

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 5

MAY 2023

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim

Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

Jihwan An
POSTECH

Baeksuk Chu
Kumoh National Institute of Technology

Won-Shik Chu
Gyeongsang National University

Doo-Man Chun
University of Ulsan

Koo Hyun Chung
University of Ulsan

Duhwan Mun
Korea University

Jihong Hwang
Seoul National University of Science & Technology

Young Hun Jeong
Kyungpook National University

Jonghan Jin
Korea Research Institute of Standards & Science

Dong Sung Kim
POSTECH

Ho-Chan Kim
Andong National University

Yang Jin Kim
Pusan National University

Seung Hwan Ko
Seoul National University

Moonkyu Kwak
Kyungpook National University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Changwoo Lee
Konkuk University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Hyunseop Lee
Dong-A University

In Hwan Lee
Chungbuk National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Sang-Hu Park
Pusan National University

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Members of Editorial Board

Jangho Bae
Kyungsung University

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Young-Man Choi
Ajou University

Young-Kug Hwang
Chosun College of Science & Technology

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Jayil Jeong
Kookmin University

Maolin Jin
Korea Institute of Robot & Convergence

Beomjoon Kim
The University of Tokyo

Chang-Ju Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

Gap-Yong Kim
Iowa State University

Jae-Yeol Kim
Chosun University

Kee Joo Kim
Tongmyong University

Woo Kyun Kim
University of Cincinnati

Patrick Kwon
Michigan State University

Bong-Kee Lee
Chonnam National University

Jongkil Lee
Andong National University

Kwang-II Lee
Kyungil University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

June Park
Korea Photonics Technology Institute

Jungjae Park
Korea Research Institute of Standards & Science

Jung Whan Park
Yeungnam University

Simon Park
University of Calgary

Yong Son
Korea Institute of Industrial Technology

Chul Ki Song
Gyeongsang National University

Ki-Sik Tae
Konyang University

Duck Hyun Wang
Kyungnam University

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

Sung Ho Yoon
Kumoh National Institute of Technology

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 5 / May 2023

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

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

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

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

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

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

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

Published on May 1, 2023 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Seok-Woo Lee (President, KSPE)

Managing Editor Bo Hyun Kim

Manuscript Editor Su-Hyun Kang

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

Printed by Hanrimwon Co., Ltd.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

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

목차

특 집 주제: 제조 지능화-제조현장에 도입되는 디지털전환기술
책임편집인 : 이동윤(한국생산기술연구원)

- 345 고장 데이터 부재 및 부족 상황에서의 딥러닝 기반 기계시스템의 고장진단 방법론
전용재, 최영운, 이상원
- 353 고장진단을 위한 영구자석형 동기모터 유한요소 모델 개발
이현승, 손세호, 정다연, 오기용, 전병찬, 선경호
- 361 에나멜 동선 피막 제거를 위한 가공부하 기반 연삭가공공정 적응제어기술
최성진, 오준영, 김진서, 이상경, 이원균
- 367 고속 금속 3D프린터용 적응형 5축 경로생성 CAM S/W 개발에 관한 연구
이성근, 김현철
- 373 절삭가공의 디지털 전환을 위한 디지털 쓰레드
이훈희, 이동윤

일 반

- 383 소형 드론을 위한 주파수 영역 식별과 모델 기반 외란 관측기
정규환, 안형준
- 389 M.2 NVMe SSD의 신뢰성 향상을 위한 히트싱크 열 설계
김찬호, 노진성, 김중배
- 399 코일전류 계산 및 AISI 1552 상변태를 고려한 주차기어의 고주파 열처리 시뮬레이션
최진규, 이석순
- 409 PCAS 공정으로 제조된 WC-5wt.%TiC 소결체의 극저온처리 효과
이정환, 박범순, 박현국, 박재철
- 415 그리퍼 내에서 물체의 위치를 인지하기 위한 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서 개발
김진, 김갑순

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 5 / May 2023

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

CONTENTS

SPECIAL Title: Manufacturing Intelligence–Digital Transformation for Manufacturing

Guest Editor: Dong Yoon Lee (Korea Institute of Industrial Technology)

- 345 Methods for Fault Diagnosis in Mechanical Systems based on Deep Learning in the Absence or Class Imbalance of Fault Data
Yongjae Jeon, Young Woon Choi, and Sang Won Lee
- 353 A Study on the Finite Element Model of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Fault Diagnosis
Hyunseung Lee, Seho Son, Dayeon Jeong, Ki-Yong Oh, Byeong Chan Jeon, and Kyung Ho Sun
- 361 Adaptive Control of Grinding Process based on Grinding Force for Removing the Coating from an Enameled Copper Wire
Sung-Jin Choi, Jun-Young Oh, Jin-Seo Kim, Sang-Kyung Lee, and Wonkyun Lee
- 367 A Study on the Development of Adaptive 5-axis Path Generation CAM S/W for High Speed Metal 3D Printer
Sung Gun Lee and Hyun Chul Kim
- 373 Digital Thread for Machining Process
Hoon Hee Lee and Dong Yoon Lee

REGULAR

- 383 Frequency Domain Identification and Model-based Disturbance Observer for a Mini Drone
Kyu-Hwan Chung and Hyeong-Joon Ahn
- 389 Thermal Design of Heatsink for M.2 NVMe SSD Reliability
Chan Ho Kim, Jinsung Rho, and Joong Bae Kim
- 399 High-frequency Heat Treatment Simulation of Park Gear considering Coil Current Calculation and AISI 1552 Phase Transformation
Jin Kyu Choi and Seok Soon Lee
- 409 Study of Cryogenic Treatment Effects on WC-5wt.%TiC Compact Fabricated by PCAS
Jeong Han Lee, Bum Soon Park, Hyun Kuk Park, and Jae-Cheol Park
- 415 Development of 5-axis Force/Moment Sensor of Gripper to Recognize the Position of an Object within the Gripper
Jin Kim and Gab-Soon Kim

책임편집인
이동윤
한국생산기술연구원



제조 지능화-제조현장에 도입되는 디지털전환기술

Manufacturing Intelligence-Digital Transformation for Manufacturing

- (1) 고장 데이터 부재 및 부족 상황에서의 딥러닝 기반 기계시스템의 고장진단 방법론
- (2) 고장진단을 위한 영구자석형 동기모터 유한요소 모델 개발
- (3) 에나멜 동선 피막 제거를 위한 가공부하 기반 연삭가공공정 적응제어기술
- (4) 고속 금속 3D프린터용 적응형 5축 경로생성 CAM S/W 개발에 관한 연구
- (5) 절삭가공의 디지털 전환을 위한 디지털 쓰레드

디지털전환은 디지털기술을 적용해서 제품, 서비스 및 운영방식을 디지털화하는 것을 말하며, 궁극적인 목적은 가치를 높이는 것이다. 세상의 모든 것이 디지털전환의 대상이 될 수 있으며, 이는 제조현장도 예외가 아니다. 그러나, 제조현장은 새로 소개되는 다양한 기술로 혼돈에 빠져 있다고 볼 수 있다. 4차 산업 혁명이라는 새로운 패러다임이 제조현장을 당장이라도 바꿀 듯했고, 늦으면 도태될지도 모른다는 위기 의식에 제조현장은 정보통신관련 기술들을 앞다투어 도입하기 시작했다. 사물인터넷(IoT)과 디지털트윈(Digital Twin) 등의 용어가 너무나 일상적으로 사용되고 있으나, 아직 대부분의 제조현장은 정보를 수집해서 보관하는 수준에서 벗어나지 못하는 것도 사실이다. 제조현장에서 수집된 정보를 분석하여 제조현장을 개선, 즉 가치를 높이기 위해서는 지능화 기술이 필요하다. 본 특집논문은 ‘제조 지능화’라는 주제로 다양한 제조현장에 도입되고 있는 디지털전환기술을 소개하고 있다.

제조현장의 다양성만큼이나 다양한 분야의 논문을 특집논문으로 구성하였다. 제조현장 어디를 막론하고 고장진단에 대한 관심이 높은 상황에서 최근 활용도가 높아지는 인공지능을 적용하려는 움직임이 잦아지고 있다. 그러나, 학습을 위해 필요한 고장관련한 데이터는 현장에 존재하지 않고, 있더라도 정상데이터에 비해 비교할 수 없을 정도로 양이 적다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고장데이터를 직간접적으로 생성하는 연구가 소개되었다. 연삭과 3D프린팅 분야에서 제조현장에서 수집되는 정보를 이용하여 공정을 제어하는 연구가 소개되었다. 디지털기술이 제조현장에 적용되면서 상당한 정보가 축적되기 시작했는데, 데이터의 발생 시점과 활용 시점간 차이 및 발생자와 활용자간 관점의 차이로 인해 데이터간 관계가 적절하게 정의되지 못하여 결과적으로 데이터의 활용도를 높이지 못하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 디지털 쓰레드라는 개념을 절삭가공에 도입하여 설계 데이터에서 검사데이터까지 상호 참조되어 조회할 수 있는 프레임워크에 대한 연구도 소개되었다.

디지털전환의 목적이 가치를 높이는 것임을 고려할 때 제조 지능화는 제조현장에서 거스를 수 없는 흐름이다. 제조공정의 다양성과 제조현장의 복잡성을 고려해 보면 제조 지능화는 끝이 보이지 않는 길을 계속 걷는 것과 유사해 보이지만, 중간중간 분명히 개선되는 점을 확인할 수 있다. 본 특집논문의 발간 이전에도 관련해서 많은 논문이 출간되었으며, 앞으로도 상당 기간 동안 발표될 것으로 예상된다. 디지털정보를 이용해서 제조 지능화를 모색해 본 최근의 대표적인 연구사례를 모아서 소개하는 본 특집논문이 한국정밀공학회 회원에게 디지털전환과 관련한 다양한 시각을 제공할 수 있기를 바란다. 끝으로, 특집논문 발간에 도움을 주신 스마트생산시스템부문의 이상원 전 부회장님과 좋은 내용으로 논문을 준비해 주신 저자분께 감사드립니다.

• 특집 • 제조 지능화-제조현장에 도입되는 디지털전환기술

고장 데이터 부재 및 부족 상황에서의 딥러닝 기반 기계시스템의 고장진단 방법론

Methods for Fault Diagnosis in Mechanical Systems based on Deep Learning in the Absence or Class Imbalance of Fault Data

전용재¹, 최영운¹, 이상원^{2,#}
Yongjae Jeon¹, Young Woon Choi¹, and Sang Won Lee^{2,#}

¹ 성균관대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Sungkyunkwan University)
² 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
Corresponding Author / E-mail: sangwonl@skku.edu, TEL: +82-31-290-7467
ORCID: 0000-0002-6352-5635

KEYWORDS: Class imbalance (클래스 불균형), Anomaly detection (이상탐지), Industrial data generation (산업 데이터 생성), Auto-encoder (오토인코더), Generative adversarial network (적대적 생성 신경망)

Deep learning-based fault diagnosis systems for prognostics and health management of mechanical systems is an active research topic. Notably, the absence and class imbalance of fault data (insufficient fault data compared to normal data) have been shown to cause many challenges in developing fault diagnosis systems for the manufacturing fields. Therefore, this paper presents case studies using deep learning algorithms in the absence or class imbalance of fault data. Auto-encoder-based anomaly detection method, which can be used when fault data is absent, was applied to diagnose faults in a robotic spot welding process. The anomaly detection threshold was set based on the reconstruction error of trained normal data and the confidence level of the distribution of normal data. The anomaly detection performance of the auto-encoder was verified using non-trained normal data and three sets of fault data through the threshold. As a case study for insufficient fault data, synthetic data was generated based on cGAN and applied to diagnose fault of bearing. Using the imbalanced dataset to generate synthetic fault data and to reduce the imbalance ratio, it was confirmed that the accuracy of the synthetic data generation-based 2DCNN fault diagnosis model was improved.

Manuscript received: March 13, 2023 / Revised: April 4, 2023 / Accepted: April 4, 2023

1. 서론

인공지능 알고리즘의 빠른 발전에 따라, 산업 현장의 유지보수 및 건전성 관리를 목적으로 기계시스템과 그 내부의 다양한 기계요소들의 고장을 진단하기 위해 센서 데이터와 딥러닝 기반의 방법론을 결합하여 적용하는 연구가 활발히 수행되고 있다. 신뢰성이 높은 딥러닝 알고리즘 기반의 고장진단 모델을 구축하기 위해서는, 대량의 정상 상태의 데이터뿐만 아니라 고장

상태의 데이터 또한 요구된다.

그러나 대부분의 산업 현장에서는 생산 공정의 다운타임 유발을 방지하기 위해서, 고장이 발생한 부품을 즉시 교체하거나 고장이 발생하기 전에 유지보수를 수행한다. 따라서 산업 현장에서는 고장 상태의 데이터가 존재하지 않거나, 정상 데이터에 비해 매우 적게 존재(클래스 불균형)한다. 따라서 최근에는 위와 같은 고장 데이터 부재 및 부족 문제의 해결을 위한 방법론이 제시되고 있다.

