig. 18 Stair traversal sequence results

2장에서 제시한 시뮬레이션 결과에 기반하여 이어지는 극복 과정을 안정적으로 수행할 수 있음을 방증한다.

마지막으로, 실질적인 계단 주행을 위한 계단 극복 알고리즘의 검증을 위한 실험을 진행한다. 해당 실험은 앞선 계단 접근 및 정렬 과정을 통해 로봇이 계단의 정면에 도달하여 정렬이 완료된 상황을 가정하여 로봇을 계단의 정면에 배치한다. Fig. 18은 계단 극복 과정을 수행하는 중, 로봇의 3축에 대한 회전을 표현한다.

상기한 실험의 조건에 따라 시작 시점의 Yaw 각도는 정렬이 완료된 상태의 로봇의 Yaw 각도를 의미하고, 해당 값은 극복 과정의 기준 신호로 사용된다. 본 실험에서 사용된 기준 신호는 -0.02165 rad이며, 로봇이 계단을 극복하는 동안에 로봇의 Yaw 각도는 0.023679 rad의 범위 내에 존재함을 보인다. 즉, 해당 결과와 같이 궤도형 로봇이 안정적으로 계단을 주행함을 알 수 있음을 의미한다. 또한, 27초 부근에서 계단의 최상단에 도달하여 모든 시스템이 종료되어 정지함을 보인다.

앞서 제시한 각 과정의 실험 결과를 통해, 제안하는 전략들의 안정성 및 효율성을 검증하였다. 다시 말해, 해당 결과는 각 과정의 알고리즘을 통합하여 운용함으로써 전체적인 계단 자율 주행이 안정적으로 수행될 수 있음을 의미한다. 따라서, 해당 실험 결과를 통해 본 연구에서 제안하는 계단 자율 주행 시스템을 통해 2장에서 도출한 요구사항을 모두 충족하며 계단을 주행할 수 있음을 입증하였다.

## 5. 결론

본 논문에서는 실내 재난 환경 탐색에 사용되는 궤도형 로봇의 안정적인 계단 주행을 위한 계단 자율 주행 시스템 제안한다.

시스템을 설계하기에 앞서, 계단 주行的 요구사항을 도출하기 위해 다양한 초기 조건에서 동역학 시뮬레이션을 수행한다. 상세한 시뮬레이션 결과 분석을 통해 명확한 계단 주행 요구사항을 도출하고, 도출된 요구사항을 기반으로 계단 접근 · 계단 정렬 · 계단 극복 단계로 구분되는 계단 자율 주행 시스템을 설계한다. 또한, 각 단계를 적절하게 수행하기 위한 전략을 제시한다. 먼저, 계단 접근 과정에서는 객체 인식 알고리즘을 사용한 계단 인식과 계단의 중심에 접근하기 위한 제어를 설계한다. 다음으로, 계단 정렬 단계에서는 강인한 영상 처리 기법 및 계단 모서리 각도 추정을 통해 제어 신호를 생성하여 계단 정렬을 수행한다. 마지막으로, 계단 극복 과정에서는 실질적으로 계단을 주행하기 위한 기준 신호 설정 및 제어 방법을 제시한다. 추가적으로, 제안하는 각 전략이 순차적으로 수행될 수 있도록 하는 통합 시스템을 구축한다.

본 논문에서 제안하는 각 단계의 전략과 전체적인 계단 자율 주행 시스템의 유효성을 검증하기 위해 궤도형 로봇과 모형 계단을 이용하여 실험을 진행하였다. 계단 접근 실험에서 임의의 위치에 배치된 궤도형 로봇이 계단의 중심에 근접하게 접근하는 것을 확인할 수 있으며, 계단 접근 과정에서는 로봇의 Yaw 각도가 0.018634 rad 이내의 수렴 성능을 보였다. 계단 극복 실험에서는 초기 기준 신호 대비 최대 오차가 0.025806 rad, 최종 정상 상태 오차가 0.009886 rad으로 안정적인 주행이 가능함을 보였다.

즉, 본 논문에서 제안하는 계단 자율 주행 시스템이 유효하다는 것을 입증하였다. 향후에는 본 논문에서 고려되지 않는 최적 경로 생성에 관한 연구를 수행할 예정이다. 이와 함께 다양한 제어 기법을 적용하여 시스템의 성능을 더욱 향상시킬 계획이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상자원부의 재난 및 위험작업 현장근로자의 사고방지를 위한 안전로봇 기술개발 사업(No. 20026194, 소방용 4족 보행 로봇 인명탐지·화재진압 솔루션 개발 및 소방 로봇·센서 실증)의 지원을 받았습니다.

## REFERENCES

- Shin, J., Pyo, J., Lee, M., Park, S., Park, S., Suh, J., Jin, M., (2022), Hazardous gas detecting and capturing robot, *Journal of Drive and Control*, 19(2), 27-35.
- Kim, S.-J., Suh, J.-H., (2023), Adaptive robust RBF-NN nonsingular terminal sliding mode control scheme for application to snake robot's head for image stabilization, *Applied Sciences*, 13(8), 4899.
- Kim, S. J., Suh, J. H., (2024), A study on I-PID-based 2-DOF snake robot head control scheme using RBF neural network and robust term, *Journal of Korea Robotics Society*, 19(2), 139-148.
- Sun, B., Jing, X., (2017), A tracked robot with novel bio-inspired passive "legs", *Robotics and biomimetics*, 4(18), 1-14.
- Huang, H., Li, D., Xue, Z., Chen, X., Liu, S., Leng, J., Wei, Y., (2017), Design and performance analysis of a tracked wall-climbing robot for ship inspection in shipbuilding, *Ocean Engineering*, 131, 224-230.
- Bai, Y., Sun, L., Zhang, M., (2020), Terramechanics modeling and grouser optimization for multistage adaptive lateral deformation tracked robot, *IEEE Access*, 8, 171387-171396.
- Ugenti, A., Galati, R., Mantriota, G., Reina, G., (2023), Analysis of an all-terrain tracked robot with innovative suspension system, *Mechanism and Machine Theory*, 182, 105237.
- Adiwahono, A. H., Saputra, B., Chang, T. W., Yong, Z. X., (2014), Autonomous stair identification, climbing, and descending for tracked robots, *Proceedings of the 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, 48-53.
- Ding, Z., Li, Y., Tang, Z., (2020), Theoretical model for prediction of turning resistance of tracked vehicle on soft terrain, *Mathematical Problems in Engineering*, 1, 4247904.
- Panchi, N., Agrawal, K., Patil, U., Gujarathi, A., Jain, A., Namdeo, H., Chiddarwar, S. S., (2019), Deep learning-based stair segmentation and behavioral cloning for autonomous stair climbing, *International Journal of Semantic Computing*, 13(04), 497-512.
- Endo, D., Watanabe, A., Nagatani, K., (2017), Stair Climbing Control for 4?DOF Tracked Vehicle Based on Internal Sensors, *Journal of Robotics*, 1, 3624589.
- Zhang, Q., Ge, S. S., Tao, P. Y., (2011), Autonomous stair climbing for mobile tracked robot, *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, 92-98.
- Mihankhah, E., Kalantari, A., Aboosaeedan, E., Taghirad, H. D., Ali, S., Moosavian, A., (2009), Autonomous staircase detection and stair climbing for a tracked mobile robot using fuzzy controller, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 1980-1985.
- Fair, M., Miller, D. P., (2001), Automated staircase detection, alignment & traversal, *Proceedings of International Conference on Robotics and Manufacturing*, 218-222.
- Cong, Y., Li, X., Liu, J., Tang, Y., (2008), A stairway detection algorithm based on vision for UGV stair climbing, *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 1806-1811.

16. Hesch, J. A., Mariottini, G. L., Roumeliotis, S. I., (2010), Descending-stair detection, approach, and traversal with an autonomous tracked vehicle, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 5525-5531.
17. Xiong, Y., Matthies, L., (2000), Vision-guided autonomous stair climbing, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2, 1842-1847.
18. Hsiao, C.-W., Chien, Y.-H., Wang, W.-Y., Li, I.-H., Chen, M.-C., Su, S.-F., (2015), Wall following and continuously stair climbing systems for a tracked robot, Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Networking, Sensing and Control, 371-375
19. Guo, J., Shi, J., Zhu, W., Wang, J., (2017), Approach to autonomous stair climbing for tracked robot, Proceedings of the IEEE International Conference on Unmanned Systems, 182-186.
20. Fourre, J., Vauchey, V., Dupuis, Y., Savatier, X., (2020), Autonomous RGBD-based industrial staircase localization from tracked robots, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 10691-10696.
21. Tseng, C.-K., Li, I.-H., Chien, Y.-H., Chen, M.-C., Wang, W.-Y., (2013), Autonomous stair detection and climbing systems for a tracked robot, Proceedings of the International Conference on System Science and Engineering, 201-204.
22. Li, I.-H., Wang, W.-Y., Tseng, C.-K., (2014), A kinect-sensor-based tracked robot for exploring and climbing stairs, International Journal of Advanced Robotic Systems, 11(5), 80.
23. Köppel, M., Ndjiki-Nya, P., Doshkov, D., Lakshman, H., Merkle, P., Müller, K., Wiegand, T., (2010), Temporally consistent handling of disocclusions with texture synthesis for depth-image-based rendering, Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, 1809-1812.
24. Sun, J., Xie, Y., Chen, L., Zhou, X., Bao, H., (2021), Neuralrecon: Real-time coherent 3D reconstruction from monocular video, Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR), 15598-15607.
25. Lee, K., Ban, Y., Lee, S., (2017), Efficient depth enhancement using a combination of color and depth information, Sensors, 17(7), 1544.
26. Tukey, J. W., (1977), Exploratory data analysis, Addison-wesley.
27. Cao, N., Liu, Y., (2024), High-noise grayscale image denoising using an improved median filter for the adaptive selection of a threshold, Applied Sciences, 14(2), 635.
28. Steplight, S., Egnal, G., Jung, S.-H., Walker, D. B., Taylor, C. J., Ostrowski, J. P., (2000), A mode-based sensor fusion approach to robotic stair-climbing, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2, 1113-1118.
29. Helmick, D. M., Roumeliotis, S. I., McHenry, M. C., Matthies, L., (2002), Multi-sensor, high speed autonomous stair climbing, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1, 733-742.
30. Patil, U., Gujarathi, A., Kulkarni, A., Jain, A., Malke, L., Tekade, R., Paigwar, K., Chaturvedi, P., (2019), Deep learning based stair detection and statistical image filtering for autonomous stair climbing, IEEE International Conference on Robotic Computing, 159-166.
31. Zou, Z., Chen, K., Shi, Z., Guo, Y., Ye, J., (2023), Object detection in 20 years: A survey, Proceedings of the IEEE, 111(3), 257-276.
32. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A., (2016), You only look once: Unified, real-time object detection, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 779-788.
33. Jin, G.-G., Son, Y.-D., (2019), Design of a nonlinear PID controller and tuning rules for first-order plus time delay models, Studies in Informatics and Control, 28(2), 157-166.
34. Huang, S.-C., Cheng, F.-C., Chiu, Y.-S., (2012), Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution, IEEE transactions on image processing, 22(3), 1032-1041.
35. Canny, J., (1986), A computational approach to edge detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8(6), 679-698.
36. Duda, R. O., Hart, P. E., (1972), Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures, Communications of the ACM, 15(1), 11-15.
37. Roberts, S. W., (2000), Control chart tests based on geometric moving averages, Technometrics, 42(1), 97-101.
38. Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Berger, E., Wheeler, R., Ng, A. Y., (2009), ROS: an open-source Robot Operating System, IEEE International Conference on Robotics and Automation Workshop on Open Source Software, 3(3.2), 5.





**Min Gi Song**

MS candidate in the Department of Intelligent Robot Engineering, Graduate School, Pukyong National University. His research interest is robot control, autonomous system, and mobile robot.

E-mail: speedydragon@naver.com



**Sung-Jae Kim**

Postdoctoral researcher in the Major of Intelligent Robot Engineering. His research interest is robot control systems, control engineering, intelligent control, and robust control.

E-mail: bbman7020@gmail.com



**Jin-Ho Suh**

Professor in the Major of Mechanical System Engineering, Division of Energy Transport Systems Engineering, College of Engineering, Pukyong National University. His research interest is disaster response robot, underwater robots, and system control & integration in field robotics.

E-mail: suhgang@pknu.ac.kr

# 상온 보상용 내부 온도 센서가 열전대 온도 지시계의 교정 불확도에 미치는 영향

## Effect of the Internal Thermometer for Room Temperature Compensation on the Calibration Uncertainty of Thermocouple Indicators

강주경<sup>1</sup>, 이영희<sup>2</sup>, 양인석<sup>1,2,#</sup>  
Joo Gyeong Kang<sup>1</sup>, Young Hee Lee<sup>2</sup>, and Inseok Yang<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 과학기술연합대학원대학교 정밀측정과 (Department of Precision Measurement, Graduate School, University of Science and Technology)  
<sup>2</sup> 한국표준과학연구원 열유체측정그룹 (Thermometry and Fluid Flow Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science)  
# Corresponding Author / E-mail: [iyang@kriss.re.kr](mailto:iyang@kriss.re.kr), TEL: +82-42-868-5772  
ORCID: 0000-0001-7945-9671

KEYWORDS: Thermocouple (열전대), Room temperature compensation (상온 보상), Thermometer (온도계), Uncertainty (불확도), Thermocouple indicator (열전대 온도 지시계)

*Most temperature indicators that use thermocouples as sensors include an internal thermometer for compensating room temperature variations. This thermometer measures ambient temperature, which is then converted to a thermoelectric voltage. This voltage is added to the electromotive force measured in the thermocouple sensor and then converted back to temperature. Although precise calibration of the indicator can be conducted in a controlled room-temperature environment, additional uncertainty arises due to room temperature compensation during actual measurements. To address this issue, we calibrated temperature indicator at the ice point. In this experiment, the indicator was placed in an environment where the temperature varied between 8 and 38°C, demonstrating its dependency on ambient temperature. In a second set of experiments, we shorted the thermocouple input terminal to verify whether the indicator correctly indicated the ambient temperature. This study proposed a method to assess additional uncertainty that must be considered when using a thermocouple connected to an indicator calibrated with an external ice point in a laboratory. It also highlights additional steps and factors to consider during the calibration of temperature indicators that employ internal temperature compensation.*

Manuscript received: August 31, 2024 / Revised: October 21, 2024 / Accepted: November 12, 2024  
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2024

### 1. 서론

열전대 온도 지시계(이하 “지시계”)는 열전대 센서의 측온접점과 기준접점 사이에서 발생하는 열기전력을 측정하여 측온접점에서의 온도를 지시하는 장치이다. 이상적인 기준접점은 0°C의 빙점이지만, 대부분의 지시계는 기준접점이 상온인 지시계 표면에 위치해 있고 내부의 상온 보상 기능을 사용하여 0°C와 상온의 차이를 보상한다. 이때, 열전대를 지시계에 연결하는 단자 위치에서의 온도에 따라서 열전대에서 발생하는 열기전력의

크기가 다르다. 따라서, 지시계 내부의 연결 단자와 가까운 위치에 상온 보상을 위한 온도계가 설치되어 있다. 이 온도계에서 측정된 온도는, 사용한 열전대의 종류에 따른 표준표에 따라 빙점으로부터 해당 온도까지의 열기전력으로 환산된다. 이 환산된 열기전력에 열전대에서 측정된 열기전력을 더하고, 이렇게 더해진 열기전력은 다시 열전대의 종류에 따른 표준표를 통해 온도로 환산된다. 최종적으로 이 환산된 온도가 지시계에 표시된다.

이상적인 상온 보상을 위한 내부 온도계는 연결 단자의 온도를 정확히 측정하여 내부 보상이 온도 측정의 정확도에 영향을

미치지 않아야 한다. 이 온도계가 연결 단자에서의 온도를 부정확하게 측정하더라도, 지시계가 결과적으로 지시하는 온도를 기준 온도계와 비교 교정하면 교정의 결과인 보정 값을 지시 값에 반영하여 사용할 수 있다. 지시계의 교정에 사용되는 시뮬레이터는 상온 보상 기능을 켜고 끌 수 있어서 기능을 끈 상태에서 시뮬레이터 교정이 가능하지만[1-3], 대부분의 열전대 온도 지시계는 이런 기능 없이 내부 상온 보상이 작동하는 상태에서 교정하거나 사용해야 하는 것이 일반적이다.

그러나, 이것은 교정실에서 교정 당시에 지시계가 놓인 환경의 온도와 교정 후에 지시계를 사용할 때 환경의 온도가 동일하다는 가정에서만 성립한다. 실제 상황에서 교정 후에 실제 지시계를 사용하는 온도는 교정 당시의 환경 온도와 다를 수 있으며, 그로 인해 지시계 내부의 상온 보상을 위한 온도계가 갖고 있는 편차도 달라질 수 있다. 이 경우에 교정실에서의 환경 온도를 가정한 교정 결과가 더 이상 유효하지 않을 수 있으며, 더 정확한 온도 측정을 위해서는 상온 보상용 온도계의 온도 편차에 따른 변화를 교정 결과에 반영하거나 추후 사용할 때 불확도 인자로 고려해야 한다. 현재까지 열전대 온도 지시계를 온도 센서 연결 없이 시뮬레이터만을 이용하여 전기적 방법으로 교정할 때 상온 보상 온도 센서가 불확도에 미치는 영향에 대한 연구는 있었으나[1,4], 다양한 환경 온도에서 열전대 센서가 장착된 지시계의 내부 상온 보상 온도 센서가 온도 측정에 미치는 영향에 관한 연구는 지금까지 충분히 이루어지지 않았다.

이 논문에서는 기존의 연구에서 고려하지 않았던 다양한 환경 온도에서 열전대를 센서로 하는 지시계 내부의 상온 보상용 온도계의 편차가 온도 측정에 미치는 영향을 분석하였다. 먼저 지시계에 연결된 열전대 센서로 온도를 측정할 때의 오차 모델을 수립하였다. 실험적으로 상온 보상용 내부 온도계의 편차가 온도 측정에 미치는 영향을 측정하는 두 가지 방법을 제시하며 실험 결과들을 서로 비교할 때 수립한 모델과 실험 결과 사이에 일관성이 있음을 보였다. 두 측정 방법의 장단점을 분석하고 이 실험 결과를 이용하여 지시계에서 상온 보상용 내부 온도계에 의한 불확도 인자를 추정하는 법을 논의하였다.

2. 측정의 모델식

상온 보상 온도계가 내부에 들어 있는 열전대 온도 지시계는 내부에서 식(1)과 같이 열기전력  $E(t)$  를 얻는다.

$$E(t) = E(t_1) + E(t_r) \tag{1}$$

여기서  $E(t_1)$  은 열전대 온도 지시계에 연결된 센서가 발생시키는 열기전력이고  $E(t_r)$  은 지시계 내부에 있는 상온 보상 온도 센서가 측정한 온도  $t_r$  을 0°C에서  $t_r$  까지의 해당 열전대의 열기전력으로 환산한 값이다. 열전대 온도 지시계는 내부에 IEC 60584-1 [5]이나 ASTM E1751, E230 [6,7] 등과 같은 표준 문서에 따라서 열전대 종류에 맞게 열기전력을 온도로 변환해

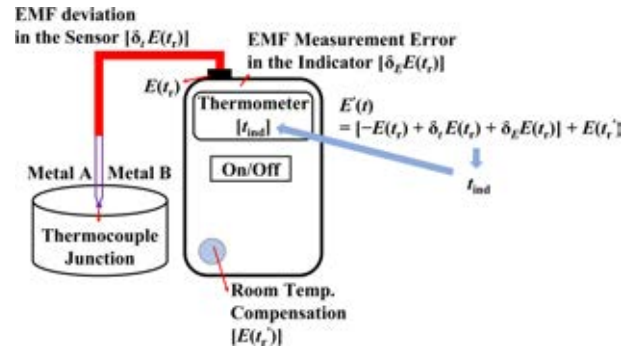


Fig. 1 Measurement model of temperature indications in thermocouple indicators calculated using room temperature compensation. The symbols used are defined in the main text

주는 함수를 갖고 있으며, 이 함수를 이용하여 식(1)과 같이 계산된 열기전력을 온도 값으로 환산하여 표시해준다.

2.1 열전대 측정접점이 빙점에 담겨 있을 때

만약 지시계에 연결된 열전대의 측정 접점이 빙점(0°C)에 담겨 있고 열전대 온도 지시계가 0°C보다 높은 상온  $t_r$  에 놓여 있다면, 이상적으로 식(1)의  $E(t_1)$  은 0°C에서  $t_r$  사이에서 발생하는 열기전력에 음수를 취한 값이다 (즉,  $-E(t_r)$ ). 또, 내부 상온 보상 온도 센서가  $t_r$  을 정확하게 측정하고 있다면 식(1)에서 우변에 있는 두 기전력의 합은

$$E(t) = -E(t_r) + E(t_r) = 0 \tag{2}$$

이 되므로 지시계는 0°C를 표시하게 된다.

그러나, 실제 측정에서는 여러가지 요인에 의해서 0°C 가 아닌 값이 표시될 수 있다. 첫 번째 요인은 지시계에 연결된 열전대 센서가 지시계 내부에 갖고 있는 기준 열전대 테이블과 다른 열기전력을 발생하는 경우이다. 두 번째는 지시계가 열기전력을 부정확하게 재는 경우이다. 세 번째는 지시계 내부의 상온 보상 온도 센서가 정확한 상온  $t_r$  이 아닌 다른 온도  $t_r'$  을 측정하게 되거나 지시계에 센서를 연결하는 단자 부위와 상온 보상 온도 센서의 위치 차이로 인해서 상온 보상 온도 센서에서는 실제 상온인  $t_r$  과는 차이가 있는 온도인  $t_r'$  을 측정하게 되는 경우이다. 위의 세 가지를 고려하면 실제로 열전대 온도 지시계가 상온 보상을 하고 나서 최종적으로 계산하는 열기전력은 식(3)과 같다. Fig. 1에 발생하는 기전력을 도식적으로 나타내었다.

$$E'(t) = [-E(t_r) + \delta_s E(t_r) + \delta_E E(t_r)] + E(t_r)' \tag{3}$$

여기서  $\delta_s E(t_r)$  은 사용한 열전대가 기준 테이블에서 벗어난 정도이며  $t_r$  의 함수이다.  $\delta_E E(t_r)$  은 열전대 온도 지시계가 기전력을 잘못 측정하는 정도이며 역시  $t_r$  의 함수이다.  $E(t_r)'$  은 상온  $t_r$  의 온도를  $t_r'$  이라고 측정할 상온 보상 온도 센서 결과에 의해서 보상해주는 기전력이다.  $t_r$  과  $t_r'$  은 다르기는 해도 열전대 온도 지시계가 완전히 고장난 경우가 아니라면 상당히 가깝다고 가정할 수 있으므로  $t_r$  과  $t_r'$  사이에서 제백 계수가

$S(t_r)$ 로 일정하다고 가정하여  $E(t_r')$ 를 식(4)와 같이 근사할 수 있다.

$$E(t_r') = E(t_r) + S(t_r)(t_r' - t_r) \tag{4}$$

식(4)를 식(3)에 대입하여 식(5)를 얻는다.

$$E'(t) = S(t_r)(t_r' - t_r) + \delta_t E(t_r) + \delta_E E(t_r) \tag{5}$$

식(5)의 각 항은 0에 가까운 값이다. 따라서, 그 합인  $E'(t)$ 도 0에 가까운 값이다. 그러므로, 0에서  $E'(t)$  사이에 제백 계수가  $S(0^\circ\text{C})$ 로 일정하다고 근사하면, 지시계가 표시하는 온도를 식(6)과 같이 계산할 수 있다.

$$t_{ind} = \frac{1}{S(0^\circ\text{C})} [S(t_r)(t_r' - t_r) + \delta_t E(t_r) + \delta_E E(t_r)] \tag{6}$$

즉, 위에서 정리한 세 가지 요인에 의해서 지시계는 정확한 빙점의 온도인  $0^\circ\text{C}$ 가 아니라  $0^\circ\text{C}$  근처의  $t_{ind}$ 를 표시한다. 여기서  $S(t_r)(t_r' - t_r)$  항과  $\delta_E E(t_r)$  항은 지시계에 의해서 발생하는 오차이고,  $\delta_t E(t_r)$  항은 열전대 센서에 의해서 발생하는 오차이다.

### 2.2 지시계 단자를 단락 시킬 때

열전대 온도 지시계의 단자에 열전대 센서를 연결하지 않고 짧은 구리선을 연결하여, 열전대에서 발생한 기전력을  $0\ \mu\text{V}$ 로 강제하는 경우를 생각해 보자. 이상적인 경우라면 열전대에서 발생하는 기전력이 0이므로 식(1)로부터 식(7)과 같이 기전력  $E(t_r)$ 을 얻는다.

$$E(t) = 0 + E(t_r) = E(t_r) \tag{7}$$

즉, 상온  $t_r$ 에 해당하는 만큼의 열기전력이 내부에서 계산되어 열전대 온도 지시계에서는 상온  $t_r$ 을 정확하게 지시하게 된다. 그러나, 실제로는 지시계가 열기전력을  $\delta_E E(0)$ 만큼 부정확하게 재는 요인과 상온 보상 온도 센서가 상온  $t_r$ 을  $t_r'$ 로 부정확하게 재는 요인이 결합되어 식(8)과 같은 기전력  $E'(t_r)$ 이 발생하게 된다.

$$E'(t_r) = \delta_E E(0) + E(t_r) + S(t_r)(t_r' - t_r) \tag{8}$$

즉,  $E(t_r)$ 항만 있다면 열전대 온도 지시계가 정확하게 상온  $t_r$ 을 지시하는 것에 비해,  $\delta_E E(0)$ 항과  $S(t_r)(t_r' - t_r)$ 항 때문에 지시계가 상온에서 약간 벗어난 온도를 지시하게 된다. 이 두 항에 의해 발생하는 오차를 온도로 환산하면 식(9)와 같다.

$$\Delta t = \frac{\delta_E E(0)}{S(t_r)} + (t_r' - t_r) \tag{9}$$

식(9) 우변의 두 항은 모두 열전대 온도 지시계가 원인이 되어 발생하는 것으로 첫번째 항은 열전대 온도 지시계가 열기전력을 잴 때의 오차에 의해서 발생하며, 두번째 항은 열전대 내부의 상온 보상 온도 센서의 부정확함에 의해서 발생한다.

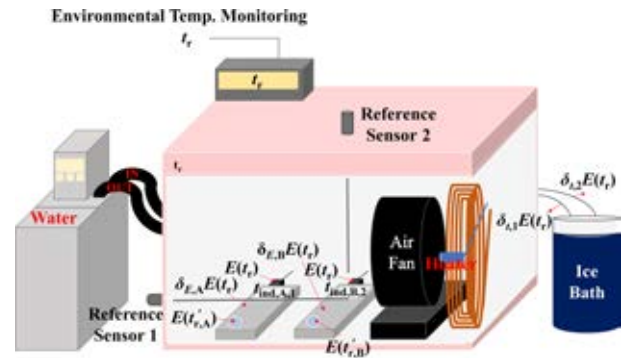


Fig. 2 Experimental setup for calibrating temperature indicators using an environmental temperature chamber

### 3. 실험 장치

#### 3.1 열전대 온도 지시계 및 열전대

본 실험에서는 두 개의 지시계를 사용하였다. TESTO의 모델 922를 지시계 A로 지정하였으며, Fluke의 모델 51을 지시계 B로 지정하였다. 두 지시계의 온도 분해능은  $0.1^\circ\text{C}$ 이며, 작동 온도 범위는 각각  $(-20\sim 50^\circ\text{C})$ 와  $(-10\sim 50^\circ\text{C})$ 이다. 열전대로는 서로 다른 K형 센서 두 개를 각각 TC 1과 TC 2로 지정하여 사용하였다.

#### 3.2 환경 온도 단열 챔버

환경 온도 설정 및 유지를 위해 Fig. 2와 같이 단열 챔버를 구성하였다. 환경 온도는 8, 15, 23, 30,  $38^\circ\text{C}$ 의 총 5개의 온도를 설정하였다. 일반적인 교정실의 온도가 23 정도이므로, 이를 기준으로 하여 아래위  $15^\circ\text{C}$  범위를 상정하여 온도 범위를 선택하였다. 이는 온도 제어가 되지 않는 실내 환경의 최저, 최고 온도와 비슷한 범위라고 할 수 있다. 또한 물을 순환시켜서 챔버 내부의 온도를 조절할 때 이슬이 많이 맺히지 않은 상태에서 쉽게 얻을 수 있는 온도 범위이기도 하다. 이와 같이 환경 온도 단열 챔버의 온도 변화를 주었을 때 K형 열전대를 연결한 온도 지시계의 지시 값을 읽는 실험(4.1 절)과 열전대 온도 지시계의 센서 연결 단자대 부분을 단락시켰을 때의 지시 값을 읽는 실험(4.2절)을 실시하였다. 각 설정 온도에서 실험할 때 충분히 좋은 온도 구배와 안정도를 얻기 위하여 약 8시간 정도 기다렸다. 기준 온도 센서를 이용하여 측정된 단열 챔버의 온도 구배는 0.02, 온도 안정도는  $0.1^\circ\text{C}$ 이었다.

환경 온도 단열 챔버의 온도 설정과 유지를 위해 소형 항온조인 LAUDA의 모델 E100/RE104 (설정 온도 분해능:  $0.1^\circ\text{C}$ )에서 나오는 물을 단열 챔버 안에 설치된 구리관 내에 순환시켰고 팬(Fan)으로 구리관 외벽 주변의 공기를 단열 챔버 내부로 강제 순환시키는 방법을 사용하였다. 가장 높은 설정 온도인  $38^\circ\text{C}$ 에서 온도 안정도가 다른 온도에 비해서 좋지 않게 나왔는데, 이를 개선하기 위해 Fig. 2에 나타난 바와 같이 추가적인 히터를

설치하였다. 구리관에 히터를 접촉시키고 히터가 발생하는 열량을 제어하였다. 히터의 열량 제어는 단열 챔버 내부에 제어용 온도계를 추가로 설치하고 PID제어 기능이 있는 온도조절계 Lakeshore의 모델 331을 활용하여 제어 온도계가 일정한 온도를 유지하도록 히터에 흐르는 전류를 제어하는 방식으로 이루어졌다.

단열 챔버 안의 온도를 측정하기 위해 기준 온도 센서인 저항 온도계와 저항 측정 장치를 사용하였다. 기준 온도 센서는 Fluke의 명목 저항값 100 Ω의 백금 저항 온도계인 모델 5622이다. 저항 온도계는 저항 측정 장치인 Fluke의 모델 1529에 연결하여 저항을 측정하였으며, 이 장비의 분해능은 0.0001 Ω이다. 2개의 기준 온도 센서로 환경 온도 단열 챔버 안의 실시간 온도를 PC에 연결하여 측정하였다. 실험에 사용한 환경 온도 단열 챔버는 자체 제작하였으며 기본적으로 직육면체 형태이다. 뚜껑을 포함한 여섯 면은 두께 50 mm의 아이소핑크 단열재를 각각 두께 10과 5 mm인 아크릴 재질의 외벽과 내벽으로 감싼 구조이며, 측정선과 구리관을 위한 최소한의 구멍을 뚫었다. 챔버의 바깥 규격은 가로 430, 세로 310, 높이 315 mm이며, 내벽 규격은 가로 300, 세로 180, 높이 205 mm이다.

3.3 빙점조

실험에 사용한 빙점조는 일반적인 열전대 기준 점점에 사용되는 빙점 듀어(Dewar)이며, 바깥 규격은 지름 130, 높이 365 mm이다. 내부 규격은 지름 100, 높이 280 mm이다. 실험 중에 매일 빙점조를 비우고 새로운 얼음을 넣어서 빙점을 유지하였다.

4. 실험 결과

4.1 환경 온도 변화에 따른 지시계의 빙점 지시 값

8-38°C의 범위 내에서 환경 온도가 변할 때 지시계에 K형 열전대를 연결하여 0°C 온도에 해당하는 지시 값을 관찰하였다. 이때 지시계의 지시온도는 식(6)의  $t_{ind}$ 에 해당하는 값이다. Fig. 3은  $t_{ind}$ 와 0°C의 차이를 환경 온도에 대한 함수로 그린 것이다. Figs. 3(a)는 지시계 A에 TC 1을 연결하여 3회 측정된 것이고, 3(b)는 지시계 B에 TC 2를 연결하여 3회 측정된 것이다. 곡선으로 표시한 것은 3회 측정된 결과를 평균하여 내삽한 것이다.

이 측정이 끝난 후에는 TC 1과 TC 2를 교환하여 지시계 A와 TC 2, 지시계 B와 TC 1의 조합으로 마찬가지로 3회 측정하였고, 그 결과를 Figs. 4(a)와 4(b)에 각각 나타내었다.

Figs. 3과 4에서 지시계의 지시 값  $t_{ind}$ 가 정확하게 0°C이 나오지 않는 것은 2장에서 기술한 여러가지 원인을 생각할 수 있으나, 보통은 교정을 해서 보정값을 부여하므로 전혀 문제가 되지 않는다. Figs. 3과 4의 핵심 결과는 지시 값이 환경 온도에 의존해서 변한다는 것이다. 지시계와 열전대의 조합에 따라 상온 환경(23°C)에서 지시 값과 비교했을 때, 온도가 0.2에서

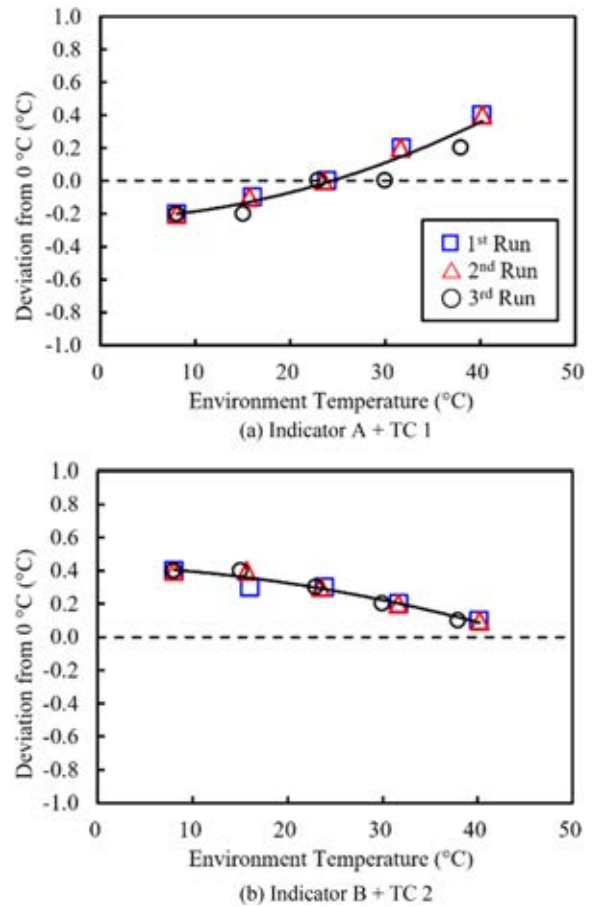


Fig. 3 Deviation of indicated temperature from 0°C for the combination of (a) indicator A with TC 1 and (b) indicator B with TC 2

0.4°C까지 변할 수 있으며, 이러한 변화가 반복성 있게 관찰되었다.

지시계 A와 TC 1의 조합으로 빙점을 측정하는 경우 지시계의 지시 값을 식(6)에 첨자를 붙여서 식(10)과 같이 쓸 수 있다.

$$t_{ind,A,1} = \frac{1}{S(0^\circ\text{C})} [S(t_r)(t'_{r,A} - t_r) + \delta_{t,1}E(t_r) + \delta_{E,A}E(t_r)] \quad (10)$$

여기서, 각 항에서 지시계의 특성인 것은 첨자 A로 표시하고, 열전대의 특성인 것은 첨자 1로 표시하였다. 일반적으로, 지시계 X (X = A 혹은 B)와 TC i (i = 1 혹은 2)를 조합한 실험에서 지시계의 지시 값을 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{ind,X,i} = \frac{1}{S(0^\circ\text{C})} [S(t_r)(t'_{r,X} - t_r) + \delta_{t,i}E(t_r) + \delta_{E,X}E(t_r)] \quad (11)$$

지시계 A와 TC 1을 조합한 식(11)에서 지시계 A와 TC 2를 조합한 식(11)을 빼면 식(12)를 얻는다.

$$t_{ind,A,1} - t_{ind,A,2} = \frac{1}{S(0^\circ\text{C})} [\delta_{t,1}E(t_r) - \delta_{t,2}E(t_r)] \quad (12)$$

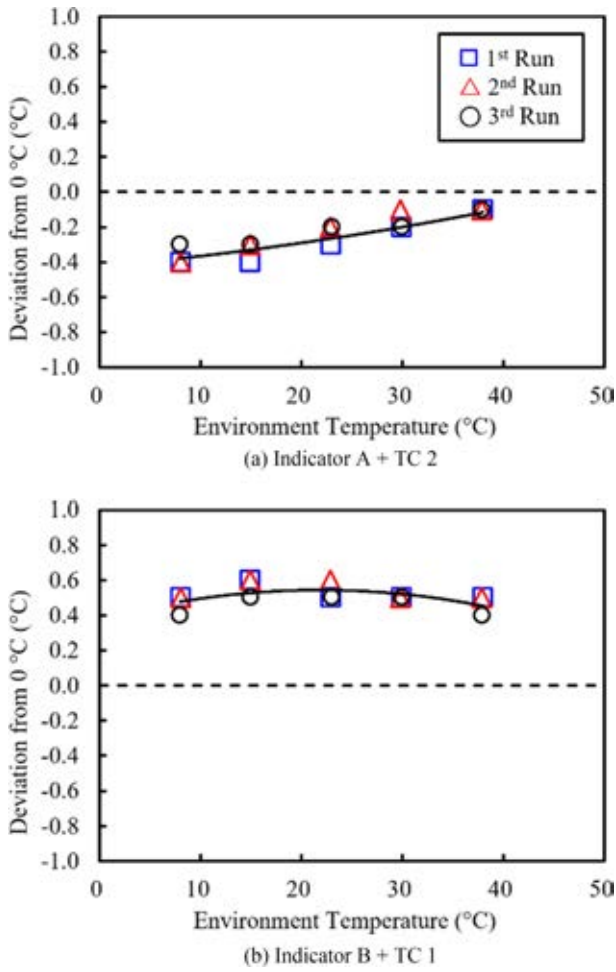


Fig. 4 Deviation of indicated temperature from 0°C for the combination of (a) indicator A with TC 2 and (b) indicator B with TC 1

또, 지시계 B와 TC 1을 조합한 식(11)에서 지시계 B와 TC 2를 조합한 식(11)을 빼면 식(13)을 얻는다.

$$t_{ind,B,1} - t_{ind,B,2} = \frac{1}{S(0^\circ\text{C})} [\delta_{t,1} E(t_r) - \delta_{t,2} E(t_r)] \quad (13)$$

식(12)와 식(13)의 우변은 지시계 의존성 없이 TC 1과 TC 2의 특성 차이에만 의존하고 그 값이 동일하다. 따라서,  $t_{ind,A,1} - t_{ind,A,2}$  와  $t_{ind,B,1} - t_{ind,B,2}$  는 이 모델에 의하면 같은 값이어야 한다. 실제 지시 값의 차이를 이용하여 두 값을 계산한 결과를 Table 1에 제시하였다. 두 값 간의 차이가 거의 없거나 지시계의 분해능인 0.1°C 이내에서 잘 일치하는 것을 확인하였다.

마찬가지로 지시계 A와 TC 1을 조합한 식(11)에서 지시계 B와 TC 1을 조합한 식(11)을 빼면 식(14)를 얻는다.

$$t_{ind,A,1} - t_{ind,B,1} = \frac{1}{S(0^\circ\text{C})} [S(t_r)(t'_{r,A} - t'_{r,B}) + \delta_{E,A} E(t_r) - \delta_{E,B} E(t_r)] \quad (14)$$

Table 1 Characteristic differences between TC 1 and TC 2 as estimated from measurements using two different indicators

$t_r$ (°C)	$t_{ind,A,1} - t_{ind,A,2}$ (°C)	$t_{ind,B,1} - t_{ind,B,2}$ (°C)
8	0.2	0.1
15	0.2	0.2
23	0.2	0.2
30	0.3	0.3
38	0.4	0.4

Table 2 Characteristic differences between Indicator A and Indicator B as estimated from measurements using two different thermocouple sensors

$t_r$ (°C)	$t_{ind,A,1} - t_{ind,B,1}$ (°C)	$t_{ind,A,2} - t_{ind,B,2}$ (°C)	$\Delta t_A - \Delta t_B$ (°C)
8	-0.7	-0.8	-0.8
15	-0.7	-0.7	-0.6
23	-0.5	-0.5	-0.3
30	-0.4	-0.4	-0.1
38	-0.1	-0.2	0.1

또, 지시계 A와 TC 2를 조합한 식(11)에서 지시계 B와 TC 2를 조합한 식(11)을 빼면 식(15)를 얻는다.

$$t_{ind,A,2} - t_{ind,B,2} = \frac{1}{S(0^\circ\text{C})} [S(t_r)(t'_{r,A} - t'_{r,B}) + \delta_{E,A} E(t_r) - \delta_{E,B} E(t_r)] \quad (15)$$

식(14)와 식(15)의 우변은 열전대 의존성 없이 지시계 A와 지시계 B의 특성 차이에만 의존하고 그 값이 동일하다. 따라서,  $t_{ind,A,1} - t_{ind,B,1}$  와  $t_{ind,A,2} - t_{ind,B,2}$  는 이 모델에 의하면 같은 값이어야 한다. 실제 지시 값의 차이를 이용하여 두 값을 계산한 결과를 Table 2의 두 번째, 세 번째 열에 나타내었다. 두 값 간의 차이가 거의 없거나 지시계의 분해능인 0.1°C 이내에서 잘 일치하는 것을 확인하였다.

#### 4.2 지시계 측정 단자를 단락할 때 상온 지시 값

환경 온도가 변화할 때 상온 보상을 위한 내부 온도 센서의 정확도가 지시계와 열전대를 이용한 온도 측정에 영향을 미친다는 것을 확인하기 위하여 추가 실험을 진행하였다. 이 실험에서는 지시계의 열전대 연결 단자대에 짧은 구리선을 연결하여 단락시켜서 외부 열전대에서 발생하는 열기전력을 0 μV인 상황으로 만들었다. 이 때 지시계의 지시온도는 이상적으로는 내부 상온 보상 온도계가 측정한 온도  $t_r$  그대로가 되지만, 실제로는 이상적인 값과 식(9)의  $\Delta t$ 에 해당하는 만큼 차이가 난다. Figs. 5(a)와 5(b)에 지시계 A와 B에 대해서 이 측정을 수행한 결과를 표시하였다.

식(9)를 이용하여 지시계 A로 이 실험을 했을 때의 상온 지시 값과 기준 상온값의 차이인  $\Delta t_A$  와, 지시계 B로 이 실험을

했을 때의 상온 지시 값과 기준 상온값의 차이인  $\Delta t_B$ 의 차이를 구하면 식(16) 같다.

$$\Delta t_A - \Delta t_B = \frac{\delta_{E,A}E(0) - \delta_{E,B}E(0)}{S(t_r)} + (t'_{r,A} - t'_{r,B}) \quad (16)$$

한편 0에서 38°C 구간에서 K형 열전대 제백 계수가 39.45  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 에서 40.94  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 로 거의 변동이 없으므로 [5] 본 실험 온도 구간에서의 K형 열전대의 제백 계수는 거의 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서,  $S(0^\circ\text{C}) \approx S(t_r)$ 로 근사하면 식(14)와 식(15)의 우변을 식(17)과 같이 좀 더 간단하게 나타낼 수 있다.

$$(t'_{r,A} - t'_{r,B}) + \frac{\delta_{E,A}E(t_r) - \delta_{E,B}E(t_r)}{S(t_r)} \quad (17)$$

식(17)과 식(16)을 종합하면, 4.1절의 실험에서  $t_{\text{ind},A,1} - t_{\text{ind},B,1}$  혹은  $t_{\text{ind},A,2} - t_{\text{ind},B,2}$ 와 4.2절의 실험의  $\Delta t_A - \Delta t_B$ 의 차이는 다음과 같다.

$$\frac{1}{S(t_r)} \{ [\delta_{E,A}E(t_r) - \delta_{E,B}E(t_r)] - [\delta_{E,A}E(0) - \delta_{E,B}E(0)] \} \quad (18)$$

이 항은 열전대 온도 지시계가 기전력을 부정확하게 측정하기 때문에 생기는 항으로써  $t_r = 0$ 일 때 0이며,  $t_r$ 이 커질수록 그 값이 커지는 항이다.

4.2절의 실험에서 관찰한  $\Delta t_A - \Delta t_B$ 를 Table 2의 마지막 열에 나타내었다. 두번째, 세번째 열의 값과 비교해보면 예상과 같이 이 값은  $t_r$ 이 낮을 때에는 (0에 가까울 때에는) 서로 비슷하거나 지시계의 분해능인 0.1°C 정도 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 그러나, 상온인 23°C를 기준으로 높은  $t_r$ 에서 마지막 열의 값이 두번째, 세번째 열의 값과 0.2에서 0.3°C의 차이로 조금씩 벌어지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 식(18)에 표시한 차이 값이  $t_r$  커질수록 0에서 멀어지기 때문이며, 이로써 본 실험에서 수립한 모델이 일관성 있게 성립함을 보여주고 있다.

### 4.3 불확도 평가

열전대 온도 지시계를 교정하거나 지시계를 이용하여 온도를 측정할 때, 내부 상온 보상 온도 센서로 인한 불확도 인자를 측정하는 두 가지 방법을 제시하였다.

4.1절에 제시한 첫번째 방법은 빙점을 이용하여 다양한 환경 온도에서 0°C를 측정할 때 지시 값의 변화를 이용하는 방법이다. 예를 들어, (8-38)°C 영역에서 TC 1을 이용하여 본 논문의 지시계 A를 측정한 결과, 23°C의 상온에 비해 -0.2~0.3°C의 편차가 관찰되었다. 이때, 양 극단의 편차 중 절대값이 큰 값인 0.3°C를 반쪽으로 하는 직사각형 분포를 사용하여 내부 상온 보상 온도 센서에 대한 불확도 평가를 수행할 수 있다. 그러나, 이 방법은 빙점을 측정할 때 사용하는 열전대의 특성에 따라 결과가 다소 달라질 수 있다. 만약 TC 2를 이용하여 동일한 방식으로 불확도 평가를 수행했다면, 상온에 비해 -0.2~0.1°C의 편차가 관찰되어 0.2°C를 반쪽으로 하는 직사각형 분포를 사용하여

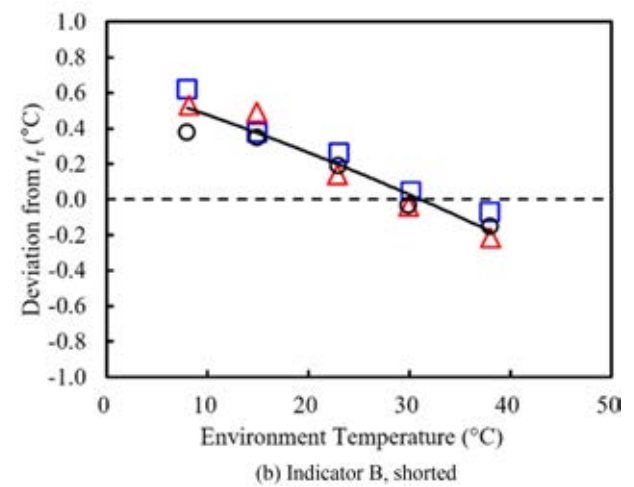
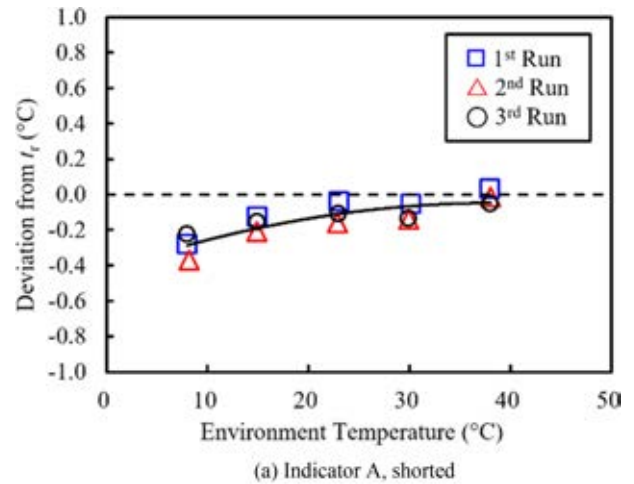


Fig. 5 Temperature difference between the indicated value and the reference temperature when the thermocouple junction of the indicator was shorted

불확도 평가를 할 수 있을 것이다. IEC 60584 등에서[5-7] 정한 표준 함수를 잘 따르는 열전대를 선별해 놓고 불확도 평가에 사용하는 것도 한 방법이다. 이 방법의 장점은 환경 온도  $t_r$ 을 정확하게 결정할 필요가 없다는 점이다.

4.2절에 제시한 두 번째 방법은 지시계의 열전대 입력 단자를 단락하여 지시계의 지시 값과 기준 온도계로 측정된 상온을 비교하는 방법이다. 이 방법은 빙점을 따로 준비할 필요가 없다는 장점이 있지만, 환경 온도  $t_r$ 을 지시계의 지시 값과 직접 비교해야 하기 때문에 환경 온도 측정의 정확도가 불확도 인자의 크기를 결정하는 데 직접적으로 영향을 미친다는 단점이 있다. 즉, 이 방법에서는 기준 온도를 측정하는 데 있어서 0.1°C의 편차가 내부 상온 보상 온도계로 인한 측정의 편차 0.1°C로 이어진다. 하지만, 부피가 있는 열전대 온도 지시계 내부에서 상온 보상 온도계가 위치한 지점의 온도를 0.1°C의 불확도로 측정하는 것은 어려운 일이다. 따라서, 이 방법을 교정에 직접 적용할 경우, 기준 온도의 정확한 측정을 위해 단열 챔버의 온도가 안정할 때까지 오래 기다려야 하므로 교정에 소요되는 시간이 더 증가할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 환경 온도에서 열전대 온도 지시계 내부에 있는 상온 보상 온도계가 온도 측정에 미치는 영향을 실험적으로 보임으로써 온도 지시계를 교정할 때 불확도 인자를 산출하는 방법을 연구하였다. 교정된 열전대 온도 지시계를 사용할 때도 논문에서 제시한 실험 방법으로 이 인자를 산출하고 교정 불확도에 추가하여 사용에서의 불확도를 평가할 수 있을 것이다.

실험 결과, 정해진 지시계와 열전대의 조합에 대해서 빙점 측정 시 환경 온도가 변할 때 지시 값이 반복성 있게 변화하는 것을 확인하였다. 측정 결과의 일관성을 확인하기 위해 4.1절에서 측정 한 결과를 이용하여 센서 간의 특성 차이와 지시계 간의 특성 차이에 대한 비교를 한 결과, 모델에서 예측한 값과 실제 지시 값을 이용해 계산한 값 사이의 차이가 거의 없거나 지시계의 분해능 내에서 일치함을 확인하였다. 4.2 절의 측정 결과와 4.1절의 측정 결과를 비교했을 때 측정 모델에서 예측한 바와 같이 발생하는 열기전력이 커질수록 열전대 온도 지시계의 기전력 측정 오차가 커지고 두 측정 결과가 예측 가능한 경향을 보이며 차이나는 것도 확인하였다. 이런 결과들은 본 연구의 2장에서 서술한 모델이 실험 결과를 일관성 있게 설명하는 데 적합하다는 것을 보여준다.

이 연구의 결과로 내부 상온 보상 온도 센서로 인한 불확도 인자를 결정하는 방법으로는 4.1 절에 제시한 대로 표준 규준 함수를 잘 따르는 특성을 가진 열전대를 이용하여 환경 온도에 따른 빙점 지시 값의 변화를 읽는 방법을 권장한다. 아울러, 본 방법으로 상온 보상 온도 센서로 인한 불확도 인자를 평가했는지 여부와 관계없이, 열전대 지시 온도계를 교정할 때 명시된 환경 온도를 벗어나서 사용하는 경우 교정 결과가 불확도 내에서 유효하지 않을 수 있음을 교정성적서에 명시하는 것이 바람직하다. 만약 교정 당시의 환경 온도에서 벗어난 온도에서 측정을 하게 된다면, 해당 온도에서 빙점 측정을 통해 교정성적서에서 제시한 보정값에서 얼마나 벗어나는지를 산출하여 추가 불확도에 반영하는 것이 좋은 한 방법이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024 년도 한국표준과학연구원의 ‘음향기체온도계 기반 열역학 온도 측정’의 지원을 받아 연구되었음(No.24011029).

REFERENCES

1. European Association of National Metrology Institute (EURAMET), (2011), Guidelines on the Calibration of Temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement, (EURAMET cg-11). <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines>

2. Oh, K.-S., Lee, W.-H., (2016), A study on the calibration technique of an electrical temperature calibrator, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 22(11), 944-951.  
3. Chen, X., Sun, L., Ling, Y., (2018), A calibration method for thermocouple-temperature calibrator based on cold junction calibrator, Proceedings of IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, 1118-1121.  
4. Wu, J., Ma, Z., Gao, W., Ma, W., Zhu, C., Zhong, Y., (2022), Temperature indicators field calibration method based on an integrated thermostat with cold junction compensation, Journal of Physics: Conference Series, 2229(012019), 944-951.  
5. IEC 60584-1, (2013), Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances.  
6. ASTM E1751/E1751M-20, (2020), Standard guide for temperature electromotive force (emf) tables for non-letter designated thermocouple combinations.  
7. ASTM E230/E230M-17, (2017), Standard specification for temperature-electromotive force (emf) tables for standardized thermocouples.



**Joo Gyeong Kang**  
Ph.D. candidate in the Department of Precision Measurement, University of Science and Technology. Her research interest is precision engineering.  
E-mail: joogyekang@kriss.re.kr



**Young Hee Lee**  
Principal Research Engineer in the Thermometry and Fluid Flow Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science. Her research interest is calibration of contact thermometers.  
E-mail: young@kriss.re.kr



**Inseok Yang**  
Professor in the Department of Precision Measurement, University of Science and Technology. Principal Research Scientist in the Thermometry and Fluid Flow Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science. His research interest is international temperature scale and thermodynamic temperature measurement.  
E-mail: iyang@kriss.re.kr





# 원형 플렉서 힌지의 축방향 연성 계산을 위한 새로운 현상-기반 이론식의 유도과 검증

## Derivation and Verification of Novel Phenomenon-based Theoretical Formulas for the Axial Compliance of Circular Flexure Hinges

문준희<sup>1</sup>, 신현표<sup>2,#</sup>  
Jun-Hee Moon<sup>1</sup> and Hyun-Pyo Shin<sup>2,#</sup>

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

KEYWORDS: Precision stage (정밀 스테이지), Flexure hinge (플렉서 힌지), Phenomenon-based (현상-기반), Axial compliance (축방향 연성), Finite element analysis (유한요소해석)

*A circular flexure hinge is a core element for force transmission and relative motion of precision stages used in semiconductor processes. When designing a circular flexure hinge, calculation formulas for axial and rotational compliance are essential. However, in the case of axial compliance, results of the existing calculation formulas have significant differences from reliable finite element analysis results. In this study, calculation formulas for axial compliance of the circular flexure hinges were derived based on stress distribution phenomenon. Comparison with finite element analysis results confirmed that the newly developed calculation formulas were more accurate than existing ones. It is anticipated that these enhanced formulas will lead to more precise designs, ultimately reducing both time and costs in research and industry.*

Manuscript received: September 9, 2024 / Revised: October 29, 2024 / Accepted: November 11, 2024

### 1. Introduction

Precision stages widely used in semiconductor etching processes use flexure hinges as connecting elements for rotational motion [1-3]. Conventional hinges, which are joints for relative rotational motion, have backlash and use lubricants, so they are not suitable for semiconductor processes where precision and contaminants significantly affect yields. However, the flexure hinge is free from these problems because it is made of a monolithic metal structure and is therefore widely adopted in semiconductor processes. Many studies have been conducted for a long time to calculate the axial compliance and bending compliance values of flexure hinges. Since most flexure hinges,

including circular and elliptical notch flexure hinges, can be viewed as beams whose cross-sectional shape changes continuously in the axial direction, most previous studies have used the Timoshenko-Ehrenfest beam theory for analysis [4,5].

There have been studies by Paros and Weisbord [6], Wu and Zhou [7], and Lobontiu [8] to calculate the compliance of 1-D circular flexure hinges (see Fig. 1). Although the forms of the compliance calculation equations developed in these studies are different, we found that they are the same equations when the terms in their equations were expanded and compared in this study. This is consistent with the diagnosis in the paper by Yong et al. [9] that the calculation results of these equations are the same, and the reason is that these equations are derived based on the same Timoshenko-

Ehrenfest beam theory. It is noteworthy that the Paros-Weisbord simplified formulas for the rotational compliance are more similar to the finite element analysis (FEA) results than the analytically derived full equations. In addition, Smith et al. [10], Tseytlin [11], and Schotborgh et al. [12] presented rotational compliance formulas for 1-D circular flexure hinges, but they were excluded from the comparison because this study deals with axial compliance.

Yong et al. [9] presented an accurate empirical formula for calculating axial and rotational compliance for the 1-D circular flexure hinge in the range of  $t/R$  of 0.1 to 0.25, and pointed out that when an axial load is applied to a circular flexure hinge, deformation occurs not only at the notch but also around it, but there is no compliance calculation formula that takes this into account. Li et al. [13] pointed out that a flexible joint with a circular flexure hinge consists of three parts: a notched segment, a segment close to the notch (as much as  $R$ ), and a segment further away. They obtained an empirical formula for the compliance of a circular flexure hinge by regression to an exponential function from the deformation value calculated by finite element analysis minus the deformation value of the non-notched segment.

We recognized that although a lot of deformation occurs in the region close to the notch, as commonly mentioned by Yong et al. [9] and Li et al. [13], there is no compliance calculation formula that takes this into account. Therefore, our research started with the aim of making theoretical formulas to calculate compliance more accurately by creating a reasonable phenomenon-based model for the region close to the notch.

Meanwhile, studies on the compliance calculation method of 2-D circular flexure hinges have been relatively less frequent than those of 1-D circular flexure hinges, and the compliance calculation formulas of 2-D circular flexure hinges have been derived only by Paros and Weisbord [6] and Lobontiu [8]. Although the compliance calculation formulas developed in these studies have different formula forms, we found that they are the same formulas when the terms were expanded and compared in our study.

Since there was a significant discrepancy between the results obtained from theoretical formulas in previous studies and those obtained from finite element analysis, particularly regarding the axial flexibility of the flexure hinge, this study aims to achieve the following detailed objectives in order to derive more accurate calculation formulas for axial compliance.

First, reasonable assumptions for compliance calculation are established through the stress distribution that occurs when an axial load is applied to the flexure hinge.

Second, phenomenon-based theoretical formulas are derived based on the assumptions.

Third, the accuracy of the newly developed theoretical formulas

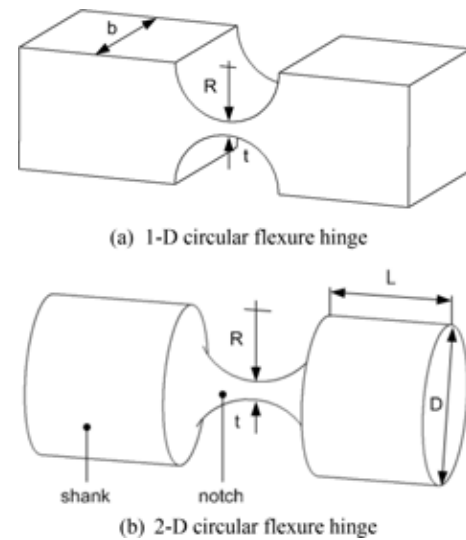


Fig. 1 Circular flexure hinges

is verified by comparing them with existing theoretical formulas, and FEA results.

Section 1 is the introduction. Section 2 describes the structure of circular flexure hinges and existing compliance calculation methods. Section 3 derives new theoretical formulas based on the phenomenon caused by axial load. Section 4 verifies the developed formulas through finite element analysis. And Section 5 presents the results and implications of the research.

## 2. Structure and Compliance of Circular Flexure Hinges for Ultra-precision Stages

Ultra-precision stages are mainly used for position control of masks in semiconductor etching processes, and they are in charge of micro-displacement control in a dual motion control consisting of large displacement and micro-displacement. The flexure hinge operates as a precision revolute joint without backlash and micro-dust due to the absence of lubricant, so it is adopted as an essential component for precision stages.

Circular flexure hinges can be divided into 1-D circular flexure hinges with one rotational degree of freedom and 2-D circular flexure hinges with two rotational degrees of freedom, as shown in Fig. 1.

Theoretically, a flexure hinge has a compliance of six components (3 translational + 3 rotational), but the following two components of compliance of a circular flexure hinge are important. The compliance in the axial direction, where the force is transmitted, should be low, and the compliance in the rotational direction, where the intended rotation occurs, should be high. Therefore, in this study, only the axial and rotational compliance of

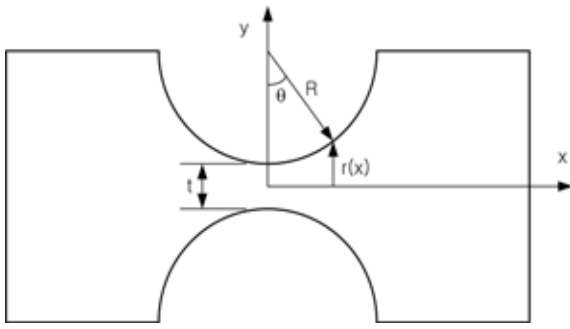


Fig. 2 Dimensions and coordinates of the circular flexure hinge

the flexure hinge are considered. The names and coordinates of the variables for the development of the theory are shown in Fig. 2.

In this study, the Euler-Bernoulli beam theory was utilized to develop the equations for the following reasons: Since the load changes over time are not abrupt, the effects of rotational inertia can be disregarded. Additionally, for calculating axial and rotational compliance, shear deformation is negligible. When the effects of shear deformation and rotational inertia are excluded from the Timoshenko-Ehrenfest beam theory, it simplifies to the Euler-Bernoulli beam theory.

The compliance of a flexure hinge is based on the following two equations.

$$\delta_i = C_i \cdot F_i \tag{1}$$

$$\theta_i = C_{\theta_i} \cdot M_i \tag{2}$$

where  $i = x, y, z$ .  $\delta$  and  $\theta$  represent the deformation length and deformation angle, respectively, and  $F$  and  $M$  represent the force and moment, respectively. The axial compliance  $C_a$  and the rotational compliance  $C_b$  are calculated as follows [14].

$$C_a = \frac{1}{E} \int \frac{dx}{A} \tag{3}$$

$$C_b = \frac{1}{E} \int \frac{dx}{I} \tag{4}$$

where  $E$  is the modulus of elasticity,  $A$  is the area, and  $I$  is the moment of inertia. In Fig. 2,  $r(x)$  is as follows:

$$r(x) = \frac{t}{2} + R \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{x}{R} \right)^2} \right) \tag{5}$$

With the above basic mechanical equations, previous researchers including Paros and Weisbord [6], Wu and Zhou [7], and Lobontiu et al [8] derived compliance calculation formulas. The formulas are included in Eqs. (A1)-(A14) in the appendix since they are used for comparison. The subscripts are added in the order of ‘compliance direction, degrees of freedom, author’, and

the formulas are listed in the order of ‘degrees of freedom, compliance direction, author’ for easy comparison. In addition, the simplified formula of Paros has ‘S’ at the end of the subscript.

Since static linear structural analysis by FEA numerically produces only stress and deformation values under specific loads and constraints, additional application of Eqs. (1) and (2) is required to obtain compliance. In this study, the conditions for FEA are as follows: the left side of the flexure hinge is fixed, and the axial load and bending moment are applied to the right side, respectively. The thickness  $t$  of the hinge neck is 1 mm, the width  $b$  of the 1-D circular flexure hinge is 10 mm, and the selected material is A7075-T6 with the elastic modulus of 73.013 GPa. The load condition was set so that the maximum stress at the neck of the hinge is within the allowable stress obtained by dividing the yield stress of the material by a safety factor of 2. To obtain the rotational compliance, one end of the shaft was fixed, and a moment (100 N mm for a 1-D circular flexure hinge and 10 N mm for a 2-D flexure hinge) was applied to the opposite end. In addition, to obtain the compressive compliance, one end of the shaft was fixed in the same way, and a force (1000 N for a 1-D circular flexure hinge and 100 N for a 2-D flexure hinge) was applied to the opposite end.

Through Figs. 3 and 4, it is shown that the differences between the calculated values and the finite element analysis values for the rotational compliance are not large, but the differences are large for the axial compliance. Since it is judged that the calculation formulas for the axial compliance need to be improved, and new calculation formulas for the axial compliance are derived in this study.

### 3. Derivation of New Compliance Formulas for Circular Flexure Hinges

The discrepancy between the results of the theoretical axial compliance calculations and the finite element analysis was examined through an investigation of stress distribution. The stress distribution under axial loading is illustrated in Fig. 5. The stress contour (iso-stress line or surface) is approximately circular and approximately perpendicular to the outline of circular flexure hinge. This phenomenon is clear for the 1-D circular flexure hinge and less clear for the 2-D circular flexure hinge.

The existing theoretical formulas were obtained by integrating only up to the end of the notch part of the hinge, but the actual stress is widely distributed up to the shank part. It was assumed that a more accurate axial compliance calculation formula could be obtained by deriving the formula considering the shank part. The following two assumptions were made based on the insight obtained from the stress contour shown in

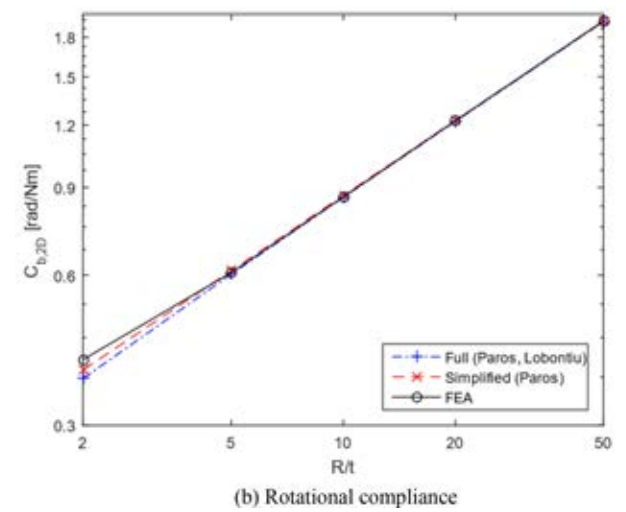
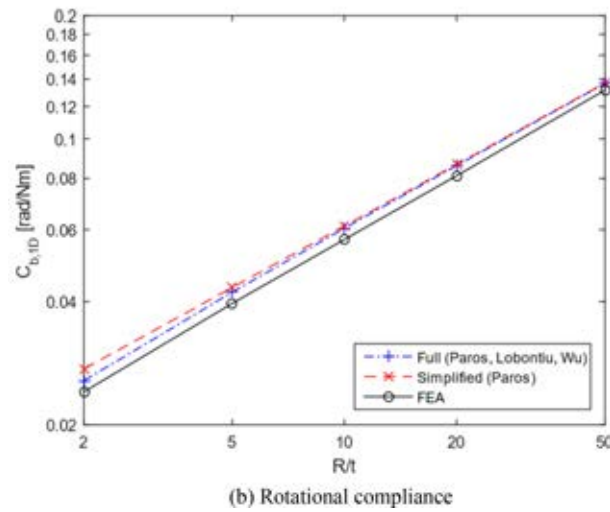
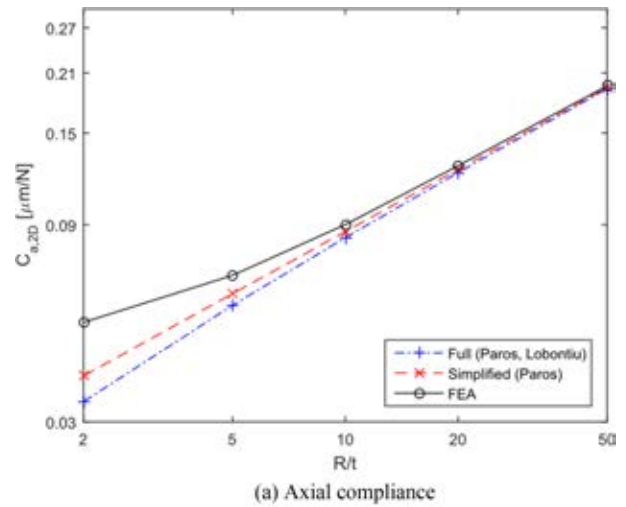
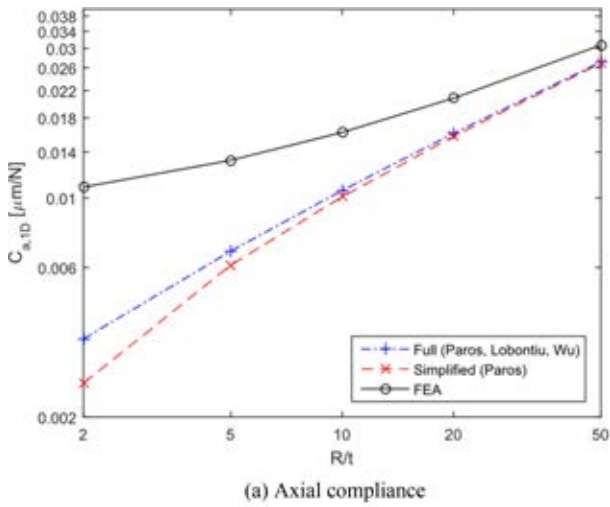


Fig. 3 Comparison between existing methods and FEA results for the 1-D circular flexure hinge

Fig. 4 Comparison between existing methods and FEA results for the 2-D circular flexure hinge

Fig. 5: First, the stress contour is circular and intersects the outline of the hinge at a right angle. Second, the stress acts perpendicular to the contour plane.

The free body diagram drawn by considering the latter first is as shown in Fig. 6. As can be seen in Figs. 6(a), the stress acting perpendicular to the stress contour can be projected as a stress perpendicular to the plane, as shown in 6(b).

Since the shape of the stress contour (dotted line) in Figs. 7(a) is expressed according to the angle  $\theta$ , the corresponding geometry for one stress contour is depicted in 7(b).

The equation of the circle forming the outline of a circular flexure hinge is:

$$x^2 + \left(y - \left(\frac{t}{2} + R\right)\right)^2 = R^2 \quad (6)$$

Therefore, any point  $(x,y)$  on this circle can be expressed as follows:

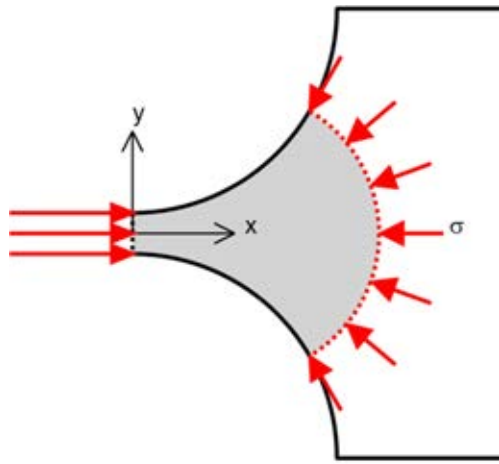
$$x = R \sin \theta \quad (7)$$

$$y = \frac{t}{2} + R(1 - \cos \theta) \quad (8)$$

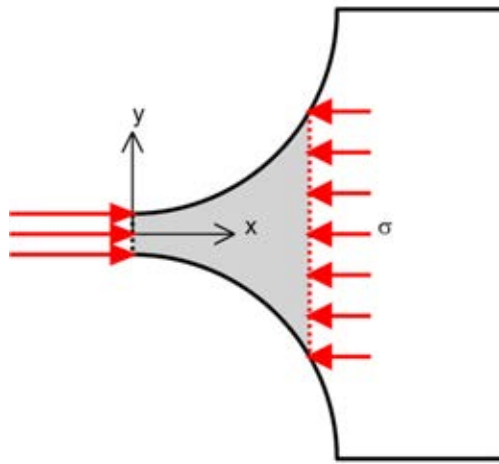
Also, the equation of the tangent line at the point  $(x_1, y_1)$  on this circle is as follows.



Fig. 5 Stress distribution of a 1-D circular flexure hinge when axially extended



(a) Stress distribution



(b) Equivalent stress distribution by projection

Fig. 6 Free body diagram at a certain stress contour

$$x_1x + \left(y_1 - \left(\frac{t}{2} + R\right)\right)\left(y - \left(\frac{t}{2} + R\right)\right) = R^2 \quad (9)$$

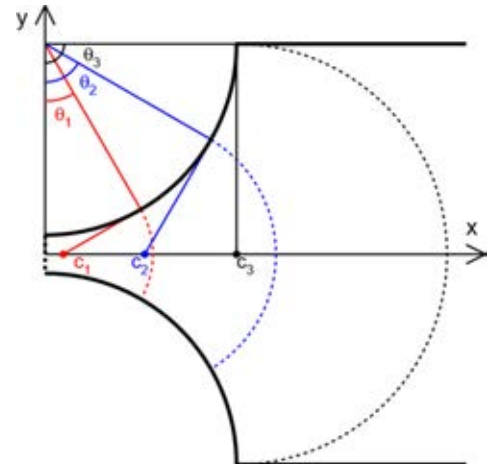
Let the intersection point of this tangent line and the  $x$ -axis ( $y = 0$ ) be  $(c, 0)$ , then

$$c = \frac{\left(\frac{t}{2} + R\right)\left(\frac{t}{2} + R(1 - \cos \theta)\right) - \frac{t^2}{4} - tR}{R \sin \theta} \quad (10)$$

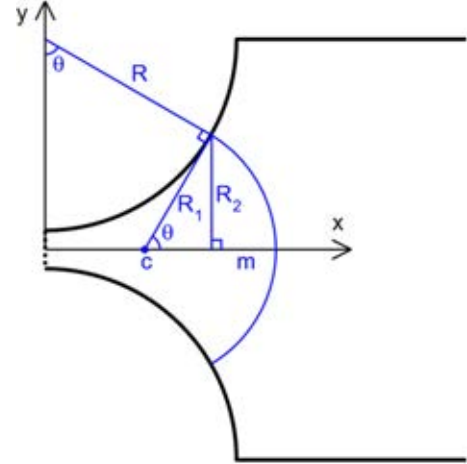
This intersection point  $(c, 0)$  becomes the center of the circle forming the stress contour, and the equation of the stress contour circle is as follows (see Fig. 7).

$$(x - c)^2 + y^2 = R_1^2 \quad (11)$$

Since the stress contour circle is assumed to be perpendicular to the outline of the hinge, the height  $m$  of the arc can be simply expressed as follows by a geometric relationship.



(a) Stress contours and their geometry



(b) Geometry for a certain stress contour

Fig. 7 Stress contour and geometry

$$m = \left(\frac{t}{2} + R(1 - \cos \theta)\right) \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \quad (12)$$

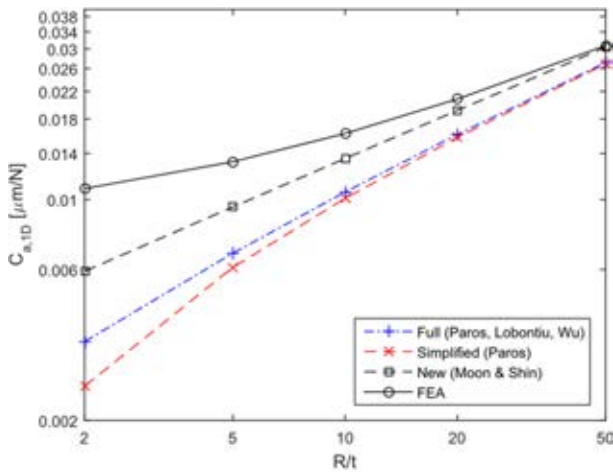
Considering that deformation occurs up to the stress contour area of Fig. 7(a), the axial compliance calculation formula of Eq. (3) needs to be corrected. Therefore, if the stress distribution is projected as in Fig. 6, while the area  $A$  is the same as in the existing formula, the variable of integration should be replaced from  $x$  to  $x + m$ .

$$d(x + m) = d\theta \left(\frac{t}{2} + 2R\right) \frac{1}{1 + \cos \theta} \quad (13)$$

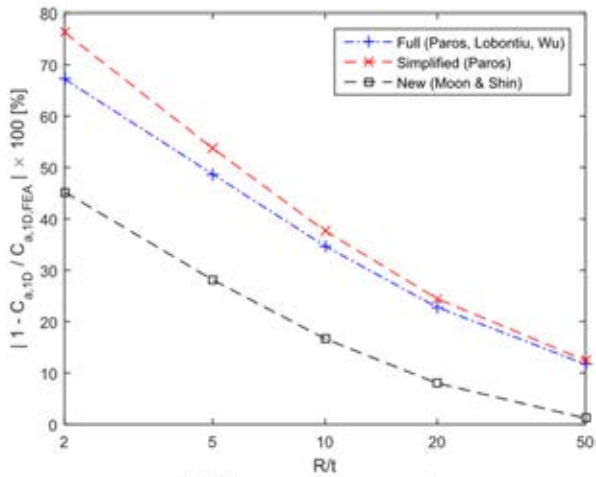
Therefore, by replacing  $dx$  in Eq. (3) with  $d(x + m)$  in Eq. (13), we can obtain the following result.

$$C_a = \frac{1}{E} \int \frac{1}{A} \left(\frac{t}{2} + 2R\right) \frac{1}{1 + \cos \theta} d\theta \quad (14)$$

The axial compliance formulas for the 1-D flexure hinge and 2-



(a) Axial compliance comparison



(b) Percentage error comparison

Fig. 8 Axial compliances of the 1-D circular flexure hinge

D flexure hinge obtained by calculating the integral of the above equation are Eqs. (15) and (16), respectively.