고장 데이터가 부재할 경우에는 정상 데이터의 패턴과 유사하지 않은 이상치를 고장으로 분류하는 이상탐지 알고리즘 방법론이 적용된다. 이 알고리즘은 크게 머신러닝 알고리즘(OCSVM, Isolation Forest 등)과 딥러닝 알고리즘(Auto-encoder 등)을 이용한 방법으로 나뉘어 있다.

머신러닝 알고리즘 기반 방법 중 OCSVM (One-Class SVM)은 커널을 이용해 고차원에 데이터를 매핑하여 클래스 간 거리가 최대가 되는 경계를 통해 데이터를 분류하는 SVM 방식을 하나의 클래스에 적용한 방법이다. 정상 데이터에 대한 분포를 경계로 설정한 후 경계 안의 데이터는 정상으로 판별하지만 경계 밖의 데이터는 이상으로 판별한다. Schölkopf 등에 의해서 이상탐지를 위한 OCSVM을 처음 제안되었고, Martí 등은 OCSVM을 석유 산업에 적용하여 센서에서 수집된 시계열 데이터를 통해 터보 기계의 이상을 탐지하였다[1,2]. 다만 OCSVM의 경우 학습 시간이 많이 필요하다는 단점이 있어 최근에는 학습 시간을 줄이기 위한 방법론이 제시되고 있다. 또다른 방법 중 하나인 Isolation Forest는 다중 의사결정나무 구조를 가지는 앙상블 기법으로 입력된 데이터가 가까운 깊이에서 고립되면 고장으로 판별하며 먼 깊이에서 고립되면 정상으로 판별하는 방법이다. 이 알고리즘은 Liu 등에 의해 처음 제안되어 적은 학습 시간에도 좋은 성능을 보였으며, Jahan 등은 이를 입자, 온도 및 습도 데이터와 함께 반도체 산업의 클린룸 환경 이상탐지에 적용하였다[3,4].

반면 Auto-encoder는 인공 신경망 구조를 이용해 원본 데이터를 복원하는 딥러닝 알고리즘으로 새로 입력된 데이터의 복원오차가 학습 데이터에 대한 복원오차의 분포 외에 있을 때 고장으로 판별하여 이상탐지에 적용할 수 있는 방법이다. 이는 Sakurada 등에 의해 처음 제안되었으며, 최근에는 다양한 신경망 구조와 결합되어 여러 분야에 활용되고 있다[5]. Malhotra 등은 Auto-encoder 구조에 시계열 특성을 학습할 수 있는 LSTM Layer를 결합하여 다양한 센서에 대한 이상탐지 성능을 확인하였으며, Tayeh 등은 Convolutional LSTM Layer를 결합하여 CNC 밀링 톨 마모 데이터에 적용하여 이상탐지 성능을 검증하였다[6,7].

정상 데이터에 비해 고장 데이터가 적을 경우에는 실제 고장 데이터와 유사한 가상 데이터를 생성하여 불균형의 정도를 낮추는 방법이 주로 적용된다. 가상 데이터를 생성하는 방법은 크게 실제 데이터의 분포를 기반으로 데이터를 생성하는 방법(Synthetic Minority Oversampling Technique, SMOTE), 딥러닝 알고리즘을 활용하여 데이터를 생성하는 방법(Generative Adversarial Networks, GAN)으로 나뉜다.

SMOTE는 최근접 이웃 알고리즘을 이용해 데이터 군집 내에서 임의의 샘플을 추출하는 Oversampling 방법론이다. SMOTE는 새로운 샘플을 생성하는 과정에서 실제 데이터와 양상이 다른 노이즈 샘플을 생성할 수 있다는 문제점이 있어, 이를 극복하는 방법에 관한 연구가 수행되고 있다. Li 등은 샘플 간 거리 지표를 이용하여 클래스 간 분류에 용이한 샘플을 생성하는 SDSMOTE 알고리즘을 제안하였다[8]. Wei 등은 다중 클래스

불균형 데이터의 분류 문제를 해결하기 위하여, 다중 이진 불균형 분류 문제로 변환하고 데이터를 생성하는 SCOTE 알고리즘을 제시하였다[9].

반면 딥러닝 기반 데이터 생성 모델을 이용하여 불균형 문제를 해결하는 연구도 다수 수행되었다. Zareapoor 등은 불균형 데이터셋의 균형을 복원하기 위해 혼합 데이터 분포를 기반으로 클래스별 데이터 생성이 가능한 MoGAN 모델을 제안하였다[10]. Ali-Gombe 등은 ACGAN을 변형하여, 소수 클래스 데이터 생성에 초점을 맞춘 MFC-GAN을 제시하였다[11].

위와 같이 고장 데이터의 부재 혹은 부족 상황에 활용할 수 있는 딥러닝 알고리즘은 꾸준히 발전되었고, 최근 산업 현장에서 이를 통해 문제를 해결하려는 연구가 수행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 기계시스템의 고장 데이터 부재 및 부족한 상황에서 활용 가능한 딥러닝 기반 알고리즘을 소개하고, 각 알고리즘을 적용한 연구 사례를 제시한다.

2. 기계시스템 고장 데이터 부재 및 부족 상황의 딥러닝 기반 해결 방법

고장 데이터가 부재한 경우, 정상 데이터만이 존재하여 고장의 특성을 미리 딥러닝 모델이 학습하지 못한 상태이므로 진단이 어렵다. 한편 고장 데이터가 부족한 경우, 그 수가 정상 데이터에 비해 현저히 적은 상태로, 딥러닝 모델이 정상 데이터만을 편향적으로 학습하여 신뢰성이 저하된다.

2.1 고장 데이터 부재: Auto-encoder 기반 이상탐지

Auto-encoder는 입력 데이터의 차원을 축소하는 Encoder 신경망과 축소된 차원에서 입력 데이터로 복원하는 Decoder 신경망을 갖는다. 두 신경망은 데이터의 특징이 보존된 Latent Space로 연결되어 있으며 Encoder에 의해 축소된 차원에서 Decoder에 의해 원본 데이터를 복원시키는 것을 목표로 한다. 이러한 Auto-encoder는 2006년에 Hinton 등에 의해 데이터 차원 축소 방법에 사용될 수 있음이 확인되었고, 2014년에는 Kingma 등이 확률적 모델과 결합한 Variational Auto-encoder 구조를 제안하여 데이터 생성 등 분야에 활용되기 시작하였다[12,13]. 또한 2014년에는 Sakurada에 의해 이상탐지 분야에도 활용할 수 있음이 확인되었다.

Auto-encoder 기반 이상탐지는 일반적으로 정상 데이터만을 학습하여 해당 데이터에 대한 복원오차를 통해 Threshold를 결정하고 해당 Threshold 내의 데이터를 정상으로 판별하고 그 외의 데이터는 고장으로 판별한다. 본 연구에서는 학습된 정상 데이터 복원오차의 신뢰구간을 기반으로 Threshold를 선정하여 이상탐지에 사용하였다.

2.2 고장 데이터 부족: GAN 기반 데이터 생성

GAN은 두 개의 개별적인 네트워크(생성자와 구분자)를 적대적

으로 학습시키는 비지도 학습 기반 생성 모델로, 생성자는 구분자가 구별하지 못하도록 가짜 데이터를 생성하고 구분자는 실제와 가짜 데이터를 최대한 잘 구분하도록 학습한다. GAN은 Goodfellow가 2014년에 최초로 제시한 이후 지속적으로 발전되었다[14]. Radford 등은 GAN 구조의 모든 연산 과정을 Convolution Layer로 대체하여, GAN의 수렴 난이도를 대폭 낮춘 DCGAN (Deep Convolutional GAN)을 제시했다[15]. 또한 이들은 생성자의 입력으로 사용되는 Latent Space를 통해 생성된 데이터의 구체적인 정보를 추론할 수 있다는 점을 제시하였다. Gauthier는 GAN 구조에 데이터의 속성(레이블)을 함께 학습시켜 각 속성에 해당하는 데이터를 생성할 수 있도록 구조를 설계한 cGAN (Conditional GAN)을 제시하였다[16]. 위와 같은 다양한 GAN을 기반으로 특정 상태의 데이터 생성이 가능하므로, 고장 데이터가 정상 데이터에 비해 부족한 상황에서 활용될 수 있다. 많은 양의 정상 데이터를 이용하여 데이터의 패턴을 학습시키고, 적은 양의 고장 데이터를 같이 학습시켜 고장 데이터를 생성하는 방식으로 이용된다.

GAN의 경우, 데이터 생성이 주된 목적이므로, 모델의 정량적인 평가가 제한적이다. 따라서 정성적으로 연구자가 직접 생성된 데이터를 평가하거나, 학습된 분류기를 이용하여 분류 정확도를 측정한다.

3. 딥러닝 기반 기계시스템 고장진단 사례 연구

3.1 고장 데이터 부재 연구사례: Auto-encoder 기반 RSW 공정 이상탐지

로봇 스폿 용접(Robotic Spot Welding, RSW) 공정은 자동차 생산에서의 핵심 자동화 대량 생산 공정으로 차량 한 대당 수천 회의 용접이 수행되고 있다. 하지만 로봇 스폿 용접 공정에서 사용되는 로봇과 용접건에는 다양한 고장모드 등이 존재하며, 해당 고장모드들은 용접 너جت 소형화를 발생시킨다. 이는 스폿 용접의 가장 치명적인 결함으로 용접 접합력을 감소시켜 차체의 품질이 저하되기 때문에 이를 관리하는 시스템이 필요하다. 다만 이와 같은 고장모드들은 발생 빈도가 높지 않고, 발생 시 즉각 조치를 취하기 때문에 고장 데이터를 수집하기 어렵다.

본 사례 연구에서는 고장 데이터가 없을 경우에 적용할 수 있는 Auto-encoder 기반 이상탐지를 통해 정상 데이터만을 학습하여 다양한 고장모드들을 탐지할 수 있는 방법을 제시한다. 로봇 스폿 용접 모니터링 테스트베드를 이용하여 정상과 로봇 스폿 용접 주요 고장모드인 전극 비정렬, 전극 팁 마모 및 무효분류 실험 조건에서 용접을 진행하면서 센서 데이터를 수집하였다. 이 중 대부분의 정상 데이터는 Auto-encoder의 학습에 사용하고, 정상 학습 데이터의 복원오차를 기반으로 Threshold를 변화시키며 학습에 사용되지 않은 정상과 고장 데이터에 대한 검증 성능을 비교하였다.

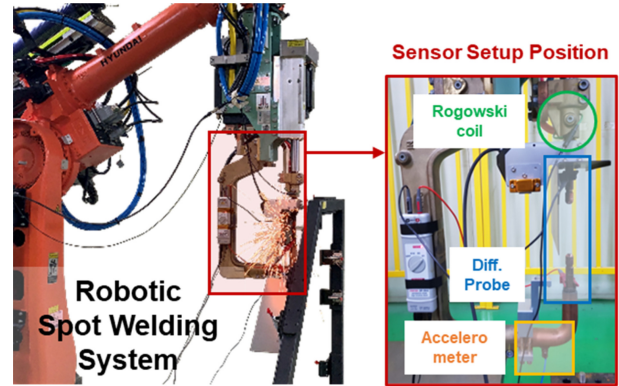


Fig. 1 Robotic spot welding monitoring system

Table 1 Information on failure mode

Failure mode	Description
Angular misalignment	5° between specimen and electrode tip
Electrode tip wear	Tip area $\geq 19 \text{ mm}^2$
Shunting effect	109 mm welding space

Table 2 Spot welding parameter settings

Welding current [kA]	5.5
Electrode force [kgf]	150
Welding time [sec]	0.2167 (13 cycles)
Holding time [sec]	0.25 (15 cycles)

3.1.1 실험 및 데이터 수집 조건

로봇 스폿 용접 테스트베드는 산업용 6축 로봇(HS-180, 현대로보틱스)과 AC-servo 모터 기반 용접건(c-type, OBARA)을 이용하여 구축되었다. 또한 전압 프로브(DP-30HS, PINTEK), 로고스키 코일(CWT-M-60R, PEM) 및 가속도 센서(353B03, PCB Piezotronics)를 Fig. 1과 같이 용접건에 부착하여 전압, 전류 및 가속도 센서 신호를 통해 공정 상태를 모니터링할 수 있는 시스템을 구축하였다. 센서로부터 측정된 아날로그 신호는 데이터 수집 장치(NI 9232, National Instrument)를 통해 디지털 신호로 변환되어 PC에서 수집된다.

위 모니터링 테스트베드를 이용하여 정상과 전극 비정렬, 전극 팁 마모 및 무효분류 실험 조건에서 용접을 수행하면서 센서 데이터를 수집하였다. 정상 조건에서는 300개의 데이터를 수집하였고 고장 조건에서는 각 50개의 데이터를 수집하였다. 고장에 대한 정보는 Table 1과 같다.

용접 조건은 Table 2와 같으며, 데이터는 용접 시 전류가 인가되는 0.2167초 동안의 세 센서를 통해 1.28 kHz로 수집되었다. 따라서, 각 데이터는(2774, 3)의 배열로 구성된 데이터로 Fig. 2와 같이 수집되었다.