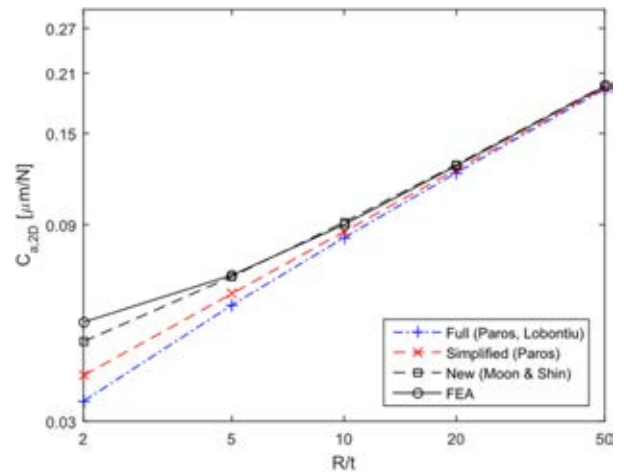
$$C_{a,1D} = \frac{1}{bE} \left[ 1 + \frac{4s}{\sqrt{4s+1}} \arctan \sqrt{4s+1} \right] \quad (15)$$

$$C_{a,2D} = \frac{4}{\pi Et(4s+1)} \times \left[ 1 + \frac{4s^2}{(2s+1)} + \frac{8s(s+1) \arctan \sqrt{4s+1}}{\sqrt{4s+1}} \right] \quad (16)$$

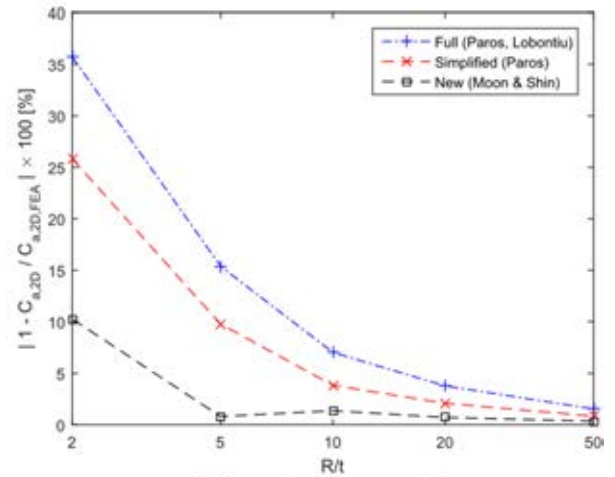
where  $s = R/t$ .

#### 4. Verification of the Newly Developed Formulas by Finite Element Analysis

Finite element analysis is performed to verify the performance of the newly developed axial compliance formulas of Eqs. (15) and (16).



(a) Axial compliance comparison



(b) Percentage error comparison

Fig. 9 Axial compliances of the 2-D circular flexure hinge

The circular flexure hinge used in the finite element analysis was set to have a length of one end of the shaft excluding the notch of 120 mm, and the height (at 1-D circular flexure hinge) or diameter (at 2-D circular flexure hinge) of the shaft was set to 101 mm, which was set to a sufficiently large value compared to the neck of the notch so that the deformation of the shank did not affect the overall analysis results. The thickness of the neck of the notch was fixed to 1 mm, and the radius of the circular notch was determined so that  $R/t$  was 2, 5, 10, 20, and 50. The grid was created so that the size of one side of the grid was smaller than the thickness  $t$  of the hinge.

The results of comparing the existing methods and the new method developed in this study with the finite element analysis results are shown in Tables 1 and 2. In Figs. 8 and 9, the percent errors compared with finite element analysis are shown for the 1-D and 2-D circular flexure hinges.

The performance of the newly developed method was evaluated by the percentage error to see how close the results by the

Table 1 Axial compliance values of the 1-D circular flexure hinge (unit:  $\mu\text{m}/\text{N}$ )

$R/t$	2	5	10	20	50
Full formula (Paros, Wu, Lobontiu)	3.551E-03	6.764E-03	1.057E-02	1.607E-02	2.713E-02
Simplified formula (Paros)	2.565E-03	6.101E-03	1.009E-02	1.572E-02	2.691E-02
New formula	5.932E-03	9.475E-03	1.348E-02	1.915E-02	3.036E-02
FEA result	1.023E-02	1.276E-02	1.556E-02	2.051E-02	2.994E-02

Table 2 Axial compliance values of the 2-D circular flexure hinge (unit:  $\mu\text{m}/\text{N}$ )

$R/t$	2	5	10	20	50
Full formula (Paros, Lobontiu)	3.357E-02	5.745E-02	8.375E-02	1.204E-01	1.923E-01
Simplified formula (Paros)	3.874E-02	6.125E-02	8.662E-02	1.225E-01	1.937E-01
New formula	4.686E-02	6.735E-02	9.129E-02	1.260E-01	1.960E-01
FEA result	5.222E-02	6.789E-02	9.007E-02	1.251E-01	1.953E-01

developed compliance formulas are to the finite element analysis results. The results are as follows: For the 1-D circular flexure hinge, the developed calculation formulas are 10.5 to 31.1% closer to the finite element analysis results across all values of  $R/t$ . For the 2-D circular flexure hinge, the formulas are 0.48 to 25.4% closer to the finite element analysis results for all values of  $R/t$ . These findings demonstrate that the newly developed formulas provide superior compliance calculation performance compared to existing formulas. Furthermore, the new formulas are simpler in form, enhancing their ease of use.

## 5. Conclusion

Firstly, we found a significant discrepancy between the axial compliance values of the circular flexure hinge obtained from existing theoretical formulas and those from finite element analysis (FEA). Secondly, reasonable assumptions were established for compliance calculation based on the stress distribution under axial load: the stress contour is circular and meets the outline of the hinge at a right angle, and the stress acts normally to the contour plane. Thirdly, axial compliance formulas for both 1-D and 2-D circular flexure hinges, presented in Eqs. (15) and (16), were derived based on these assumptions. Fourthly, the superiority of the developed theoretical formulas over existing ones was confirmed by evaluating the percent error relative to FEA results. Lastly, the newly proposed compliance formulas for circular flexure hinges are anticipated to be highly beneficial for industrial applications due to their accuracy and simplicity, potentially reducing both time and cost in design processes.

## REFERENCES

1. Moon, J.-H., Pahk, H. J., Lee, B.-G., (2011), Design, modeling, and testing of a novel 6-DOF micropositioning stage with low profile and low parasitic motion, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(1-4), 163-176.
2. Shin, H., Moon, J.-H., (2014), Design of a double triangular parallel mechanism for precision positioning and large force generation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(3), 862-871.
3. Yong, Y. K., Moheimani, S. O. R., Kenton, B. J., Leang, K. K., (2012), Invited review article: high-speed flexure-guided nanopositioning: mechanical design and control issues, *Review of Scientific Instruments*, 83(12), 121101.
4. Moon, J.-H., (2022), Analysis of the cylindrical flexure hinges with circular notches, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(2), 151-157.
5. Shin, H.-P., Moon, J.-H., (2023), Analysis on elliptic and parabolic 2-DOF flexure hinges for spatial positioning stages, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(3), 229-236.
6. Paros, J. M., Weisbord, L., (1965), How to design flexure hinges, *Machine Design*, 37(8), 151-156.
7. Wu, Y., Zhou, Z., (2002), Design calculations for flexure hinges, *Review of Scientific Instruments*, 73(9), 3101-3106.
8. Lobontiu, N., (2002), *Compliant mechanisms: design of flexure hinges*, CRC press.
9. Yong, Y. K., Lu, T.-F., Handley, D. C., (2008), Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations, *Precision Engineering*, 32(2), 63-70.
10. Smith, S. T., Chetwynd, D. G., Bowen, D. K., (1987), Design and assessment of monolithic high precision translation mechanisms, *Journal of Physics E*, 20(8), 977-983.



11. Tseytlin, Y. M., (2002), Notch flexure hinges: an effective theory, Review of Scientific Instruments, 73(9), 3363-3368.
12. Schotborgh, W., Kokkeler F., Trangter, H., van Houten, F., (2005), Dimensionless design graphs for flexure elements and a comparison between three flexure elements, Precision Engineering, 29(1), 41-47.
13. Li, T.-M., Zhang, J.-L., Jiang, Y., (2015), Derivation of empirical compliance equations for circular flexure hinge considering the effect of stress concentration, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16(8), 1735-1743.
14. Crandall, S. H., Dahl, N. C., Lardner, T. J., Sivakumar, M. S., (2012), An introduction to mechanics of solids: (In SI Units), 3rd Ed., McGraw-Hill.



#### Jun-Hee Moon

Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Yuhan University, Gyeonggi-do, South Korea. His research interests include the design and control of flexure linkages and micro-positioning stages.

E-mail: junheemoon@gmail.com



#### Hyun-Pyo Shin

Associate Professor in the School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University, Seoul, South Korea. His current research interests include the design of redundantly actuated parallel mechanisms and ultra-precision positioning stages based on flexure hinges.

E-mail: hpshin@dongyang.ac.kr

## APPENDIX

### A.1 Compliance Formulas for the 1-D Circular Flexure Hinge

(1) Axial compliance formulas for the 1-D circular flexure hinge by Paros

$$C_{a,1D,Pa} = \frac{1}{Eb} \left[ -2 \tan^{-1} \left( \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right) + \frac{2(1 + \beta)}{\sqrt{2\beta + \beta^2}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \times \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right) \right] \quad (A1)$$

where  $\beta = \frac{t}{2R}$ ,  $\gamma = 1 + \beta$

by Lobontiu

$$C_{a,1D,Lo} = \frac{1}{Eb} \left[ \frac{2(2R + t)}{\sqrt{t(4R + t)}} \arctan \sqrt{\frac{4R}{t} + 1} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (A2)$$

by Wu

$$C_{a,1D,Wu} = \frac{1}{Eb} \left[ \frac{2(2s + 1)}{\sqrt{(4s + 1)}} \arctan \sqrt{4s + 1} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (A3)$$

where  $S = R/t$

(2) Rotational compliance formulas for the 1-D circular flexure hinge by Paros

$$C_{b,1D,Pa} = \frac{3}{2EbR^2} \left( \frac{1}{2\beta + \beta^2} \right) \left[ \left( \frac{1 + \beta}{\gamma^2} + \frac{3 + 2\beta + \beta^2}{\gamma(2\beta + \beta^2)} \right) \times \sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2} + \left( \frac{6(1 + \beta)}{(2\beta + \beta^2)^{3/2}} \right) \times \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \times \frac{(\gamma - \beta)}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right) \right] \quad (A4)$$

where  $\beta = \frac{t}{2R}$ ,  $\gamma = 1 + \beta$

by Lobontiu

$$C_{b,1D,Lo} = \frac{24R}{Ebt^3(2R + t)(4R + t)^3} \left[ t(4R + t)(6R^2 + 6Rt + t^2) + 6R(2R + t)^2 \sqrt{t(4R + t)} \arctan \left( \sqrt{\frac{4R}{t} + 1} \right) \right] \quad (A5)$$

by Wu

$$C_{a,1D,Wu} = \frac{12}{EbR^2} \left[ \frac{2s^3(6s^2 + 4s + 1)}{(2s + 1)(4s + 1)^2} + \frac{12s^4(2s + 1)}{(4s + 1)^2} \arctan(\sqrt{4s + 1}) \right] \quad (A6)$$

where  $s = R/t$

### A.2 Compliance Formulas for the 2-D Circular Flexure Hinge

(1) Axial compliance formulas for the 2-D circular flexure hinge by Paros

$$C_{b,1D,Pa} = \frac{2}{\pi ER} \left\{ \left[ \frac{2}{(2\beta + \beta^2)^{3/2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \frac{\gamma}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right] + \left[ \frac{(1 + \beta)}{(2\beta + \beta^2)\gamma} \sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2} \right] \right\} \quad (A7)$$

by Lobontiu

$$C_{a,2D,Lo} = \frac{8R}{\pi Et^2} \left[ \frac{t}{4R+t} + 4R \sqrt{\frac{t}{(4R+t)^3}} \arctan \sqrt{1 + \frac{4R}{t}} \right] \quad (A8)$$

(2) Rotational compliance formulas for the 2-D circular flexure hinge

by Paros

$$C_{b,2D,Pa} = \frac{8}{3\pi ER^3(2\beta + \beta^2)} \times \left\{ \left[ \frac{1+\beta}{\gamma^3} + \frac{2(1+\beta)^2+3}{2\gamma^2(2\beta + \beta^2)} + \frac{2(1+\beta)^3+13(1+\beta)}{2(2\beta + \beta^2)^2\gamma} \right] \times \sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2} \right. \\ \left. + \frac{12(1+\beta)^2+3}{(2\beta + \beta^2)^{5/2}} \left[ \tan^{-1} \sqrt{\frac{2+\beta}{\beta}} \frac{\gamma-\beta}{\sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2}} \right] \right\} \quad (A9)$$

by Lobontiu

$$C_{b,2D,Lo} = \frac{128R}{3\pi Et^4} \left[ \frac{t(120R^4 + 176R^3t + 92R^2t^2 + 24Rt^3 + 3t^4)}{(2R+t)^2(4R+t)^3} + 24R(5R^2 + 4Rt + t^2) \sqrt{\frac{t}{(4R+t)^7}} \arctan \sqrt{1 + \frac{4R}{t}} \right] \quad (A10)$$

### A.3 Simplified Compliance Formulas for the Circular Flexure Hinge (by Paros)

(1) Axial compliance formulas for the 1-D circular flexure hinge (by Paros)

$$C_{a,1D,PaS} = \frac{1}{Eb} \left[ \pi \left( \frac{R}{t} \right)^{\frac{1}{2}} - 2.57 \right] \quad (A11)$$

(2) Rotational compliance formulas for the 1-D circular flexure hinge (by Paros)

$$C_{b,1D,PaS} = \frac{9\pi}{2Eb^2} \left( \frac{R}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A12)$$

(3) Axial compliance formulas for the 2-D circular flexure hinge (by Paros)

$$C_{a,2D,PaS} = \frac{2}{Et} \left( \frac{R}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A13)$$

(4) Rotational compliance formulas for the 2-D circular flexure hinge (by Paros)

$$C_{b,2D,PaS} = \frac{20}{Et^3} \left( \frac{R}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A14)$$



# 오염제거장치를 이용한 해양환경에서의 PEMFC의 전기화학적 성능 평가

## Evaluation of Electrochemical Performance of PEMFCs with Decontamination Devices at Marine Environments

권예림<sup>1</sup>, 유호준<sup>1</sup>, 강병규<sup>1</sup>, 홍기원<sup>1</sup>, 권순기<sup>1</sup>, 이상훈<sup>2,\*</sup>, 조구영<sup>1,\*</sup>  
Ye rim Kwon<sup>1</sup>, Ho Jun Yoo<sup>1</sup>, Byung Gyu Kang<sup>1</sup>, Ki Won Hong<sup>1</sup>, Sun Ki Kwon<sup>1</sup>, Sanghoon Lee<sup>2,\*</sup>, and Gu Young Cho<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook University)

<sup>2</sup> Center for Energy Research, University of California San Diego

# Corresponding Authors / E-mail: guyoungcho@dankook.ac.kr, TEL: +82-2-8005-3520, ORCID: 0000-0002-7263-8172

E-mail: sal050@UCSD.EDU, TEL: +1 (858) 534-6527, ORCID: 0000-0002-1568-5028

KEYWORDS: Polymer electrolyte membrane fuel cell (고분자막 전해질 연료전지), Marine environments (해양환경), Electrochemical impedance spectroscopy (전기화학 임피던스 분광법), Cyclic voltammetry (순환전압전류법), Decontamination (오염제거)

*In this study, we developed and evaluated a simple device for removing ionic impurities that affect the performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) in a marine environment. In such environments, PEMFCs may experience performance degradation due to the presence of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> in the air. To address this issue, the decontamination device was designed with both heating and cooling components. This device was positioned between a humidifier containing NaCl solution and a humidifier containing deionized water, both connected on the cathode side. The decontamination device effectively removed impurities (Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup>) during experiments. As a result, the electrochemical performance of the fuel cell with the decontamination device improved compared to that of the fuel cell without it. Notably, the activation resistance and electrochemical surface area were significantly enhanced, and the ohmic resistance also improved when compared to the fuel cell without the decontamination device.*

Manuscript received: September 10, 2024 / Revised: October 15, 2024 / Accepted: October 20, 2024

### 1. 서론

연료전지는 연료와 산소 사이의 전기화학적 반응을 이용하여 화학 에너지를 전기 에너지로 변환하는 장치이다. 이 중 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 백금을 기반으로 하는 촉매층과 고분자 전해질막을 포함한 구조로 이루어져 있다. PEMFC의 핵심 구성 요소로는 촉매층이 적용된 막 전극 집합체(Membrane Electrode Assembly, MEA), 가스켓, 분리판, 엔드플레이트, 집전판 등이 있다.

PEMFC는 주로 60-80°C의 저온 범위에서 작동하며, 수소를 연료로 사용하기 때문에 이산화탄소를 배출하지 않고, 에너지 효율이 높으며, 소음이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다[1].

이러한 장점들을 바탕으로 이동형 PEMFC 다양한 이동 수단에서도 PEMFC의 활용 범위가 점차 확대되고 있다[1-3]. 이동형 연료전지 시스템의 경우 고순도 수소가 저장 탱크로부터 공급되며, 공기는 대기로부터 블로어를 통해서 공급된다[4]. 일반적인 육상 이동형 연료전지의 경우, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 미세먼지 등의 공기 중 불순물로 인해 연료전지의 성능이 저하될 수 있다[5,6].

선행연구와 같이 공기 중 불순물로 인한 PEMFC 성능저하가 발생하므로 PEMFC가 해양 이동형 전원으로 사용될 경우, 해양 공기 중의 이온들이 PEMFC 작동에 미치는 영향에 대한 고려가 필요하다. 특히, 국제해사기구는 2030년까지 온실가스 감축을 목표로 하는 전략을 수립했으며, 한국 역시 선박, 트럭, 하역 장비 등 항만 운영과정에서 수소를 활용하여 2050 탄소중립 목표

실험에 기여 하려한다[7-9].

해양환경의 공기중에 존재하는 불순물과 이온들은 PEMFC의 공기극으로 공급되어 PEMFC 작동에 문제를 야기할 수 있다. Na<sup>+</sup>의 경우 H<sup>+</sup>을 대체하여 전해질막을 통과하려고 하기 때문에 전해질의 이온전도도를 저하시키고 연료전지의 오믹저항(Ohmic Resistance)을 증가시킨다. Cl<sup>-</sup>는 Pt 촉매에 흡착하여 활성화반응 사이트를 감소시켜 활성화 저항 및 활성화 면적(Electrochemically Active Surface Area, ECSA)을 감소시킨다[4,10,11,12-23].

대부분의 선행연구는 NaCl 수용액을 이용해 공기극에 공급 되는 공기를 가습하여 PEMFC가 해양환경에서 운전되는 상황을 모사하였다. Yoo et al.과 Uemura et al. 는 PEMFC에 공급되는 공기를 가습할 때 초음파 진동기와 NaCl 에어로졸 발생기를 사용하여 성능평가를 진행하였다[9,17] Park et al. 은 PEMFC의 작동 Voltage에 따른 평가를 진행했고, Yoo et al.은 PEMFC의 유로에 따른 성능평가를 진행하였고, Lamard et al.은 다양한 NaCl 농도에서 PEMFC를 평가했다[11,12,14]. 한편, NaCl 수용액으로 인한 PEMFC의 성능저하를 회복시키는 선행연구도 진행되었다. Lamard et al. 는 질소 퍼지를 통한 성능회복 효과를 보고하였고, MS Mikkola. et al.는 Neat Air를 이용하여 회복시키는 연구를 수행하였다[14,17].

이처럼 PEMFC를 해양환경에서 사용하기 위하여 해양 환경에서의 오염으로 인한 성능감소에 관한 연구들과 성능감소를 회복하는 방법에 관한 연구들이 진행되었다. 하지만, PEMFC 공기극의 오염을 방지하기 위한 연구는 필터를 사용하는 방법 외에 다른 연구는 미비했다[24].

본 연구에서는 PEMFC의 해양환경 운전을 모사하기 위하여 NaCl수용액을 이용해 연료전지의 공기극에 공급되는 공기를 가습 하였다. 또한, 자체 제작한 오염제거장치를 적용하여 그 효과를 평가하였다.

PEMFC의 전기화학적 성능과 특성은 Polarization Curve, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), Cyclic-voltammetry 를 이용하여 측정하였다. 실험이 종료된 후 공기극의 가스확산층(Gas Diffusion Layer) 표면을 전자주사현미경(Scanning Electron Microscopy)과 에너지분산광법(Energy Dispersion Spectroscopy) 를 이용하여 분석하였다.

2. 실험방법

실험은 22 × 23 mm<sup>2</sup>의 활성화 면적을 갖는 상용 막 전극 접합체 (CNL Energy, Republic of Korea, MEA C Type)를 사용하였다. 막 전극 접합체의 Nafion 은 NR211 (Chemours, USA)로 제작되었고, Ionomer는 D521 (Chemours, USA)로 제작되었다. 전극의 Pt Loading 은 Anode 와 Cathode 모두 0.4 mg/cm<sup>2</sup> 이며 상용 가스확산층(SGL, Germany, 39BB)을 사용하였다. 분리판은 폭 1.0, 깊이 0.8 mm의 사형 유로를 가지고 있는 그라파이트 분리판을 사용하였다.

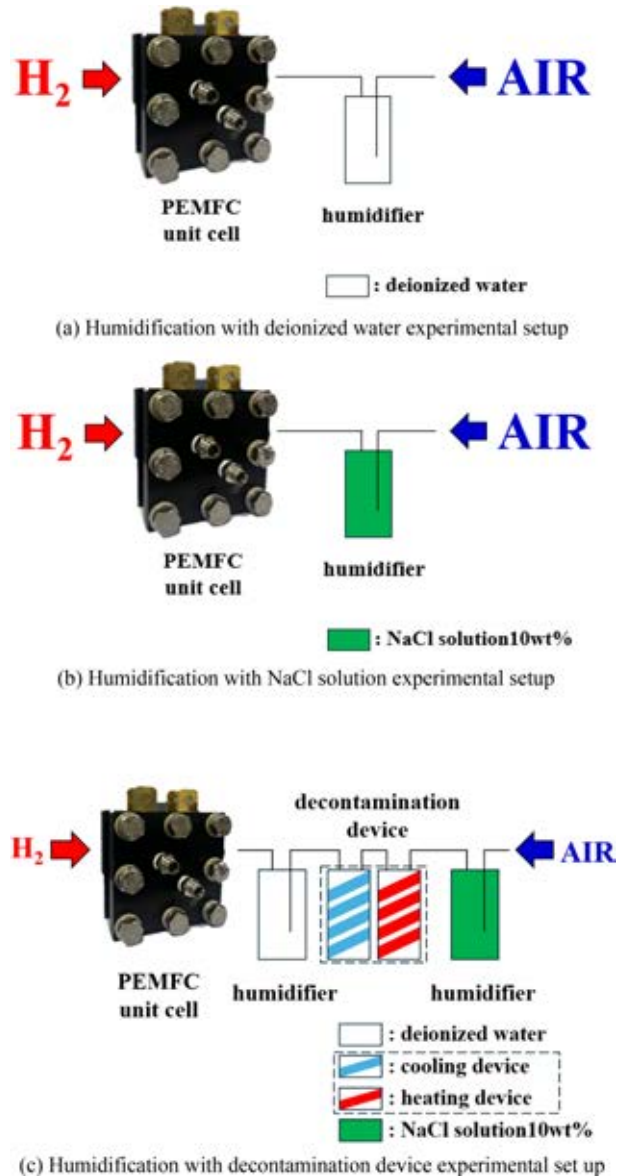


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

연료전지 특성 평가는 상온(25°C)에서 진행하였다. Fuel Cell Test Station (CNL-Station, CNL, Republic of Korea)을 사용하여 PEMFC에 가스를 공급하였다. 기체의 온도는 25°C로 유지되었다. 수소는(99.999%, Samjung Energy, Republic of Korea) 150 kPa의 압력으로 0.1 lpm으로 가습 없이 연료극에 공급하였다. 공기는 (N<sub>2</sub> 80 vol.%, O<sub>2</sub> 20 vol %, Samjung Energy, Republic of Korea) 150 kPa의 압력으로 0.5 lpm 공급하였다. NaCl 수용액으로 인한 오염 효과를 확인하기 위하여 공기는 상대습도 100으로 가습하여 공급하였다.

본 연구에서는 버블러(Bubbler) 방식의 가습장치를 활용하였다. 연료전지의 전기화학적 특성을 측정하기 위하여 상용 포텐시오스탯(sp 150, BioLogic, France)과 부스터(VMP -10)를 사용하였다. EIS는 0.8 V에서 측정하였다. Cyclic Voltammetry는 공기극에 N<sub>2</sub> 0.2 lpm, 연료극에 H<sub>2</sub> 0.1 lpm을 공급하여 측정하였

다. 전압 범위는 0.05-1.2 V, 속도는 50 mV·dt<sup>-1</sup> 로 설정하여 진행하였다. SEM 및 EDS (JSM-7600F, JEOL, Japan)를 이용하여 막 전극 접합체 표면을 분석하였다. 이온크레마토그래피(88 Basic IC Plus, Metrohm, Switzerland)분석법을 사용하여 가열장치에 포집된 내용물의 음이온 및 양이온 구성성분을 분석하였다.

Polarization Curve와 EIS를 이용하여 연료전지의 초기 성능을 확인하였다. 이후 Constant Current (0.62A/cm<sup>2</sup>) 조건에서 10 시간 동안 성능을 측정하였다. Constant Current 성능 측정 후 Polarization Curves, EIS, Cyclic Voltammetry를 측정하였다.

Figs. 1(a) 는 Deionized Water를 사용하여 가습한 실험 셋업의 개략도이며, 1(b)는 NaCl solution을 사용하여 공기극을 가습한 실험 셋업 개략도이다. Fig. 1(c)는 오염제거시스템을 적용한 실험 셋업 개략도이다. 오염제거장치는 단순하게 가열장치와 냉각장치의 연결로 구성되었다.

오염제거장치의 작동은 다음 설명과 같다. NaCl 수용액을 통해 가습된 25°C 공기는 50°C로 가열된 가열장치를 지나면서 공기중의 수분과 수분에 포함되어 있는 오염물질을 제거한다. 이후 가열된 건조한 공기는 냉각장치를 통과하면서 잔여 수분을 응축시키고 포함되어 있는 오염물을 제거한다. 냉각장치에 공급되는 냉각유로의 온도는 12°C로 설정하였다. 냉각장치를 지나 차가워진 건조한 공기는 다시 가습을 위해 탈이온수로 가습하였다. 탈이온수를 이용하여 가습하고 성능을 평가한 경우를 case-1 (Ref), NaCl 수용액을 이용하여 공기를 가습하고 성능을 평가한 경우를 case-2 (NC), NaCl 수용액을 사용하여 가습하고 오염제거장치를 추가한 경우를 case-3 (DC)라고 표기하였다.

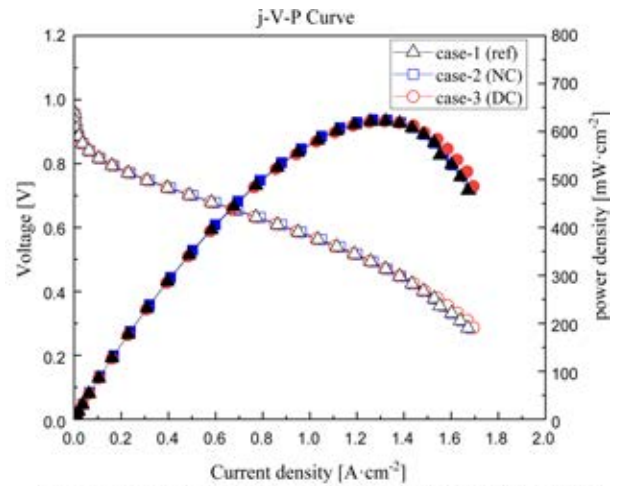
3. 결과 및 고찰

3.1 연료전지 초기 성능

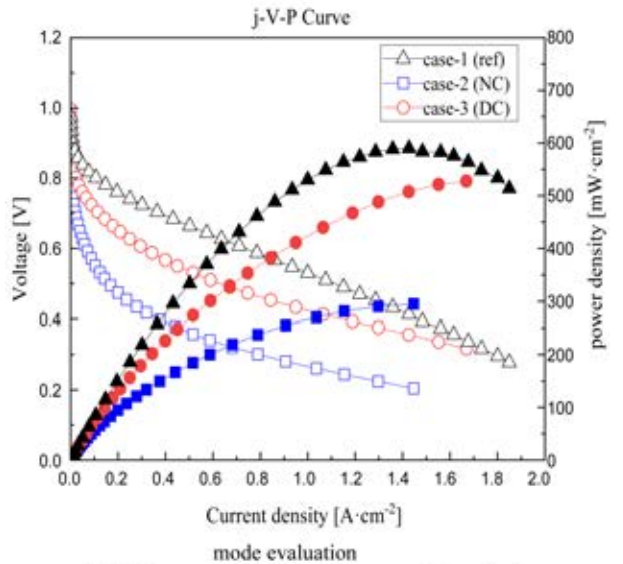
본격적인 실험을 진행하기 전 탈이온수를 이용하여 진행한 활성화 후 연료전지의 초기 성능을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 동일한 막 전극 접합체와 부품을 사용하고, 동일한 순서에 맞춰 활성화를 진행하여 성능차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. case-1 (Ref)의 성능은 622 mW/cm<sup>2</sup> 이고 case-2 (NC)의 초기성능은 625.4 mW/cm<sup>2</sup> 이며, case-3 (DC)의 초기성능은 623.3 mW/cm<sup>2</sup> 이다.

3.2 장기 성능 측정(Constant Current Mode Evaluation)

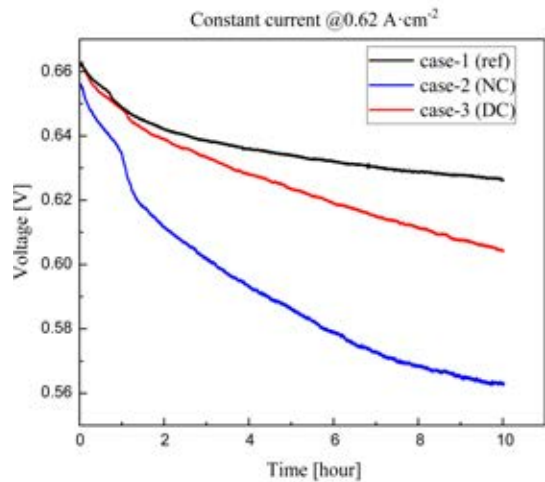
연료전지의 초기 성능을 측정한 후 0.62 A/cm<sup>2</sup>로 10시간동안 각 case의 성능을 측정하였다. 이를 통해 가습액이 연료전지의 전압에 미치는 영향을 평가하고 결과를 Fig. 2(c)에 나타내었다. Fig. 2(c)에 나온 것과 같이 탈이온수를 이용하여 공기를 가습하고 장기 성능을 측정한 case-1 (Ref)에서는 연료전지의 최초 전압이 0.66에서 0.62 V로 6% 감소하였다. NaCl 수용액을 이용하여 가습하면서 장기성능을 측정한 case-2 (NC)의 경우 연료전지의 최초 전압이 0.65에서 0.56 V로 13.8% 감소하였다. 오염



(a) j-V-P curves of the three cases measured after constant current



(b) j-V-P curves as initial performance after activation



(c) constant current at 0.62 A/cm<sup>2</sup>

Fig. 2 j-V-P curve and constant current graph

제거장치를 적용한 case-3 (DC)의 연료전지는 최초 전압이 0.66에서 0.60 V로 9% 감소하였다. case-2 (NC) 보다 오염제거장치

를 사용한 case-3 (DC) 경우 4.76 % 성능이 향상되었다.

이는 10시간 동안 연료전지의 성능을 평가하는 동안, 오염제거장치가 정상적으로 작동하여 NaCl 수용액속의 Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup> 이온을 충분히 제거하였음을 의미한다. 공기가 NaCl 수용액이 담겨있는 가습장치를 통과하면서 Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup> 이온을 포함한 수분이 공기와 함께 공기극에 공급되었고, 오염제거장치의 가열장치와 냉각장치를 거치면서 증발과 응축과정을 통해 오염 성분을 적절하게 제거한 것으로 추정된다.

3.3 장기 성능 평가 후 연료전지 성능

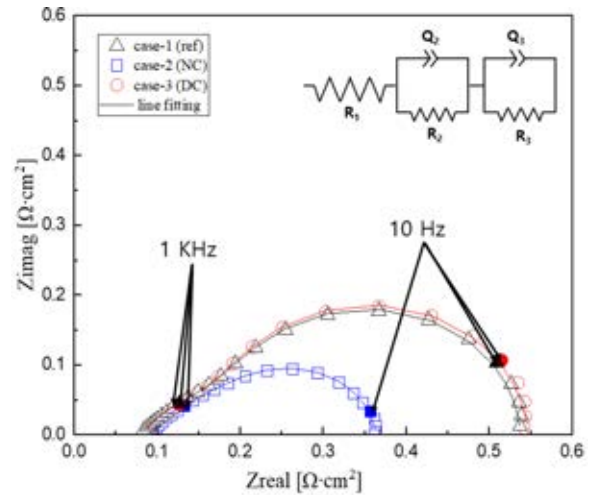
10시간 장기 성능 측정 후 연료전지의 성능을 다시 비교하였다. 각 연료전지의 분극곡선과 EIS 결과를 Figs. 2(b)와 2(c)에 나타내었다. 먼저 연료전지의 성능을 보면, 탈이온수로 평가한 연료전지 case-1 (Ref)의 경우, 10시간 Constant Current 작동이후 성능은 590 mW/cm<sup>2</sup>로 5.14% 감소하였다. NaCl 수용액을 이용하여 평가한 case-2 (NC)의 성능은 295 mW/cm<sup>2</sup>로 52.82% 감소하였다. 오염제거장치를 적용한 case-3 (DC)의 경우 장기성능 측정 후 성능은 527 mW/cm<sup>2</sup>로 최초 성능 대비 15.42% 감소하였다. 앞선 Constant Current 실험 결과와 비슷하게 오염제거장치를 적용한 연료전지의 성능감소가 NaCl 수용액을 이용하여 가습한 장치보다 개선되었다.

3.4 EIS 및 cyclic-voltammetry

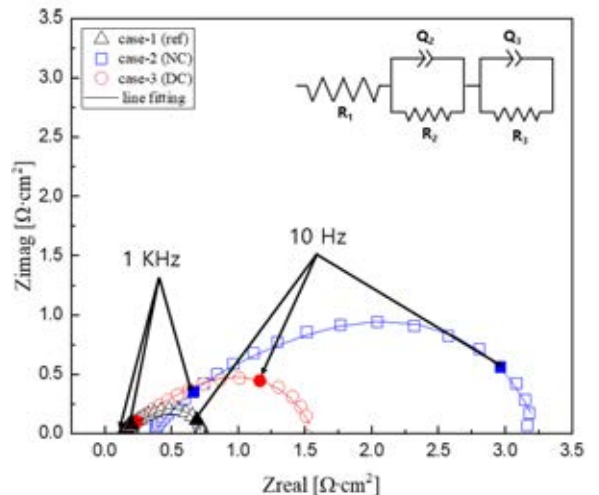
연료전지의 전기화학적 특성과 손실을 분석하기 위하여 EIS를 측정하였다. Fig. 3에 각 case의 Nyquist Plot을 나타내었다. 연료전지 저항은 활성화 저항, 오믹 저항, 그리고 물질 전달 저항 3가지로 구분된다[1]. 이 중에서 오믹저항은 Nyquist Plot의 원점에서 X축 절편인 연료전지의 EIS 결과가 시작되는 지점, 즉 고주파 영역의 시작점까지의 길이로 나타난다. 연료전지의 활성화 저항은 Nyquist Plot의 오믹저항으로부터 그려지는 반원의 크기로 나타난다[3].

Constant Current로 10 h 작동 후 측정된 Fig. 3(b)에 나타난 EIS 결과는 확연한 차이를 보였다. case-1 (Ref)의 경우 탈이온수를 이용한 평가를 진행하였기 때문에 오믹저항은 0.13, 활성화 저항은 0.55 Ω·cm<sup>2</sup>로 측정되었다. NaCl 수용액을 이용한 평가 후 연료전지인 case-2 (NC)는 오믹저항이 0.37, 활성화 저항이 2.77 Ω·cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 오염제거장치를 장착한 case-3 (DC)는 오믹저항이 0.15이고, 활성화 손실이 1.37 Ω·cm<sup>2</sup>로 측정되었다. NaCl로 가습한 case-2 (NC) 연료전지의 오믹저항은 case-1 (Ref) 보다 184.62% 크고, 활성화 저항은 case-1 (Ref) 보다 403.64% 크다. 오염제거장치를 사용한 case-3 (DC) 연료전지는 case-1 (Ref) 대비 오믹 저항은 15.3, 활성화 저항은 149.09% 크다.

각 연료전지의 초기 성능 측정 시 EIS 결과를 나타낸 Fig. 3(a)의 결과와 비교하면 10시간 운전 후 case-1 (Ref)는 오믹저항은 38.46, 활성화 저항은 16.36% 증가하였고, case-2 (NC) 연료전지는 오믹저항은 75.67, 활성화 저항은 90.25% 증가하였다.



(a) EIS Nyquist plot at 0.8V before the constant current evaluation



(b) EIS Nyquist plot at 0.8V after the constant current evaluation

Fig. 3 EIS graph

오염제거 장치를 장착한 case-3 (DC)의 오믹저항은 46.66 %, 활성화 저항은 66.42 % 증가하였다.

NaCl로 인한 연료전지 성능저하 원인을 파악하기 위하여 ECSA를 측정하였다. Cyclic Voltammetry 방법을 이용하였고, 결과는 Figs. 4(a)와 4(b)에 나타내었다. 10시간 운전 후 각 연료전지의 ECSA는 case-1 (Ref)는 4.40476E-09, case-2 (NC) 연료전지는 3.69048E-09, case-3 (DC) 연료전지는 3.90476E-09 m<sup>2</sup>/g로 측정되었다. 즉, NaCl 수용액으로 가습을 하면서 운전한 case-2 (NC)의 경우 탈이온수로 가습하면서 운전한 case-1 (Ref)와 비교하여 연료전지의 활성화 면적이 16.22% 적다는 것을 나타낸다. 이는 Fig. 3(b)의 각 연료전지의 EIS 결과와도 유사하다. NaCl 수용액을 이용하여 가습한 case-2 (NC)의 활성화 저항이 다른 case의 연료전지와 비교하여 월등하게 증가하였다.