3.1.2 이상탐지 모델 구축

본 사례 연구에서 이상탐지에 사용된 Auto-encoder의 Encoder와

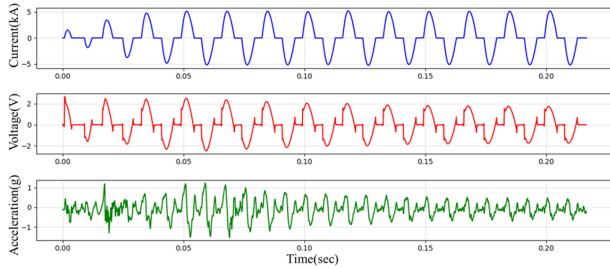


Fig. 2 Spot welding sensor data

Table 3 Architecture and hyperparameters of the Auto-encoder

	Encoder	Decoder
First layer	1D conv.	1D conv. transposed for all layers
Second layer	Max pooling	
Third layer	1D conv.	
Fourth layer	Max pooling	
Fifth layer	1D conv.	
Num. of filters	32, 128, 512	512, 128, 64, 32, 3
Num. of kernel size	3 for all layers	4, 3, 5, 3, 5
Num. of strides	3 for all layers	
Activation function	ReLU for all layers, Sigmoid for Decoder's last layer	
Epochs	1,000	
Batch size	32	
Optimizer	Adam (Learning rate = 0.001)	
Loss function	Mean Absolute Error (MAE)	

Table 4 Z-score and threshold for each confidence level

Confidence level	Z-score	Threshold
0.9	1.65	$\mu + \sigma \times 1.65$
0.95	1.96	$\mu + \sigma \times 1.96$
0.99	2.56	$\mu + \sigma \times 2.56$

Decoder는 1D Convolution Layer로 구성되었다. Encoder에서는 3개의 Convolution Layer와 2개의 Max Pooling Layer를 통해 입력 데이터의 특성을 보존하며 데이터의 차원을 축소시킨다. 차원이 축소된 데이터는 Decoder에서 5개의 Transposed Convolution Layer를 거쳐 원본 데이터와 유사하게 차원이 복원된다. 위 설명과 같이 설계된 Auto-encoder의 구조 및 하이퍼파라미터는 Table 3과 같다.

학습에는 정상 데이터 250개를 사용하였으며 학습 후에는 해당 데이터를 복원한 후 복원오차를 통해 Threshold를 결정하였다. 복원오차는 Loss 함수와 동일한 Mean Absolute Error로 계산하였고 해당 결과를 기반으로 Table 4에서의 정규분포 신뢰수준에 따른 Z-Score에 의거하여 0.9, 0.95, 0.99에 해당하는 Threshold 값을 얻었다. 해당 Threshold 기준을 학습 데이터에 적용한 정확도는 96.8,

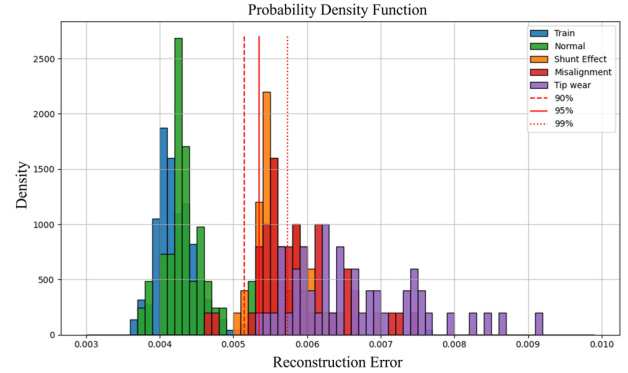


Fig. 3 Histogram of reconstruction and thresholds

Table 5 Accuracy of the anomaly detection model

Failure mode	Threshold (Confidence level)		
	0.9	0.95	0.99
Normal [%]	92	96	98
Misalignment [%]	96	94	34
Electrode tip wear [%]	96	94	48
Shunt effect [%]	100	98	86
Average [%]	96	95.5	66.5

98.4, 98.8%를 달성하여 0.9와 0.95 Threshold는 이론적 기준을 넘어섰고, 0.99는 이론적 기준과 매우 가깝게 달성한 것을 확인하였다. 결과적으로 이 세 가지 Threshold를 통하여 검증 데이터의 정확도를 비교하여 Threshold별 이상탐지 정확도를 평가하였다.

3.1.3 이상탐지 결과

이상탐지 모델의 검증 데이터는 학습에 사용되지 않은 정상과 고장 데이터 각 50개를 이용하였다. 학습된 Auto-encoder 모델에 검증 데이터를 입력하여 복원된 결과와 복원오차를 계산하여 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. 해당 복원오차와 Threshold를 비교하여 정확도를 산출하였고 정상과 각 고장의 데이터에 대한 개별 정확도를 Table 5와 같이 평균하여 산출하였다.

정상 데이터는 Threshold 값이 커질수록 정확도가 높아지는 반면 고장 데이터에 대해서는 정확도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Trade-off 관계로 정상을 포함하는 신뢰도가 커질수록 일부 고장 데이터에 대해서도 정상으로 포함할 수 있기 때문에 발생하는 현상이다. Threshold별 평균 정확도를 확인했을 때 0.9가 96%로 가장 높았고 두번째로는 0.95로 95.5%의 정확도를 확인하였다. 하지만 0.99의 경우에는 정상 데이터는 98% 정확도로 이론적 기준과 근접하지만 고장에 대해서는 낮은 정확도를 보여 평균 66.5%의 정확도를 확인하였다. 따라서 Auto-encoder 기반 차원축소 및 복원 모델과 학습 데이터 복원 오차의 0.9, 0.95 신뢰구간을 통해 정상과 고장에 대한 높은 정확도를 갖는 이상탐지 모델을 얻을 수 있었다.

3.2 고장 데이터 부족 연구사례: cGAN 기반 베어링 진동 Spectrogram 데이터 생성

베어링은 대다수 기계시스템에 포함되어 운동을 원활하게 수행할 수 있도록 하는 핵심 기계요소이다. 이 중 구름 베어링의 고장은 스핀들 등의 정밀한 회전운동을 요하는 기계시스템의 성능 악화를 유발한다. 또한 정상 구동 시의 진동과 다른 진동이 발생하여 전반적인 기계요소의 결함 발생의 원인이 되므로, 회전기계 내부의 베어링은 그 상태를 지속적으로 진단할 필요가 있다. 그러나 서론과 같이 실제 산업 현장에서는 고장이 발생한 베어링이 즉시 교체되기 때문에 고장 데이터를 얻기 어려운 문제가 존재한다.

따라서 본 사례 연구에서는 고장 데이터가 적은 상황에서 cGAN을 이용한 고장진단 문제의 해결 방법을 제시한다. 스핀들 등의 회전기계의 내부와 유사한 베어링 시뮬레이터를 이용하여 정상 및 4종의 고장(볼, 케이지, 외륜, 내륜) 상태의 베어링 회전에 따른 진동 데이터를 수집하고, 정상 대비 고장 데이터의 수를 적게 수집하여 클래스 불균형 데이터셋을 구축하였다. 클래스 불균형 데이터셋을 학습한 합성곱 신경망 기반 고장진단 모델과, cGAN 기반으로 생성된 고장 데이터를 실제 데이터와 통합하여 학습한 모델의 분류 성능을 비교하였다.

3.2.1 데이터 수집 및 전처리 과정

베어링 시뮬레이터는 Fig. 4 좌측의 모터가 축을 일정 속도 (20,00 RPM)로 회전시키며 공작기계의 동작을 모사하도록 설계되었다. Fig. 4 우측과 같이 각 고장 상태별 베어링(6204)을 설치하고 진동 데이터를 수집할 수 있도록 가속도계(353B03, PCB Piezotronics)를 수직 및 수평 방향으로 설치하였다. 센서는 PC에서 시계열 데이터를 수집할 수 있도록 데이터 수집 장비 (NI 9232, National Instruments)에 연결되었다.

위와 같은 시뮬레이터를 이용하여, 정상 및 4종의 고장 상태별 베어링의 진동 데이터를 수집하여 클래스 불균형 데이터셋을 구축하였다. 고장 상태별 데이터 수는 정상 데이터의 5%만큼 수집하였다. 데이터셋의 상태별 데이터 개수 및 고장 종류에 따른 결함은 Table 6과 같다.

개별 시계열 데이터는(60000, 2)의 배열로, 정보량이 많아 GAN 기반 시계열 데이터 생성 시 크고 복잡한 구조가 필요하다. 이를 방지하기 위해, 시계열 데이터의 정보량 감소 및 주파수 영역의 정보 유지를 위한 STFT (Short Time Fourier Transform) 기반 전처리 과정이 적용되어 이미지로 변환되었다. 전처리 과정의 예시는 Fig. 5와 같다. 수직 및 수평 방향 시계열 데이터의 Spectrogram을 각각 다른 색의 Green, Blue 채널로 변환, 픽셀 값 95% 분위수 기준 정규화, Red 채널은 모두 0으로 입력, 64 × 64 정사각형 형태로 Resizing. 베어링의 고장 주파수 및 회전속도 조건을 고려한 STFT의 설정은 Table 7에 표시하였다[18].

위와 같은 STFT 기반 전처리가 모든 데이터에 적용되어 이미지 데이터셋이 구축되었으며, Conditional GAN을 기반으로 베어링의 고장 상태별 이미지를 생성 가능한 모델이 구축되었다.

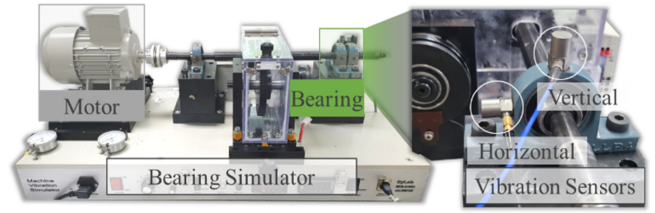


Fig. 4 Bearing simulator and sensor attachment [17] (Adapted from Ref. 17 on the basis of OA)

Table 6 Configuration of class imbalance dataset

Fault mode	Number of data	Damage type
Normal	500	None
Ball	25	1-line scratch
Cage	25	Crack
Outer	25	2-line scratch
Inner	25	2-line scratch

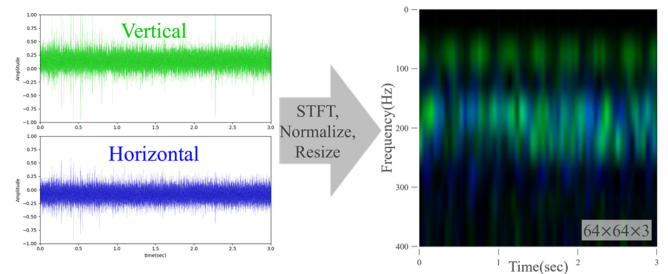


Fig. 5 STFT-based preprocessing (Applied to normal data)

Table 7 Parameter settings for STFT

Window size	400
Overlap size	80
Frequency range [Hz]	1-400

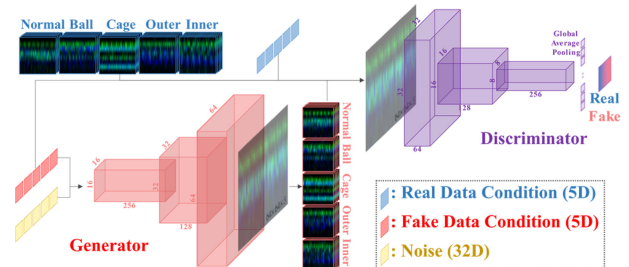


Fig. 6 Architecture of the cGAN model

3.2.2 데이터 생성 모델 구축

cGAN은 GAN과 기본적인 구조는 동일하지만, 생성자에 데이터의 Condition을 추가로 학습하여 상태별 데이터를 생성할 수 있다. Fig. 6과 같이, 베어링의 상태별 데이터 생성이 가능하도록

Table 8 Architecture and hyperparameters of the cGAN model

Generator		Discriminator
Conv. layer	Strided transposed conv.	Strided conv.
Pooling	Not used	
Activation function	Leaky ReLU ($\alpha = 0.2$) for all conv. layers, Sigmoid for discriminator's last layer	
Stride	2, 2	
Kernel	3, 3	
Epochs	1,000	
Batch size	100	
Optimizer	Adam (Learning rate = 0.0002)	

Table 9 Configuration of augmented class imbalance dataset

Fault mode	Number of real data	Number of fake data
Normal	500	None
Ball	25	75
Cage	25	75
Outer	25	75
Inner	25	75

cGAN 모델의 구조를 설계하였다. 생성자는 상태 별 레이블 및 Latent Space를 이용하여 실제와 유사한 데이터를 생성하도록, 구별자는 실제 데이터와 생성자가 생성한 데이터 및 상태별 레이블을 통해 실제와 생성 데이터를 구별하도록 학습되었다.

cGAN 모델의 구조 및 하이퍼파라미터는 Table 8과 같다. 안정적인 학습이 가능한 DCGAN의 아키텍처 중 일부가 적용되었다.

3.2.3 데이터 생성 결과

학습된 cGAN 모델을 이용하여, 4종의 고장 종류마다 75개씩의 데이터를 생성하여 증강된 클래스 불균형 데이터셋을 구축하였다. 데이터셋의 구성은 Table 9와 같이, 정상 및 각 고장별 클래스 불균형 비율을 5%에서 20%로 증가시켰다.

이후 동일한 구조의 CNN 기반 고장진단 모델을 Fig. 7과 같이 설계하고, Table 6 (2DCNN)과 Table 9 (cGAN-2DCNN)의 데이터셋을 학습하였다. 두 모델은 학습 데이터를 제외하고 모두 동일한 조건(Epochs, Optimizer, Learning rate, Architecture)에서 학습되었다.

2가지 진단 모델을 상태별 실제 데이터 50개(총 250개)로 시험한 결과는 Fig. 8과 같다. 2DCNN 및 cGAN-2DCNN 진단 모델의 정확도는 각각 86.8, 99.6%로 나타났다. 특히, 2DCNN 모델에서 확인된 내륜 고장을 정상으로 진단하는 문제가 개선되었다. 결과적으로, cGAN 모델을 통해 생성한 데이터를 이용하여 클래스 불균형 상황에서의 고장 진단의 정확도를 대폭 향상시킬 수 있었다.

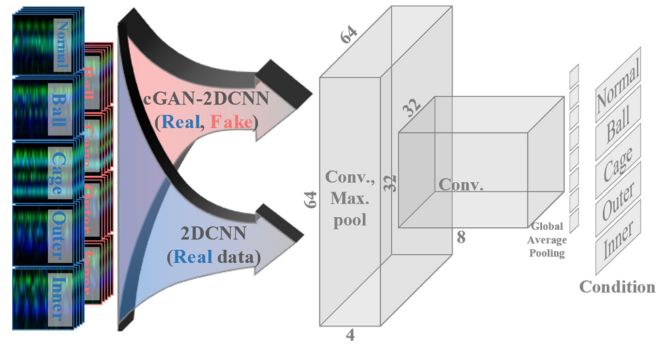


Fig. 7 Architecture of 2DCNN and cGAN-2DCNN diagnostic model

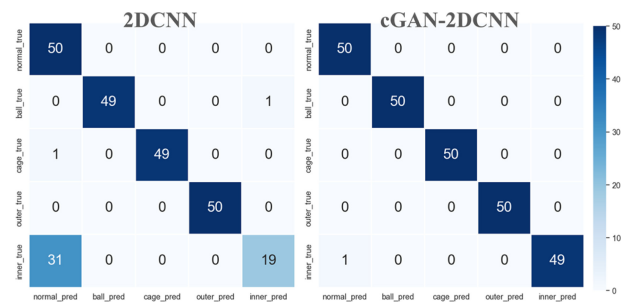


Fig. 8 Confusion matrix of 2DCNN and cGAN-2DCNN diagnostic model

4. 결론

본 연구에서는 실제 산업 현장에서 발생하는 클래스 불균형에 대한 해결방안을 제시하며 사례 연구로써 이를 검증하였다. 각 사례 연구에서는 클래스 불균형 중 산업 현장에서 주로 발생하는 고장 데이터 부재와 부족 상황에서 적용할 수 있는 딥러닝 기반 이상탐지 방법과 데이터 생성 방법의 사례 연구를 제시했다.

이상탐지 방법은 로봇 용접 공정에서의 고장 데이터 부재 시 고장진단을 위해 정상 용접 중 수집된 센서 데이터에 1D Convolutional Layer 기반의 Auto-encoder를 적용하였고, 정상 데이터의 복원오차를 기준으로 신뢰구간별 Threshold를 설정하였다. 이후 학습에 사용되지 않은 정상 데이터와 고장 데이터를 통해 이상탐지 모델의 성능을 검증하였다.

한편 고장 베어링 데이터 부족 시 베어링 고장진단을 위해 cGAN 기반 데이터 생성 방법을 적용하여 고장진단 성능의 향상을 달성하였다. 구체적으로, 시뮬레이터를 통해 수집된 정상 및 소수 고장 데이터를 STFT를 기반으로 이미지화하였다. 이를 cGAN 모델에 학습하여 가상의 고장 데이터를 생성하고 실제 및 생성 데이터를 이용하여 2DCNN 기반 고장진단 모델을 통해 데이터 생성 및 학습 시 성능이 향상되는 것을 검증하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2016년도, 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(10073196, 20012807).

REFERENCES

- Schölkopf, B., Williamson, R. C., Smola, A., Shawe-Taylor, J., Platt, J., (1999), Support vector method for novelty detection, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 12, 582-588.
- Martí, L., Sanchez-Pi, N., Molina, J. M., Garcia, A. C. B., (2015), Anomaly detection based on sensor data in petroleum industry applications, *Sensors*, 15(2), 2774-2797.
- Liu, F. T., Ting, K. M., Zhou, Z.-H., (2012), Isolation-based anomaly detection, *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*, 6(1), 1-39.
- Jahan, I., Alam, M. M., Ahmed, M. F., Jang, Y. M., (2021), Anomaly detection in semiconductor cleanroom using isolation forest, *Proceedings of the 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 795-797.
- Sakurada, M., Yairi, T., (2014), Anomaly detection using autoencoders with nonlinear dimensionality reduction, *Proceedings of the MLSDA 2014 2nd Workshop on Machine Learning for Sensory Data Analysis*, 4-11.
- Malhotra, P., Ramakrishnan, A., Anand, G., Vig, L., Agarwal, P., Shroff, G., (2016), LSTM-based encoder-decoder for multi-sensor anomaly detection, *arXiv preprint arXiv:1607.00148*.
- Tayeh, T., Aburakhia, S., Myers, R., Shami, A., (2022), An attention-based ConvLSTM autoencoder with dynamic thresholding for unsupervised anomaly detection in multivariate time series, *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 4(2), 350-370.
- Li, K., Zhang, W., Lu, Q., Fang, X., (2014), An improved SMOTE imbalanced data classification method based on support degree, *Proceedings of the 2014 International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things*, 34-38.
- Wei, J., Huang, H., Yao, L., Hu, Y., Fan, Q., Huang, D., (2020), New imbalanced fault diagnosis framework based on Cluster-MWMOTE and MFO-optimized LS-SVM using limited and complex bearing data, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 96, 103966.
- Zareapoor, M., Shamsolmoali, P., Yang, J., (2021), Oversampling adversarial network for class-imbalanced fault diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 149, 107175.
- Ali-Gombe, A., Elyan, E., (2019), MFC-GAN: Class-imbalanced dataset classification using multiple fake class generative adversarial network, *Neurocomputing*, 361, 212-221.
- Hinton, G. E., Salakhutdinov, R. R., (2006), Reducing the dimensionality of data with neural networks, *Science*, 313(5786), 504-507.
- Kingma, D. P., Welling, M., (2013), Auto-encoding variational bayes, *arXiv preprint arXiv:1312.6114*.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y., (2020), Generative adversarial networks, *Communications of the ACM*, 63(11), 139-144.
- Radford, A., Metz, L., Chintala, S., (2015), Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks, *arXiv preprint arXiv:1511.06434*.
- Gauthier, J., (2014), Conditional generative adversarial nets for convolutional face generation. <https://www.foldl.me/uploads/2015/conditional-gans-face-generation/paper.pdf>
- Lee, C. H., (2023), A study on data processing and transfer learning methods for robust bearing fault diagnosis, M.S. Thesis, Sungkyunkwan University. http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=0f18e849aaab4826ffe0bdc3ef48d419
- Fernandez A., Rolling element bearing components and failing frequencies. <https://power-mi.com/content/rolling-element-bearing-components-and-failing-frequencies>

Yongjae Jeon

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is prognostics and health management for smart manufacturing.

E-mail: rhrhgudwp@g.skku.edu



Young Woon Choi

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is prognostics and health management for smart manufacturing.

E-mail: woonathome@g.skku.edu



Sang Won Lee

Professor in the School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest include prognostics and health management (PHM), cyber-physical system (CPS), additive manufacturing, and data-driven design.

E-mail: sangwonl@skku.edu



• 특집 • 제조 지능화-제조현장에 도입되는 디지털전환기술

고장진단을 위한 영구자석형 동기모터 유한요소 모델 개발

A Study on the Finite Element Model of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Fault Diagnosis

이현승¹, 손세호¹, 정다연¹, 오기용^{1,2,#}, 전병찬³, 성경호³
Hyunseung Lee¹, Seho Son¹, Dayeon Jeong¹, Ki-Yong Oh^{1,2,#}, Byeong Chan Jeon³, and Kyung Ho Sun³

¹ 한양대학교 대학원 융합기계공학과 (Department of Mechanical Convergence Engineering, Graduate School, Hanyang University)

² 한양대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Hanyang University)

³ 한국기계연구원 시스템 다이내믹스 연구실 (Department of System Dynamics, Korea Institute of Machinery and Materials)

Corresponding Author / E-mail: kiyongoh@hanyang.ac.kr, TEL: +82-2-2220-3116

ORCID: 0000-0003-2895-4749

KEYWORDS: Permanent magnet synchronous motor (영구자석형 동기모터), Finite element method (유한요소법), Electromagnetic analysis (전자기 해석), Fault diagnosis (고장 진단)

This paper proposes a high-fidelity finite element model of a permanent synchronous motor (PMSM) to predict electromagnetic responses. The proposed method aims to generate electromagnetic responses from the PMSM under various operational conditions—including normal and faulty conditions—by coupling several partial differential equations governing the electromagnetics of a PMSM. The rotor eccentricity is considered to be a representative fault of a PMSM, which has electromagnetic characteristics that differ from the healthy state of a PMSM. Note that eccentricity is the most frequent fault during PMSM operation. Therefore, the proposed model could replicate the defected torque responses of an actual motor system. The effectiveness of the proposed model is validated using measurements from a PMSM test bench. Quantitative comparison reveals that the proposed model could replicate both the transient- and steady-state torque responses of the PMSM of interest at a variety of operational conditions, including a faulty status. The proposed model could be used to generate virtual electromagnetic responses of a PMSM, which could be used for data-driven fault detection methods of electric motor systems.

Manuscript received: February 10, 2023 / Revised: March 10, 2023 / Accepted: March 13, 2023

NOMENCLATURE

J	=	Current Density
A	=	Magnetic Vector Potential
B	=	Magnetic Flux density
σ	=	Maxwell Stress Tensor
μ	=	Magnetic Permeability
δ	=	Length of the Air Gap with Eccentric Rotor
Λ	=	Air Gap Permeance
F	=	Magento Motive Force

1. 서론

최근, 직면한 환경 문제 해결을 위해 다양한 산업 분야에서 전동화와 함께 전기 모터 사용이 빠르게 증가하고 있다. 다양한 전동기 모터 중 영구자석형 동기모터(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 높은 에너지 효율 및 출력 밀도를 갖는 장점 덕분에 전기자동차 산업을 포함한 다양한 산업분야에서 각광받고 있다. 영구자석형 동기모터에 대한 관심이 증가함에 따라 모터 출력 향상, 토크 리플 및 진동 저감 등 관련분야에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔으며[1,2], 영구자석형 동기모터 사용량이 증가함에 따라 안정성 또한 중요한 문제로 대두되고 있다.

영구자석형 동기모터는 영구 자석, 권선, 베어링과 회전체 등 다양한 부품들로 구성되어 있으며 하나의 부품에만 이상이 발생해도 전체 시스템의 정상적인 구동이 불가능하다. 따라서 모터 시스템 상태감시 및 고장진단과 관련된 연구 또한 활발하게 진행 중이다[3].

모터는 전류가 인가되어 발생하는 회전 자기장과 영구자석의 자기장의 상호 작용을 통해 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환하여 토크를 발생시킨다. 일반적으로 고장 발생 시 인가되는 전류 특성이 변화하기 때문에 전류를 감시하여 고장을 구별하는 MCSA (Motor Current Signature Analysis) 기법에 대해서 많은 연구가 수행되었다[4]. 해당 기법은 전류 데이터를 통해 쉽게 고장 감지가 가능하지만, 모터 공간 정보를 담아내지 못해 고장이 어디에 발생했는지 정확히 규명하기 어렵다. 이러한 단점 보완을 위해 모터에서 전기에너지를 기계에너지로 변환 시 발생하는 열 및 진동을 기반으로 고장을 탐지하는 기법 또한 지속적으로 연구되고 있다[5]. 하지만 이런 기계적 신호 기반 진동 신호 감시 기법은 추가 센서를 설치해야 하기 때문에 비용 증가의 단점이 존재한다.