앞에서도 언급한 선행연구 결과처럼, NaCl 수용액을 이용한 가습상황에서 운전할 때 반응면적인 Pt에 Cl<sup>-</sup>가 흡착되면서 활성화 면적이 감소하고, 활성화 저항은 증가한 것으로 추정할 수

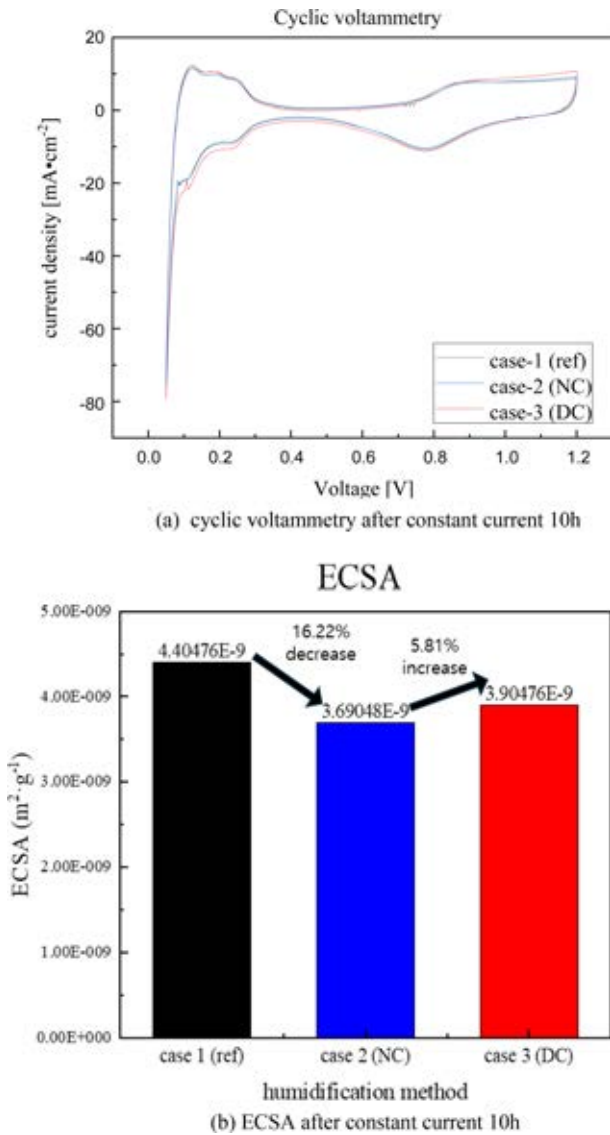


Fig. 4 Cyclic voltammety after constant current 10h and ECSA

있다[16,20-22]. 또한, 다른 선행연구에서는 Na<sup>+</sup> 이 전해질을 통한 양성자 이온의 이동을 대체하여 전해질을 통과하면서 연료 전지의 이온전도도를 감소시키고, 옴저항을 증가시킨다고 보고되었다[9,17]. Xiaofei Wen은 Element Distribution Curve 방법을 통한 MEAS의 단면 분석을 통해 Na<sup>+</sup> 원소 분포 곡선이 F 원소의 분포 곡선과 유사하고 Cl<sup>-</sup> 은 pt의 곡선과 유사한 분포 경향을 나타내는 것을 보고하였다[13].

3.5 분석

case-2 (NC) 연료전지의 실험 후 GDL을 이용하여 SEM과 EDS 분석을 실시하였다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 SEM 분석 결과 GDL 표면에서 NaCl 결정을 관찰할 수 있었다. 이는 NaCl 수용액을 이용한 가습 상황(case-2 (NC))에서 가습기를 통해서 NaCl이 포함된 수증기가 연료전지로 잘 공급되었다는 것을 의미한다. 또한 Table 3에는 Cathode Side GDL에서의 EDS 결과를

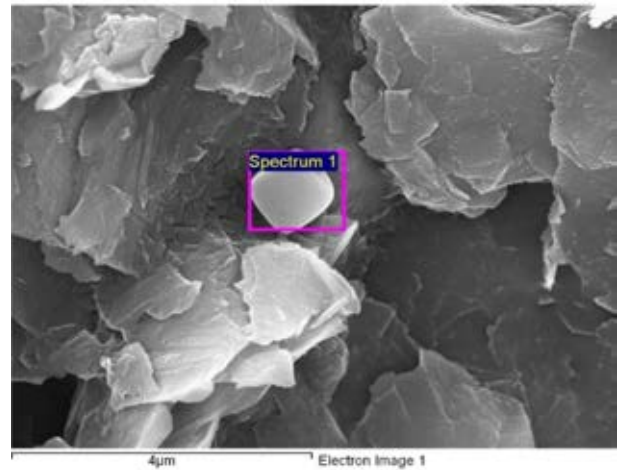


Fig. 5 SEM of cathode side GDL

Table 1 Ion mass in the air in the cooling device and heating device, obtained by Ion chromatography

Element	Cl <sup>-</sup> [mg/kg]	Na <sup>+</sup> [mg/kg]
in the cooling device	138	96
in the heating device	56	30

Table 2 EDS of cathode side GDL

Element	Weight [%]	Atomic [%]
C K	84.24	91.92
F K	3.51	2.42
Na K	5.66	3.23
Cl K	6.59	2.44
Totals	100.00	

나타내었다. GDL의 구성성분인 탄소 이외에, Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup> 이 검출되었다.

가열장치와 냉각장치로 구성되어 있는 오염제거장치가 적절하게 작동되었는지 확인하기 위하여 각 오염제거 장치의 내부 공기에 대하여 이온크로마토그래피(Ionchromatography) 분석을 실시하였다. Table 1의 이온크로마토그래피 결과를 통해 확인할 수 있다. 냉각장치 내부의 공기에서는 Cl<sup>-</sup> 가 138, Na<sup>+</sup>가 96 mg/kg 검출되었으며, 가열장치에서 포집된 공기에서는 Cl<sup>-</sup> 가 56, Na<sup>+</sup> 30 mg/kg검출되었다.

4. 결론

본 연구에서는 해양환경의 대기 중 존재하는 Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> 과 같은 이온이 PEMFC의 성능에 미치는 부정적인 영향을 최소화할 수 있는 효과적인 방안을 제시하였다. 해양환경의 대기에 포함되어 있는 Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup>는 각각 연료전지의 옴저항과 활성화 저항을 증가시키며, 성능을 감소시키는 것을 확인하였다.



10시간의 Constant Current 평가를 통해서 NaCl 수용액을 이용한 가습이 연료전지의 성능에 치명적인 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. 또한, 간단한 가열장치와 냉각장치를 결합하여 제작한 오염제거장치를 장착하는 경우인 case-3 (DC) 그리고 NaCl 수용액을 이용한 경우인 case-2 (NC)보다 나은 성능을 보였다.

오염제거장치가 장착된 연료전지의 성능은 NaCl 수용액을 이용하여 가습한 경우보다 개선된 성능을 보였다.

본 연구는 해양 환경에서 PEMFC의 안정적인 운영을 위한 효과적인 예방 방법을 제공하여, 해양환경에서의 연료전지 작동과 관련한 의미 있는 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00213741). 이 논문은 2024년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0017120, 2024년 산업혁신인재성장지원사업). 이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030030260, 항공용 모빌리티를 위한 연료전지 경량화 기술 개발).

## REFERENCES

- O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F. B., (2016), Fuel cell fundamentals, John Wiley & Sons.
- Wang, Y., Pang, Y., Xu, H., Martinez, A., Chen, K. S., (2022), PEM Fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development - A review, *Energy & Environmental Science*, 15(6), 2288-2328.
- Jang, G.-E., Cho, G.-Y., (2022), Effects of Ag current collecting layer fabricated by sputter for 3D-printed polymer bipolar plate of ultra-light polymer electrolyte membrane fuel cells, *Sustainability*, 14(5), 2997.
- Yoo, H. J., Jang, G. E., Lee, Y. J., Song, D. K., Lee, H., Cho, J. Y., (2022), Analysis of electrochemical behavior of PEMFC humidified with NaCl Solution mist using an ultrasonic vibrator, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(12), 939-946.
- Jing, F., Hou, M., Shi, W., Yu, H., Ming, P., Yi, B., (2007), The effect of ambient contamination on PEMFC performance, *Journal of Power Sources*, 166(1), 172-176.
- Nagahara, Y., Sugawara, S., Shinohara, K., (2008), The impact of air contaminants on PEMFC performance and durability, *Journal of Power Sources*, 182(2), 422-428.
- International Maritime Organization (IMO), (2018), Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships, (Report No. MEPC.304(72)). [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf)
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), (2021), 2050 Carbon neutrality roadmap for the oceans and fisheries sector. <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=44586&listUpdtDt=2024-12-26++10%3A00&menuSeq=1065&bbsSeq=84>
- Finlayson-Pitts, B. J., Hemminger, J. C., (2000), Physical chemistry of airborne sea salt particles and their components, *The Journal of Physical Chemistry A*, 104(49), 11463-11477.
- Yoo, H. J., Cho, G. Y., (2022), Effects of humidification with NaCl solution mist on electrochemical characteristics of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Sustainability*, 14(23), 16242.
- Yoo, H. J., Cho, G. Y., (2023), Influences of flow channel on electrochemical characteristics of polymer electrolyte fuel cells humidified with NaCl contained H<sub>2</sub>O, *Sustainability*, 15(3), 2415.
- Park, S., Shorova, D., Kim, H., (2022), Effect of operating cell voltage on the NaCl poisoning mechanism in polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 538, 231590.
- Wen, X., Zhu, D., Hnydiuk-Stefan, A., Ma, Z., Królczyk, G., Li, Z., (2024), Energy storage performance of hydrogen fuel cells operating in a marine salt spray environment using experimental evaluation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 213-225.
- Lamard, M., Auvity, B., Buttin, P., Rosini, S., Retière, C., (2023), Impact of NaCl Spray on the durability of PEMFC single cells and stacks in marine environment, *Journal of The Electrochemical Society*, 170(2), 024504.
- Sasank, B. V., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K. S., (2016), Performance analysis of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stack operated under marine environmental conditions, *Journal of Marine Science and Technology*, 21(3), 471-478.
- Uemura, S., Yamazaki, M., Yoshida, T., Jao, T.-C., Hirai, S., (2017), Performance degradation of PEMFC by sea salt aerosol contamination, *ECS Meeting Abstracts*, 80(8), 651.
- Mikkola, M. S., Rockward, T., Uribe, F. A., Pivovar, B. S., (2007), The effect of NaCl in the cathode air stream on PEMFC performance, *Fuel Cells*, 7(2), 153-158.
- Madhav, D., Shao, C., Mus, J., Buysschaert, F., Vandeginste, V., (2023), The effect of salty environments on the degradation behavior and mechanical properties of nafion membranes, *Energies*, 16(5), 2256.
- Nagahara, Y., Sugawara, S., Shinohara, K., (2008), The impact of air contaminants on PEMFC performance and durability, *Journal of Power Sources*, 182(2), 422-428.
- Unnikrishnan, A., Janardhanan, V. M., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K. S., (2018), Chlorine-contaminated anode and cathode PEMFC-recovery perspective, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 22(7), 2107-2113.

21. Uddin, M. A., Wang, X., Qi, J., Ozdemir, M. O., Pasaogullari, U., Bonville, L., Molter, T., (2015), Effect of chloride on pefcs in presence of various cations, *Journal of The Electrochemical Society*, 162(4), F373-F379.
22. Baturina, O. A., Epshteyn, A., Northrup, P. A., Swider-Lyons, K. E., (2011), Insights into PEMFC performance degradation from HCl in Air, *Journal of The Electrochemical Society*, 158(10), B1198.
23. Zhang, G., Yang, G., Li, S., Shen, Q., Jiang, Z., Li, Z., Wang, H., Liao, J., Zhang, H., (2022), Molecular dynamics study on the impacts of cations in sea salt aerosol on transport performance of Nafion Membranes for PEMFCs in marine application, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(63), 27139-27149.
24. Özyalcin, C., Mauermann, P., Dirkes, S., Thiele, P., Sterlepper, S., Pischinger, S., (2021), Investigation of filtration phenomena of air pollutants on cathode air filters for PEM fuel cells, *Catalysts*, 11(11), 1339.



#### Ye rim Kwon

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte fuel cells.

E-mail: d72230125@dankook.ac.kr



#### Ho Jun Yoo

a doctoral program in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of solid oxide fuel cells.

E-mail: dku72220126@dankook.ac.kr



#### Byung Gyu Kang

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: dku72240129@dankook.ac.kr



#### Ki Won Hong

Under graduated student in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: 32194950@dankook.ac.kr



#### Sun Ki Kwon

Under graduated student in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: 32180262@dankook.ac.kr



#### Sang Hoon Lee

Post Doctoral researcher in the Center for Energy Research, University of California, San Diego. He received his Ph.D. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University. His research interests are fuel cells, and thin films.

E-mail: sal050@UCSD.EDU



#### Gu Young Cho

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. He received his Ph.D. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University. His research interests are fabrication and characterization of fuel cells, deposition and characterization of thin films.

E-mail: guyoungcho@dankook.ac.kr



# 새로운 소형 버너리그를 이용한 EB-PVD 열차폐 코팅의 열피로 수명 평가

## Thermal Fatigue Life Evaluation of EB-PVD TBC Using Newly Developed Small-scale Burner Rig

박수<sup>1</sup>, 김대진<sup>2,#</sup>, 김준영<sup>2</sup>, 김성주<sup>2</sup>, 석창성<sup>1</sup>  
Soo Park<sup>1</sup>, Dae-Jin Kim<sup>2,#</sup>, Jun-Young Kim<sup>2</sup>, Seoung-Ju Kim<sup>2</sup>, and Chang-Sung Seok<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 성균관대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Sungkyunkwan University)

<sup>2</sup> 안동대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Andong National University)

# Corresponding Author / E-mail: [djkim@anu.ac.kr](mailto:djkim@anu.ac.kr); TEL: +82-54-820-6128

ORCID: 0009-0004-2051-8904

KEYWORDS: Thermal barrier coating (열차폐코팅), Burner rig (버너리그), Thermal fatigue life (열피로수명), Flow rate ratio (유량비), Total flow rate (총유량)

*In this study, the effect of flow rate ratio (R) and total flow rate (Q) on the surface temperature of thermal barrier coatings (TBC) was investigated using a newly developed small-scale methane-oxygen burner rig. Subsequently, the failure mode of electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) TBC was examined, and the relationship between surface temperature and coating life was established. The surface temperature of the TBC was found to be strongly dependent on both the flow rate ratio and the total flow rate. Specifically, surface temperature exhibited a proportional relationship with total flow rate, while it showed an inverse relationship with flow rate ratio. The failure mode of the EB-PVD TBC involved a gradual increase in delamination from the rim to the center of the coin-shaped specimen, and this failure mode was found to be independent of surface temperature. Additionally, it was determined that the surface temperature of EB-PVD TBC has a perfectly inverse linear relationship with coating life. This finding implies that the derived linear regression line from the burner rig test can be directly used to predict coating life for any untested surface temperature.*

Manuscript received: September 10, 2024 / Revised: October 11, 2024 / Accepted: October 21, 2024

### 1. 서론

가스터빈의 터빈 입구 온도(Turbine Inlet Temperature, TIT)는 약 1,350-1,500°C 정도로[1,2], 블레이드 소재인 초내열합금의 한계온도(약 1,000°C)를 크게 상회한다. 가스터빈 가동 중에도 블레이드의 온도가 한계 온도 이하에 머물도록 하기 위해, 블레이드에는 표면에 냉각 공기를 흘려주는 막 냉각 기술과 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC) 기술이 적용되고 있다. TBC는 모재의 산화 방지 목적으로 적용되는 MCrAlY 재질의 본드 코팅과, 열 차단 목적으로 적용되는 YSZ (Yttria Stabilized Zirconia) 재질의 탑 코팅으로 구성된다[3]. 대표적인 탑 코팅 방식에는 대기 중 용사 방식(Air Plasma Spray, APS)

방식과 진공 물리 증착 방식(Electron Beam Physical Vapor Deposition, EB-PVD)이 있으며[4,5], APS 방식은 발전용 블레이드에, EB-PVD 방식은 항공기용 터빈 블레이드에 주로 적용되고 있다[5]. 열피로 시험은 TBC의 내구성을 평가하기 위한 가장 일반적인 방법으로, 열피로 시험에는 주로 전기로와 버너리그가 사용된다. 버너리그 시험에서 시편의 표면온도는 화염거리, 연료/산소의 유량에 따라 달라지므로, 실험 수행에 앞서 각각의 조건이 TBC의 표면 온도에 미치는 영향을 파악하는 것이 필요하다. 그러나 문헌에는 버너리그 시험 조건으로서 TBC의 표면 온도만 제시되어 있을 뿐, 그 표면 온도를 구현하기 위한 화염거리, 연료/산소 유량 등에 관한 정보는 전혀 제시되어 있지 않다. 그 밖에도 버너리그 시험 조건을 결정하고 실험을

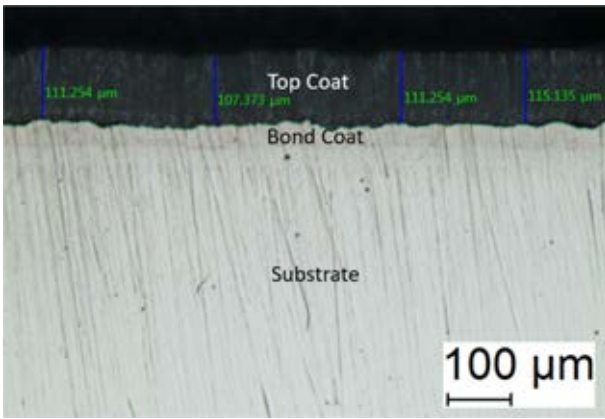


Fig. 1 Cross-section of EB-PVD TBC specimen

수행하기까지는 많은 준비 과정이 필요하지만, 참고할 수 있는 내용을 문헌에서 찾아보기는 매우 어렵다. 국내에서 아직까지 버너리그를 이용한 TBC의 열피로 특성 평가에 관한 연구가 부족한 것은 이러한 기술적 참고 자료의 부재가 큰 원인이라고 판단된다. 박수 등[6]은 화염 직경이 25 mm인 소형 메탄 버너를 이용한 버너리그 시험을 수행하였고, 목표 시험 온도를 구현하기 위해 화염거리 및 연료/산소 유량의 최적화가 필요함을 강조하였다. 이에 대한 후속 연구로서, 본 연구에서는 동일한 버너를 사용한 새로운 버너리그를 설계 및 제작하는 과정을 상세히 기술함으로써, 버너리그 시험의 진입 장벽을 낮추고자 하였다. 더불어, 제작된 버너리그를 이용하여 EB-PVD TBC에 대한 열피로 수명 선도를 도출할 수 있음을 제시하였다.

2. 시험재료 및 시편

Fig. 1은 EB-PVD 공정으로 제작된 TBC 시편의 단면 미세조직을 나타낸 것이다. 단결정 니켈 기지 초내열 합금인 CMSX4 재질의 모재 위에 VPA (Vapor Phase Aluminizing) 방식으로 MCrAlY 재질의 본드 코팅을 적용한 후, 진공 상태( $4 \times 10^{-4}$  Torr)에서 약 180분 동안 YSZ를 증착하였다. 탑코팅의 두께는 약 110 μm이다.

3. 버너리그

Fig. 2는 버너리그의 전체 개략도이다. 버너는 움직이지 않고 두 개의 시편이 모터 선형가이드(선형가이드1)에 의해 버너와 냉각팬 사이를 왕복 운동하는 방식으로 열피로 시험이 이루어진다. 두 개의 냉각팬을 알루미늄 각판의 양단에 고정하고, 그 각판의 중심에는 수평형 선형가이드(선형가이드 2)를 설치했다. 버너를 선형가이드2의 슬라이딩 블록에 체결함으로써 화염거리의 조절이 용이하도록 하였다. 두 번째 알루미늄 각판 위에는 배기가스를 포집하기 위한 연통을 설치하였다. 열기가 위로

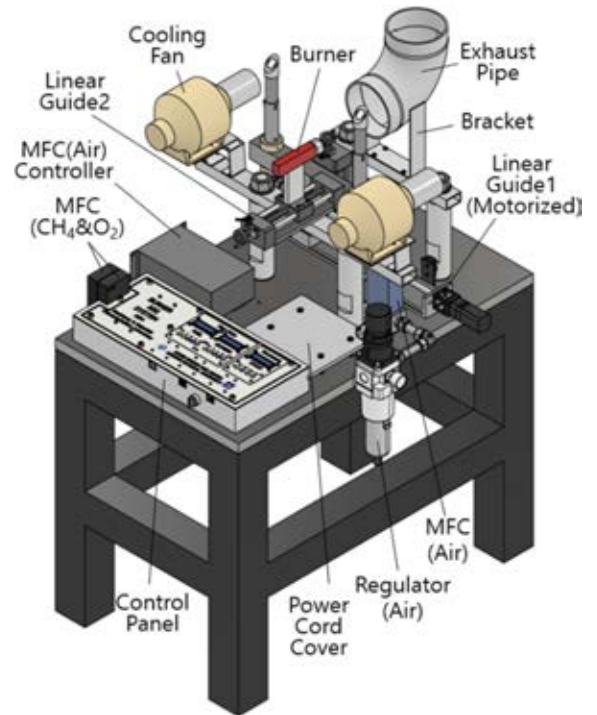


Fig. 2 Illustration of burner rig system

올라가는 것을 감안하여 직경이 150 mm인 연통의 중심이 화구의 중심보다 조금 더 높게 위치하도록, 연통 측면에 부착한 브라켓의 높이를 200 mm로 결정하였다. 시편 홀더의 산화를 방지하기 위한 압축 공기의 유량을 조절하기 위해 400 LPM (Liter Per Minute)급의 유량조절장치(Mass Flow Controller, MFC)와 전용 콘트롤러(MFC Korea, MPR-Z300)를 이용하였고, 압축 공기가 MFC로 유입되기 전에 레귤레이터(Regulator)에서 압력을 4 Bar로 조정하였다. 메탄과 산소의 유량 제어 시스템 및 시편 홀더의 움직임 제어 목적의 모터 제어 시스템을 아두이노를 이용하여 구성하였고, 자세한 구성 방식은 3장에서 설명하였다. 유량 및 모터 제어 시스템을 하나의 콘트롤 패널로 제작하여 버너리그 운용 시 유량 및 모터 제어의 편의성을 제고하였다.

3.1 선형가이드를 이용한 자동 이송 시스템

Fig. 3은 두 개의 시편 홀더가 모터에 의해 왕복 운동하는 방식을 자세히 나타낸 것이다. 두 개의 시편 홀더는 기둥(Adapter+Pole)과 결합되고 두 기둥은 알루미늄 각판에 링으로 체결된다. 알루미늄 각판은 수직으로 세워진 선형가이드(선형가이드3)의 슬라이딩 블록에 결합되어 필요시 시편의 높이를 수동으로 간편하게 조절할 수 있도록 하였다. 선형가이드3은 선형가이드1의 슬라이딩 블록과 체결이 되며, 모터의 정/역 회전에 의해 좌우로 움직이게 되는데, 좌측과 우측에 리미트 스위치를 고정하여 선형가이드3의 움직이는 가동범위를 제한하였다. 결과적으로 좌/우측 시편이 한 번씩 번갈아 버너의 화구로 이동하며 일정 시간 동안 가열된 후 다시 냉각팬 위치로 돌아와 동일한 시간 동안 냉각이 되는 방식이다. 한 위치에서 다른 위치로의 이송

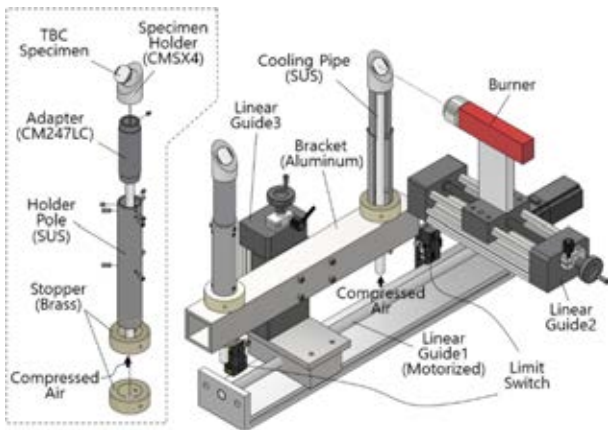


Fig. 3 Illustration of automatic specimen moving system with exploded diagram of holder part

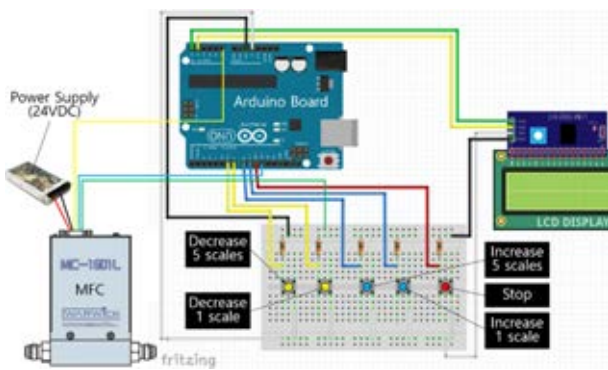


Fig. 4 Circuit diagram of gas flow rate control system with arduino

시간은 약 18초이다. Fig. 3은 선형가이드1의 슬라이딩 블록이 좌측 리미트 스위치와 접촉하여, 모터가 정지한 상황으로서, 이때 우측 시편의 중심과 버너의 화구 중심이 일치하여 우측 시편은 가열되고, 좌측 시편은 냉각팬(그림에서 미도시)에 의해 아두이노 코딩에서 설정한 지연(Delay) 시간 동안만큼 냉각된다.

3.2 아두이노를 이용한 유량조절 시스템

메탄과 산소의 유량 제어용 MFC (Warwick, MC-1600L)의 용량은 각각 10 LPM과 30 LPM이다. 메탄 탱크와 산소 탱크의 출구측 레귤레이터의 압력은 모두 2 Bar로 세팅하였다. 아두이노 보드, 푸시 버튼 스위치 및 LCD를 이용한 MFC 유량 조절 시스템을 Fig. 4와 같이 구성하였고, 유량 값이 LCD 화면을 통해 실시간으로 출력되도록 하였다. 아두이노를 이용하여 MFC의 개방 정도를 제어하는 방법 및 실험을 통해 유량 값을 보정하는 방법은 이전 논문[6]에 자세히 기술되어 있다. 5개의 푸시 버튼 스위치는 좌측부터 각각, 5스케일 유량감소, 1스케일 유량감소, 1스케일 유량증가, 5스케일 유량증가, Stop(유량 0)에 해당하며, 화염의 세기를 바꾸고자 할 때 실시간으로 유량 조절이 가능하도록 하였다.

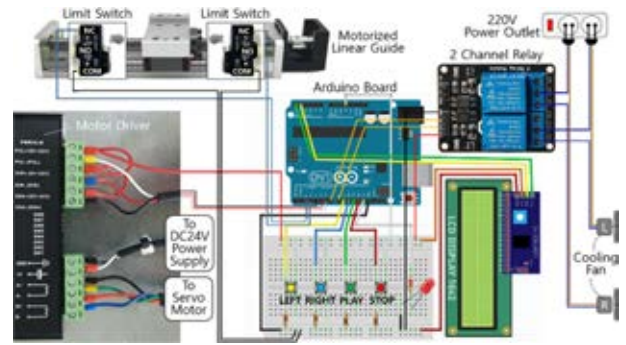


Fig. 5 Circuit diagram of automatic burner moving & cooling system with Arduino

3.3 아두이노를 이용한 모터/냉각팬 제어 시스템

Fig. 5는 선형가이드1과 모터드라이버, 2개의 리미트 스위치, 2채널 릴레이와 냉각팬, 4개의 푸시 버튼 스위치, LCD 및 아두이노 보드를 이용하여 구성된 모터/냉각팬 제어 시스템의 개략도이다. 모터가 회전하다가 리미트 스위치가 눌리면 아두이노를 통해 모터드라이버의 전원은 차단되고 동시에 릴레이에는 전원이 인가된다. 릴레이는 220V로 작동하는 냉각팬의 스위치에 해당한다. 따라서, 리미트 스위치가 눌리면 모터는 정지하고, 동시에 리미트 스위치 반대편의 냉각팬은 설정된 시간만큼 작동한다. 설정된 시간이 지나면 릴레이에 공급되는 전원이 차단되어 냉각팬은 멈추고, 모터는 반대편 리미트 스위치에 부딪힐 때까지 반대 방향으로 계속 회전한다.

네 개의 푸시 버튼 스위치는 각각 LEFT, RIGHT, PLAY, STOP에 해당한다. LEFT와 RIGHT 버튼은 버너를 점화하기 전에 두 시편의 사이에 버너의 화구가 위치할 수 있도록 시편 홀더의 위치를 적절히 조정할 때 사용된다. 이렇게 정해진 초기 위치에서 버너를 점화한 후, PLAY 버튼을 누르면 열피로 시험이 시작되며, 이때 시편 홀더는 우측으로 움직이도록 설정되어 항상 좌측에 설치한 시편이 먼저 가열 단계로 들어가게 된다. LCD에는 좌/우측 리미트 스위치가 부딪힌 횟수를 위 행과 아래 행에 각각 표시하도록 하여 누적된 가열 횟수(열피로 시험의 사이클 수)를 쉽게 확인할 수 있다. 실험 중 STOP 버튼을 누르면 모터가 정지하면서 시편이 그 자리에서 멈추게 된다.

4. 버너리그 시험

4.1 버너리그 시험 기본 유량 및 화염 거리 결정

이전 연구[6]를 통해 본 버너를 이용할 경우 버너리그 시험에 적합한 산소와 메탄의 유량비(R)는 3.65임을 확인하였다. Fig. 6은 유량비를 R = 3.65로 고정하고, 총유량을 달리한 세 가지 경우의 화염의 모습을 보여준다. Table 1은 각 경우의 유량 조건을 정리한 것이다. Figs. 6(a)의 경우 화구로부터 멀어질수록 화염의 직경이 작아지고, 6(c)의 경우 산소량의 과다로 화염 가장

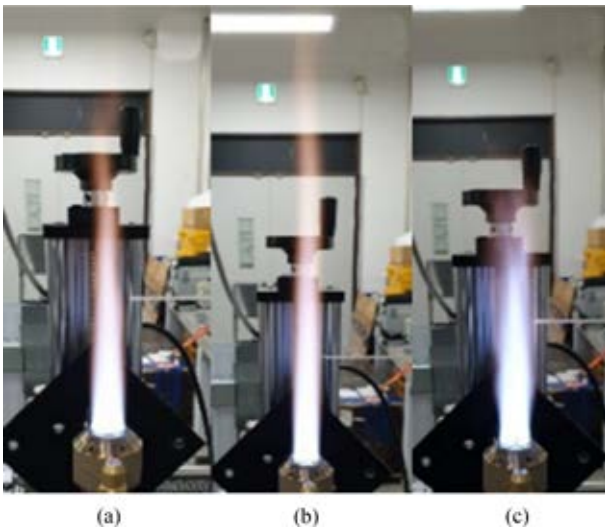


Fig. 6 Variation in the flame shape for three different Q values of (a) 12.4 LPM, (b) 18.6 LPM, and (c) 30.7 LPM, under the same R value of 3.65

Table 1 R and Q values for three cases of flames in Fig. 6

Case	CH <sub>4</sub> (LPM)	O <sub>2</sub> (LPM)	R	Q (LPM)
(a)	2.67	9.74	3.65	12.4
(b)	3.99	14.57	3.65	18.6
(c)	6.6	24.11	3.65	30.7

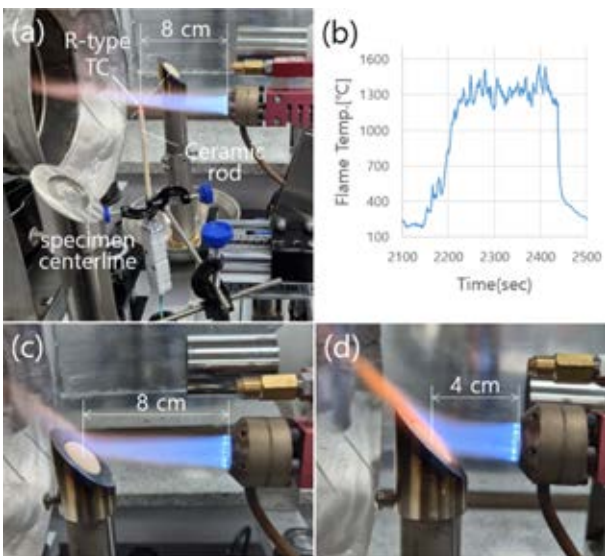


Fig. 7 a) Experimental setup for flame temperature measurement, b) temperature profiles at gun distance of 8cm, c) flame shape at gun distance of 8 cm, and d) flame shape at gun distance of 4 cm

자리의 유동이 불균일하였다. 따라서 화염의 직경이 잘 유지되고 유속이 빠른 Fig. 6(b)의 조건(R = 3.65, Q = 18.6 LPM)을 버너리그 시험의 기본 유량 조건으로 결정하였다.

버너리그 시험의 목표 온도는 시편 표면 위치에서 화염의

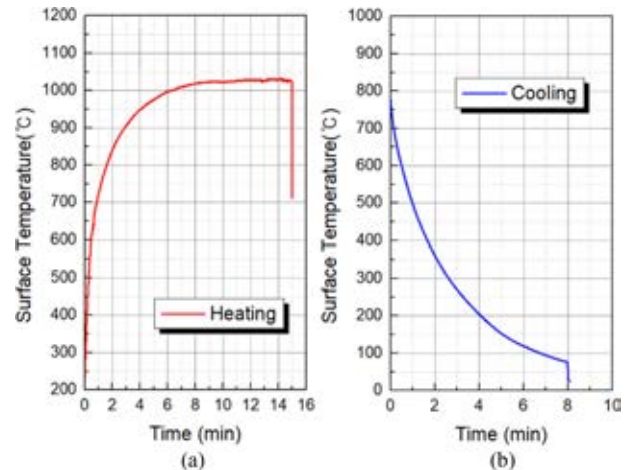


Fig. 8 Variation in the surface temperature during (a) heating and (b) cooling cycle

온도가 1,500°C 이상이 되는 것이다. Fig. 7은 이 조건을 만족하는 화염 거리를 실험적으로 결정하는 과정을 나타낸 것이다. 먼저 R-Type 열전대의 접점이 시편의 중심을 연결하는 선과 일치하도록 정렬시킨 후, 선형가이드2를 이용하여 버너를 열전대 가까이 접근시켜가면서, 화염의 온도가 1,500°C가 될 때의 위치를 결정했다. Figs. 7(a)는 화염거리가 8 cm일 때의 실험 모습으로, 이때 7(b)에 나타낸 것과 같이 열전대의 측정온도가 1,500°C가 되었다. Fig. 7(c)는 화염거리가 8 cm일때 화염이 시편에 닿는 모습으로, 시편 위치에서의 화염 직경이 작아 화염거리를 더 줄여야 함을 알 수 있다. 따라서 화염이 시편을 충분히 감싸 시편 전체에 걸쳐 고른 온도분포를 갖도록 화염거리를 Fig. 7(d)와 같이 4 cm로 결정하였다.

#### 4.2 버너리그 시험 주기 결정

Fig. 8은 비접촉식 적외선 온도계(OMEGA, OS758-LS)를 사용하여 가열과 냉각 과정 동안 시편의 표면 온도를 측정된 결과이다. Fig. 8(a)는 가열 과정의 온도 변화로 약 8분 정도 이후 정상상태에 도달하였고 그때의 온도는 1,030°C였다. Fig. 8(b)는 냉각 과정의 온도 변화로 약 8분 후에 시편의 온도는 76°C까지 냉각된다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 가열 온도가 정상상태에 거의 도달하게 되는 8분을 가열 및 냉각 시간으로 결정하였다.

#### 4.3 버너리그 시험 유량 결정

TBC의 표면 온도와 열피로 수명과의 관계를 고찰하기 위해 4.1절에서 제시한 버너리그 시험의 기본 유량 조건 이외에, 기본 유량 조건 보다 시편 표면 온도를 더 높일 수 있는 두 개의 유량 조건을 추가적으로 결정하였다. 화염의 온도는 유량비가 작아질수록, 즉 산소량이 상대적으로 적을수록 높아진다. 따라서 메탄 유량을 고정하고, 산소유량을 버너리그 시험의 기본 유량 조건인 14.57 LPM보다 3단계 낮춰 10분 가열하는 동안의 시편의 표면 온도를 측정하였다. Table 2는 화염거리가 4 cm일때,

Table 2 Measurements of maximum surface temperature, for five different combinations of R and Q

Case	CH <sub>4</sub> (LPM)	O <sub>2</sub> (LPM)	R	Q (LPM)	Max. Temp. (°C)
1	3.99	14.57	3.652	18.56	1,048
2	3.99	12.67	3.175	16.66	1,088
3	3.99	9.992	2.504	13.98	1,115
4	3.99	8.850	2.218	12.84	1,110
5	5.00	12.54	2.508	17.54	1,175

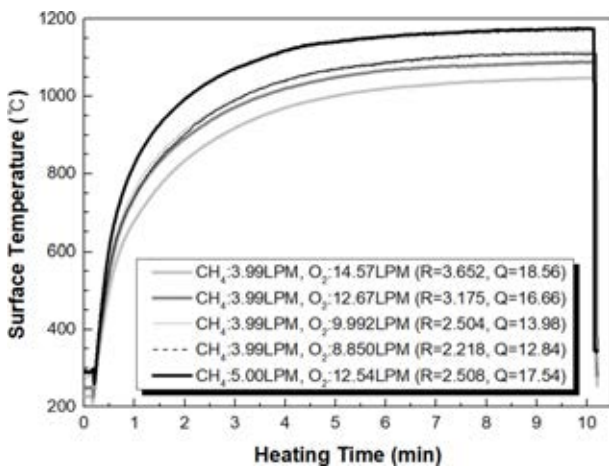


Fig. 9 Variation in the surface temperature of TBC during heating, for five different combinations of R and Q

유량비(R)와 전체 유량(Q)이 다른 다섯가지 화염 조건에 대한 정상상태에서의 시편 표면 온도 측정 결과이며, Fig. 9는 이 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

R = 3.652 (Case1)에서 R = 3.175 (Case2)로 유량비가 0.047 감소한 경우, 시편 표면의 온도는 1,047에서 1,088°C로 41°C 증가하여, Case2를 버너리그 시험의 두 번째 유량 조건으로 결정하였다. R = 3.175 (Case2)에서 R = 2.504 (Case3)로 바뀐 경우 시편 표면의 온도는 1,088에서 1,115°C로 변화하였다. 유량비 감소폭(0.671)은 Case1에서 Case2로 바뀔 때의 감소폭(0.047)보다 컸지만, 온도 상승 폭(27°C)은 둔화된 것이다.