최근 컴퓨터 연산속도 향상 및 다변량 데이터 수집 용이함이 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기반 모터 고장진단 연구를 활발하게 하였다. 구체적으로, 측정된 모터 응답을 기반으로 고장 여부를 판별하는 방법이 제시되었으며[6], 모터의 응답을 학습하여 응답 자체를 모사하는 연구 또한 진행되었다[7]. 또한 디지털 트윈 기술을 도입하여 모터 고장 시 응답변화 가상데이터를 산출하고 이러한 가상데이터를 기반으로 인공지능을 학습하는 연구 또한 주목받고 있다. 구체적으로, 모터 회전체의 경우 베어링 부품에서 고장이 자주 발생하지만 실제 데이터를 측정하기 어렵기 때문에, 가상 고장데이터를 생성하고 학습 가능하다면 고장진단에 용이하다[8]. 따라서 고정확도 유한요소해석을 통해 모터를 모델링하고 고장데이터를 생성하는 연구 또한 활발히 진행되는 연구분야이다. 구체적으로, 모터 단면을 이차원 모델링하여 모터 운전조건에서 발생하는 전자기장을 계산하고 이를 기반으로 진동과 열에 영향을 주는 인자들을 연성하여 정상상태 및 고장에 의해 변동하는 진동 및 온도 특성을 분석하면 효율적 고장 진단 알고리즘 개발이 가능하다고 사료된다[9-11]. 이러한 디지털 트윈 기반 고장진단 연구를 수행하기 위해서는 우선 정확도 높은 모터 전자기장 모델을 구현해야 하기 때문에 본 연구에서는 다양한 운전 조건에서 영구자석형 동기모터의 전자기 특성을 예측 가능한 유한요소 모델을 개발하였다. 구체적으로 모터에 전류가 인가될 때 발생하는 전자기장 관련 지배방정식을 연성하여 2차원 전자기력 산출할 수 있는 유한요소 모델을 구현하였으며, 상세 형상은 대상 모터를 분해하여 구체적 제원을 산출하였다. 또한 테스트 베드를 구축하여 제안 모델의 정확도 및 성능을 정량적으로 검증하였다. 본 연구에서 제시하는 고정밀 유한요소 해석모델은 고장을 포함한 영구자석형 모터의 다양한 운전조건에서의 전자기장 응답을 예측 가능하기 때문에, 디지털 트윈 기반 설계최적화

및 고장진단 분야 등 다양한 정밀공학분야에 활용이 가능할 것으로 사료된다.

2. 영구자석형 동기모터 유한요소 모델 구축 및 고장 모사

2.1 영구자석형 동기모터 유한요소 모델

영구자석형 동기모터는 고정자에 권선된 코일에 3상 전류가 인가되면, 3상 교류 전류로 인해 회전 자기장이 형성되는 원리이다. 구체적으로, 영구자석이 부착된 회전자에 전류로 인해 회전하는 자기장의 위상에 동기(Synchronization)되어 회전하며 자기력이 생성된다. 또한 이렇게 생성된 자기장은 고정자와 회전자 사이 공극(Air Gap)에서 생성되는 전자기력을 기반으로 회전자에 기계에너지인 토크를 생성한다. 모터에 흐르는 전류로 인해 공극에서는 Maxwell Equation(식(1))을 통해 자기 벡터 포텐셜을 계산한다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (1)$$

여기서 μ 는 자기 투자율(Permeability), A 는 자기 벡터 포텐셜, J 는 전류 밀도를 나타낸다. 자기 벡터 포텐셜을 기반으로 공극에서의 자속 밀도 B 를 계산할 수 있다. 유한요소 모델의 전자기 해석의 빠르며 높은 정확도를 갖는 2D 단면으로 간소화하여 계산한다. 모터의 단면인 원을 중심으로 r , θ , z 좌표계를 지정하여, 자기 벡터 포텐셜의 z 방향 성분만 고려하는 것이 가능하다. 이 때 자기 벡터 포텐셜에 의한 자속 밀도 B 는 식(2) 및 식(3)을 이용하여 계산된다.

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

$$B = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} \right] \hat{r} + \left[-\frac{\partial A_z}{\partial r} \right] \hat{\theta} \quad (3)$$

계산된 자속 밀도는 회전자에 자기력으로 작용하여 회전을 유도하고 이를 통해 모터는 전기적인 에너지로부터 기계적인 에너지인 토크를 발생시킨다. 회전자에 가해지는 단위체적당 힘 f 는 Maxwell 방정식에 의해 식(4)와 같이 정의되며, 이로부터 Maxwell Stress Tensor σ 를 정의할 수 있다.

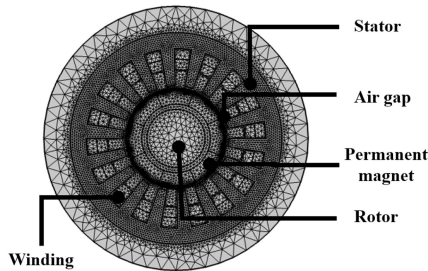
$$f = \frac{1}{\mu} \left[(\nabla \cdot B)B + (B \cdot \nabla)B - \frac{1}{2}B^2 \right] \quad (4)$$

$$f = \nabla \cdot \sigma \quad (5)$$

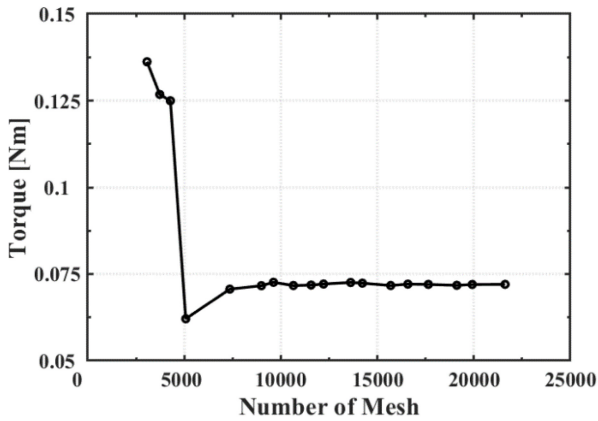
$$\sigma = \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} \frac{B_r^2 - B_\theta^2 - B_z^2}{2} & B_r B_\theta & B_r B_z \\ B_\theta B_r & \frac{B_\theta^2 - B_r^2 - B_z^2}{2} & B_\theta B_z \\ B_z B_r & B_z B_\theta & \frac{B_z^2 - B_r^2 - B_\theta^2}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$



(a) Configuration of permanent magnet synchronous motor



(b) 2-D finite element mesh of PMSM



(c) Mesh convergence of the model

Fig. 1 PMSM used for experiments and finite element model

Maxwell Stress Tensor σ 로부터 2D 형상의 회전자에 가해지는 토크 T 는 다음과 같이 유도된다.

$$T = \int_S r \times \sigma \cdot ds \tag{7}$$

$$T = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_r B_\theta d\theta \tag{8}$$

이때 ε 길이의 공극을 가지는 모터의 경우 가해지는 토크는 공극에서의 면적분으로 계산된다(식(9)).

$$T = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon} \int r B_r B_\theta dS \tag{9}$$

본 연구에서는 식(9)를 바탕으로 모터의 전자기 해석을 위한

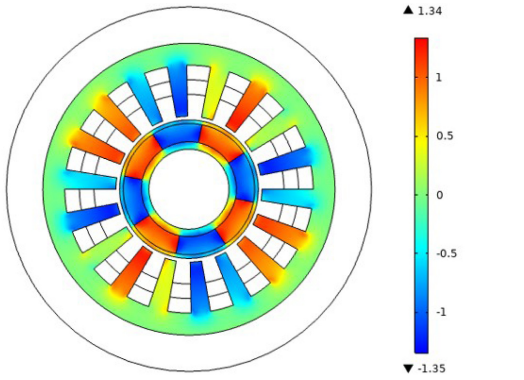
Table 1 Specification of PMSM FE model

Specification	Value
Number of slots	18
Number of poles	8
Length of air gap [mm]	1
Diameter of stator [mm]	50
Diameter of rotor [mm]	18
Number of coil turns	10
Coil winding	Distributed winding
Remanent magnet flux density [T]	1.47
Type of permanent magnet	Neodymium
Type of rotor	Iron
Type of stator	Soft iron
Type of coil	Copper

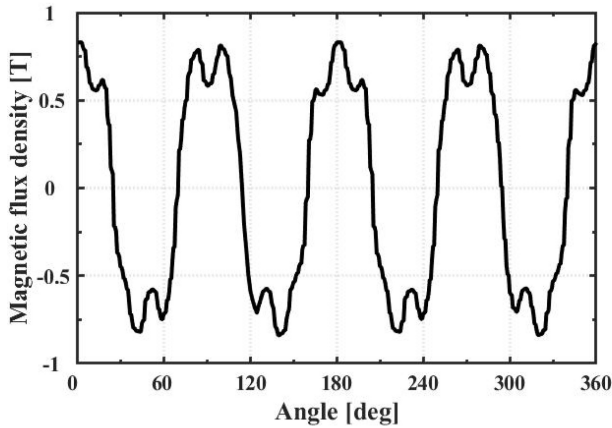
2D 유한요소 모델을 구축하였다. 모델 형상은 3장에서 후술된 실험에 사용한 모터의 단면인 Fig. 1(a)를 참고하였으며, 해당 모델의 구조 및 물성치는 Table 1에 명시하였다. 토크는 모터의 구조 변수 및 자속 밀도 값으로 계산되며, 토크 값이 실제 모터의 토크 값과 유사하다면 유한요소 모델이 실제 모터의 전자기 특성을 매우 정확하게 모사한다.

유한요소 모델이 실제 모터의 토크 특성을 정확하게 예측하기 위해서는 모터의 구조 및 물성뿐만 아니라 모터 구동에 필요한 입력 정보 데이터도 구명되어야 한다. 토크 값 계산에 필요한 자속 밀도는 공극 내에 회전하는 회전자 및 전류에 의한 자기장으로 생성되기 때문에, 본 연구에서는 정확한 토크 특성 모사를 위해 유한요소 모델에 실제 모터의 구동 및 제어에 따른 회전자의 위치 및 전류 값을 그대로 대입하여 공극 내에 자기장이 계산하였다. 본 연구에서는 실측 데이터를 적용하여 정상 및 과도 상태의 토크 응답뿐만 아니라 토크 리플 또한 표현 가능하도록 구성하였다.

Fig. 1(b)에 유한요소 모델 해석을 위한 메쉬(Mesh) 구성을 도시하였다. 메쉬는 모터의 부품별로 다르게 구성하여 유한요소 해석의 정확성 및 계산 시간을 최적화하였다. 특히 자기장 계산에서 정밀도에 큰 영향을 미치는 각 부품 간 경계 영역은 세밀한 메쉬를 갖도록 구성하였다. 즉, 토크 계산은 공극 내의 자속 밀도의 적분을 통해 계산되기 때문에 해당 영역에서 오차가 크게 발생 가능하며, 이러한 특성을 고려할 때 이 관심영역에서는 정교하게 메쉬를 구성하여야 정확도가 보장된다. 충분한 정도의 정교한 메쉬 구성을 위해 메쉬 수렴성을 조사하였다. 해당 유한요소 전자기 모델은 측정된 모터 전류 및 회전자의 위치 데이터를 입력으로 사용하여 전자기장 및 토크가 계산되는데, 메쉬 수를 늘려가며 같은 입력 데이터에 대해 계산되는 토크 값의 경향을 확인하였다. Fig. 1(c)을 근거로 유한요소 모델은 총 17,643개의 메쉬로 구성하였다. 계산된 특정 시간에서의 자기장 특성은 Fig. 2에 예시로 도시하였다. 본 연구에서



(a) Distribution of radial magnetic flux density



(b) Radial magnetic flux density along the air gap

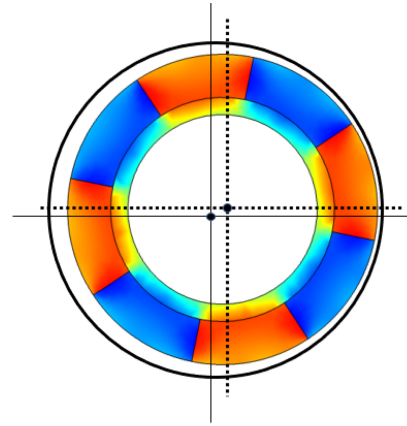
Fig. 2 Magnetic flux density profile of PMSM FE model

모사한 8극 모터의 경우 반경 방향의 자속 밀도는 공극 내에서 극자의 절반에 해당하는 고조파 성분을 가지게 되고 4th 고조파 성분을 크게 갖는 것을 Fig. 2(b)에서 확인할 수 있다. 따라서 제안 모델의 실제 영구자속형 모터의 특성을 잘 모사함을 추론 가능하다.

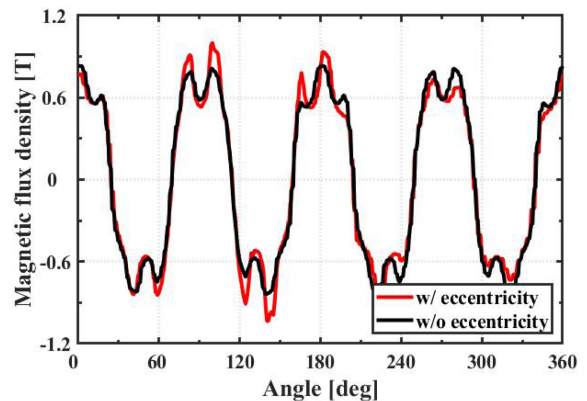
2.2 고장모사: 편심

모터는 고장이 발생함에 따라 전자기 특성이 달라진다. 본 연구에서는 유한요소 모델을 이용하여 고장 상태에 대한 전자기 응답을 예측하고자 대표적인 고장 모드인 편심을 구현하였다. 모터의 회전축 편심은 설계 공차 및 연결 축 불량으로 모터 내에 가장 자주 발생하는 고장 모드이다. 편심이란 회전자의 회전축이 고정자의 중심축으로부터 벗어나 회전하게 되는 상태로 정의되며, 이로 인해 모터는 불필요한 진동 및 소음에 노출되고 베어링의 부하로 연결되어 고장이 가속화되고 수명이 감소한다. 따라서 이러한 편심을 감시하고 고장이 발생하기 전 적절한 예방정비가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 3(a)에 도시된 바와 같이 회전자의 중심이 고정자의 중심과 불일치하도록 유한요소 모델을 구축하여 편심 고장을 모사하였다.

모터는 고정자와 회전자 사이 공극에서 자기장이 형성된다. 하지만 회전자의 회전축이 편심될 경우 공극에 불균형이 발생하고



(a) Geometry of PMSM FE model with eccentricity



(b) Radial magnetic flux density with and without eccentricity

Fig. 3 PMSM FE model with eccentricity

이러한 구조 변형은 형성되는 자기장의 불균형을 야기시켜 전체적인 전자기적인 거동의 변화를 유발한다. 첫 번째로 모터 공극에서 발생하는 기자력 F (Magnetomotive Force)는 고정자 인가 전류 및 회전자의 영구자석으로부터 생성된다. 기자력으로부터 발생하는 자기장은 투과율(Permeance)로부터 결정되고 투과율 Λ 는 식(10)과 같이 정의된다.

$$\Lambda(t, \alpha) = \frac{\mu}{\delta(t, \alpha)} \tag{10}$$

식(10)에서 $\delta(t, \alpha)$ 는 편심이 존재할 때 시간 t 와 공극의 위치각 α 에 따라 변화하는 공극 길이이며, 기자력에 의한 자속 밀도는 식(11)로 정의된다.

$$B_r = F(t, \alpha) \times \Lambda(t, \alpha) \tag{11}$$

결과적으로 공극의 비대칭은 자기장의 불균형에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 편심 모델에서는 회전자 위치를 고정자의 중심에서 0.15 mm 이격시켰고, 이에 따른 전자기 응답을 편심이 없을 때와 비교하여 Fig. 3(b)에 도시하였다. 나머지 조건은 동일한 채로 편심의 조건만 주었을 때, 자속 밀도는 편심으로 인한 공극의 비대칭으로 인해 불균형한 모습을 보이는 것을 확인할 수 있다.

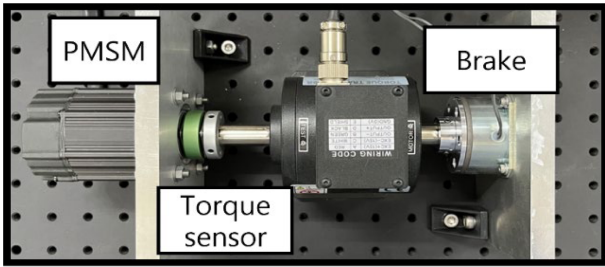


Fig. 4 PMSM experimental setup

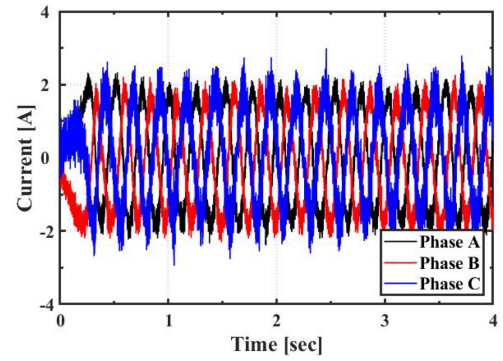
Table 2 List of various operating condition of PMSM experiment

Operating condition	Demonstration
No load	60 RPM with no load
Speed varying	from 60 RPM to 600 RPM
Load varying	from no load to 0.4 Nm
Braked	brake during operation
Eccentricity	eccentric rotor with no load

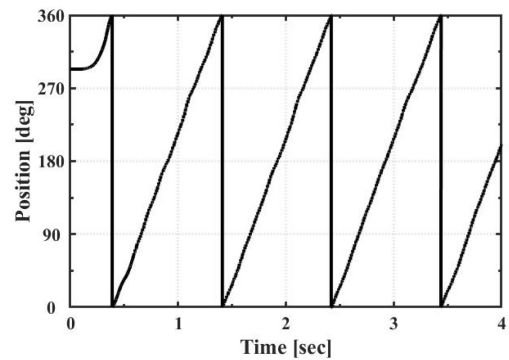
3. 테스트베드 구축 및 실험

정상 및 고장 상태 모터에 대한 유한요소 모델의 검증에 위한 테스트베드를 Fig. 4와 같이 구축하였다. 모터는 드라이버 및 컨트롤러를 통해 FOC (Field Oriented Control) 제어로 구동된다. 정상상태 모터의 경우 여러 조건에서 구동 데이터를 취득하였고, 대표 고장 모드인 편심 조건에서도 실험을 진행하여 데이터를 취득하였으며, 상세 운전조건은 Table 2에 기술하였다. 정상(Steady) 및 과도(Transient) 상태에서 모터 전자기 특성 관찰을 위해 다양한 운전조건에서 실험을 진행하였다. 모터가 제어됨에 따라 측정되는 전류 및 회전자의 위치는 모터의 드라이버 및 내장 엔코더(Encoder)를 통해 수집하였고 Table 2의 첫 번째 실험에서 측정된 데이터를 대표적인 예시로 Figs. 5(a) 및 5(b)에 도시하였다. 또한 실험 시 인가되는 해당 데이터를 구축한 유한요소 모델에 입력으로 인가하여 산출된 전자기 해석 결과를 기반으로 토크 값을 산출하였다. 산출된 토크 값은 테스트베드에 설치된 토크 센서 측정값과 정량적 비교/분석을 실시하여 본 연구에서 제안하는 영구자석형 전기 모터 유한요소 모델의 정확도를 검증하였다. 첫 번째 실험의 토크 측정값은 Fig. 5(c)에 예시로 도시하였다.

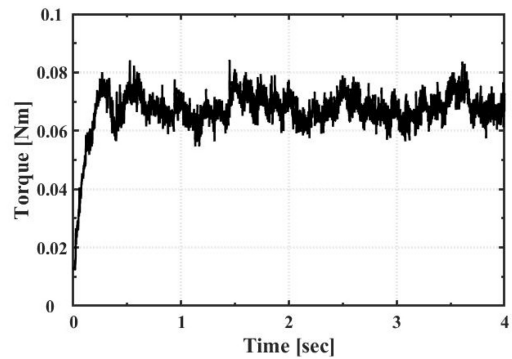
또한 모터 주요 고장 모드인 정적 편심 상태를 모사하기 위해 실험에서 Fig. 4의 고정된 영구자석형 동기모터의 고정자를 포함한 하우징을 이격시킨 채로 고정하였다. 회전자는 토크센서의 축과 커플링으로 단단하게 연결되어 있어 고정된 반면 고정자의 중심축을 이동시킴으로써 회전자의 중심 회전축이 고정자의 중심으로부터 벗어난 정적 편심 상태 모사가 가능하다. 이러한 실험조건은 2장에서 기술한 편심 모델과 동일한 상황으로서 편심이 인가된 상황에서 모터 전자기 특성을 검증할 수 있다. 편심된 모터 전자기 특성은 비대칭 공극으로 인한 불균형한 자기장



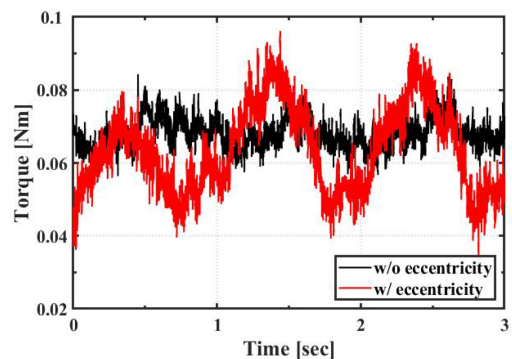
(a) 3 phase current of the stator winding



(b) Position of the rotor



(c) Torque of the rotor shaft



(d) Comparison of measured torque with and without eccentricity

Fig. 5 Measured data from PMSM testbench setup

형성된다는 것인데, 결과적으로 회전자 토크 또한 불균일하게 나타나는 것을 Fig. 5(d)에 도시된 측정결과에서 확인 가능하다.

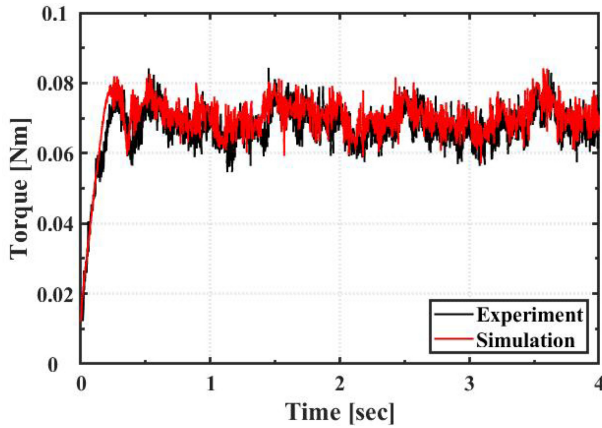


Fig. 6 Comparison of torque characteristics between measured and calculated torque during no load operating condition

4. 결과분석 및 고찰

유한요소 모델을 통해 계산된 토크 값과 위 구축된 테스트베드를 통해 측정된 토크 값의 비교를 통해 다양한 구동조건 및 고장 조건에서 모델의 검증능을 진행하였다. Table 2에 기술한 첫 번째 운전 조건으로, 정지해 있던 무부하 모터를 60 RPM으로 구동했을 때 실험 및 해석 모델의 토크를 비교 및 검증하여 Fig. 6에 도시하였다. 정지되어 있던 모터는 0초부터 구동되어 0.2초 까지 과도응답 상태를 거쳐 정상 상태의 토크 특성이 관찰 가능하다. 모터 구조 및 물성치뿐만 아니라 영구자석형 동기모터의 제어에 필요한 전류 및 위치 데이터를 유한요소 모델에 그대로 입력으로 사용하여 단순히 정상 상태에서의 토크만 예측하는 것이 아니라 과도 상태 및 토크 리플 또한 유한요소 모델을 통해 정확하게 모사 가능한 것을 Fig. 6을 통하여 관찰할 수 있다.

나머지 구동 조건에서 유한요소 모델에서 산출되는 토크 값과 측정된 값 또한 동일한 경향을 보이는 것을 Fig. 7에서 관찰 가능하다. 구체적으로, 1초에 60 RPM으로부터 600 RPM까지 속도를 급격하게 증가시키는 속도 가변 조건(Table 2 두 번째 운전조건)에서 나타나는 토크 과도 응답, 무부하 상태에서 0.4 Nm까지 토크가 점차적으로 증가하는 가변 부하 조건에서 나타나는 토크 응답(Table 2 세 번째 운전조건) 또한 유한요소 모델 추정결과가 실험결과와 유사함을 확인 가능하다. 브레이크를 이용하여 구동 토크보다 큰 힘으로 구동 중인 모터를 정지할 때의 토크(Table 2 네 번째 운전조건)의 경우, 2.5초 이후 해석상 토크 값의 리플이 크게 나타난다. 이는 모터에 정격 전류가 흐를 때, 드라이버를 통해 측정되는 전류에 잡음이 포함되어 측정되는 현상이 있었는데(Fig. A1), 해당 전류를 그대로 유한요소 모델에 사용하여 실험값과 차이가 발생하였다. 하지만 정격 토크 이상의 하중이 지속되는 상태를 제외하고, 즉 정상적인 모터 구동 상황에서는 이 경우 또한 매우 정확하게 토크 값 예측이 가능한 것으로 보인다. 요약하면, 본 연구에서 제안하는 고정밀 유한요소 해석모델은 다양한 운전조건에서 영구자석형 전기모터의

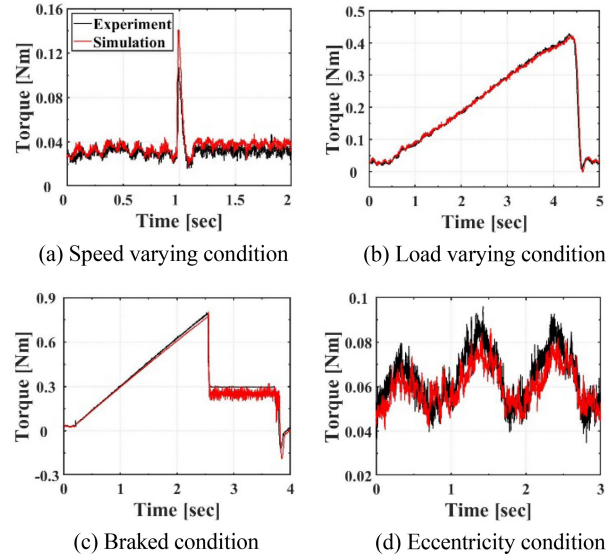


Fig. 7 Validation of calculated torque of finite element model of PMSM in various operating conditions

Table 3 Comparison between experimentally measured torque and simulated torque

Operating condition	Experiment Avg. [Nm]	Simulation Avg. [Nm]	RMSE
No load	0.066	0.068	0.005
Speed varying	0.029	0.034	0.009
Load varying	0.154	0.156	0.007
Braked	0.277	0.263	0.024
Eccentricity	0.060	0.057	0.008

전자기 특성을 매우 잘 반영하여 실제 모터의 응답에 해당하는 실험값과 매우 유사한 토크 값을 도출해 낼 수 있다. 마지막으로, 모터의 고장 상태인 편심에 대한 모델 응답을 Fig. 7(d)과 같이 실험값과 비교/분석하여 모델 정확도를 검증하였다(Table 2 다섯 번째 운전조건). 비대칭을 갖는 공극을 유한요소 모델로 구현하여 편심에 따라 달라지는 토크 응답을 계산하면 실험값과 유사한 결과가 산출됨을 관찰 가능하며, 이를 통하여 앞서 서술한 불균형한 자기장 모사가 가능함을 추론 가능하다. 따라서 제시된 모델은 모터의 고장 상태에서 달라지는 응답 또한 산출 가능하기 때문에, 고장진단에 사용할 수 있는 데이터 생성이 가능하다고 간주할 수 있다.