R = 2.504 (Case3)에서 R = 2.218 (Case4)로 유량비를 0.286 만큼 더 감소시킨 경우에는, 시편 표면의 온도는 더 상승하지 않고, 1,115에서 1,110°C로 오히려 5°C 만큼 감소하였다. Case1에서 Case4까지 유량비는 점점 감소하지만, 총유량 또한 감소하고 있다. 따라서, 총유량의 감소가 표면 온도 상승에는 부정적인 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. Case5는 Case3과 동일하게 R = 2.5로 유량비를 고정한 채, 전체 유량을 늘리기 위해 메탄 유량을 3.99 LPM에서 5 LPM으로 약 25% 증가시킨 것이다. 그에 따라 Case5의 총유량(17.54 LPM)은 Case3의 총유량(13.98 LPM)에 비해 25.5% 더 크다. Case2 조건 대비 온도 상승 폭을 비교해보면, Case5의 상승 폭(87°C)이 Case3의 상승 폭(27°C)에 비해 3.2배 정도 더 큰 것으로 나타났다. 따라서, Case5를



Fig. 10 Photos of flame for the three different burner rig test conditions

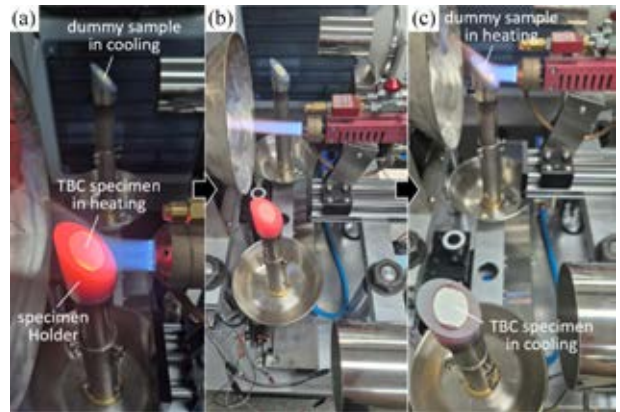


Fig. 11 Representative photos for three steps in burner rig test from the viewpoint of the lower specimen, (a) heating cycle, (b) between heating and cooling cycle, and (c) cooling cycle

버너리그 시험의 세 번째 유량 조건으로 결정하였다. 이 절의 실험 결과는 동일한 유량비라고 하더라도 화염의 총유량이 커지면 시편 표면의 온도가 더 높아진다는 것을 보여준다. 따라서, 버너리그 시험의 목표 온도를 구현하기 위한 화염 조건을 결정하기 위해서는, 화염의 유량비와 총유량이 화염 또는 시편의 표면 온도에 미치는 영향을 파악하는 연구가 선행되어야 한다.

#### 4.4 버너리그 시험 방법

##### 1) 유량에 따른 표면 온도 측정 실험

화염의 유량비와 총유량이 시편의 표면 온도에 미치는 영향을 실험을 통해 평가하였다. R = 2.5, R = 3.0, R = 3.5인 조건에 대해, 유량비를 고정하고 총유량을 4단계로 점차적으로 늘려가며 적외선 온도계(OMEGA, OS758-LS)를 이용하여 코팅 표면의 온도를 측정하였다. 이때, 코팅 시편의 온도가 정상 상태에 도달할 때까지 기다린 후, 다음 유량 단계로 넘어가는 방식으로 진행하였다. 시험 조건 및 결과를 5.1 절에 제시하였다.

##### 2) 열피로 시험

4.1절과 4.3절로부터, 버너리그 시험 기본 유량 조건인 Case1과, Case1의 시편 표면 온도보다 각각 41, 127°C만큼 더 높은 유량 조건에 해당하는 Case2와 Case5를 최종 버너리그 시험 유량 조건으로 선정하였다. Fig. 10은 각 유량 조건의 화염 모습을 보여준다. Fig. 11은 버너리그 시험 방식을 단계적으로 나타낸



것이다. 아래쪽 시편을 기준으로 할 때, Figs. 11(a)는 가열 단계, 11(c)는 냉각 단계의 모습이며, 11(b)는 가열에서 냉각 과정으로 넘어가는 중간 과정으로 시편이 아래로 이동 중인 모습이다. 시편이 장착된 홀더 외에 나머지 하나의 홀더에는, 시편 홀더의 산화를 방지하기 위해 더미(Dummy) 샘플을 장착하였다.

버너리그 시험의 파손 기준은 코팅이 떨어져 나간 면적이 전체 면적의 20% 이상이 되는 시점으로 정하였다. 세 가지 시험 조건에 대하여 코팅층의 파손 모드가 동일하지 여부를 관찰하였고, 시편의 표면 온도와 파손 수명의 관계를 분석하였다.

5. 시험 결과 및 고찰

5.1 유량 및 유량비에 따른 표면 온도 변화

Fig. 12는 버너리그로 가열하는 동안 코팅 표면 온도를 측정 한 실험 결과로, 세 개의 선도는 각각 유량비가 R = 2.5, R = 3.0, R = 3.5일 때, 총유량을 네 단계로 점진적으로 증가시킨 결과이다. Table 3은 실험 조건과 정상상태에서의 시편 표면 온도를 정리한 것이다. Fig. 12로부터, 전체적으로 유량비가 작을수록 시편의 표면 온도는 더 높고, 동일한 유량비라도 총유량이 더 클수록 표면 온도는 더 높아짐을 확인할 수 있다.

Fig. 13(a)는 총유량이 약 18 LPM으로 동일할 때 유량비와 표면 온도의 관계로, R이 작아질수록 표면 온도가 높으며 이 관계는 거의 선형에 가깝게 나타났다. 유량비와 표면온도의 이러한 선형 관계를 이용하면 특정 유량비 조건에 대한 시편 표면 온도를 예측할 수 있다. 예를 들어, 완전연소와 불완전연소의 경계인 R = 2.0일 때의 표면온도를 Fig. 13(a)의 선형회귀식(T = -163R+1643)을 이용하여 예측한 결과는 1,317°C이다. 이것은, 완전 연소 조건을 만족하면서 1,317°C 보다 높은 표면 온도를 구현하기 위해서는 유량을 18 LPM보다 더 늘려야 한다는 것을 의미한다.

Figs. 13(b)는 12의 선도에서 총유량 조건을 바꾸기 직전, 온도가 정상상태에 가까워졌을 때의 시편 표면 온도와 총유량의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 13(b)에서 각각의 데이터는 Fig. 12에서 표면 온도가 정상상태에 가까워졌을 때 측정 한 온도이다. 서로 다른 세 개의 R값에 대하여 모두, Q가 증가할 때 표면 온도가 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 선형 관계를 이용하면 버너리그의 시험 한계 온도를 예측해볼 수 있다. 예를 들어, 본 연구에서 메탄 MFC와 산소 MFC의 최대 용량은 각각 10 LPM과 30 LPM이다. R=3.5일 때, 메탄 유량을 미지수 x라고 하면 총유량은 4.5x (x+3.5x)이다. Fig. 13(b)에서 R = 3.5에 대한 선형회귀식(T = 11.4Q+864)을 이용하면 표면온도가 1,300°C가 되기 위해 필요한 총유량이 38.25 LPM으로 계산된다. 그때의 메탄유량(x)는 8.5 LPM이고 산소유량은 29.75 LPM으로, 산소 유량이 MFC 용량의 한계인 30 LPM에 가깝다. 본 논문에서의 버너리그 세팅으로는 시편 표면 온도 1,300°C 구현이 가능한 하지만, 그보다 더 높은 온도는 산소 MFC 용량의 한계로 인해 구현하기 어렵다는 것을 쉽게 예측해

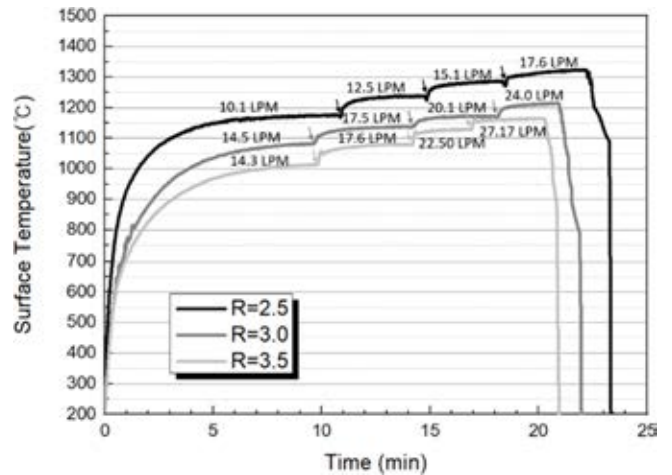


Fig. 12 Surface temperature profiles of specimen during heating with incremental increase of total flow rate for three different flow rate ratio, gun distance = 4.0 cm

Table 3 Results of maximum surface temperature measurements based on Fig. 12, for different combinations of R and Q

R	CH <sub>4</sub> (LPM)	O <sub>2</sub> (LPM)	Q (LPM)	Max. Temp. (°C)
2.5	4.03	10.12	14.15	1175
	5.00	12.54	17.54	1238
	6.01	15.08	21.09	1285
	7.02	17.63	24.65	1322
3.0	3.61	10.89	14.50	1080
	4.34	13.17	17.52	1137
	5.00	15.08	20.08	1172
	6.01	18.01	24.02	1213
3.5	3.19	11.14	14.33	1014
	3.82	13.68	17.61	1079
	5.00	17.50	22.50	1129
	6.01	21.06	27.07	1164

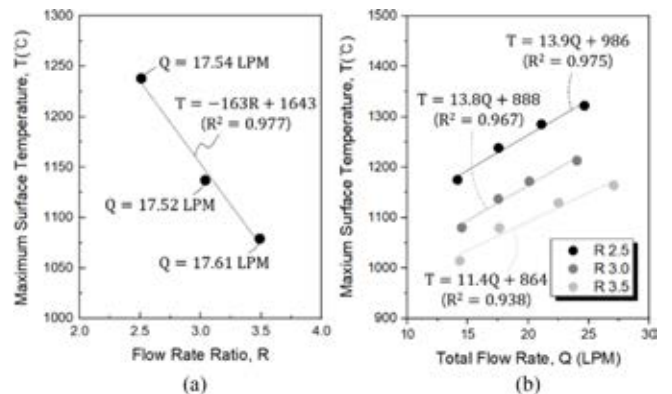


Fig. 13 a) Relation between maximum surface temperature and Q under the same R and b) relation between maximum surface temperature and Q for three different R

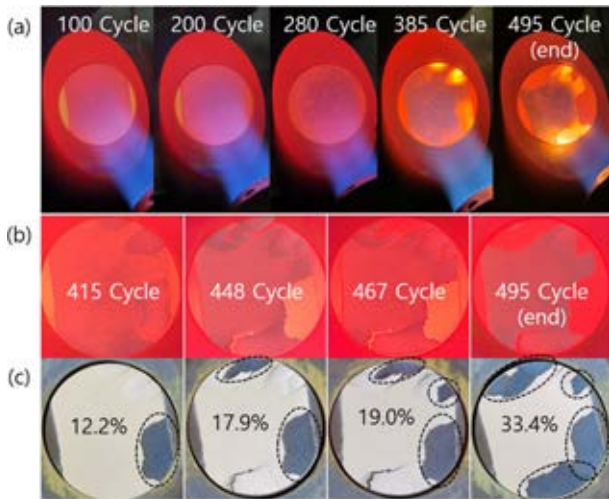


Fig. 14 The progress of specimen failure according to the number of cycles (Case1), photos taken at (a) the second half of heating step, (b) the first half of cooling step, and (c) the end of cooling step

볼 수 있다. 버너리그 시험 기획 단계에서, 사용 예정인 버너에 대하여 실험을 통해 Fig. 13(b)와 같은 선도를 도출해 본다면, 목표 표면 온도를 구현하기 위해 필요한 MFC의 용량을 결정하는데 매우 유용할 것이다.

### 5.2 버너리그 파손 모드

EB-PVD 코팅의 파손 모드는 가장자리에서부터 중앙부로 점진적으로 박리가 진행되며 떨어져 나가는 형태를 나타내었다. Figs. 14부터 16은 각각 Case1, Case2, Case5에 대한 코팅의 열화 및 파손 진행 과정을 보여주고 있다. Fig. 14(a)는 가열 시작 후 약 7분 정도 지난 시점의 모습으로 열피로 사이클이 진행됨에 따라 위아래 가장자리에서부터 박리가 시작되어 중앙부로 전파되어 감을 알 수 있다. Fig. 14(b)는 가열 과정이 끝나고 냉각팬을 향해 시편이 이동하기 시작한 직후의 모습이다. 박리된 부분은 그렇지 않은 부분에 비해 더 빨리 냉각되기 때문에 더 어두운 색을 보이고 있다. 버너리그 시험에서는 이렇게 시편 표면의 온도 차이에 기인한 코팅 색깔의 차이로부터, 가열 과정 또는 냉각 과정 중에 코팅의 취약부를 육안으로도 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 14(c)는 냉각이 끝난 후의 시편의 모습을 코팅이 떨어진 면적과 함께 나타낸 것으로, Case1의 경우 495사이클일 때 탈락한 코팅 면적이 전체 코팅 면적의 33.4%가 되어 파손 기준에 도달하였다.

Fig. 15는 Case2의 코팅 파손 모드를 보여주고 있다. 시편의 상/하부 가장자리에서 박리가 관찰되었다. 180 사이클일 때, 우측 하단 가장자리의 코팅이 떨어진 면적이 21.1%로 파손 기준에 도달하였다.

Fig. 16은 온도가 가장 높은 Case5의 코팅 파손 모드를 보여주고 있다. 시편 하부의 가장자리에서 박리가 시작되었고, 25 사이클 만에 파손 기준에 도달하였다. Fig. 16에서 화살표는 가열 과정에서 육안으로 확인 가능한 내부 박리 영역의 경계를 나타낸

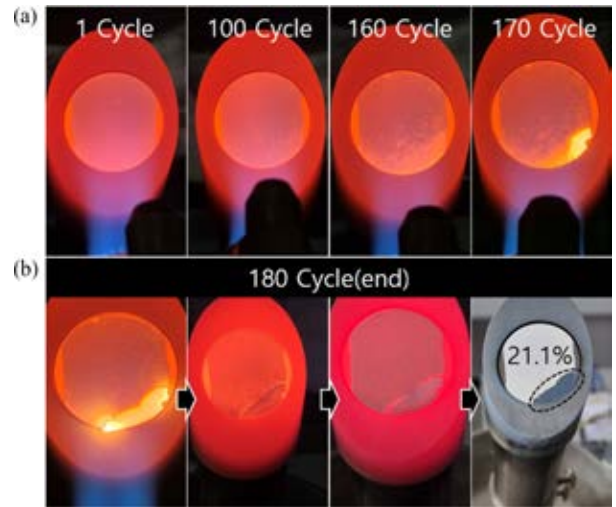


Fig. 15 The progress of specimen failure according to the number of cycles, (a) photos taken at the second half of heating step and (b) photos at 180 cycle showing the progress of cooling step



Fig. 16 The progress of specimen failure according to the number of cycles (Case3), photos taken at the second half of heating step, except for the farthest right

것으로, 시편 하부의 가장자리에서 중앙부를 향해 박리 영역의 경계가 이동하고 있다. 이러한 파손 모드는 Fig. 14와 Fig. 15의 파손 모드와 동일하다. 파손 모드는 온도와 무관하고, 코팅의 수명은 온도가 높을수록 더 짧다. 이러한 점을 활용하면, Case5와 같이 수명이 짧은 높은 온도에서 버너리그 시험을 수행하여 코팅의 취약부와 파손 모드를 빠르게 확인함으로써, 새로운 EB-PVD 코팅의 개발시간을 좀 더 단축시킬 수 있을 것이다.

### 5.3 버너리그 수명 선도

피로공학적으로, 금속 재료의 피로 시험을 통해 얻어진 응력-파손수명 데이터를, 파손 수명을 가로축에 대수 좌표계로 설정한 그래프에 도시하면, 서로 반비례하는 직선 회귀식(S-N선도)을 얻을 수 있다[7]. 이 S-N선도가 있으면 임의의 하중 조건에서의 파손 수명 예측이 가능하다. Fig. 17은 금속재료의 피로 수명 선도도와 유사하게, 버너리그 시험을 통해 얻어진 서로 다른 세 표면 온도에서의 파손 수명을 온도-수명의 대수 좌표계에 나타내 본 것이다. Fig. 17의 선형 회귀선의 R<sup>2</sup> 지수는 0.999이다.

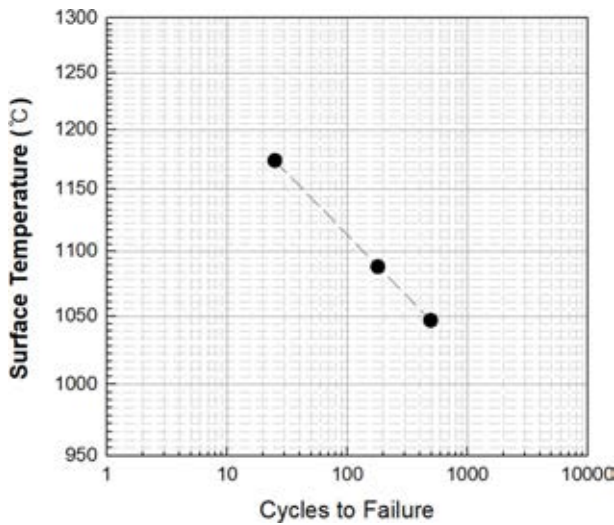


Fig. 17 Relation between surface temperature and cycles to failure

이것은 온도와 수명이 거의 완벽한 선형에 가깝다는 것으로, 버너리그 시험을 통해 얻어진 코팅 표면온도와 수명의 관계를 열피로 수명 선도로 활용할 수 있음을 의미한다. 본 연구의 대상인 EB-PVD 코팅이 서로 다른 온도 조건에서도 파손 모드가 동일하다는 것은 5.1절에서 이미 확인되었다. 따라서, Fig. 17의 열피로 수명 선도를 활용하면 임의의 온도에서의 수명을 예측할 수 있을 것이다. 향후, 다른 종류의 코팅에 대해서도 표면 온도와 수명 간에 이러한 선형성이 성립하는지 여부에 관해서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 화구 직경 25 mm의 소형 버너를 이용하여 수평형 버너리그를 제작하였다. 메탄+산소 화염을 이용한 직경 25 mm의 EB-PVD TBC시편에 대한 열피로 시험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 코팅의 표면 온도는 총유량이 동일할 때 유량비에 반비례하며, 유량비가 동일할 때 총유량에 비례한다.
2. 버너리그 시험에 의한 EB-PVD 코팅의 파손 모드는 가장 자리에서부터 중앙부로 박리 영역이 점진적으로 증가되는 형태이며, 온도와 무관하게 파손모드는 동일하였다.
3. 버너리그 시험을 통해 EB-PVD 코팅의 표면온도와 수명의 선형 관계식을 도출할 수 있으며, 이 식을 이용하여 임의의 온도 조건에 대한 코팅의 파손 수명을 예측할 수 있다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UD220004JD).

## REFERENCES

1. Hada, S., Takata, K., Iwasaki, Y., Yuri, M., Masada, J., (2015), High-efficiency gas turbine development applying 1600°C class “J” technology, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 52(2), 2-9.
2. Oguma, H., Tsukimoto, K., Goya, S., Okajima, Y., Ishizaka, K., Ito, E., (2015), Development of advanced materials and manufacturing technologies for high-efficiency gas turbines, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 52(4), 5-14.
3. Padture, N. P., Gell, M., Jordan, E. H., (2002), Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications, Science, 296(5566), 280-284.
4. Rabieifar, A., Abouei Mehrizi, V., Ghanbari Haghghi, M., (2023), Degradation mechanisms of APS and EB-PVD thermal barrier coatings, Journal of Environmental Friendly Materials, 7(1), 48-49.
5. Darolia, R., (2013), Thermal barrier coatings technology: critical review, progress update, remaining challenges and prospects, International Materials Reviews, 58(6), 315-348.
6. Park, S., Kim, D.-J., Kim, J.-Y., Kim, S.-J., Lee, K.-Y., Kim, J.-M., Kim, H.-I., (2024), Development of a Vertical Burner Rig Using Methane Flame, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 41(8), 653-661.
7. Dowling, N. E., (2012), Mechanical Behavior of Materials, 4<sup>th</sup> Edition, Pearson.



**Soo Park**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His Research Interest is Structural Integrity Evaluation.

E-mail: roonasis@skku.edu.ac.kr



**Dae-Jin Kim**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Andong National University. His Research Interest is Burner Rig Test.

E-mail: djkim@anu.ac.kr



**Jun-Young Kim**

B.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Andong National University.

E-mail: ggabuto@naver.com



**Seong-Ju Kim**

B.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Andong National University.

E-mail: bys3808@naver.com



**Chang-Sung Seok**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His Research Interest is Structural Integrity Evaluation.

E-mail: seok@skku.edu



# IPL 소결을 활용한 고안정 열임프린팅 투명전극 제조 공정 개발

## Manufacturing Process for Highly Stable Thermal Imprinting Transparent Electrode Using IPL Sintering

장윤석#  
Yunseok Jang#

한국기계연구원 이차전지장비연구실 (Department of Advanced Battery Manufacturing Systems, Korea Institute of Machinery & Materials)  
\*Corresponding Author / E-mail: yjang@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7469  
ORCID: 0000-0001-8137-5602

KEYWORDS: Thermal imprinting (열임프린팅), Transparent electrode (투명전극), Manufacturing process (제조공정), High stable (고안정성), Intensed pulsed light (아이피엘)

*This paper shows results of research on transparent electrode manufacturing processes using thermal imprinting and IPL technique. By using an IPL process instead of the existing heat sintering process, the sheet resistance value was reduced to about 1/ 10. Additionally, sintering time could be reduced from 1 hour to 1 ms. As a result of measuring the transmittance to determine the excellence of the transparent electrode produced in this way, it was confirmed that it had a high transmittance of 94.4% compared to the substrate with a very high bending stability compared to the existing ITO transparent electrode. These results show that the transparent electrode manufacturing method proposed in this study is very useful.*

Manuscript received: September 30, 2024 / Revised: October 16, 2024 / Accepted: October 17, 2024

### 1. 서론

열임프린팅(Thermal Imprinting) 기술은 대표적인 마이크로 핫 엠보싱(Micro Hot-embossing) 기술[1]로, 열가소성 고분자 기판이나 열경화성 수지에 적절한 열과 압력을 가하여 금형의 미세한 마이크로/나노 패턴을 기판에 복제하는 기술이다. 핫엠보싱 기술은 기존 반도체 기술에 기반한 노광/에칭 공정, UV (Ultraviolet) 나노/마이크로 임프린팅, 인쇄전자 기술과 함께 대표적인 나노/마이크로 형상을 패터닝할 수 있는 기술 중 하나이다[2].

열임프린팅(Thermal Imprinting)과 같은 핫엠보싱 기술은 다른 패터닝 공정에 비하여 공정이 간단하고 정밀한 패턴의 복제가 용이하여 롤 금형을 이용한 대량 생산 공정에 적합하다. 반면, 핫엠보싱 기술은 공정 속도가 느리고 금형제작이 어렵다는 단점도 가지고 있다. 하지만 이러한 단점은 롤 형태의 금형과 연속 공급되는 기판을 이용하는 롤투롤(R2R) 핫엠보싱 기술을 적용하여 극복하고 있으며, 이러한 기술을 적용하여 생산 속도와 패터닝 속도 향상의 공정 혁신이 이루어지고 있다[3-7].

열임프린팅 기술은 롤투롤 기술을 적용할 경우 공정 혁신이 가능하기 때문에, 활발한 연구가 수행되고 있다[8-10]. 하지만 기존 ITO (Indium Tin Oxide) 대비 물성에서 뒤처지는 문제가 있고, 이를 극복하는 연구를 본 연구에서 수행하였다. ITO의 경우 전도도 측면에서 우수한 성능을 보이지만, 무기물의 특성상 굽힘강도에 약한 성능을 보여준다. 이러한 취약함으로 인해 유연전자(Flexible Electronics)에 적용하기에 어려움이 있고, 이를 극복하는 기술로 열임프린팅 공정 연구를 수행하였다.

고분자기반 투명기판의 경우 유리전이 온도가 100-200°C의 범위를 가지고[11,12] 가장 많이 사용되고 있는 은잉크의 경우 대략 500°C의 소결 온도를 가진다[13]. 이러한 온도차이에 의해 기존 열을 이용한 공정을 적용하기에 어려움이 있고, 이러한 어려움을 해결하는 방법 광소결(Intensed Pulsed Light, IPL) 기법이 널리 활용되고 있다[14,15]. 광소결 기법은 높은 에너지밀도를 가지는 백색광을 매우 짧은 시간에 조사하여 은잉크를 소결 할 수 있는 기술로 고분자기판의 유리전이 온도와 은잉크의 소결 온도의 차이를 극복할 기술로 활발히 활용되고 있는 기술이다.

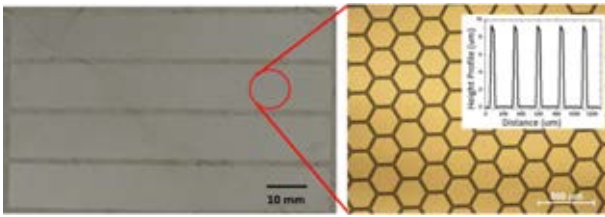


Fig. 1 (Left) Ni mold, (Right) Ni mold electrode pattern (inset) Height profile pattern of Ni mold electrode using Alpha step



Fig. 2 Thermal imprinting equipment

본 연구에서는 기존 열공정을 이용할 때보다 월등한 물성을 보여주는 새로운 광소결 기법을 적용한 열임프린팅(Thermal Imprinting) 투명전극 제작 공정에 대한 연구 결과를 제시하려 한다.

2. 실험

2.1 패턴금형의 제작

열임프린팅공정에 사용되는 패턴금형의 경우, SUS 기판에 니켈 무전해 도금기법을 활용해서 제작되었고, Fig. 1과 같이 260 μm 크기의 벌집모양 패턴(높이 8.8, 폭 20 μm, Fig. 1(삽입) 참고)들이 모여, 10 × 100 mm 크기의 전극 패턴을 형성하였다. (Fig. 1(좌))

2.2 투명전극의 제작

자체 제작한 열임프린팅(Thermal Imprinting) 장비 (Fig. 2)와 제작된 금형(Fig. 1)을 이용하여 투명전극을 제작하였다. 이때 사용된 온도는 90°C, 압력은 21 KgF/cm, 롤의 회전속도는 1 mm/s였다.

투명전극은 Fig. 3과 같이 투명 고분자 기판에 열임프린팅장비/패턴금형을 이용을 이용하여 미세패턴을 형성하고, 형성된 미세패턴에 은잉크를 채워 제작하였다.

2.3 투명전극의 평가

제작된 투명전극 기판은 가시광 영역에서의 투과도, 전도도, 굽힘 테스트를 수행하여 투명전극의 물리적 물성을 평가하였다.

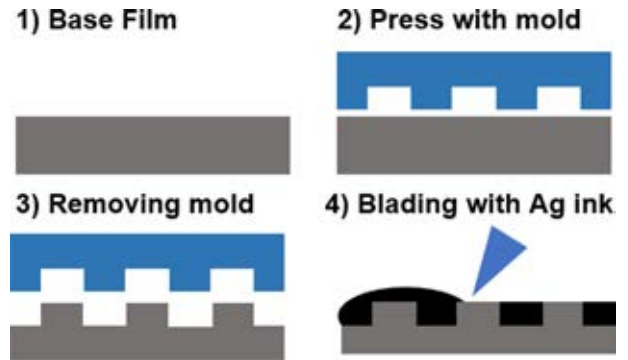


Fig. 3 Transparent electrode manufacturing process using thermal imprinting equipment

Table 1 Imprinting depth depending on substrate type

substrate	Pattern depth (μm)		
	1st	2nd	3rd
PC	7.5±0.2	7.3±0.2	7.4±0.2
PET	4.1±0.1	4.0±0.1	4.2±0.1
PEN	1.5±0.1	1.5±0.1	1.6±0.1

3. 실험결과

3.1 기판 종류에 따른 각인율

다양한 플라스틱 기판과 열임프린팅장비/패턴금형을 이용하여 각인된 깊이를 Alpha Step Profiler를 이용하여 측정하였다. 대표적인 투명기판 Poly Carbonate (PC), Polyethelene Teraphthalate (PET), Polyethylene Naphthalate (PEN)을 이용하여 각인되는 깊이를 Alpha Step Profiler를 이용하여 측정하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 기판의 종류에 따라 각인되는 깊이가 달라지는 것을 확인하였다. 이는 각 기판이 가지는 Young's Modulus/Yield Strength값의 차이로, 각각 PC (2.6 GPa/ 40 MPa), PET (4 GPa/ 58 MPa), PEN (5 GPa/ 80 MPa)의 값을 가지고 있고[16-20], 이리 차이가 각인 깊이의 차이를 만들어낸다. 이러한 각인 깊이 차이로 본 실험에서는 PC를 이용하여 실험을 수행하였다.

3.2 투명전극 제작

투명전극 소결에 사용한 IPL 공정에서 제일 주요한 변수는 사용되는 전압과 펄스타임으로, 이 두 가지 조합으로 고분자 기판에 손상이 가지 않으면서 은잉크가 소결되는 최적의 에너지 밀도를 조절할 수 있다. 에너지 밀도는 사용되는 기판이 손상이 가지 않는 범위에서 설정하게 되는데, 본 공정에서는 300 V전압과, 1 ms의 펄스타임 0.977 J/cm<sup>2</sup>의 에너지를 생성하여 은잉크가 채워진 기판에 조사하여 소결을 하였다. (Fig. 4 참조)

IPL의 유용성을 확인하기 위해 150°C 핫플레이트와 IPL을 활용하여 소결한 투명전극의 면저항 값을 비교해 보았다. 먼저

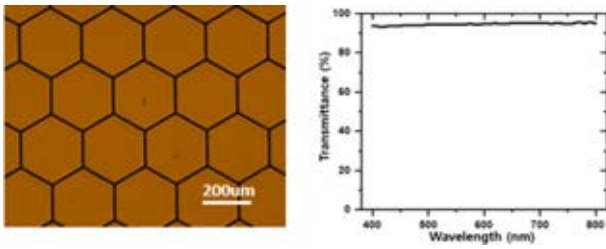


Fig. 4 Manufactured transparent electrode (left) and transmittance (right)

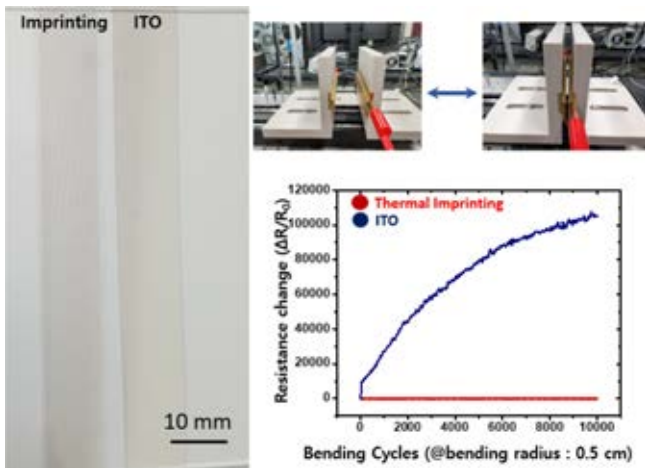


Fig. 5 Bending test result

항 값은 EC-80P 비접촉 면저항 측정기를 이용해서 측정하였고, 150°C 핫플레이트에서 1시간 열처리를 한 시료의 경우 6.5 Ω/sq, IPL을 활용(2 J/cm<sup>2</sup> @ 1 ms)할 경우 0.8 Ω/sq의 면저항을 확보 할 수 있었다. 이를 통해 기존 열을 이용한 공정보다 IPL공정을 이용하는 것이 유용한 것을 알 수 있었다.

3.3 투명전극 투과도

열임프린팅(Thermal Imprinting) 장비와 IPL 공정으로 제작된 투명전극의 투과도를 측정한 결과, 기판대비 투과도가 530 nm 에서 94.4%임을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서 제작된 투명전극은 높은 투과도를 가지는 것을 확인하였다.

3.4 투명전극 기계적 물성

열임프린팅(Thermal Imprinting) 장비와 IPL공정으로 제작된 투명전극의 기계적 물성을 평가하기 위해, 가장 대표적인 투명 전극인 ITO (Indium Tin Oxide) 와 굽힘테스트 결과를 비교해 보았다. ITO의 경우 측정된 저항 값이 Fig. 5에서와 같이 초기 72.5 Ω에서 10,000 cycles 후 104,212 Ω로 커지는 것을 알 수 있다. 하지만 열임프린팅 기법으로 제작된 투명전극의 경우 Fig. 5와 같이 10,000 cycles 굽힘 테스트 후에도 변화가 거의 없는 것을 확인하였다. 이를 통해 본 실험에서 제안하는 투명전극이 기존 ITO 투명전극에 비해 기계적 물성이 월등히 우수함을

알 수 있다.

이는 열임프린팅 기법으로 제작된 투명전극의 경우, 각인공정을 거치면서 음각으로 전극이 채워지기 때문에 기판이 전극을 잡아주는 역할을 할 수 있어, 굽힘테스트 결과가 좋게 나온 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 열임프린팅 기법으로 투명전극을 제작하는 공정에 관한 연구 결과이다. 기존 열을 이용하는 공정대신 IPL을 이용하는 공정을 이용하여, 면저항 값을 대략 10분에 1로 줄일 수 있었다. 또한 소결 시간 또는 1시간에서 1 ms로 줄일 수 있었다.

이렇게 제작된 투명전극의 우수성을 알아보기 위해 투과도를 측정해본 결과 기판대비 94.4%의 높은 투과도를 지니며, 기존 ITO투명전극 대비 매우 높은 굽힘 안정성을 지님을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안하는 투명전극 제작 방법이 매우 유용함을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국기계연구원 주요사업 및 국가R&D 사업 (2020M3H4A310631922/K\_G012002245203/G02P23630000812/ K\_G012000702706/GTL24011-710/NK249G/KN029E/G01005078071/G01005073171))의 지원 하에 이루어 졌습니다.

REFERENCES

1. Worgull, M., (2009), Hot embossing - modeling and process simulation, William Andrew, 179-225.
2. Lee, S.-H., Jo, J., Kim, K.-Y., Choi, Y.-M., (2018), Recent research trend of micro hot-embossing, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 35(11), 1027-1034.
3. Velten, T., Bauerfeld, F., Schuck, H., Scherbaum, S., Landesberger, C., Bock, K., (2011), Roll-to-Roll hot embossing of microstructures, Microsystem Technologies, 17(4), 619-627.
4. Chang, C.-Y., Tsai, M.-H., (2015), Development of a continuous roll-to-roll processing system for mass production of plastic optical film, Journal of Micromechanics and Microengineering, 25(12), 125014.
5. Peng, L., Wu, H., Shu, Y., Yi, P., Deng, Y., Lai, X., (2016), Roll-to-roll hot embossing system with shape preserving mechanism for the large-area fabrication of microstructures, Review of Scientific Instruments, 87(10), 105120.



6. Rank, A., Lang, V., Lasagni, A. F., (2017), High speed roll to roll hot embossing of micrometer and sub micrometer structures using seamless direct laser interference patterning treated sleeves, *Advanced Engineering Materials*, 19(11), 1700201.
7. Shan, X. C., Chen, S. H., Mohahidin, M. B., Wei, J., (2017), Development of a roll-to-roll thermal imprinting system with seamless belt-type template, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27(8), 087001.
8. Jeong, H., La, M., Park, S. J., Kim, D. S., (2013), Roll-to-flat texturing system with infrared preheating for manufacturing a microfluidic device, *Microelectronic Engineering*, 107, 10-16.
9. Kim, S., Son, Y., Park, H., Kim, B., Yun, D., (2015), Effects of preheating and cooling durations on roll-to-roll hot embossing, *Microscopy and Microanalysis*, 21(1), 164-171.
10. Jo, J., Kim, W., Kim, K.-Y., Choi, Y.-M., (2017), Focused-infrared-light assisted roll-to-roll hot embossing, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 34(3), 199-203.
11. Dudowicz, J., Freed K. F., Douglas, J. F., (2005), The glass transition temperature of polymer melts, *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(45), 21282-21292.
12. Saito, S., Nakajima, T., (1959), Glass transition in polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 2(4), 93-99.
13. Li, W., Xu, X., Li, W., Liu, P., Zhao, Y., Cen, Q., Chen, M., (2020), One-step synthesis of Ag nanoparticles for fabricating highly conductive patterns using infrared sintering, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 142-151.
14. Lee, J. L., Park, S. H., Jang, S., Kim, H. S., Oh, J. H., Song, Y. W., (2011), Pulsed light sintering characteristics of inkjet-printed nanosilver films on a polymer substrate, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21(12), 125023.
15. Kang, J. S., Ryu, J., Kim, H. S., Hahn, H. T., (2011), Sintering of inkjet-printed silver nanoparticles at room temperature using intense pulsed light, *Journal of Electronic Materials*, 40, 2268-2277.
16. Kim, H., Macosko, C. W., (2009), Processing-property relationships of polycarbonate/graphene composites, *Polymer*, 50(17), 3797-3809.
17. Gaduan, A. N., Singkronart, K., Bell, C., Tierney, E., Burgstaller, C., Lee, K.-Y., (2022), Mechanical upcycling immiscible polyethylene terephthalate-polypropylene blends with carbon fiber reinforcement, *ACS Appl Poly Mater*, 4(5), 3294-3303.
18. Bowen, A., Li, J., Lewis, J., Sivaramakrishnan, K., Alford, T. L., Iyer, S., (2011), The properties of radio frequency sputtered transparent and conducting ZnO:F films on polyethylene naphthalate substrate, *Thin Solid Films*, 519(6), 1809-1816.
19. Mergler, Y. J., van Kampen, R. J., Nauta, W. J., Schaake, R. P., Raas, B., van Griensven, J. G. H., Meesters, C. J. M., (2005), Influence of yield strength and toughness on friction and wear of polycarbonate, *Wear*, 258(5-6), 915-923.
20. TEIJIN, Polyethylene Naphthalate (PEN) Resin Teonex®. <https://www.teijin-resin.com/products/teonex>



#### Yunseok Jang

received his Ph.D. degree in Chemical Engineering, from the department of Chemical Engineering of Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Republic of Korea, in 2008. Now, he is a principal researcher in Department of Advanced Battery Manufacturing Systems, Korea Institute of Machinery and Materials, His research interest is roll-to-roll printing, coating and patterning system.