유한요소 모델의 정량적 검증능을 위해 토크 계산 값과 실험값의 RMSE (Root Mean Squared Error)를 계산하여 Table 3에 구동 조건별로 도시하였다. 해당 실험에서 구동 조건에 따라 토크 스케일이 크게는 10배까지 변하는데 이로 인해 RMSE 값은 비례하여 증가하기 때문에 각 구동 조건별 RMSE를 정량적으로 정확하게 비교하기 위해 각각 계산 값과 실험값에 대해 토크 평균 값에 대한 RMSE 값도 함께 표에 도시하였다. Figs. 6, 7의 토크 개형 비교 및 Table 3의 RMSD를 근거하여 제안한 모터의

유한요소 전자기 모델은 고장 상태를 포함한 여러 조건에서 의미 있는 해석 결과를 도출하고 고장 진단을 위해 활용도가 높음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고장 상태를 포함한 여러 운전 조건에서 영구자석형 동기 모터 전자기 응답특성을 예측 가능한 유한요소 모델을 제시하였다. 해당 유한요소 모델은 실제 실험에서 사용된 모터의 구조 및 물성을 반영하여 구축하였으며, 관심모터의 전자기 특성을 정확하게 반영하기 위해 유한요소 모델 토크 값이 계산되기에 필요한 대입되는 전류 및 회전자의 위치 데이터를 가상으로 생성하지 않고 실험에서 직접 측정된 값을 사용하였다. 또한, 다양한 운전 조건에서 정상 상태, 과도 상태와 토크 리플을 매우 정확하게 구현이 가능한 것을 실험과 비교분석을 통해 검증하였으며, 편심을 갖는 모터의 달라지는 전자기 응답 또한 유한요소 모델을 통해 구현 가능하다는 것을 검증하였다. 모터 편심은 토크만 불균일하게 만들뿐 아니라 회전자 전체 불평형 자기력(Unbalanced Magnetic Pull, UMP)을 형성하여 심한 진동 및 베어링 부하를 야기시키는데 이러한 상황에 대한 구현 방법을 본 연구에서는 제시하였다. 향후 연구에서 영구자석형 전기모터에 대해 제시된 전자기 모델을 근간으로 고장진단에 사용 가능한 다물리 응답을 산출하는 모델을 구현할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국기계연구원의 기본사업(NK244B) 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Kang, G.-H., Son, Y.-D., Kim, G.-T., Hur, J., (2009), A novel cogging torque reduction method for interior-type permanent-magnet motor, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(1), 161-167.
2. Jang, I.-S., Kim, W.-H., (2020), Study on electromagnetic vibration analysis process for PM motors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1-6.
3. Bhuiyan, E. A., Akhand, M. M. A., Das, S. K., Ali, M. F., Tasneem, Z., Islam, M. R., Saha, D., Badal, F. R., Ahamed, M. H., Moyeen, S., (2020), A survey on fault diagnosis and fault tolerant methodologies for permanent magnet synchronous machines, *International Journal of Automation and Computing*, 17, 763-787.
4. Ebrahimi, B. M., Roshtkhari, M. J., Faiz, J., Khatami, S. V.,

- (2013), Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(4), 2041-2052.
5. Tsyppkin, M., (2011), Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique-A practical implementation, *Proceedings of the 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 406-411.
6. Ince, T., Kiranyaz, S., Eren, L., Askar, M., Gabbouj, M., (2016), Real-time motor fault detection by 1-D convolutional neural networks, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(11), 7067-7075.
7. Lopes, T. D., Raizer, A., Valente Júnior, W., (2021), The use of digital twins in finite element for the study of induction motors faults, *Sensors*, 21(23), 7833.
8. Tadina, M., Boltežar, M., (2011), Improved model of a ball bearing for the simulation of vibration signals due to faults during run-up, *Journal of Sound and Vibration*, 330(17), 4287-4301.
9. Martinez, J., Belahcen, A., Detoni, J., (2016), A 2D magnetic and 3D mechanical coupled finite element model for the study of the dynamic vibrations in the stator of induction motors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 66, 640-656.
10. Xie, Y., Chen, P., Li, F., Liu, H., (2019), Electromagnetic forces signature and vibration characteristic for diagnosis broken bars in squirrel cage induction motors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 123, 554-572.
11. Taras, P., Li, G.-J., Zhu, Z.-Q., Foster, M. P., Stone, D. A., (2018), Combined multiphysics model of switched flux PM machines under fault operations, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(9), 6737-6745.

APPENDIX

A1. 전류 실험 측정값

다양한 운전조건에서 진행된 실험에서 측정된 교류 전류는 첫 번째의 무부하 구동 실험을 제외하고 하기와 같이 측정되었다. 3상의 교류 중 대표로 하나의 상을 도시하였다.

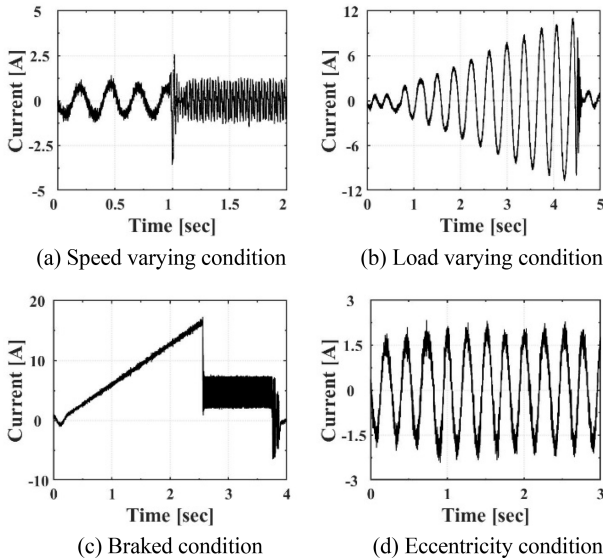


Fig. A1 Measured current in various operating conditions correspond to cases (a)-(d) as described in Fig. 7, respectively



Hyunseung Lee

M.S. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. His research interest is multiphysics modeling of electric motors.
E-mail: justin0304@hanyang.ac.kr



Seho Son

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. His research interest is data-driven prognosis and health management and deep neural network for remaining useful life estimation.
E-mail: shoo1101@hanyang.ac.kr



Dayeon Jeong

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. His research interest is multiphysics modeling of electric motors.
E-mail: jdd2635@hanyang.ac.kr



Ki-Yong Oh

Assistant Professor in the School of Mechanical Engineering, Hanyang University. His teaching and research interests include applied dynamics and prognostics and health management in the field of complex energy systems.
E-mail: kiyongoh@hanyang.ac.kr



Byeong Chan Jeon

Senior Engineer in the Department of System Dynamics, Korea Institute of Machinery & Materials. His research interests include prognostics and health management for rotating machinery.
E-mail: arice1008@kimm.re.kr



Kyung Ho Sun

Principle Researcher in the Department of System Dynamics, Korea Institute of Machinery & Materials. His research interests include prognostics and health management for rotating machinery.
E-mail: sunkh@kimm.re.kr

• 특집 • 제조 지능화-제조현장에 도입되는 디지털전환기술

에나멜 동선 피막 제거를 위한 가공부하 기반 연삭가공공정 적응제어기술

Adaptive Control of Grinding Process based on Grinding Force for Removing the Coating from an Enamelled Copper Wire

최성진¹, 오준영¹, 김진서², 이상경², 이원균¹,#
Sung-Jin Choi¹, Jun-Young Oh¹, Jin-Seo Kim², Sang-Kyung Lee², and Wonkyun Lee¹,#

¹ 충남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

² 디케이텍인더스트리 (DKTEC Industry)

Corresponding Author / E-mail: wklee@cnu.ac.kr, TEL: +82-42-821-6575

ORCID: 0000-0002-3207-5336

KEYWORDS: Electric vehicle (전기자동차), Hairpin motor (헤어핀 모터), Machining process control (가공공정제어), Eco-friendly vehicle (친환경자동차)

A hairpin motor is a type of motor that is used for driving an eco-friendly car. Unlike a conventional coil-winding motor, hundreds of hairpins formed by an enamelled copper wire with a rectangular cross section comprise a stator to improve the driving efficiency by maximizing a coil drip rate. With the increased use of the hairpin motor, there has been an increased interest in manufacturing techniques and automated systems of the hairpin motor. Enamel coating removal is one of the major processes of hairpin motor production; enamel coating at the end of the hairpin should be removed to connect the hundreds of hairpins by using the welding process. Grinding is one of the machining processes used for removing the enamel coating. This study proposed an adaptive control method for the grinding process to improve the efficiency and quality of the enamel coating removal process. Grinding depth is maintained during machining by controlling the vertical position of the spindle based on driving torque. A lab-scale grinding machine including a sensory system for adaptive control is developed and used to verify the performance of the proposed method.

Manuscript received: March 27, 2023 / Revised: April 10, 2023 / Accepted: April 11, 2023

1. 서론

지구 온난화에 따른 글로벌 온실가스 감축 요구에 의해 LEV4, EURO7 등 이산화탄소 배출 규제 기준이 강화되고 있으며, 이로 인해 이산화탄소를 비롯한 온실가스를 배출하지 않는 전기자동차(Electric Vehicle) 시장이 급격히 확대되고 있다. 이와 함께 전기자동차의 엔진인 모터의 출력과 효율을 향상시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 세계적인 기업들의 투자가 지속되고 있다. 헤어핀 모터는 사각 권선을 헤어핀 형상으

로 성형하여 슬롯에 개별 삽입한 뒤 각 헤어핀을 연결하는 방식으로, 일반적으로 사용되는 코일 와인딩 방식의 모터에 비해 권선의 단면적에 대한 도체 단면적의 비율인 코일 점적률이 높아 출력과 효율이 높다[1]. 따라서 전기자동차 구동모터로 헤어핀 모터를 활용하기 위한 다양한 측면에서의 기초연구가 진행되었다. Jung 등은 헤어핀 모터를 전기자동차에 적용하였을 때, 모터의 높은 공간 계수로 인해 전기자동차의 효율과 출력 밀도가 향상됨을 보여주었다[2]. Nuzzo 등은 헤어핀 모터의 생산 비용을 기존의 코일 와인딩 방식의 모터에 비해 최대 27%까지 절감

할 수 있는 것을 보여주었고, 기존 권선 개념과 비교하여 새로운 헤어핀 권선 모터의 장단점을 비교하여 설명하였다[3]. Ghahfarokhi 등은 헤어핀 모터의 고속 회전 시 발생하는 교류전류손실을 줄여 모터의 효율을 극대화하기 위한 헤어핀 권선 설계방법을 제안하였다[4].