E-mail: yjang@kimm.re.kr

# 다천체 분광 관측을 위한 Robotic Fiber Positioner 및 경로 계획 알고리즘 개발

## Development of Robotic Fiber Positioner and Path Planning Algorithm for Multi-object Spectroscopy

임현호<sup>1</sup>, 김재우<sup>2</sup>, 황호성<sup>3,4</sup>, 홍성욱<sup>2,5</sup>, 이종철<sup>2</sup>, 최영만<sup>1,#</sup>  
Hyunho Lim<sup>1</sup>, Jae-Woo Kim<sup>2</sup>, Ho Seong Hwang<sup>3,4</sup>, Sungwook Hong<sup>2,5</sup>, Jong Chul Lee<sup>2</sup>, and Young-Man Choi<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 아주대학교기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou University)

<sup>2</sup> 한국천문연구원 (Korea Astronomy and Space Science Institute)

<sup>3</sup> 서울대학교 물리천문학과 (Department of Physics and Astronomy, Seoul National University)

<sup>4</sup> 서울대학교 천문연구센터 (SNU Astronomy Research Center, Seoul National University)

<sup>5</sup> 과학기술연합대학원대학교 천문우주캠퍼스 (Astronomy Campus, University of Science and Technology)

# Corresponding Author / E-mail: ymanchoir@ajou.ac.kr, TEL: +82-31-219-2342

ORCID: 0000-0002-9754-0307

KEYWORDS: SCARA robot (스카라 로봇), High-precision positioning (고정밀 포지셔닝), Fiber positioner (광섬유 위치기), Swarm bot (군중 로봇), Path planning (경로 계획), Collision avoidance (충돌 방지)

*A robotic focal plane system using robotic fiber positioners enables multi-object spectroscopy for hundreds to thousands of galaxies by utilizing a dense array of positioners that are closely packed at the focal plane of a telescope. While this dense arrangement increases the number of observations, it also introduces the potential for collisions between adjacent positioners. A fiber positioner is designed similarly to a SCARA robot. It is driven by two series of BLDC motors. Each positioner is manufactured with an outer diameter of 16 mm. It operates within an annular workspace with an outer diameter of 33.6 mm and an inner diameter of 12.8 mm. As these positioners are arranged with a spacing of 16.8 mm, target assignment and motion planning are critical to avoid collisions caused by overlapping workspaces. To address this, we proposed an optimized step choice algorithm using a motion planning method based on optimization with the sequential quadratic programming algorithm. Simulation results demonstrated that paths for all positioners within a tile were successfully generated with a success rate of up to 93.75% across 80 tiles.*

Manuscript received: October 2, 2024 / Revised: November 5, 2024 / Accepted: November 8, 2024

### 1. 서론

우주의 가속 팽창을 발견한 이후 우주론의 주요 과제는 암흑에너지의 본질을 이해하는 것이다. 이를 위해 3차원 우주 지도를 작성하고, 은하의 진화 양상을 정확하게 설명할 수 있는 우주 모형을 찾는 다양한 연구가 진행되고 있다. 이런 연구에서 핵심적인 역할을 하는 것이 바로 한번에 많은 천체의 스펙트럼을 얻을 수 있는 다천체 분광기(Multi-Object Spectrograph, MOS)를 활용한 관측이다[1]. The All-sky Spectroscopic Survey of Nearby Galaxies

(A-SPEC)는 국내 연구진들의 주도로 진행되는 최초의 외부 은하 분광 탐사로, K-SPEC이라는 MOS 개발을 통해 거리 200 Mpc 이내 은하들에 대한 대규모 분광 관측을 진행하고자 한다. 이를 통해 가속 팽창이 본격적으로 진행된 최근 수 억년 동안의 은하와 은하 집단들의 진화 양상을 연구하고 암흑에너지의 특성과 우주 공간 팽창 역사를 이해하고자 한다.

대규모 분광 관측을 통한 우주 연구를 위해서는 다천체 분광기의 개발이 필요하다. Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) [1-3]를 비롯한 Sloan Digital Sky Survey (SDSS)[4], Multi-object

Optical and Near-IR Spectrograph (MOONS)[5] 등의 탐사에서는 MOS에 필요한 Robotic Focal Plane System (RFPS)을 개발하였다. RFPS는 다천체 분광기의 새로운 Focal Plate 방식으로 다수의 Robotic Fiber Positioner (RFP)를 Focal Plate에 배치하여 은하를 관측한다[6-8]. RFP는 2개의 회전 모터를 사용하는 SCARA 로봇 형태로 제작되며, 광섬유를 동작 범위 내의 원하는 위치로 이동시킨다[9,10]. RFP는 수백에서 수천 개가 Focal Plate에 일정한 배열로 배치되며, 관측 위치로 RFP 끝단에 설치된 광섬유를 동시에 이동시킨다. RFPS는 밀도 높은 광섬유 배치 구조와 짧은 재구성 시간을 가지므로 효율적인 은하 관측이 가능하다.

그러나 RFPS의 밀집한 배치 구조로 인해 동작 시 인접한 RFP 간 충돌이 발생한다. 따라서 RFP를 사용한 분광 관측에서는 반드시 이들 간 충돌을 방지하는 동시에 지정된 위치로 이동하는 경로 계획이 필요하다. Macktoobian[11]은 다수의 RFP의 궤적 생성을 행렬 수식으로 표현하고 RFP에 할당되는 관측 대상을 변경하여, 모든 RFP가 충돌 없이 관측 대상의 위치로 수렴할 수 있는 경로 계획 알고리즘을 제안했다. 그러나 성공적으로 관측 대상의 위치로 이동하는 경로를 생성하기 위해서는 많은 계산량을 요구한다. Sayres[12]는 모터의 동작을 3가지로 제한하고, 각 시간 단계마다 충돌이 발생하지 않으면서 목표 위치와 가까워지는 모터 동작의 조합을 찾는 Greedy Choice (GC) 알고리즘을 제안했다. GC는 간단하면서도 효율성이 높은 경로 계획 알고리즘으로 관측 대상의 위치에서 초기 위치 방향으로 경로를 생성하는 Reverse Path Solution을 사용한다. 그러나 Reverse Path Solution의 경우 RFP의 동작의 반대 방향으로 경로를 생성하므로 경로 생성에 실패하여 정지할 경우, 초기 위치에서부터 지정된 위치까지의 경로 데이터가 존재하지 않는다. 따라서 MOS에서 하나의 RFP라도 경로 계획을 통해 경로를 생성하지 못한 경우 은하를 관측할 수 없다.

경로 계획이 수렴할 수 있도록 RFP에 할당된 관측 대상을 변경하면 이러한 문제를 해결할 수 있다[12-14]. 그러나 주요 은하들을 반드시 관측하면서 경로 계획의 수렴 문제를 해결하기 위해서는 천문학과 경로 계획 모두 전문적인 지식을 요구한다. 그러나 관측자에게 2가지 분야에 전문적인 지식을 요구하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 최적화에 기반한 동작 선택을 통해 모든 RFP의 경로를 생성하는 경로 계획 알고리즘을 제안한다. 논문에서 제안하는 Optimized Step Choice는 Sequential Quadratic Programming (SQP) 알고리즘을 기반으로 매시간 단계마다 최적의 모터 동작을 선택하며, 이를 통해 모든 RFP가 관측 위치로 이동할 수 있는 궤적을 생성한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 다천체 분광기를 위한 RFP를 설계하고, 3장에서 이를 위한 경로 계획 알고리즘인 Optimized Step Choice를 제안한다. 4장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 GC 알고리즘과 비교 검증한다.

2. Robotic Fiber Positioner

K-SPEC은 A-SEPC을 위한 다천체 분광기 시스템으로, 주경 1.6 m 망원경인 K-MTNet을 이용해 6 deg<sup>2</sup> 하늘 영역에서 한번에

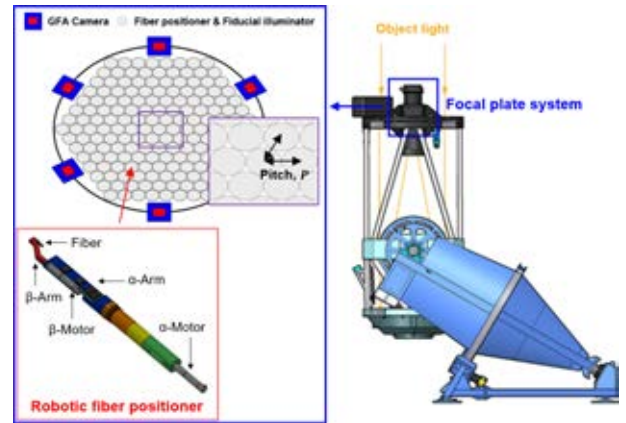


Fig. 1 Multi-object spectroscopic telescope: K-SPEC

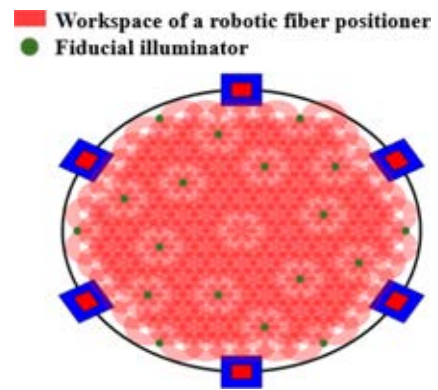


Fig. 2 Focal plate layout for the K-SPEC telescope

150여개의 천체를 관측하기 위해 개발된다[15]. Fig. 1은 K-SPEC의 Focal Plate의 구조를 보여준다. RFPS를 통해 밀집한 은하를 관측하기 위해서는 다양한 설계 조건을 고려해야 한다. 2장에서는 K-SPEC의 설계 요구 조건에 맞는 RFP의 설계 과정을 보여준다.

2.1 K-SEPC의 Focal Plate 구성

Focal Plate에는 RFP 이외에 다양한 요소가 배치되어 있다. Fiducial Illuminator (FI)는 내부에 있는 LED를 통해 빛을 발생시킬 수 있다. 이 빛을 Focal Plate 맞은편에 있는 Metrology Camera를 통해 관측하고 Focal Plate의 기준점으로 사용하면 RFP의 Calibration에 사용할 수 있다. FI는 Focal Plate 내 특정한 위치에 배치되어 있다. RFP와 FI는 일정한 간격 Pitch(P)로 배치되며, 이 값에 따라 Focal Plate에 배치할 수 있는 RFP의 수가 결정된다. 최종적으로 RFP와 FI가 부착된 Focal Plate는 Fig. 2와 같다. 256 mm 직경의 Focal Plate에 150개의 RFP와 18개의 FI를 배치하기 위해 P는 16.8 mm로 정의하였다.

2.2 Robotic Fiber Positioner 설계

RFP의 높은 위치 분해능 성능을 얻기 위해 일반적으로 소형 회전 모터에 높은 기어비의 기어 헤드를 부착한다. 논문의 RFP에 사용된 2개의 모터는 6 mm 직경의 BLDC 모터(ECX SPEED 6 M,

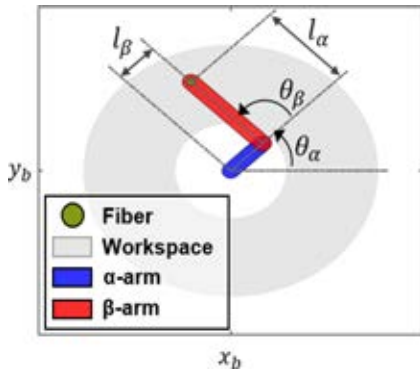


Fig. 3 Kinematics of RFP

Maxon)로 854:1의 기어 헤드(GPX 6, Maxon)를 연결하여 사용한다. 2개의 모터는 각각  $\alpha$ -arm과  $\beta$ -arm을 움직인다. 이때  $\alpha$ -arm의 길이( $l_\alpha$ )를 수식(1)을 만족하는 범위에서 선정하면 RFP의 충돌은  $\beta$ -arm에서만 발생하므로, 경로 계획의 충돌 방지 문제를 단순화할 수 있다. 이때  $D_{motor}$ 는 모터 직경을 의미한다.

$$l_\alpha \leq \frac{P}{2} - \frac{D_{motor}}{2} \tag{1}$$

Focal plate에는 RFP 이외에 은하를 관측할 수 없는 FI가 같이 부착된다. Focal plate의 빈 공간 없이 모든 영역을 관측하기 위해서 RFP의 두 Arm의 길이는 수식(2)를 만족해야 한다. 이때 모터 및 RFP 부품의 가공 오차를 고려하여,  $\alpha$ -arm의 길이는 5.2 mm,  $\beta$ -arm의 길이는 11.6 mm로 설계하였다.

$$l_\alpha + l_\beta \leq P \tag{2}$$

Fig. 3은 RFP의 기구학을 보여준다. 광섬유의 위치는 모터의 각도와 Arm의 길이에 따라 결정되며, 좌표 값은 수식(3)과 같다. ( $x_b, y_b$ )는 RFP의 중심 좌표이다. 반대로 관측 대상의 좌표 값이 주어지면, 역 기구학을 통해 해당 위치에 도달하기 위한 모터의 각도 값을 계산할 수 있다. 이때 좌표 값에 대한 역 기구학이 하나의 해를 가지기 위해  $\beta$ -모터의 각도는 0에서 180°로 제한된다.

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_\alpha) & \cos(\theta_\alpha + \theta_\beta) \\ \sin(\theta_\alpha) & \sin(\theta_\alpha + \theta_\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_\alpha \\ l_\beta \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\theta_\beta = \cos^{-1} \frac{x_f^2 + y_f^2 - l_\alpha^2 - l_\beta^2}{2l_\alpha l_\beta} \tag{4}$$

$$\theta_\alpha = \tan^{-1} \frac{y_f}{x_f} - \tan^{-1} \frac{l_\beta \sin \theta_\beta}{l_\alpha + l_\beta \cos \theta_\beta} \tag{5}$$

최종적으로 설계된 RFP는 Fig. 4와 같다. 광섬유는  $\beta$ -arm 끝에 연결되며, RFP 내부를 통과하여 분광기와 연결된다. 이를 위해서는 샤프트는 광섬유가 연결된다. 이를 위해서는 샤프트는 광섬유가 통과할 수 있도록 중공 형태로 제작되어야 한다. 그러나 중공 형태의 샤프트를  $\alpha$ -모터에 직접적으로 연결하기 어려우므로 Lollipop Feature 부품이 필수적이다[8,10]. 이를 통해  $\alpha$ -모터는

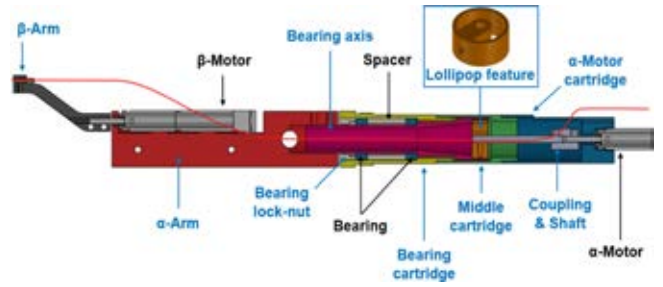


Fig. 4 Robotic fiber positioner for K-SPEC

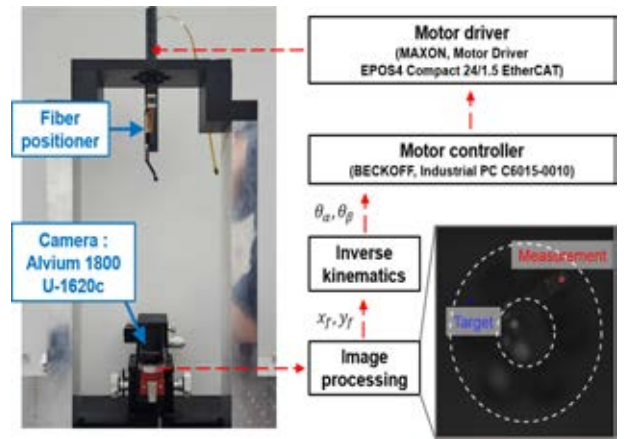


Fig. 5 Testbed of fiber positioner

RFP의 최 하단에 부착되어 샤프트를 통해  $\alpha$ -arm에 회전력을 전달 하면서 광섬유가 이를 통과하여 분광기로 연결될 수 있도록 한다.

### 2.3 Robotic Fiber Positioner 성능 측정

#### 2.3.1 테스트 베드 셋업

RFP의 성능을 평가하기 위한 테스트 베드는 Fig. 5와 같다. 테스트 베드는 실제 망원경 환경과 유사하게 RFP는 지면을 바라보며 하단의 맞은편에는 Metrology Camera를 배치하였다. Metrology Camera는 CCD 카메라(1800 U-1620c, Allied Vision)에 렌즈(25 mm 1" HPr Lens f/1.8, Edmund Optics)를 부착하여 사용하였다.

#### 2.3.2 위치 정확도 및 반복성 측정

RFP의 위치 오차는 관측 대상의 광 손실을 의미하며, 허용치는 광섬유의 코어 직경에 비례한다. 제작된 RFP의 광섬유 코어 직경은 75  $\mu\text{m}$ 이며, A-SPEC에서는 5  $\mu\text{m}$  이내의 위치 정확도로 RFP를 위치 제어하고자 한다.

RFP는 측정 대상의 좌표 값이 주어지면, 역 기구학을 통해 이동할 모터의 각도 값을 계산한다. 동작은 오픈 루프로 이루어지며, 이러한 동작을 Blind Move라고 한다. 동작 후 Metrology Camera는 Focal Plate의 상태를 확인한다. 이를 통해 RFP의 광섬유의 위치와 관측 대상의 위치 간의 오차를 계산할 수 있다. 계산된 차이만큼 추가적으로 RFP를 구동하여 최종적으로 광섬유를 관측 대상의 위치로 정확하게 이동하는 과정을 Calibration Move라 한다. Calibration 과정의 예시는 Fig. 6과 같다.

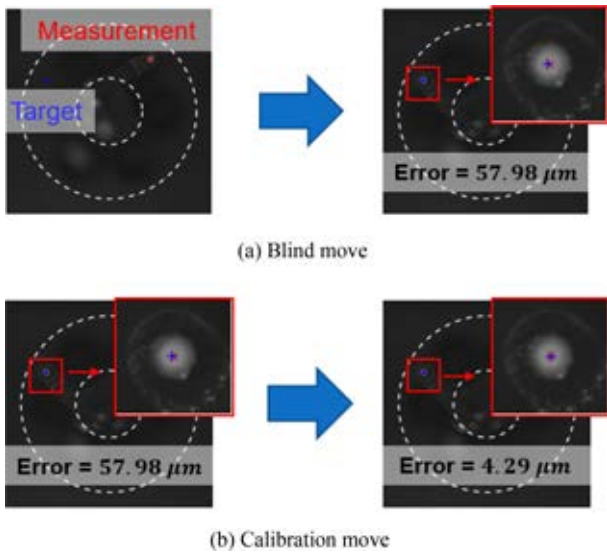


Fig. 6 Calibration process

RFP의 위치 정확도 측정을 위하여 Fig. 7(a)과 같이 관측 영역 내의 임의의 32개의 관측 대상을 설정하였다. 측정은 다음과 같이 진행하였다. RFP는 각 대상으로 Blind Move로 이동한 후 위치 오차를 측정한다. 이후 Calibration Move를 진행한 뒤 다시 오차를 측정한다. Calibration Move는 위치 오차 값이 5 μm보다 작도록 하되 최대 4회 진행하였다. 측정 결과 Blind Move 성능은 Figs. 7(b), Calibration Move의 성능은 7(c)와 같다. Blind Move의 평균 위치 오차는 118 μm이다. Blind Move의 위치 오차는 기어 박스의 백래시 및 제작 공차로 인해 발생한다. 이 오차는 Calibration Move를 통해 개선 가능하며, 평균 위치 오차는 3.1 μm로 감소하였다. 이는 논문의 RFP가 A-SPEC에서 요구하는 위치 오차 크기 이내로 위치 제어가 가능함을 보여준다.

RFP의 또다른 중요한 지표로는 반복능이 있다. RFP의 반복능을 측정하기 위해 동일한 관측 위치로 Blind Move를 통해 광섬유를 반복적으로 이동시키고, 위치를 측정하였다. 총 50회 측정을 수행하였으며, 결과는 Fig. 8에 나타나 있다. 측정된 RMS 오차는 6.40 μm으로, 이는 Blind Move의 위치 정확도인 118 μm에 비해 매우 작은 값이다. 이러한 두 가지 성능 지표를 통해 제작된 RFP가 Calibration을 통해 원하는 관측 대상을 충분히 정확하게 분광 관측할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 3. 경로 계획 알고리즘

A-SPEC은 1차 탐사에서 209일 동안 16만개의 천체를 관측한다. 따라서 한정된 시간에 목표하는 모든 천체를 관측하기 위해서는 효율적인 관측 계획이 필요하다.

#### 3.1 Target Assignment

K-SPEC은 150개의 RFP를 사용하므로, 한 번에 관측할 수 있는 은하의 개수가 한정되어 있다. 그러나 보통 Focal Plate 영역에서

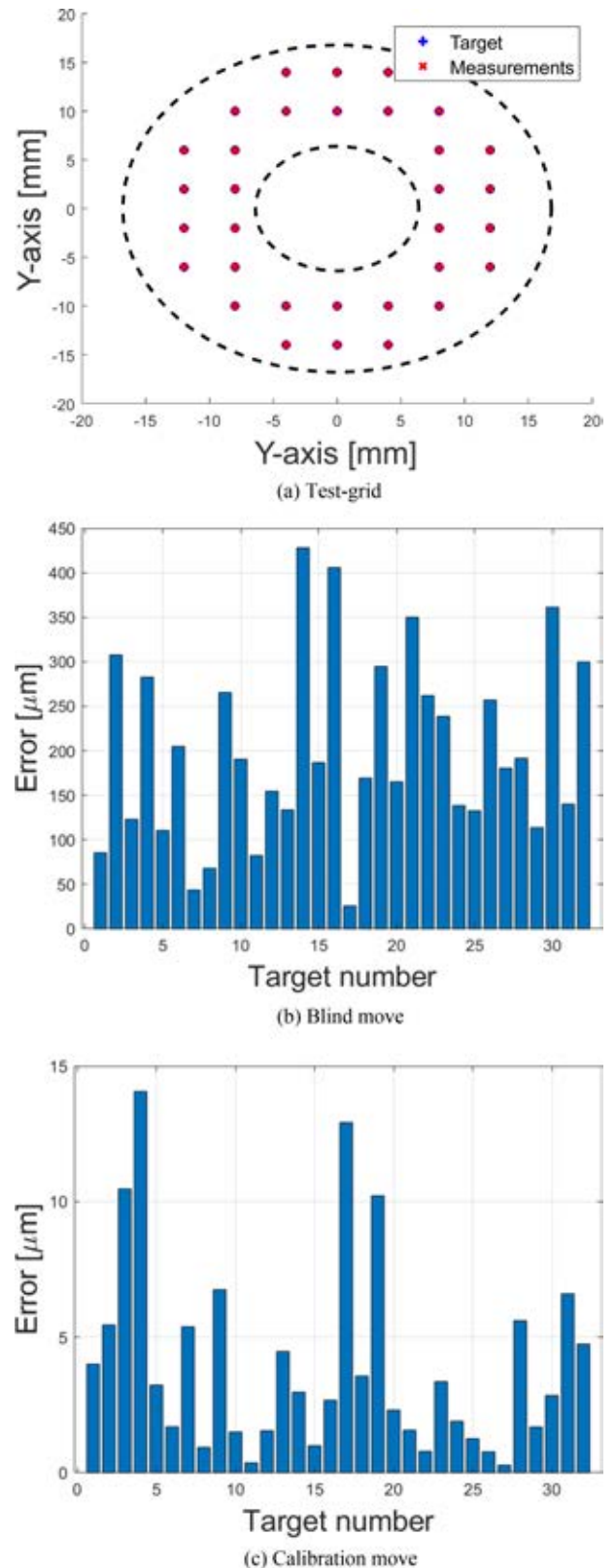


Fig. 7 Accuracy measurement results of an RFP

관측 가능한 은하의 개수는 150개보다 많으므로, 어떤 우선 순위로 은하를 관측해야 할 지 계획이 필요하다. 계획에 따라 각각의

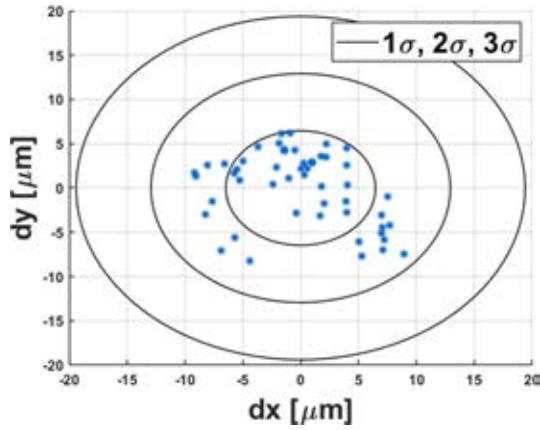


Fig. 8 Repeatability measurement results of an RFP

RFP에는 관측할 은하가 할당되며, 모든 RFP가 동시에 해당 위치로 광섬유를 이동시킨 뒤 관측이 이루어진다. 이때 관측 대상이 할당된 전체 RFP의 구성을 Tile이라 부른다. 실제 관측은 동일 영역에 대해 다수의 Tile로 구분하여 진행된다. A-SPEC은 209일 동안 2,198개의 Tile로 천체를 관측한다. Fig. 9는 400여개의 관측 대상을 3개의 Tile로 나누어 관측하는 예시를 보여준다. 각 Tile의 관측 대상은 주된 목표 대상인 Primary Target과 추가 대상인 Secondary Target, 하늘의 스펙트럼 보정을 위한 빈 하늘을 포함한다. 이러한 RFP에 관측 대상을 할당하는 과정을 Target Assignment라고 한다.

RFP는 분광 관측을 위해 초기 위치에서 각 Tile에 부여된 관측 대상의 위치로 이동한다. 분광 관측 후 RFP는 다시 초기 위치로 돌아가며, 모든 측정이 완료될 때까지 해당 과정을 반복한다. 논문에서는 Target Assignment를 통해 RFP에 측정 대상이 효과적으로 할당되었다고 가정하고, 충돌을 회피하고 관측 대상의 위치로 광섬유를 움직이는 경로 계획 알고리즘에 초점을 맞춘다.

3.2 충돌 방지

광섬유 로봇 위치기 시스템의 RFP는 동시에 초기 위치에서 관측 대상의 위치로 이동한다. 그러나 각 RFP의 관측 영역은 인접한 RFP와 겹치므로 이동 중 충돌이 발생할 수 있다. 이때 모든 RFP의 충돌은 β-arm에서만 발생하므로 RFP의 충돌 영역은 β-arm의 형상에 따라 결정된다. Fig. 10은 RFP의 β-arm 간에 충돌이 발생하는 예를 보여준다. 그림에서 충돌 영역은 β-arm의 선분과 선분을 감싸는 일정한 크기의 영역으로 구성된다. 이때 선분을 감싸는 영역을 충돌 감지 영역( $\sigma_{cd}$ )라 부르며, 인접한 RFP간 충돌 감지 영역이 겹치게 될 경우 충돌이 발생하게 된다. 따라서 RFP의 충돌 여부는 두 선분 사이의 최소 거리( $D_{ij}$ )를 계산하여 수학적으로 판단할 수 있다. 각 선분은 RFP의 광섬유의 위치( $x_f, y_f$ )와 β-모터 축( $x_e, y_e$ )의 위치로 결정된다. 광섬유의 위치는 수식(1)을 통해 계산되며, β-모터 축의 위치는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_\alpha \cos(\theta_\alpha) \\ l_\alpha \sin(\theta_\alpha) \end{bmatrix} \quad (6)$$

RFP간 충돌이 발생하는 경우는 수식(7)과 같다.

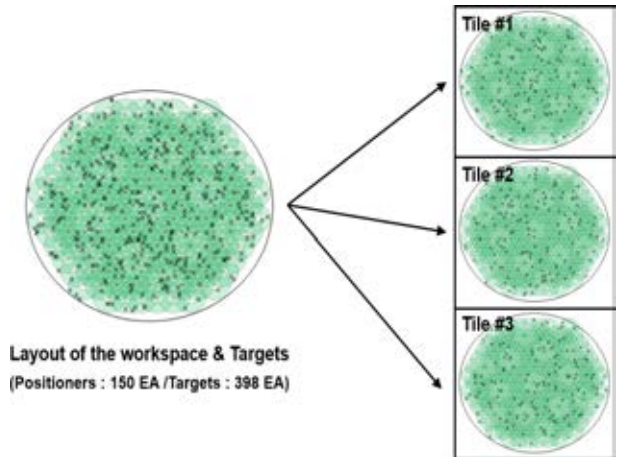


Fig. 9 Example of target assignment

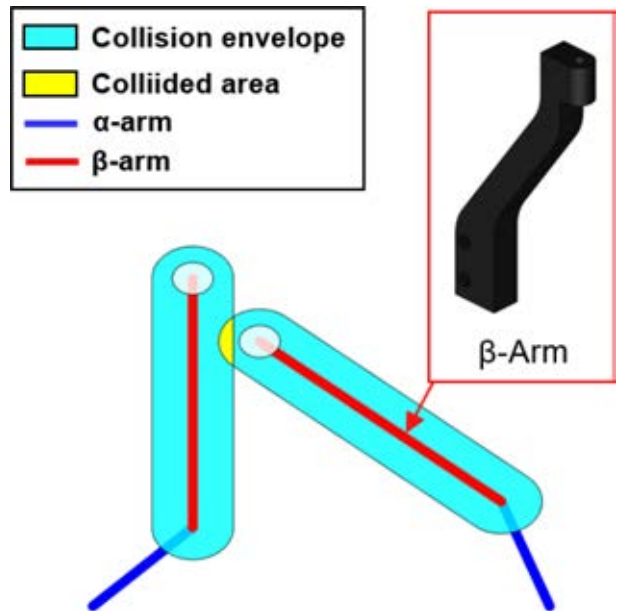


Fig. 10 Geometrical representation of collision in robotic fiber positioners

$$D_{ij} \leq 2\sigma_{cd} \quad (7)$$

3.2.1 Greedy Choice 알고리즘

GC는 간단한 충돌 방지를 적용한 MOS의 경로 계획 알고리즘으로 각 시간 단계마다 모터의 동작을 계산한다. 모터의 동작은  $[-\Delta\theta, 0, \Delta\theta]$  3개 중 하나가 선택된다. 이때 RFP는 2개의 모터로 구동하므로, 총 9개의 동작이 가능하다. 이러한 동작 중 인접한 RFP와 충돌하지 않으면서 최종 위치와 가장 가까운 방향으로 계획을 선택한다. 이때 GC는 충돌 영역을 뛰어넘어 동작하는 Tunneling Collisions을 고려하여 충돌 조건을 보수적으로 설정하였다. 따라서 충돌 조건인 수식(8)에 RFP의 최대 변위 항  $D_{max}$ 을 추가하여 충돌 제한 조건을 수식(10)과 같이 계산하였다. 수식에서  $N_i$ 는 RFP  $i$ 와 인접한 RFP의 집합을 의미한다. 또한  $G$ 는 모든

RFP의 집합이며,  $C_i$ 는 RFP  $i$ 의 중심 좌표를 의미한다.

$$N_i = \{j \in G, j \neq i \mid \|C_j - C_i\| \leq 2(P + \sigma_{cd})\} \quad (8)$$

$$D_{max} = (l_\alpha + l_\beta) \sin(2\Delta\theta) \quad (9)$$

$$\min\{j \in N_i \mid D_{ij}\} > 2\sigma_{cd} + 2D_{max} \quad (10)$$

### 3.2.2 Optimized Step Choice 알고리즘

Fully-convergent Tile은 Tile 내 모든 RFP가 경로 계획을 통해 지정된 관측 대상 위치로의 경로를 생성한 경우를 의미한다. GC의 Path Solution 방식에는 Forward Path Solution과 Reverse Path Solution 2가지가 있다. 그 중 Reverse Path Solution은 관측 대상의 위치에서부터 초기 위치로 돌아가는 방향으로 경로를 생성한다. 이때 경로 생성 도중 RFP의 이동 동작이 모두 충돌 제한 조건을 만족하지 못하면 교착 상태에 빠진다. 이 경우 경로는 관측 대상의 위치부터 정지된 위치까지만 생성된다. 그러나 실제 MOS 관측은 모든 RFP가 초기 위치로 배치된 상태에서 관측 위치로 이동하므로, Reverse Path Solution에서 하나의 RFP만이라도 경로 생성에 실패할 경우 생성된 경로 데이터를 실제 MOS 관측에 사용할 수 없다.

우리는 RFP에 더 많은 동작 선택지를 부여하면 이러한 문제를 해결할 수 있다고 판단하였다. 따라서 최적화를 통해 다양한 선택지를 제공하고 이들 중 최선의 동작을 선택한다면, 더 많은 Fully-convergent Tile을 생성할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 Optimized Step Choice (OSC)를 제안한다. OSC는 최적화를 통해 시간 단계 당 충돌 제약 조건을 충족하면서 모터의 각도를 목표 값에 가까워지도록 선택한다. 최적화는 SQP 알고리즘을 통해 진행되며, 설계 파라미터는 RFP의 각 모터 회전 각도( $\phi_{i,\alpha}, \phi_{i,\beta}$ )로 설정하였다. 이때 각 모터의 회전 각도의 크기는  $-\Delta\theta$ 에서  $\Delta\theta$  범위 내에서 최적화된다. 또한  $\alpha$ -모터의 각도( $\theta_{i,\alpha}$ )는 0 deg 에서 360 deg 범위에서 동작하며,  $\beta$ -모터의 각도( $\theta_{i,\beta}$ )는 0 deg 에서 180 deg 범위에서 동작한다. 최적화의 Cost Function은 수식(11)과 같다. 수식에서  $\theta_i^c$ 는 RFP의 현재 모터 각도 상태를 의미하며,  $\theta_i^D$ 는 RFP의 목표 각도 상태를 의미한다.

$$\text{minimize } f(\phi_{i,\alpha}, \phi_{i,\beta}) = \|\theta_i^c - \theta_i^D\| \quad (11)$$

이때 최적화의 제약 조건은 GC와 동일하게 수식(10)과 같이 설정하였다. 최적화를 통한 동작 선택은 모든 RFP가 순차적으로 진행되며, 각 RFP 상태를 갱신한다. 최적화는 모든 RFP가 수식(12)를 만족할 때까지 이루어진다.

$$\|\theta_i^c - \theta_i^D\| \leq \Delta\theta \quad (12)$$

Fig. 11은 18개의 RFP에 임의의 관측 대상을 설정하여 GC와 OSC로 각각 경로 계획을 진행한 결과이다. 그림에서 초록색 실선은 각 RFP의 이동 경로를 나타낸다. 생성된 경로를 볼 때, 일부 OSC를 통해 생성된 경로가 GC에 비해 더 짧은 이동거리를 보여 준다. 실제로 GC와 OSC의 생성된 경로의 이동 시간은 각각 5.5초와 4.3초로 OSC가 GC보다 더 짧은 시간 내에 목표하는 위치로 RFP를 이동시킬 수 있었다.

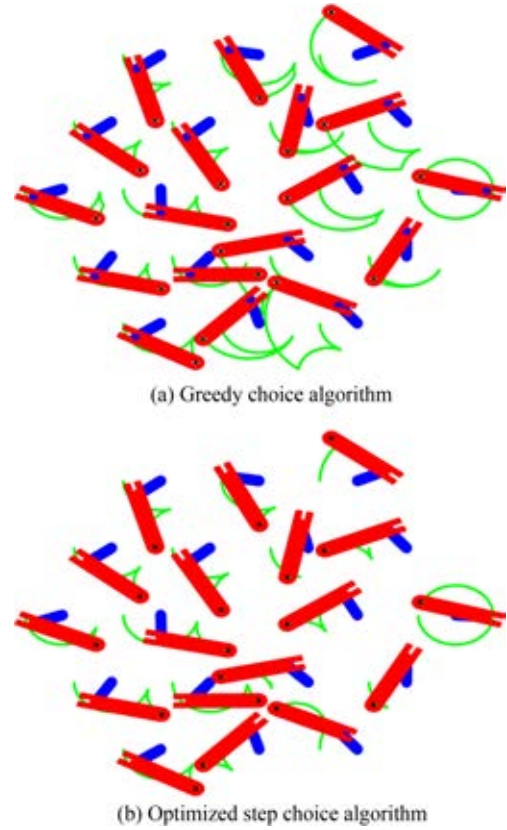
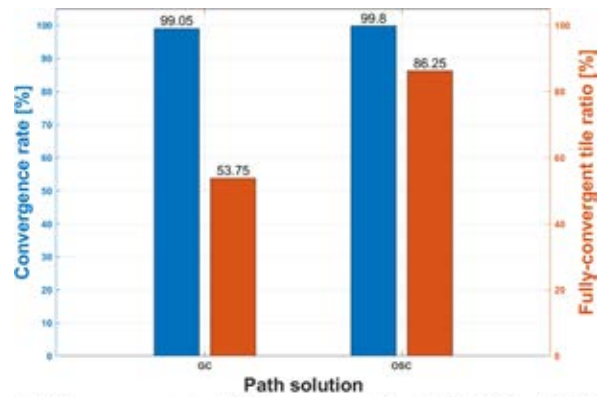
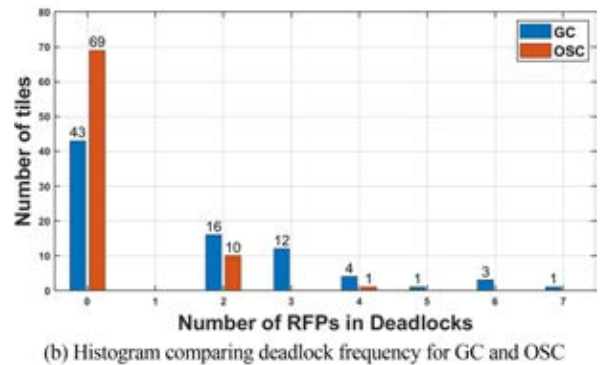


Fig. 11 Simulation results of the path planning algorithm



(a) Convergence rate and fully-convergent tile ratio for GC and OSC



(b) Histogram comparing deadlock frequency for GC and OSC

Fig. 12 Path planning simulation results for 80 tiles

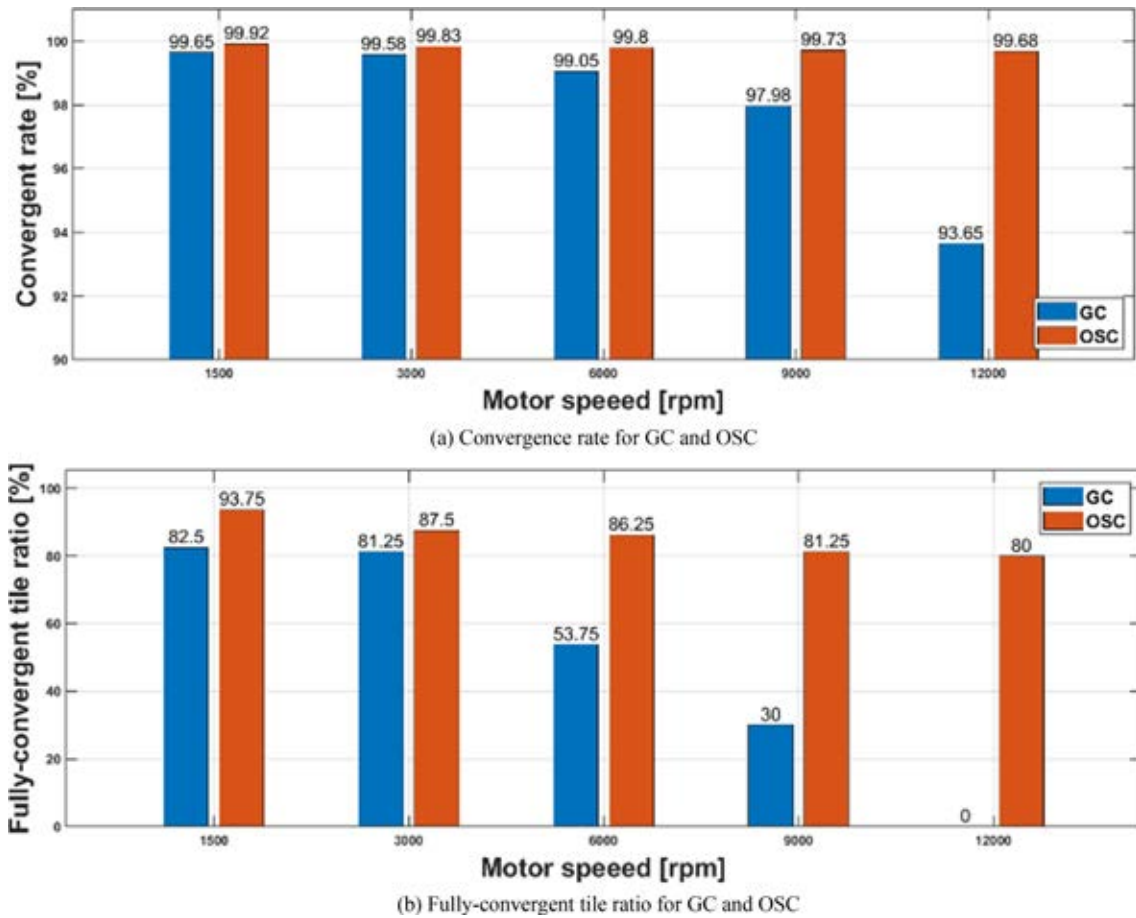


Fig. 13 Simulation results according to motor speed conditions

### 3.3 성능 비교

두 경로 계획 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 150개의 RFP를 가지는 RFPS에서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 총 80개 Tile에서 진행하였으며, 모터의 속도는 6,000 RPM으로 설정하였다. 논문에서 알고리즘의 성능 비교를 위해 2가지 성능 지표를 정의한다. Convergence Rate는 모든 Tile에서 RFP가 성공적으로 경로를 생성한 비율이며, Fully-convergent Tile Ratio는 전체 Tile 중 Fully-convergent Tile을 생성한 비율을 의미한다.

시뮬레이션 결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12(a)에서 Convergence Rate는 GC와 OSC가 각각 99.05와 99.80%로 두 알고리즘 모두 거의 모든 RFP의 경로를 성공적으로 생성할 수 있었다. 그러나 Fully-convergent Tile Ratio의 경우 GC는 53.75%로 절반에 가까운 Tile에서 교착 상태가 발생하였으며, 46.25% Tile은 MOS 관측의 경로 데이터로 사용할 수 없다. 반대로 OSC의 경우 Fully-convergent Tile Ratio는 88.25%로 기존 GC 대비 32.5% 더 많은 Tile에서 성공적으로 관측할 수 있는 경로 데이터를 생성한다. Fig. 12(b)는 시뮬레이션에서 교착 상태의 빈도를 히스토그램으로 나타낸 결과이다. 그림에서 GC는 80개의 Tile 중 16개의 Tile에서 2개의 RFP에 대한 경로 생성에 실패한 반면, OSC는 10개의 Tile에서만 경로 생성에 실패하였다. 또한 GC는 총 21개의 Tile에서 3개 이상의 RFP 경로 생성에 실패한 것으로 나타났으나, OSC는

80개 중 단 1개의 Tile에서만 3개 이상의 RFP 경로 생성에 실패하였다. 이는 논문에서 제안한 OSC가 기존 GC에 비해 복잡하게 얽혀 있는 RFP의 경로 생성 문제를 더 잘 해결하고 있음을 보여준다. 상세한 두 알고리즘의 성능 비교를 위해 모터의 다양한 속도 조건에서 시뮬레이션을 진행하였다. 결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 13(a)는 속도 조건 별 Convergence Rate를 비교한 결과이다. OSC는 속도 조건이 달라지더라도 성능의 큰 변화가 없었으나, GC는 속도 조건에 따라 경로 생성에 실패하는 RFP의 비율이 높아졌다. Fully-convergent Tile Ratio를 비교한 결과는 Fig. 13(b)와 같으며, GC와 OSC 모두 Convergence Rate의 결과와 유사하게 나타났다. OSC는 시뮬레이션 결과 모든 속도 조건에서 80% 이상의 비율로 Fully-convergent Tile을 생성한 반면, GC는 12,000 RPM 조건에서는 하나의 Fully-convergent Tile도 생성할 수 없었다. 이러한 시뮬레이션 결과는 논문에서 제안한 OSC가 다양한 Tile 및 RFP 조건에서도 성공적으로 Fully-convergent Tile을 생성할 수 있음을 보여준다.

### 4. 결론

RFPS는 MOS를 위한 다천체 분광기의 새로운 Focal Plate 방식이다. 본 논문에서는 RFPS의 필수 요소인 RFP를 설계하고 및 성능



측정을 진행하였다. 제작된 RFP의 평균 위치 오차를 측정된 결과 Blind Move는 118  $\mu\text{m}$ , Calibration Move는 3.1  $\mu\text{m}$ 로, 광섬유의 수광 효율에 영향이 없는 수준으로 제어할 수 있었다. 또한 논문에서는 제작된 RFP를 통해 여러 은하를 순차적으로 관측하기 위한 경로 계획 알고리즘을 제안했다. OSC 알고리즘은 최적화를 통해 RFP의 동작을 선택하여 충돌을 방지하고 광섬유들을 관측 대상의 위치로 이동시킨다. 제안한 알고리즘의 성능 측정을 위해 80개 Tile에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 다양한 모터 속도 조건에서 진행하였으며, OSC는 모든 모터 속도 조건에서 80% 이상의 비율로 Fully-convergent Tile을 생성할 수 있었다. 따라서 논문에서 개발한 RFP와 경로 계획 알고리즘은 추후 천문학적 대형 분광 탐사를 기획하고 추진하는 데 큰 도움이 될 것이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 한국항공우주청의 주관 하에 한국천문연구원 연구개발사업(No. 2024-1-830-00)의 지원을 받아 수행되었습니다. 황호성은 삼성전자의 지원(No. IO220811-01945-01)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2021R1A2C1094577)에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Levi, M. E., Allen, L. E., Raichoor, A., Baltay, C., BenZvi, S., Beutler, F., Bolton, A., Castander, F. J., Chuang, C.-H., Cooper, A., Cuby, J.-G., Dey, A., Eisenstein, D., Fan, X., Flaugher, B., Frenk, C., Gonzalez-Morales, A. X., Graur, O., Guy, J., Habib, S., Honscheid, K., Juneau, S., Kneib, J.-P., Lahav, O., Lang, D., Leauthaud, A., Lusso, B., Macorra, A., Manera, M., Martini, P., Mao, S., Newman, J. A., Palanque-Delabrouille, N., Percival, W. J., Pridto, C. A., Rockosi, C. M., Ruhlmann-Kleider, V., Sehlegel, D., Seo, H.-J., Song, Y.-S., Tarle, G., Wechsler, R., Weinberg, D., Yeche, C., Zu, Y., (2019), The dark energy spectroscopic instrument (DESI), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 57(7).
2. Martini, P., Bailey, S., Besuner, R. W., Brooks, D., Doel, P., Edelstein, J., Eisenstein, D., Flaugher, B., Gutierrez, G., Harris, S. E., Honscheid, K., Jelinsky, P., Joyce, R., Kent, S., Sevi, M., Prada, F., Poppett, C., Rabinowitz, D., Rockosi, C., Cardiel Sas, L., Schlegel, D. J., Schubnell, M., Sharples, R., Silber, J. H., Sprayberry, D., Wechsler, R., (2018), Overview of the dark energy spectroscopic instrument, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*, 10702, 410-420.
3. Abareshi, B., Aguilar, J., Ahlen, S., Alam, S., Alexander, D. M., Alfarsy, R., Allen, L., Prieto, C. A., Alves, O., Ameer, J., Armengaud, E., Asorey, J., Aviles, A., Bailey, S., Balaguera-Antolínez, A., Ballester, O., Baltay, C., Bault, A., Beltran, S. F., Benavides, B., BenZvi, S., Berti, A., Besuner, R., Beutler, F., Bianchi, D., Blake, C., Blanc, P., Blum, R., Bolton, A., Bose, S., Bramall, D., Brieden, S., Brodzeller, A., Brooks, D., Brownell, C., Buckley-Geer, E., Cahn, R. N., Cai, Z., Canning, R., Capasso, R., Carnero Rosell, A., Carton, P., Casas, R., Castander, F. J., Cervantes-Cota, J. L., Chabanier, S., Chaussidon, E., Chuang, C., Circosta, C., Cole, S., Cooper, A. P., da Costa, L., Cousinou, M.-C., Cuceu, A., Davis, T. M., Dawson, K., de la Cruz-Noriega, R., de la Macorra, A., de Mattia, A., Della Costa, J., Demmer, P., Derwent, M., Dey, A., Dey, B., Dhungana, G., Ding, Z., Dobson, C., Doel, P., Donald-McCann, J., Donaldson, J., Douglass, K., Duan, Y., Dunlop, P., Edelstein, J., Eftekharzadeh, S., Eisenstein, D. J., Enriquez-Vargas, M., Escoffier, S., Evatt, M., Fagrellius, P., Fan, X., Fanning, K., Fawcett, V. A., Ferraro, S., Ereza, J., Flaugher, B., Font-Ribera, A., Forero-Romero, J. E., Frenk, C. S., Fromenteau, S., Gänsicke, B. T., Garcia-Quintero, C., Garrison, L., Gaztañaga, E., Gerardi, F., Gil-Marín, H., Gontcho A Gontcho, S., Gonzalez-Morales, A. X., Gonzalez-de-Rivera, G., Gonzalez-Perez, V., Gordon, C., Graur, O., Green, D., Grove, C., Gruen, D., Gutierrez, G., Guy, J., Hahn, C., Harris, S., Herrera, D., Herrera-Alcántar, H. K., Honscheid, K., Howlett, C., Huterer, D., Iršič, V., Ishak, M., Jelinsky, P., Jiang, L., Jimenez, J., Jing, Y. P., Joyce, R., Jullo, E., Juneau, S., Karaçaylı, N. G., Karamanis, M., Karcher, A., Karim, T., Kehoe, R., Kent, S., Kirkby, D., Kisner, T., Kitaura, F., Kopesov, S. E., Kovács, A., Kremin, A., Krolewski, A., L'Huillier, B., Lahav, O., Lambert, A., Lamman, C., Lan, T.-W., Landriau, M., Lane, S., Lang, D., Lange, J. U., Lasker, J., Le Guillou, L., Leauthaud, A., Le Van Suu, A., Levi, M. E., Li, T. S., Magneville, C., Manera, M., Manser, C. J., Marshall, B., Martini, P., McCollam, W., McDonald, P., Meisner, A. M., Mena-Fernández, J., Meneses-Rizo, J., Mezcua, M., Miller, T., Miquel, R., Montero-Camacho, P., Moon, J., Moustakas, J., Mueller, E., Muñoz-Gutiérrez, A., Myers, A. D., Nadathur, S., Najita, J., Napolitano, L., Neilsen, E., Newman, J. A., Nie, J. D., Ning, Y., Niz, G., Norberg, P., Noriega, H. E., O'Brien, T., Obuljen, A., Palanque-Delabrouille, N., Palmese, A., Zhiwei, P., Pappalardo, D., PENG, X., Percival, W. J., Perruchot, S., Pogge, R., Poppett, C., Porredon, A., Prada, F., Prochaska, J., Pucha, R., Pérez-Fernández, A., Pérez-Ràfols, I., Rabinowitz, D., Raichoor, A., Ramirez-Solano, S., Ramírez-Pérez, C., Ravoux, C., Reil, K., Rezaie, M., Rocher, A., Rockosi, C., Roe, N. A., Roodman, A., Ross, A. J., Rossi, G., Ruggeri, R., Ruhlmann-Kleider, V., Sabiu, C. G., Gaines, S., Said, K., Saintonge, A., Catonga, J. S., Samushia, L., Sanchez, E., Saulder, C., Schaan, E., Schlafly, E., Schlegel, D., Schmoll, J., Scholte, D., Schubnell, M., Secroun, A., Seo, H., Serrano, S., Sharples, R. M., Sholl, M. J., Silber, J. H., Silva, D. R., Sirk, M., Siudek, M., Smith, A., Sprayberry, D., Staten, R., Stupak, B., Tan, T., Tarlé, G., Tie, S. S., Tojeiro, R., Ureña-López, L. A., Valdes, F., Valenzuela, O., Valluri, M., Vargas-Magaña, M., Verde, L., Walther, M., Wang, B., Wang, M. S., Weaver, B. A., Weaverdyck, C., Wechsler, R., Wilson, M. J., Yang, J., Yu, Y., Yuan, S., Yèche, C., Zhang, H., Zhang, K., Zhao, C., Zhou, R., Zhou, Z., Zou, H., Zou, J., Zou, S., Zu, Y., (2022), Overview of the instrumentation for the dark energy spectroscopic instrument, *The Astronomical Journal*, 164(5), 207.

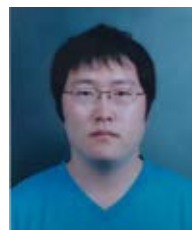
4. Kollmeier, J., Zasowski, G., Rix, H.-W., Johns, M., Anderson, S., F., Drory, N., Johnson, J. A., MacDonald, N., Merloni, A., Ness, M. K., O'Brien, T., Sanchez-Gallego, J. R., Sayres, C. C., Shen, Y., Thakar, A. R., Tkachenko, A., Aerts, C., Blanton, M. R., Eisenstein, D. J., Holtzman, J. A., Maoz, D., Nandra, K., Rockosi, C., Weinberg, D. H., Bovy, J., Casey, A. R., Chaname, J., Clerc, N., Conroy, C., Eracleous, M., Gansicke, B. T., Hekker, S., Home, K., Kauffmann, J., McQuinn, K., Pellegrini, E. W., Schinnerer, E., Schlafly, E. F., Schwobe, A. D., Seibert, M., Teske, J. K., Saders, J., (2019), SDSS-V pioneering panoptic spectroscopy, *Bulletin of the American Astronomical Society*.
5. Cirasuolo, M., Afonso, J., Carollo, M., Flores, H., Maiolino, R., Oliva, E., Paltani, S., Vanzi, L., Evans, C., Abreu, M., Atkinson, D., Babusiaux, C., Beard, S., Bauer, F., Bellazzini, M., Bender, R., Best, P., Bezawada, N., Bonifacio, P., Bragaglia, A., Bryson, I., Busher, D., Cabral, A., Caputi, K., Centrone, M., Chemla, F., Cimatti, A., Cioni, M.-R., Clementini, G., Coelho, J., Cronojevic, D., Daddi, E., Dunlop, J., Eales, S., Feltzing, S., Ferguson, A., Fisher, M., Fontana, A., Fynbo, J., Garilli, B., Gilmore, G., Glauser, A., Guinouard, I., Jammer, F., Hastings, P., Hess, A., Ibison, R., Jagourel, P., Jarvis, M., Kaper, L., Kauffman, G., Kitching, A. T., Lawrence, A., Lee, D., Lemasle, B., Licausi, G., Lilly, S., Lorenzetti, D., Lunney, D., Mannucci, F., McLure, R., Minniti, D., Montgomery, D., Muschiello, B., Nandra, K., Navarro, R., Norberg, P., Oliver, S., Origlia, L., Padilla, N., Peacock, J., Pedichini, F., Peng, L., Pentericci, L., Pragt, J., Puech, M., Randich, S., Rees II, P., Renzini, A., Ryde, N., Rodrigues, M., Roseboom, I., Royer, F., Saglia, R., Sanchez, A., Schiavon, R., Schnetler, H., Sobral, D., Speziali, R., Sun, D., Stuijk, R., Taylor, A., Taylor, W., Todd, S., Tolstoy, E., Torres, M., Tosi, M., Vanzella, E., Venema, L., Vitali, F., Wegner, M., Wells, M., Wild, V., Wright, G., Zamorani, G., Zoccali, M., (2014), MOONS: the multi-object optical and near-infrared spectrograph for the VLT, *Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, 9147, 202-214.
6. Schubnell, M., Ameel, J., Besuner, R. W., Gershkovich, I., Hoerler, P., Kneib, J.-P., Heetderks, H. D., Silber, J. H., Tarlé, G., Weaverdyck, C., (2016), The DESI fiber positioner system, *Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*, 9908, 2715-2720.
7. Leitner, D., Aguilar, J., Ameel, J., Besuner, R., Claybaugh, T., Heetderks, H., Schubnell, M., Kneib, J.-P., Silber, J., Tarlé, G., (2018), Dark energy spectroscopic instrument (DESI) fiber positioner production, *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*, 10706, 1790-1798.
8. Hörler, P., Kronig, L., Kneib, J.-P., Bouri, M., Bleuler, H., von Moos, D., (2018), High density fiber positioner system for massive spectroscopic surveys, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481(3), 3070-3082.
9. Fisher, C., Morantz, C., Braun, D., Seiffert, M., Aghazarian, H., Partos, E., King, M., Hovland, L. E., Schwochert, M., Kaluzny, J., Capocasale, C., Jouck, A., Gross, J., Reiley, D., Mao, P., Riddle, R., Bui, K., Henderson, D., Haran, T., Culhane, R., Piazza, D., Walkama, E., (2014), Developing engineering model cobra fiber positioners for the subaru telescope's prime focus spectrometer, *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*, 9151, 661-673.
10. Fisher, C. D., Braun, D. F., Kaluzny, J. V., Seiffert, M. D., Dekany, R. G., Ellis, R. S., Smith, R. M., (2012), Developments in high-density cobra fiber positioners for the subaru telescope's prime focus spectrometer, *Modern Technologies in Space-and Ground-based Telescopes and Instrumentation II*, 8450, 410-417.
11. Makarem, L., Kneib, J.-P., Gillet, D., Bleuler, H., Bouri, M., Jenni, L., Prada, F., Sanchez, J., (2014), Collision avoidance in next-generation fiber positioner robotic systems for large survey spectrographs, *Astronomy & Astrophysics*, 566, A84.
12. Sayres, C., Sánchez-Gallego, J. R., Blanton, M. R., Araujo, R., Bouri, M., Grosse, L., Kneib, J.-P., Kollmeier, J. A., Kronig, L., Pogge, R. W., Tuttle, S., (2021), SDSS-V algorithms: Fast, collision-free trajectory planning for heavily overlapping robotic fiber positioners, *The Astronomical Journal*, 161(2), 92.
13. Macktoobian, M., Gillet, D., Kneib, J.-P., (2019), Complete coordination of robotic fiber positioners for massive spectroscopic surveys, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 5(4), 045002.
14. Macktoobian, M., Araújo, R., Grosse, L., Kronig, L., Bouri, M., Gillet, D., Kneib, J.-P., (2021), Experimental evaluation of complete safe coordination of astrobots for Sloan Digital Sky Survey V, *Experimental Astronomy*, 51, 77-94.
15. Kim, S.-L., Lee, C.-U., Park, B.-G., Kim, D.-J., Cha, S.-M., Lee, Y., Yuk, I., Han, D., Chun, M.-Y., Yuk, I., (2016), KMTNET: a network of 1.6 m wide-field optical telescopes installed at three southern observatories, *Journal of The Korean Astronomical Society*, 49(1), 37-44.



**Hyunho Lim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is high-precision machines and compliant mechanism.

E-mail: qwecsz@ajou.ac.kr



**Jae-Woo Kim**

Senior researcher at the Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interest is extragalactic astronomy.

E-mail: kjw0704@kasi.re.kr

**Ho Seong Hwang**

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

E-mail: galaxy79@snu.ac.kr

**Sungwook Hong**

Senior researcher at the Korea Astronomy and Space Science Institute and professor at the Astronomy Campus of the University of Science and Technology. His research interests include cosmology, large-scale structure, and astrobiology using cosmological simulations, artificial intelligence, and spectroscopic instrumentations.

E-mail: sungwook.e.hong@gmail.com

**Jong Chul Lee**

Staff scientist in the Galaxy Evolution Research Group at the Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interests include extragalactic astronomy and multi-wavelength observations.

E-mail: jcllee@kasi.re.kr

**Young-Man Choi**

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

E-mail: ymanchoi@ajou.ac.kr

## 3D 프린팅 섬 영역 탐지 방법: CPU 기반 접근법

# Detection Method for Island Regions in 3D Printing: A CPU-based Approach

강영석<sup>1</sup>, 김윤섭<sup>2</sup>, 나승채<sup>2</sup>, 한상조<sup>2,#</sup>

Young Seok Kang<sup>1</sup>, Yeun Seop Kim<sup>2</sup>, Seung Chae Na<sup>2</sup>, and Sang Jo Han<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology)  
<sup>2</sup> 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과 (Department of Mechanical Engineering and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)  
# Corresponding Author / E-mail sjhan@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6321  
ORCID: 0009-0001-8463-1461

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), 3D printing (3D 프린팅), Support structure (지지대)

Additive manufacturing, a key enabler of Industry 4.0, is revolutionizing the automatic landscape in manufacturing. The primary challenge in manufacturing innovation centers on the implementation of smart factories characterized by unmanned production facilities and automated management systems. To overcome this challenge, the adoption of 3D printing technologies, which offer significant advantages in standardizing production processes, is crucial. However, a major obstacle in complete automation of additive manufacturing is an inadequate placement of support structures at critical locations, which remains the leading cause of print failures. This study proposed a novel algorithm for accurate detection of island regions known to be critical areas requiring support structures. The algorithm can compare loops on two consecutive layers derived from STL files. In contrast to conventional GPU-based image comparison methods, our proposed CPU-based algorithm enables high-precision detection independent of image resolution. Experimental results demonstrated the algorithm's efficacy in enhancing the reliability of 3D printing processes and optimizing automated workflows. This research contributes to the advancement of smart manufacturing by addressing a critical challenge in the automation of additive manufacturing processes.

Manuscript received: October 10, 2024 / Revised: November 11, 2024 / Accepted: November 14, 2024

### NOMENCLATURE

$\theta$  = overhang Angle  
 $S_n$  = Sectional Plane at  $n^{th}$  Height  
 $L_{A.S1}$  = A-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_1$   
 $L_{P.S2}$  = P-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_1$   
 $L_{A.S2}$  = A-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_2$   
 $L_{B.S2}$  = B-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_2$   
 $L_{P.S2}$  = P-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_2$   
 $L_{A.S3}$  = A-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_3$   
 $L_{B.S3}$  = B-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_3$   
 $L_{C.S3}$  = C-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_3$   
 $L_{P.S3}$  = P-exclusive Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_3$

$L_{m.S4}$  = All Merged Loops on Plane  $S_4$   
 $L_{T.S1}$  = Total Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_1$   
 $L_{T.S2}$  = Total Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_2$   
 $L_{T.S3}$  = Total Cross-sectional Shape Loop on Plane  $S_3$   
 $RL$  = Residual Loop  
 $NR$  = Null Residual  
 $SR$  = Sustained Residual

### 1. 서론

3D 프린팅은 4차 산업혁명의 핵심 기술로서 제조업의 혁신을 주도하며 다양한 산업 분야에서 급속히 확산되고 있다[1]. 이 기술은

의료, 우주항공, 자동차, 건축, 패션 등 광범위한 분야에서 활용되며, 최근에는 4D 프린팅 기술로도 발전하고 있다[2]. 또한, 단일화된 부품 생산을 통해 경량화 및 부품 수 감소로 불량률 저감과 생산시간 단축을 실현하여 비용 절감에 기여한다.

세계 각국은 제조경쟁력 혁신을 위해 스마트 팩토리의 필요성을 강조하며 적극적으로 지원 및 추진하고 있다. 한국은 3D 프린팅, 스마트센서, CPS, 에너지 절감 기술, IoT, 클라우드, 빅데이터, 홀로그램 등을 스마트제조 8대 핵심기술로 지정하였다[3]. 최근 스마트팩토리는 인공지능을 활용한 스마트 MES (Manufacturing Execution System) 구축을 목표로 하며, 이를 위해 ICT (Information and Communication Technology)가 적용된 대량의 표준화된 데이터가 필요하다. 3D 프린터는 기존 생산제조장비에 비해 생산공정의 표준화 및 디지털화에 유리하다[4].

그러나 3D 프린팅 공정의 완전 자동화에는 여전히 과제가 남아있다. 가장 큰 문제는 지지대(서포터)가 필요한 출력 모델에서 필수 위치를 자동으로 식별하고 생성하는 것이다. 현재까지 지지대의 필수 위치는 주로 작업자의 경험에 의존하여 결정되었으며, 이는 출력 성공률에 큰 영향을 미쳤다. 본 연구는 3D 프린팅 자동화의 핵심 요소인 지지대 필수 위치 탐색 알고리즘을 제안한다.

## 2. 지지대 생성 위치 탐색

### 2.1 지지대의 필요성

3D 프린팅 공정 자동화의 핵심 요소는 반복적으로 사용자의 개입 없이 출력 성공이 가능해야 한다는 점이다. 출력실패의 원인을 정확히 파악하여 비슷한 형상의 문제를 사전에 해결해야 한다. 다양한 출력 방식이 존재함에 따라 3D 프린팅 실패의 원인 또한 다양하다. 부적절한 출력 방향, 출력 불가능한 형상, 외부 환경 문제(온도, 진동 등), 공정속도 등 다양한 원인이 있다. 출력 실패의 원인을 해결하기 위해 출력방향 전환, 모델 형상 변경, 모델 분할 출력, 구조물 보강, 온도조절, 진동 조절, 지지대 생성 등 다양한 요소를 적용 또는 통제하여 해결한다. 다양한 출력 방식 중 실패의 원인이 비교적 적어 자동화에 유리한 출력 방식들이 있지만 이는 결국 높은 비용과 직결된다. 결국 낮은 비용의 출력 장비들은 숙련된 작업자가 개입하여 출력의 성공률을 올리는 작업을 하게 된다.

3D 프린터는 사용되는 재료 또는 적층 원리에 따라 다양한 장비가 존재한다. ISO 17296-1에 따라 3D 프린터는 7가지 카테고리 분류할 수 있다[5,6].

- 액조 광경화(Vat Polymerization) - DLP, SLA 등
- 재료 분사(Material Jetting)
- 접착제 분사(Binder Jetting)
- 재료 압출(Material Extrusion) - FDM, DMD 등
- 분말 베드 용해(Powder Bed Fusion) - SLS 등
- 판재 적층(Sheet Lamination)
- 에너지 제어 용착(Directed Energy Deposition) - SLM 등

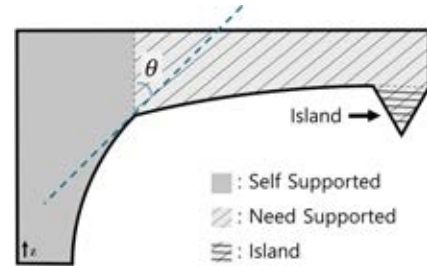


Fig. 1 The angle  $\theta$  shown in the figure is  $45^\circ$ . Overhang part is where the angle  $\theta$  exceeds a threshold angle. Self-supported area where the angle is under  $45^\circ$  usually can stand without supporters

다양한 방식에도 불구하고 대부분의 출력 실패 원인은 반드시 지지대가 필요한 위치에 적절하게 생성되지 못한 상황에서 발생된다. 지지대가 필요한 이유 또한 다양하다. 적층 중인 재료의 중력에 의한 변형, 온도 또는 잔류응력에 의한 변형, 재료의 도포 및 이동에 의한 변형, 부족 또는 과도한 지지대 등이 있다[7]. 우리가 주로 다루게 될 FDM과 DLP 방식에서는 출력 모델의 오버행과 섬에 적절한 지지대 생성이 이루어져야 한다. Fig. 1에서 그려진 모습과 같이 섬(Island) 영역은 지지대가 없다면 재료와 각도 무관하게 형상이 적층 될 수 없다. 연구에서는 이 섬의 위치를 탐색하는 알고리즘에 대해 설명하고자 한다.

### 2.2 STL 파일 형식과 지지대 생성 선행 연구

출력하고자 하는 모델은 STL (Stereolithography) 형식의 파일로 저장된다. STL 파일은 3D 모델을 삼각형을 최소 단위로 표현하며 “Standard Triangle Language”나 “Standard Tessellation Language”로 표현하는 경우도 있다.

STL 파일에서 물체의 표면을 구성하는 삼각형은 12개의 수로 이루어져 있으며 한 개의 법선 벡터와 세 개의 꼭짓점을 3차원 좌표 표현한다. 오른손 법칙에 따라 법선 벡터  $N$  방향에 맞추어  $V_1, V_2, V_3$  좌표를 정리하고 안과 밖을 구분한다[8].

$$N = (n_x, n_y, n_z)$$

$$V_1 = (x_1, y_1, z_1)$$

$$V_2 = (x_2, y_2, z_2)$$

$$V_3 = (x_3, y_3, z_3)$$

지지대 생성이 필요한 위치를 탐색하는 방법에는 많은 연구가 이루어져왔고 크게 두 가지로 나뉜다. 평면의 법선 벡터와 Z축 관계를 활용하여 주어진 조건에 만족하는 지지대 생성 위치 여부를 판별하는 방법과 연속된 단면을 비교 분석하여 탐색하는 방법이다. 이 두 기본적인 방법을 응용하여 다양한 연구가 진행되었다.

Vanek, J. 등은 주변 지점들보다 낮은 위치에 있는 지점을 섬으로 정의했다[9]. 그들은 평면의 법선 벡터가 기준 각도를 초과하는 위치에 원뿔을 생성하고, 이 원뿔들이 교차하는 영역을

활용하여 효율적으로 필수 지지대를 생성하는 방식을 제안하였다. 하지만 지지 구조 생성의 효율성을 높였으나, 섬 탐지 과정에서 한계점을 보였다. 주변 지점들과 비교는 임의로 지정된 간격을 기준으로 이루어졌기 때문에, 이 간격 설정에 따라 탐지 정확도가 달라질 수 있었다. Chen., Yong. 등은 LDNI (Layered Depth-Normal Image) 기법 활용하여 분석하고 지지대 위치 지정했다[10]. LDNI 기법을 활용하여 얻어진 1차원 정보들을 분류하여 각 레이어의 모형 외곽선(Contour)을 추출한다. 이후 전후 레이어의 외곽선을 비교하여 교차되지 않는 영역을 식별하고, 두 외곽선 간의 이격 거리를 기반으로 직전 레이어가 자체적으로 지지 가능한지 분석하여 지지대를 생성한다. 또한, 미리 준비된 XY 격자 간격에 따라 배치된 지지대와 외곽선 간의 거리를 분석하여 지지가 필요한 영역을 결정한다고 하였다. 이 방법은 섬 구조 탐지에 앞서 미리 설정된 격자를 기반으로 생성된 지지대와의 관계를 분석하여 지지 가능성을 분석하여 필요에 따라 수정하는 방식이었다. 따라서 직접적인 섬 탐지 알고리즘은 아니었다. 또한 분석 간격, 스스로 지지 가능 거리, 지지대의 지지 가능 거리 등의 변수를 경험을 바탕으로 설정하여 진행하였다. Jang, S. 등은 ‘Directed z-LDI’을 활용하여 섬과 효율적인 지지대 생성 위치를 찾는 방법을 제안했다[11]. 그들은 컴퓨터 그래픽스에서 널리 사용되는 시야 절두체(View Frustum) 기법 중 직교 시야 절두체(Orthogonal View Frustum)를 활용하였다. XY 격자를 Z축 방향으로 출력 모델에 투사하여 표면과 만나는 진입점(Entry Point)과 반대편으로 뚫고 나오는 출구점(Exit Point)을 얻어 섬을 식별하고, 각 점들의 관계를 분석하여 오버행 각도와 가중치를 적용하여 최적의 지지대 위치를 찾는 방법을 제안했다. Wang, Z. 등은 오버행 영역을 점, 모서리, 면으로 분류하여 법선 벡터의 각도에 따라 섬에 대한 정의를 내렸다[12]. 인접한 모든 두 면의 법선 벡터의 방향 중 하나라도 90°를 초과하면 오버행 점 또는 오버행 모서리로 간주된다. 그러나 이 방법은 XY 평면과 수직인 평면에 의해 생성된 단면을 통해 분석해야 하는 한계가 있다.

위 방법들은 픽셀 크기 또는 XY 평면과 수직인 평면들의 간격보다 작은 섬이 누락될 수 있는 단점이 있었다. 또한 출력 방향과 수직인 평면 외에도 다수의 평면 단면이 분석에 필요했다.

이 외에도 기존 탐색 방법을 응용하여 경제적이고 효과적인 지지대 생성에 최적화하는 연구가 많이 이루어져 왔지만, 정확하게 섬(Island)을 찾는 알고리즘을 제안한 연구는 찾기 힘들었다. 또한 많은 경우 여전히 작업자의 경험이 필요한 상수를 입력해줘야 하는 단점이 발생한다.

본 연구는 단면의 루프를 활용하여 해상도나 출력물의 방향이나 크기 상관없이 정밀한 섬을 탐색하는 알고리즘을 설명하고자 한다.

### 2.3 CPU와 GPU 탐색의 차이점

STL파일의 단면 슬라이싱 방법에는 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. CPU를 이용한 벡터 기반 슬라이싱과 GPU를

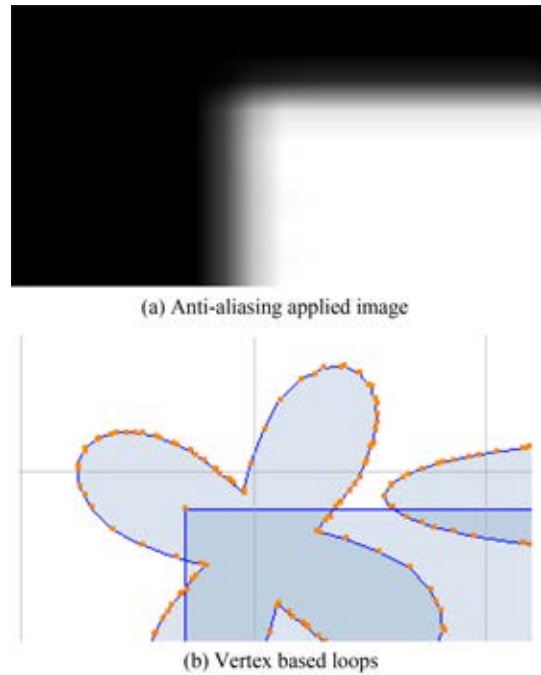


Fig. 2 Sliced layer images. (a)GPU-based method. The boundary is ambiguous due to gray pixels and (b) CPU-based method. The boundary is well-defined

활용한 픽셀 기반 슬라이싱으로 구분할 수 있다[13,14]. 각 방법을 적용한 슬라이싱 결과와 연속된 두 레이어 간 비교 시 나타나는 특징을 정리하였다. Fig. 2를 통하여 안티앨리어싱이 적용되어 경계가 불명확한 이미지와 루프로 표현되어 경계가 명확한 이미지를 비교할 수 있다.

CPU 기반 슬라이싱 결과로 얻어진 레이어의 비교 방법에 대한 주요 특징은 다음과 같다.

- 1) 벡터 연산을 기반으로 하여 이미지 처리가 불필요하다.
- 2) 픽셀 기반이 아니므로 해상도에 독립적이다.
- 3) 해상도의 영향을 받지 않아 XY 간격에 관계없이 정확한 섬 탐지가 가능하다.
- 4) 안티앨리어싱(Anti-aliasing) 적용 이전 단계에서 단면의 루프 분석이 가능하다.
- 5) 슬라이스 후 얻어지는 루프로부터 얻어진 정보는 단면 형상 편집이 용이하다.
- 6) 구조물의 영향 범위를 정밀하게 계산할 수 있다.
- 7) 지지대 생성 후 재검사가 용이하며, 지지대의 문제점도 예측 가능하다.
- 8) 출력물 이형 과정에서 가해지는 응력 분석에 유리하다.
- 9) 모든 삼각형을 모든 단면과 계산을 직접 해야 하는 단점이 있다.

반면, GPU 기반 슬라이싱 결과로 얻어진 레이어의 비교 방법에 대한 특징은 다음과 같다:

- 1) 벡터 데이터의 픽셀화 후 슬라이싱을 수행한다.
- 2) GPU 슬라이싱 후 단면 비교 분석은 이미지의 Vector화

작업이 필요하여 추가적인 연산 시간이 소요된다.

- 3) 안티앨리어싱 적용된 이미지 비교 분석의 기준이 모호해질 수 있다.
- 4) 지지대 생성 후 재검사 과정에서 슬라이싱이 요구된다.
- 5) 픽셀 간격보다 작은 섬은 탐지가 불가능할 수 있다.
- 6) 모델 방향 변경 시마다 GPU 슬라이싱을 재수행해야 한다.

CPU를 이용한 벡터 기반 슬라이싱은 출력 영역의 루프 정보만을 처리하므로 연산량이 상대적으로 적다. 반면, 이미지 기반 슬라이싱은 출력 면적 전체의 픽셀을 처리해야 하므로 불필요한 연산이 포함될 수 있다.

기존에는 CPU 기반 슬라이싱이 병렬 연산 적용이 어려워 처리 시간이 길다는 인식이 지배적이었다. 그러나 최신 컴퓨터의 연산 능력 향상으로 이러한 제약이 크게 완화되었다. 특히 다중 모델 출력을 준비하는 경우에도, 섬 구조 탐색 시 개별적으로 지지대 생성 단계에서 분석하므로 처리해야 할 데이터양은 크지 않다. 따라서 전체 처리 시간에 미치는 영향은 미미하다.

최종 출력용 안티앨리어싱 이미지 생성 단계에서만 GPU를 활용함으로써, 전체 출력 준비 과정의 효율성을 크게 높일 수 있다. 이는 CPU와 GPU의 장점을 적절히 조합하여 전체 프로세스의 성능을 최적화하는 접근 방식이다.

본 연구에서는 모든 단면에서 출력물의 형상이 하나로 합쳐지기 전과 후의 모든 루프를 활용하여 분석해야 하므로, CPU 기반 슬라이싱이 더 적합하다고 판단하였다.

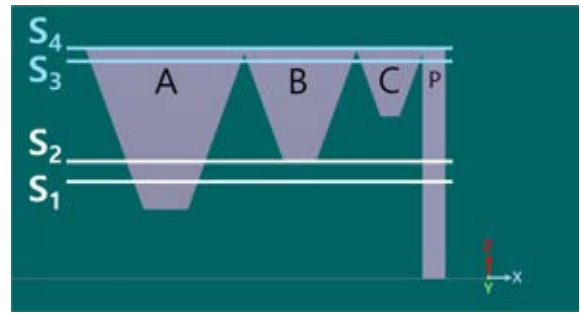


Fig. 3 A simplified model for island formation. A, B, C (square frustrum) and P(rectangular prism) represent part of a continuous landmass with three emergent island peaks

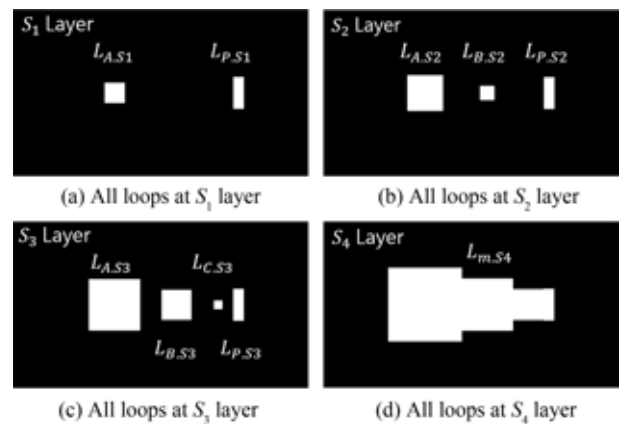


Fig. 4  $S_2$  layer exhibits the emergence of island loop( $L_{B,S2}$ ).  $S_4$  layer features merged shape( $L_{m,S4}$ ), incorporating shape P

### 3. 필수 지지대 위치 탐색 알고리즘

#### 3.1 탐색 알고리즘 준비

알고리즘 작동 원리를 설명하기 위해 Fig. 3과 같이 단순한 모형을 준비하였다. 상단 부분이 이어져 단일 부피 요소이지만 편의상 A, B, C, P로 부분을 나누어 설명하고자 한다. A, B, C는 단면이 정사각형인 사각뿔대이고 P는 직육면체 형상 기둥이고 출력이 시작되는 바닥에 위치하고 있다.

$S_{n-1}$  단면에는 없던 형상이 어디에도 연결되지 않은 상태로  $S_n$  단면에 나타나는 영역을 섬, 영어로는 Island 또는 Free-floating Area라고 불린다.

B의 단면 형상이 처음 나타나기 직전 높이의 평면을  $S_1$ , B의 단면 형상이 처음 나타나는 높이의 평면  $S_2$ 로 한다. 모든 형상 A, B, C가 바닥부터 올라온 P 형상과 한 몸이 되는 높이의 평면을  $S_4$ , 그 직전 평면을  $S_3$ 로 한다.

Fig. 4는 각 평면의 단면이며 각 형상의 루프와 관련 루프의 기호를 그림과 같이 정의한다. 오른손 법칙에 따라 법선 방향 기준으로 루프의 안과 밖이 구분되지만 본문에서 흰색을 루프 안쪽으로 정의한다.

#### 3.2 탐색 알고리즘

특정 평면에서 형상이 나타났을 경우 이 부분이 섬인지 아닌지

판별하는 알고리즘은 Fig. 5와 같다. 각 항은 Clipper 라이브러리를 통해 루프 간의 불리언(Boolean) 연산을 통해 얻어진 결과이다.

탐색하고자 하는 형상이 준비되면 판별하고자 하는 형상에 알고리즘을 적용한다.

먼저 평면  $S_2$ 에서 형상 A의 단면 형상의 섬 여부를 판별하는 방법이다. 평면  $S_2$ 에서 형상 A에 해당하는 루프(Fig. 6(a))에서 평면  $S_1$ 에 있는 모든 형상의 루프(Fig. 6(b))와 겹치는 부분을 제거한 영역을 구하면  $RL_{A,S2}$ (Residual Loop, Fig. 6(c)) 영역이 남게 된다. 다시 평면  $S_2$ 에서 형상 A 루프(Fig. 6(a))에서  $RL_{A,S2}$ (Fig. 6(c))와 겹치는 영역을 제거한다. 이때 남아 있는 영역(Fig. 6(d),  $SR$  : Sustained Residual)이 존재한다면 이 영역과 연속적으로 연결되어 있는 상태를 의미한다. 출력 중인 몸체의 지지를 받고 있으므로 섬이 아닌 영역이다.

$$L_{A,S2} - L_{T,S1} = RL_{A,S2}, L_{A,S2} - RL_{A,S2} = SR$$

다음은 평면  $S_2$ 에서 B의 단면 형상의 섬 여부를 판별하는 방법이다.

$$L_{B,S2} - L_{T,S1} = RL_{B,S2}, L_{B,S2} - RL_{B,S2} = NR$$

위와 동일한 방법으로 마지막에  $RL_{B,S2}$ (Fig. 7(c))과 겹치는

```

Algorithm : Island Detection Algorithm in Layered Planes
Input:  $L_{(l,S_n)}$ : Loop of shape  $l$  in plane  $S_n$ , where:
    ·  $l$  is one of the shapes: A, B, C, or P.
    ·  $S_n$  represents the  $n^{th}$  plane, where  $n = 1, 2, \dots, n$ .
    ·  $L_{(T,S_n)}$ : Loops of all shapes in plane  $S_n$ .
    ·  $RL_{(l,S_n)}$ : Residual Loop of shape  $l$  in plane  $S_n$ .
Output: Boolean value indicating whether each shape  $l$  is an island in plane  $S_n$ 
foreach Shape  $l$  in plane  $S_n$  do
    Step 1: Calculate Residual Loop;
     $RL_{(l,S_n)} \leftarrow L_{(l,S_n)} - L_{(T,S_{n-1})}$  // Remove intersections with shapes in plane  $S_{(n-1)}$ 
    Step 2: Calculate Remaining Area;
     $Result \leftarrow L_{(l,S_n)} - RL_{(l,S_n)}$ ;
    Step 3: Determine Island Status;
    if  $Result$  has remaining parts then
        Shape  $l$  is not an island;
    else
        Shape  $l$  is an island;
        while Shape  $l$  remains an island in previous layers do
            Move to next layer  $S_{n+1}$ ;
            Repeat Steps 1 and 2 for Shape  $l$ ;
            if  $Result$  has remaining parts then
                Shape  $l$  is not an island anymore;
                break loop;
    
```

Fig. 5 Algorithm for detection of island

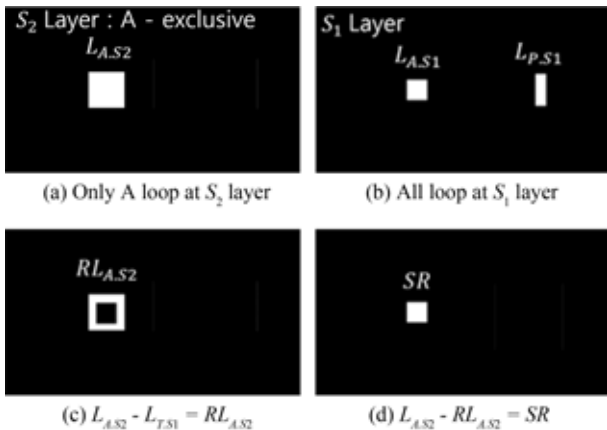


Fig. 6 Example to explain that cross section of the shape A is not an island at plane  $S_2$

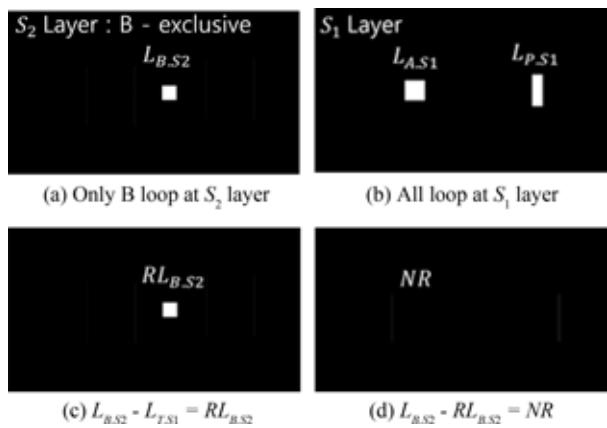


Fig. 7 Example to explain that cross section of the shape B is an island at plane  $S_2$

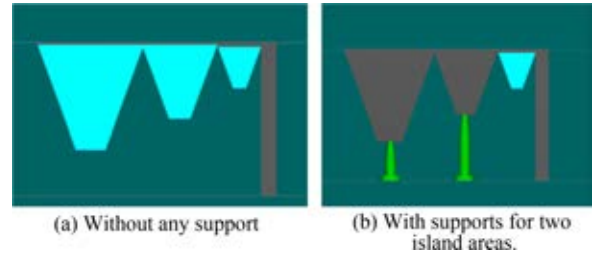


Fig. 8 Visualization of unsupported regions

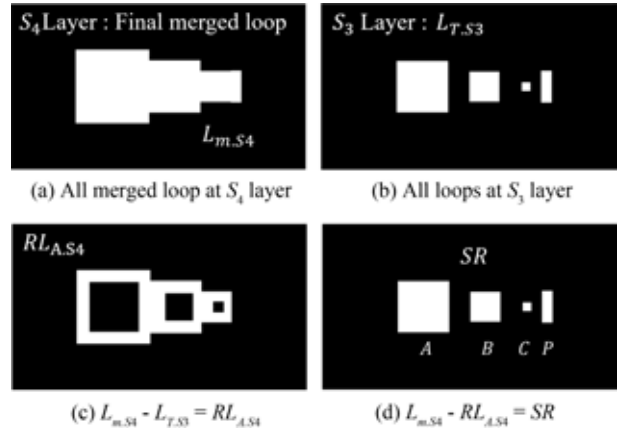


Fig. 9 Example to explain that cross section of the merged shape ( $L_{m,S4}$ ) is not an island anymore since plane  $S_4$

영역을 제거하였을 때 아무것도 남지 않으면(Fig. 7(d), NR : Null Residual) 평면  $S_2$ 에서 형상 B는 어느 몸체에도 연결되지 않고 처음 나타난 영역을 의미한다. 이는 섬을 의미하며 필수적으로 지지대가 생성되어야 할 위치이다. 처음으로 섬으로 판별이 되면 파란색으로 표시하게 되고, 다른 섬이 아닌 영역과 만나 섬이 아니라는 결과가 나올 때까지 반복하게 된다.

실제 출력의 경우 A, B, C 모형 위 알고리즘으로 연산하게 되면 모두 Island 형상으로 인식되며 최종적으로 바닥과 연결된 P 형상과 만나는 높이까지 Island로 Fig. 8과 같이 하늘색으로 표시하게 된다.

모든 형상이 만나 섬이었던 영역이 더 이상 섬 영역이 아니게 되는 높이의 평면을  $S_4$ 로 지정하고 섬영역이 끝나게 되는 상황에 대해 설명하고자 한다.

$L_{m,S4}$ 는 모든 형상이 합쳐진 루프를 의미하며 편의상 A, B, C, P로 구분 지었던 루프의 경계가 하나의 루프(Fig. 9(a))로 된다.  $S_3$ 까지 섬이었던 A, B, C 형상이 평면  $S_4$ 에도 동일 위치에 있는 루프  $L_{m,S4}$ 와 단면 형상이 이어지게 된다. 이어진  $L_{m,S4}$ 의 섬 판별 연산 결과 SR (Fig. 9(d))의 잔여 형상이 존재하게 되며 섬이 아닌 영역으로 바뀌게 된다. 만약 이 잔여 영역이 계속 섬이었던 형상과 이어진 영역이었다면 섬 판별 알고리즘은 반복되며 여전히 하늘색 영역이 된다. 하지만 이 잔여 형상 SR (Fig. 9(d))은 바닥으로부터 이어져 올라온, 섬이 아니었던 형상 P와 연결되었기 때문에 판별 알고리즘은 완료된다.

본 알고리즘은 이미지 비교가 아닌 루프의 X, Y 값 연산을



통해 모든 섬 구조의 위치를 누락 없이 식별할 수 있다. 다만, 출력 장비의 적층 레이어 두께와 사용 재료의 특성을 고려하여, 실제 출력 결과에 유의미한 영향을 미치지 않는 미세 영역은 연산에서 제외할 수 있다. 단면 루프 이미지들은 개념의 시각적 이해를 돕기 위해 이미지로 표현되었으나, 본 알고리즘은 Clipper 라이브러리를 통해 슬라이스 된 루프의 X, Y 위치를 이용한 연산이다.

4. 실험

4.1 실험 장비

본 실험에 사용한 슬라이서 프로그램은 논문 저자가 직접 해당 알고리즘을 적용해서 개발한 ‘SMART SLICER’를 사용하였다. 작동 PC는 Intel Core i7-9700K CPU, RAM 32 GB를 사용하였다. 분석 단면 간격은 장비 출력 높이인 0.025 mm로 하였다. 출력은 광경화수지를 재료로 사용하는 에이치텍(HTEC)의 LCD 기반 MSLA 장비를 사용하였다. 출력 재료는 캐스터블 레진을 사용하였다. 3D 프린터 관련하여 널리 사용되는 스탠포드 모델들의 섬 영역 탐색을 진행하였다.

4.2 섬 영역 찾기

네 가지 스탠포드 모델의 높이, 삼각형 개수를 다양하게 하여 섬 탐색을 진행해 보았다. 높이와 삼각형 개수에 비례하여 탐색 시간이 증가하는 것을 확인하였다. 탐색 시간은 PC RAM 메모리 상태와 기타 프로그램 실행 상황의 영향으로 일정하지 않아 5번의 평균 시간을 기록하였다.

Fig. 10과 같이 섬 영역은 최초로 나타나는 단면에서 진한 파란색으로 표현되고 섬이 끝나는 높이까지 하늘색으로 표현되도록 하였다. 단면 간 넓이 변화를 시각적으로 파악하여 오버행의 정도를 판별할 수 있는 장점이 있다.

또한 모형의 크기가 증가함에 따라 탐색 단면의 두께 보다 높아진 섬 위치를 정확하게 찾아낸 것을 확인할 수 있었다. 작은 모형 Fig. 10(e)에서는 무시 가능할 영역이었지만 부피가 커짐에 따라 Fig. 10(f)는 지지대가 필요한 형상으로 판단하였다.

‘Chitu Box’라는 타사 프로그램(GPU Base)과 섬 탐지 성능을 비교해보았다. Fig. 11에서 ‘Chitu Box’는 섬영역을 진한 분홍색으로 표시하였으며, 법선 벡터와 Z축과의 각도가 45°가 넘는 표면 삼각형들은 빨간색으로 표시되었다. GPU Base 방식은 정확하게 필수 서포터가 들어가야 하는 부분을 보여주는 것이 아니고 대략적인 Overhang과 각도 조건에 근거해서 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있다.

4.3 출력 결과

실험 결과 출력 실패 없이 성공적으로 출력물을 얻을 수 있었다. 후처리 공정인 출력 플레이트에서 분리할 때와 잔여 레진 세척 과정에서 출력된 서포터가 변형이 생길 수 있다.

Table 1 Model height, triangles and island detection time

Model	Height (mm)	Triangles	Time (sec)
Armadillo	37.84	345,944	14.8
		172,972	11.1
	63.56	345,944	22.2
		172,972	22.1
Dragon	36.87	318,460	14.9
		159,230	13.3
	67.92	318,460	26.5
		159,230	23.8
Lucy	36.73	701,939	15.5
		350,697	12.7
	67.08	701,939	26.6
		350,697	25.2
Bunny	36.68	112,402	10.5
		56,201	10.4
	67.97	112,402	20.3
		56,201	20.1

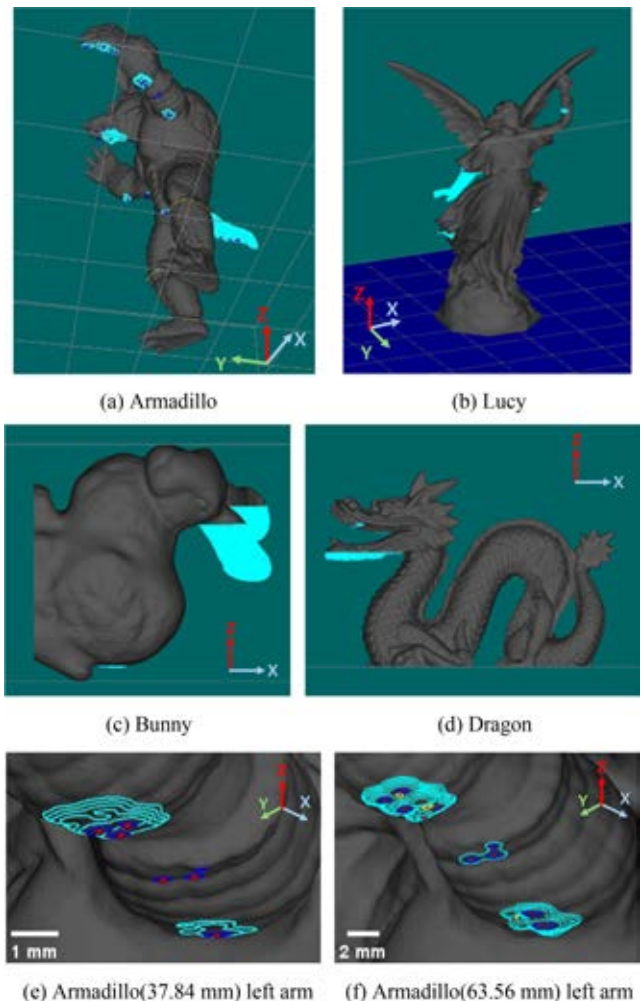


Fig. 10 Four stanford models and their differences beyond size

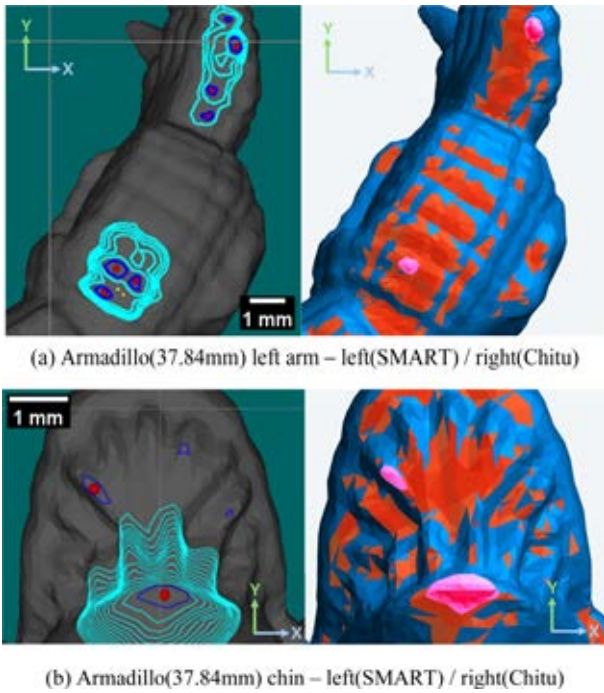


Fig. 11 Comparison between CPU and GPU methods in island detection

표시된 필수 위치에 지지대 생성 후 재탐색 과정을 통해 누락된 섬이 없는지 확인하였다. 이 과정에서 잘못 생성된 지지대가 섬이 될 경우도 파악이 가능하다. Figs. 12(a) 및 12(c)와 같이 놓친 섬은 없는 것으로 확인되었다.

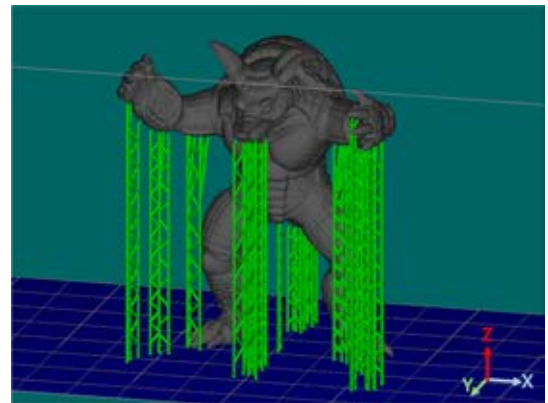
5. 결론

본 연구에서는 3D 프린터 출력 준비 과정의 핵심인 지지대 생성 위치 선정에 있어, 가장 중요한 요소인 섬 영역을 효과적으로 탐지하기 위한 CPU 기반 루프 탐색 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 효용성은 실제 출력을 통해 검증되었다.

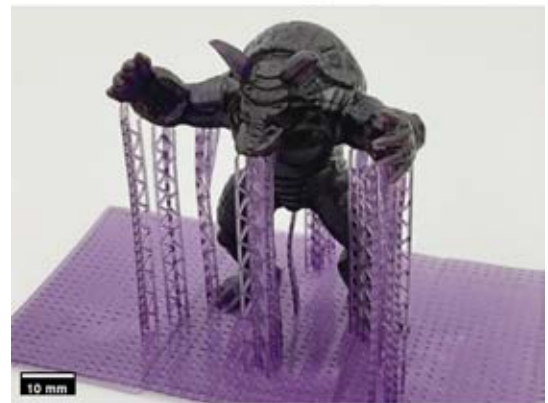
기존에 시간 소모적이라고 여겨졌던 연속된 두 단면 비교 방식을 개선하여, 이미지가 아닌 슬라이스 된 루프의 X, Y 좌표 비교 연산을 통해 신속하고 효율적인 결과를 얻을 수 있었다. 이는 지지대 생성 후 검토를 위한 반복적인 탐색에도 효과적인 것으로 나타났다.

현재 제안한 방법은 섬 영역만을 식별하며 오버행에 관한 정보는 제공하지 못하는 한계가 있다. 3D 프린팅에서 장비 특성과 재료 속성을 고려한 최적화된 자동 지지대 생성을 위해서는 오버행 영역의 정확한 탐지가 포함되어야 한다. 이를 위해 연속된 단면 간 루프 변화를 분석하는 후속 연구가 요구된다.

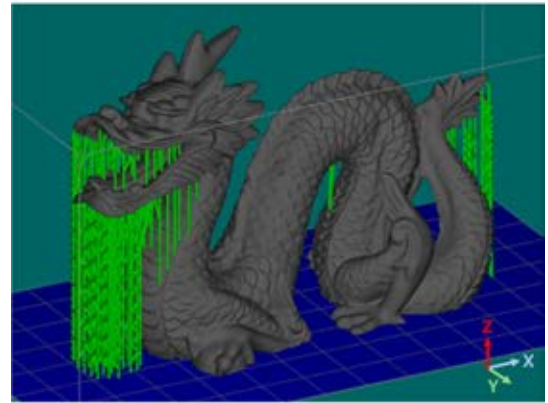
연속된 단면 간의 루프 형상과 면적의 변화를 정량적으로 분석하여 급격한 변화에 발생하는 문제점과 이에 대한 보완 방안을 마련하고자 한다. 또한 분석하는 레이어의 두께와 사용되는



(a) Armadillo with supporter generated



(b) Armadillo with supporters



(c) Dragon with supporter generated



(d) Dragon with supporters

Fig. 12 Results of armadillo and dragon 3D printing

재료의 특성을 손쉽게 반영하여 할 수 있도록 추가적인 변수들 간의 연관성에 대해 연구하고자 한다.

결론적으로, 본 연구에서 제안한 알고리즘은 3D 프린팅의 성공률을 높이는 데 기여할 것으로 기대되며, 향후 오버행 탐지 기능을 추가함으로써 더욱 완성도 높은 자동 지지대 생성 시스템으로 발전할 수 있을 것이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Kawalkar, R., Dubey, H. K., Lokhande, S. P., (2022), A review for advancements in standardization for additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, 50, 1983-1990.
2. Momeni, F., Mehdi Hassani, N. S., Liu, X., Ni, J., (2017), A review of 4D printing, *Materials & Design*, 122, 42-79.
3. Ministries, J., (2015), Policy to implement manufacturing innovation 3.0 strategy, 7th meeting to promote trade and investment in Korea.
4. Park, J.-M., (2015), Technology and issue on embodiment of smart factory in small-medium manufacturing business, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 40(12), 2491-2502.
5. Lee, I. H., Kim, H. C., Ahn, D. K., (2020), Korean terminologies for additive manufacturing according to the ISO/ASTM 52900 standard, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(12), 929-936.
6. Hur, J., Lee, K., (1996), Efficient algorithm for automatic support structure generation in layered manufacturing, *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 97621, V006T06A058.
7. Jiang, J., Xu, X., Stringer, J., (2018), Support structures for additive manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 64.
8. Hu, J., (2017), Study on STL-based slicing process for 3D printing, *Proceedings of the 28<sup>th</sup> Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
9. Vanek, J., Galicia, J. A. G., Benes, B., (2014), Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication, *Computer graphics forum*, 33(5), 117-125.
10. Chen, Y., Li, K., Qian, X., (2013), Direct geometry processing for telefabrication, *Journal of computing and information science in engineering*, 13(4), 041002.
11. Jang, S., Moon, B., Lee, K., (2020), Free-floating support structure generation, *Computer-Aided Design*, 128, 102908.
12. Wang, Z., Zhang, Y., Tan, S., Ding, L., Bernard, A., (2021), Support point determination for support structure design in additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 47, 102341.
13. Zhang, X., Xiong, G., Shen, Z., Zhao, Y., Guo, C., Dong, X., (2017), A GPU-based parallel slicer for 3D printing, *13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 55-60.
14. Huang, P., Wang, C. C., Chen, Y., (2013), Algorithms for layered manufacturing in image space, *Advances in Computers and Information in Engineering Research*, 1.



**Young Seok Kang**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is additive manufacturing and device design.

E-mail: ehfy2k@gmail.com



**Yeun Seop Kim**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Turbine engineering.

E-mail: dbstjq0408@gmail.com



**Seung Chae Na**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is biomimetics.

E-mail: theo2002@naver.com



**Sang Jo Han**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest includes heat and mass transfer, thermal process design, gas turbines, and organic Rankine cycle systems.

E-mail: sjhan@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 심사위원에 의해 진행되며 심사 및 게재여부 판정 절차는 논문심사규정에 따른다.

### 제8조 (저작권)

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

### 제9조 (자료공개)

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

### 제10조 (원고작성요령)

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

### 제11조(게재료)

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

## 논문집필요령

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

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제1조 (목적)

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

## 제2조 (투고 및 접수)

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

## 제3조 (심사위원 선정)

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

## 제4조 (심사 방법)

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

## 제5조 (심사 기간)

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

## 제6조 (저자수정기한)

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

## 제7조 (게재 판정)

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

## 제8조 (특집논문심사)

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

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제9조 (비밀유지)

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

## 제10조 (이의제기)

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

## 제11조 (심사료)

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



# (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

## 제 1 장 총칙

### 제1조 (목적)

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

### 제2조 (윤리규정 적용범위)

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

### 제3조 (부정행위의 범위)

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

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

## 제 2 장 저자

### 제4조 (저자의 정직성)

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

### 제5조 (저자의 기준)

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

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

### 제6조 (저자의 준수사항)

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

## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

### 제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

#### 제7조 (편집위원 준수사항)

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

#### 제8조 (심사위원 준수사항)

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

### 제 4 장 검증 절차와 기준

#### 제9조 (윤리위원회)

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

#### 제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

### 제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

### 제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

### 제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

### 제14조 (피조사자 권리 보호)

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

### 제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

### 제16조 (조사결과의 보고)

- ① 위원회는 조사의 결과와 내용을 조사의 종료 및 판정 후, 접수일 기준 6개월 경과 이전에 심의 내용을 확정하여 이사회에 보고한다.
- ② 결과보고서에는 다음 각 호의 사항이 반드시 포함되어야 한다.
  1. 제보의 내용
  2. 조사의 대상이 된 부정행위
  3. 조사위원회의 조사위원 명단
  4. 해당 연구에서의 피조사자의 역할과 부정행위의 사실 여부
  5. 관련 증거 및 증인
  6. 제보자와 피조사자의 이의제기 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](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

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

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

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

### KSPE Young Researcher Award

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

## 특별상

### 가헌학술상

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

### 현승공학상

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

### 유정백합학술상

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

### 백암논문상

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

## Year of Launching

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

## Aims and Scope

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

## Fee

### Subscription Fee:

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

### Publication Fee:

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

## Contact Us

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

# Rules for Submitting and Publishing Papers

## Article 1 Purpose

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

## Article 2 Submitter

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

## Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

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

## Article 4 Scope of Research

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

## Article 5 Categorization of Submissions

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

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

## Article 6 Submission

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

## Article 7 Review and Decision to Publish Paper

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

## Article 8 Copyright

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

## Article 9 Disclosure of Materials

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

## Article 10 Manual of Style

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

## Article 11 Publication Fees

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



## Guidelines for Manuscript Writing

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

## Author's Check List

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

# Rules for Reviewing Papers

## Article 1 Purpose

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

## Article 2 Submission and Reception

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

## Article 3 Selection of Reviewers

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

## Article 4 Review Procedure

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

## Article 5 Review Period

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

## Article 6 Deadline for Author's Revision

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

# Rules for Reviewing Papers

## **Article 7 Decision over Publication**

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

## **Article 8 Review of Special Papers**

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

## **Article 9 Confidentiality**

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

## **Article 10 Objection**

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

## **Article 11 Review Fee**

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

# Code of Ethics for Academic Activities

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

## Chapter 1 Overall Rules

### Article 1 Purpose

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

### Article 2 Application Area of Code of Ethics

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

### Article 3 Scope of Misconduct

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

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

## Chapter 2 Author

### Article 4 Honesty of Author

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

### Article 5 Authorship

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

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

# Code of Ethics for Academic Activities

## Article 6 Compliance of Authors

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

## Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

### Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

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

### Article 8 Compliance of Reviewers

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

## Code of Ethics for Academic Activities

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

### Chapter 4 Verification Process and Standard

#### Article 9 Ethics Committee

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

#### Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

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

#### Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

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

#### Article 12 Reporting Research Misconduct

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

# Code of Ethics for Academic Activities

## **Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions**

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

## **Article 14 Protection of Rights of Examinee**

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

## **Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation**

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

## **Article 16 Report of Investigation Result**

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

# Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

<b>Title</b>	<b>Korean</b>
	<b>English</b>
<b>Authors</b>	

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 1 · January 2025

## REGULAR PAPERS

- A Low-Cost Laser Welding Monitoring Framework Based on Depth-Wise Separable Convolution with Photoelectric Signals**  
W. Cheng · Y. Zhang · X. Gao · J.K. Pocorni · X. Jiang 1
- Study of Bacterial Culture on Zirconia and Alumina Surfaces Through Laser Surface Treatment**  
S. Yoon · J. Kim 17
- Enhancing Mechanical Performance of Friction Stir Welded AZ31 Magnesium Alloy with Nano-TiC Reinforcements Using Grey Relational Analysis**  
K. Sabari · A. Muniappan · B. Deepanraj · M.J.S. Mohamed 27
- Machinability Performance of Single Coated and Multicoated Carbide Tools During Turning Ti6Al4V Alloy**  
A. Ali · M. Younas · M. Khan · S.H.I. Jaffery · Z. Khan 43
- Novel Direct Digital Interface of Frequency-Modulated Eddy-Current Displacement Sensor (ECDS) for Real-Time Control of AMB**  
N.V. Vo · H.-J. Ahn 59
- Equivalent Error Based Modelling for Prediction and Analysis of Measuring Accuracy in 3-Axis FXYZ Coordinate Measuring Machines from Position, Repeatability and Reversibility Errors**  
J. Jodar · P. Franco 67
- Axial Offset Error Modeling of Big-Plus Bottle Grip Taper Tool Holder Using Natural Neighbor Interpolation on Spindle Speed Domain**  
H.-G. Cho · S.-J. Kim 81
- A Fault-Diagnosis Algorithm-Embedded Controller Design for Hydraulic Solenoid Valves in Industrial Applications**  
S. Yoo · J.H. Jung · J.-K. Lee · S.W. Shin · D.S. Jang 95
- Separation of All Motion Errors in a Rotary Motor Using Dual Rotary Encoders**  
T.-H. Hsieh · M.-X. Lin · T. Watanabe 117
- Dynamic Analysis of Vertical Magnetic Suspension System Rotor Dropping to Protective Bearing with Different Structural Parameters**  
D. Zhu · X. Pang · D. Wang · M. Qiu · D. Liu · Y. Dong · B. Xu 133
- Influence of Multiple Post Weld Repairs on Mechanical and Microstructural Properties of Butt Weld Joint Utilized in Structural Members**  
A. Shazad · M. Uzair · M. Tufail 157

- Finite Element Analysis of Roll Forming using Roll Flowers with Different Bending Shapes**  
Y. Chung · H. Son · I.H. Lee · D. Kim 165
- Enhancing CNC Turning Efficiency of Aluminium 7071 Alloy Using Taguchi Method and L<sub>27</sub> Array**  
D. Sudarsan · A.B.H. Bejathin · S. Rajkumar 177
- Piecewise Modification of Cycloidal Gear in RV Reducer: Application of Spline Interpolation Theory and Comparison with a Combination Modification Optimization Method**  
S. Gao · Y. Zhang · Y. Li · S. Ji · T. Wei · Z. Wang 195
- A Dual-Parallel Chamber Electromagnetic Micropump Fabricated Using 3D Printing Method from a Novel Magnetic Nanocomposite Material**  
M. Tahmasebipour · S. Ebrahimi · M. Dehghan · F. Anousheh 209
- Formation of Multiscale Porous Surfaces via Evaporation-Induced Aggregation of Imprinted Nanowires with Highly Viscous Photocurable Materials**  
M.S. Kim · S. Shin · W.Y. Kim · S.H. Lee · S.R. Park · S. Kim · Y.T. Cho 217
- EMG and Usability Assessment of Adjustable Stiffness Passive Waist-Assist Exoskeletons for Construction Workers**  
J.S. Kang · B.R. Jeong · E.-P. Hong · B.M. Lim · B.J. Choi · Y.B. Lee · Y.H. Chang 227

## REVIEW

- Prediction of Microstructure and Mechanical Properties of Ultrasonically Treated PLA Materials Using Convolutional Neural Networks**  
J.-H. Park · S.-H. Kim · J.-Y. Park · S.-G. Kim · Y.-J. Lee · J.-H. Kim 239

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

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

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

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 12 · Number 1 · January 2025

## REGULAR PAPERS

### Energy Consumption and Tool Condition in Friction Stir Processing of Aluminum Alloys

A.T. Silvestri · A. El Hassanin · G. de Alteriis · A. Astarita 1

### Data-driven Discrete Simulation-based Dynamic Modeling and Continuous Optimization for Comprehensive Carbon Efficiency of Batch Hobbing

Q. Yi · C. Hu · C. Li · Y. Luo · S. Yi · J. Zhuo 19

### Surface Integrity of Binderless WC Using Dry Electrical Discharge Assisted Grinding

Y. Lu · X. Mou · H. Xiao · K. Li · C. Wang 43

### Facile Fabrication of Highly Flexible and Sensitive Strain Sensors Based on UV-laser-reduced Graphene Oxide with CuO Nanoparticles for Human Health Monitoring

J.-U. Lee · B.-S. Kang · S.-C. Cho · B.-S. Shin · P.C. Lee 61

### High Efficiency Preparation of Microdrill Edge by Shear Thickening Polishing

Y. Zhou · J. Zhang · X. Shao · Y. Dai · J. Wang · B. Lyu 75

### Guideline to Assess Geometrical Intolerance of Thin-Walled Blanks After Burnishing Process

R. Teimouri 97

### Marine Waste Management of Oyster Shell Waste as Reinforcement for Clay Additive Manufacturing Components

Y.S. Romario · C. Bhat · M. Ramezani · C.-P. Jiang 117

### Utilizing Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Technology to Fabricate Parts with Controlled Porosity and Permeability Characteristics for Filtration Applications

S. Haiati · K. Dotchev · M. Lowther 135

### Performance Evaluation of Cutting Fluids Formulated with Recycled Toner Waste and Rice Bran Oil in Sustainable Machining of LMD Processed Ti64 Alloy

N.S. Ross · P.M. Mashinini · D. Vinayagamorthy · R. Rai · V. Sivaraman · B.J. Ananth · D.S. Kumar · M.K. Gupta 151

### Digital Light Processing Followed by Pressureless Sintering of Metal-Reinforced Ceramics: Adjustment of Process Parameters and Correlation with Composites Properties

J. Tanska · A. Wieclaw-Midor · J. Misiukiewicz · P. Falkowski · J. Zyguntowicz · W. Bulejak · P. Wieceńska 169

### Customized, In Situ Functionalized Electrospun Nanofiber Filter via All-in-One Printing Combining 3D Printing and Electrospinning

J.Y. Song · M.J. Kim · D.Y. Kim · B. Kim · S.M. Park 193

### Green Evaluation on Material Deformation Energy of Mechanical-Compressed Shear Rheology in Micro Hot-Embossing

L. Li · M. Hu · X. He · J. Xie 207

### New Numerical Approach to Determine the Optimum Mixing Ratio of Electrode Materials for Maximum Li-ion Battery Performance by the Hierarchical Homogenization and Feedforward Neural Networks

B. Seo · C. Kim 227

### Enhancing Five-Axis Machine Tool Performance Through ESG-Based Design Optimization

A. Ullah · T.-C. Chan · S.-L. Chang 245

### Conductive rGO/PEGDA Hydrogel for Controllable Drug Release

C.M.B. Ho · K. Hu · Y.-J. Yoon 263

## REVIEWS

### Additive Manufacturing of Sensors: A Comprehensive Review

M.J. Hossain · B.T. Tabatabaei · M. Kiki · J.-W. Choi 277

### Advances in Prognostics and Health Management for Aircraft Landing Gear—Progress, Challenges, and Future Possibilities

I. Raouf · P. Kumar · Y. Cheon · M. Tanveer · S.-H. Jo · H.S. Kim 301

### Design and Fabrication of Nature-Inspired Surfaces for Anti-Fouling: A Review

J.B. Yang · H. Lee · D.R. Kim 321

**Fabrication Strategies for 2D Halide Perovskite  
Towards Next-Generation Optoelectronic Applications**

S.H. Cho · Y. Jung · Y.-W. Jang · H. Kim · J. Kim ·  
C. Lim · K.-T. Park · S. Kim · Y.H. Chu · T. Kim · J. Lee ·  
C. Lee · J. Park · K.T. Yoon · D. Eom · S. Park · T. Kim ·  
Y.S. Lee **349**

**The Abrasion Robotic Solutions: A review**

H. Kim · H. Jin · C. Moon · S. Kim · T. Kim · T. Seo **381**

(JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang

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

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

**Abstracted/Indexed** in *Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, EI Compendex, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency*

# 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