이러한 연구결과를 바탕으로 현대자동차, 기아자동차, 테슬라, 폭스바겐 등 국내외 자동차 제조사에서는 다양한 전기자동차 모델에 헤어핀 모터를 적용하기 시작하는 추세이며, 이에 따라 헤어핀 모터 생산 자동화를 위한 장비 및 공정기술에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 헤어핀 모터 제조 공정은 헤어핀 성형, 에나멜 피막 제거, 스테이터 삽입의 세 가지로 구성된다. 에나멜 피막 제거 공정은 스테이터에 삽입된 수백 개의 헤어핀을 용접을 통해 연결하기 위해 헤어핀 다리 끝부분의 에나멜 피막을 제거하는 공정이다. 에나멜 피막 제거 과정에서 동선의 과도한 손실, 에나멜 피막 잔류, 버 발생에 따른 출력 밀도 저하 문제가 발생할 수 있으며, 이를 방지하기 위해 에나멜 피막을 빠르고 정교하게 제거하기 위한 가공공정기술과 위치제어기술이 요구된다. Kuehl은 헤어핀 모터의 에나멜 피막 제거를 위한 화학적, 열적, 기계적 가공공정을 소개하고, 화학적 가공공정과 기계적 가공공정인 밀링, 브러싱 공정 테스트베드를 구축하여 실험결과를 바탕으로 공정별 가공품질을 평가하였다[5]. 상용장비에는 에나멜 피막 제거를 위해 레이저 가공, 프레스를 이용한 전단, 연삭 공정이 적용되고 있다. 레이저 가공은 정밀도가 높으나 가공모듈의 높은 단가, 경계면에서의 열 영향 층 발생 문제가 있다. 프레스를 이용한 전단은 가공속도가 빠르고 가공품질이 좋으나 에나멜 피막 제거 후 동선 단면적의 감소율인 동선 손실률이 높으며, 프레스 금형이 마모됨에 따라 신뢰성이 저하되는 문제가 있다. 연삭은 가공품질이 좋으나 공구마모, 눈매움 등 공구 상태 변화에 의해 가공품질이 저하되는 문제가 있다.

본 연구에서는 연삭가공을 이용한 에나멜 피막 제거 공정의 단점을 해결하기 위해 가공부하 기반 연삭가공공정 적응제어기술을 제안하였다. 가공 중 가공부하(주분력)를 일정하게 유지하도록 공구의 위치를 제어함으로써 공구 상태 변화에도 가공 깊이를 일정하게 유지함으로써 가공품질을 유지하는 적응제어 알고리즘을 제안하고, 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. 일정 주기로 에나멜 동선의 공급과 고정이 반복되는 헤어핀 생산 자동화 장비의 구성을 고려하여 고정시간 내 사각 동선의 상하면, 좌우면의 피막을 제거하기 위한 가공 테스트베드를 설계 제작하였다. 가공 중 공구와 가공물 사이에 작용하는 수직방향 힘(배분력)을 측정하기 위해 로드셀을 설치하였으며, 주축부하(토크)를 실시간으로 측정하기 위한 시스템을 구축하였다. 배분력과 주축부하 측정결과를 바탕으로 공구 상태를 모니터링하기 위한 알고리즘을 적용하였다. 실시간 측정결과 수집, 측정결과 기반 공구 위치 결정, 이송속과 주축 제어 및 공정 모니터링을 위한 제어시스템을 구축하였다. 적응제어 알고리즘 적용 전후의 가공부하 변화와 가공품질을 비교함으로써 제안한 방법의 우수성을 검증하였다.

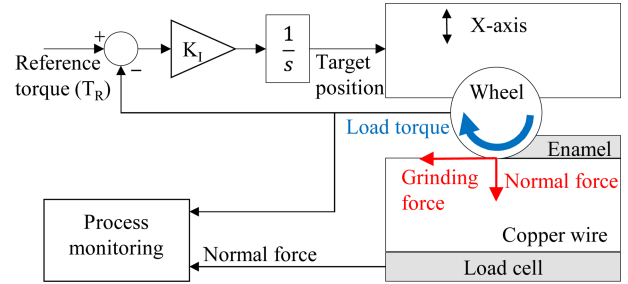


Fig. 1 Adaptive control strategy

2. 적응제어 알고리즘 및 연삭가공장비 설계

2.1 적응제어 알고리즘

가공부하 기반의 공정 적응제어기술은 선반, 밀링, 드릴링 등 절삭가공공정에 널리 적용되었다. Koren은 절삭부하를 일정하게 유지하도록 공구 이송속도를 제어하여 가공시간을 저감하는 공정 최적화 기술, 가공조건을 기반으로 제어기의 계인을 자동 조절하여 공구 수명과 표면 품질을 향상시키는 기술 등 절삭가공공정 최적화 및 가공품질 향상을 위한 다양한 적응제어기술을 소개하였다[6,7]. Watanabe는 밀링가공 시 공구와 소재 사이의 물리적 상호작용에 대한 모델을 구축하고, 이를 이용하여 공구 마모율과 수명, 발열량을 예측하였다. 구축된 모델을 기반으로 공구마모율을 조절하기 위한 가공조건 적응제어기술을 제안하였다[8]. Chen 등은 연삭가공 시 공구동력계를 이용하여 가공부하를 측정하고, 공구 이송속도를 조절하여 가공부하를 일정하게 유지하는 제어기법을 제안하였다[9]. 연삭가공은 연삭 입자의 크기와 간격의 불확실성에 의해 부하의 정확한 예측이 어려우며, 치수효과, 마찰력, 경작작용에 의한 에너지 손실이 크다. 따라서 위에서 소개된 가공부하 기반의 공구 이송속도 적응제어 기술을 적용할 경우 공구 위치에 따른 재료제거율의 편차가 발생하여 가공품질이 저하될 수 있다. 하지만 본 연구에서는 에나멜 피막과 동선으로 구성된 이종소재에서 에나멜 피막만을 제거하기 위한 연삭가공공정의 개발을 목표로 한다. 에나멜 피막과 동선은 경도 차이에 의해 가공부하의 차이가 크므로, 가공부하 기반의 적응제어 기술을 적용할 경우 동선의 손실을 최소화하며 에나멜 피막만을 정교하게 제거할 수 있다. Fig. 1은 본 연구에서 제안한 적응제어 알고리즘이다. 주축부하의 목표값(Reference Torque, T_R)과 측정값(Load Torque)과의 차이를 실시간으로 계산하고, 적분제어를 통해 공구의 X축 방향 목표 위치(Target position)를 도출하여 연삭깊이를 제어한다. 주축부하의 목표값과 적분제어 계인(K_i)은 기초실험을 통해 적정값을 도출한다.

자동화 생산 장비에 기계적 피막제거 방법을 적용할 경우 품질 유지와 생산성 향상을 위해 공구의 교체 주기를 적절히 설정해야 한다. 연삭가공 시 가공부하(Grinding Force)와 배분력(Normal Force)의 비율인 연삭가공비는 연삭숫돌과 가공물 사이의 마찰계수로, 공구 표면 상태의 영향을 받는다[10]. 따라서

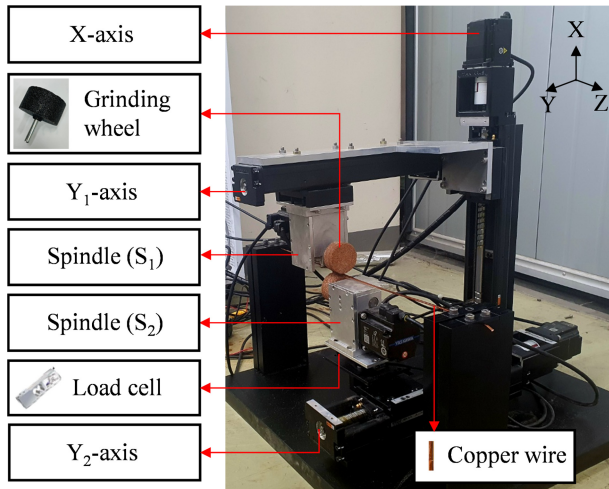


Fig. 2 Experimental setup

연삭가공비를 통해 공구 상태를 모니터링할 수 있으며, 이를 바탕으로 공구 교체 주기를 판단할 수 있다. 본 연구에서는 연삭 깊이의 적응제어를 위해 제어기에서 측정된 주축부하로부터 계산된 가공부하와 로드셀에서 측정된 배분력을 이용하여 실시간으로 연삭가공비를 도출하였다. 기초실험을 통해 정상적인 가공이 가능한 연삭가공비의 한계값을 도출하고, 실시간으로 측정된 연삭가공비와 비교하여 공구 교체 시점을 판단하는 알고리즘을 적용하였다.

2.2 실험 장치 구성

Fig. 2는 본 연구에서 제안한 에나멜 피막 제거 공정을 구현하기 위해 제작한 연삭가공장비이다. 직경 50 mm인 추지식 두 개를 이용하여 사각 에나멜 동선의 피막을 제거한다. 추지식의 회전 방향과 속도를 조절하기 위해 정격 회전속도 3,000 RPM, 정격 출력 200 W, 24 bit 증분형 엔코더가 적용된 저관성 PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor, SGM7J-02A, Yaskawa)과 드라이브(SGD7S-1R6A, Yaskawa)를 이용하여 주축을 구성하였다. 각 주축의 Y축(수평축) 위치를 독립적으로 제어하기 위해 두 개의 동일한 직선이송계를 이용하여 Y축을 구성하였다. Y축 직선이송계는 정격 회전속도 3,000 RPM, 정격 출력 200 W인 PMSM (SGM7J-02A, Yaskawa), 드라이브(SGD7S-1R6A, Yaskawa), 리드 10 mm의 볼나사, 직선이송가이드로 구성된다. 가공부하는 측정된 주축부하를 이용하여 계산하였으며, 가공 중 추지석과 동선 사이에 발생하는 배분력을 측정하기 위해 Y축 직선이송계와 주축 사이에 정격 출력 1.0±0.1 mV/V, 정격 용량 3 kgf인 로드셀(LC8401-K003, AND)을 설치하였다. 주축의 X축 위치는 정격 회전속도 3,000 RPM, 정격 출력 200 W인 PMSM(SGM7J-02A, Yaskawa), 드라이브(SGD7S-1R6A, Yaskawa), 리드 10 mm의 좌우볼나사, 직선이송가이드로 구성되는 직선이송계를 이용하여 제어하며, 에나멜 동선의 중심부를 기준으로 수직방향으로 대칭이동하도록 구성하였다. 헤어핀 모터 생산

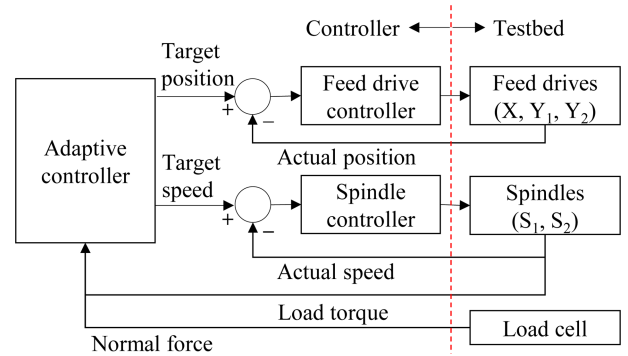


Fig. 3 Control system algorithm

자동화 장비의 동선 공급장치에 의해 에나멜 동선은 매 사이클 타임마다 헤어핀 한 개의 길이만큼 Z축 방향(길이 방향)으로 이동 후 고정된다. 제작한 연삭가공장비는 헤어핀 생산 자동화 장비에 적용될 모듈로, Z축방향 이송은 고려하지 않았다.

두 개의 주축의 회전속도 제어, 세 개의 이송축의 위치제어, 주축부하와 배분력 측정 및 적응제어 알고리즘 구현을 위해 실시간컴퓨터(MicroLabbox, dSPACE)를 이용하여 제어시스템을 구성하였다. Fig. 3은 제어시스템의 구성이며, PID 제어 알고리즘을 적용하여 이송축의 위치와 주축의 속도를 제어했다. 위치 및 속도제어 시 정밀도 향상을 위해 직선형 가감속 프로파일을 적용하였으며, 제어시스템의 실행주기는 1 ms로 설정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 제어 파라미터 선정을 위한 기초실험

제안한 적응제어 알고리즘의 적용을 위해 구축된 테스트베드를 이용하여 주축부하의 목표값을 도출하기 위한 기초실험을 진행하였다. 동선 단면 규격은 2.8×1.2 mm, 피막을 포함한 경우 3.2×1.6 mm 로 실제 친환경자동차용 헤어핀 모터에 사용되는 규격의 에나멜 동선을 사용하였다. 주축 회전속도는 3,000 RPM으로 설정하였으며, 공구 이송속도는 헤어핀 모터 생산 자동화 장비의 사이클타임을 고려하여 90 mm/min으로 설정하였다. Figs. 4(a)부터 4(c)는 연삭 깊이를 일정한 폭으로 증가시키며 가공했을 때의 가공부하 측정결과와 가공물 사진이다. Fig. 4(a)에서 추지석과 에나멜 피막이 접촉은 했지만 깊이가 충분하지 않아 전체 가공 영역에 에나멜 피막이 남아있다. Fig. 4(b)에서 전체 가공 영역 중 일부에 에나멜 피막이 남아있으며, 이를 통해 에나멜 피막과 동선이 동시에 가공되기 시작하는 부분에서의 가공부하는 약 0.5 N임을 알 수 있다. Fig. 4(c)에서 가공 초반부 피막을 제외한 동선의 평균 상하 폭은 약 1.0 mm로, 0.2 mm의 동선이 제거되어 손실률이 증가하였으며, 이 때 가공부하는 1.2 N까지 증가하였다. 반면 가공 후반부 가공부하가 0.5 N 이하로 감소하는 구간에서 에나멜 피막이 일부 남아있다. 가공 중 X축 이송계의 위치가 고정되어 있음에도 가공 전반부와

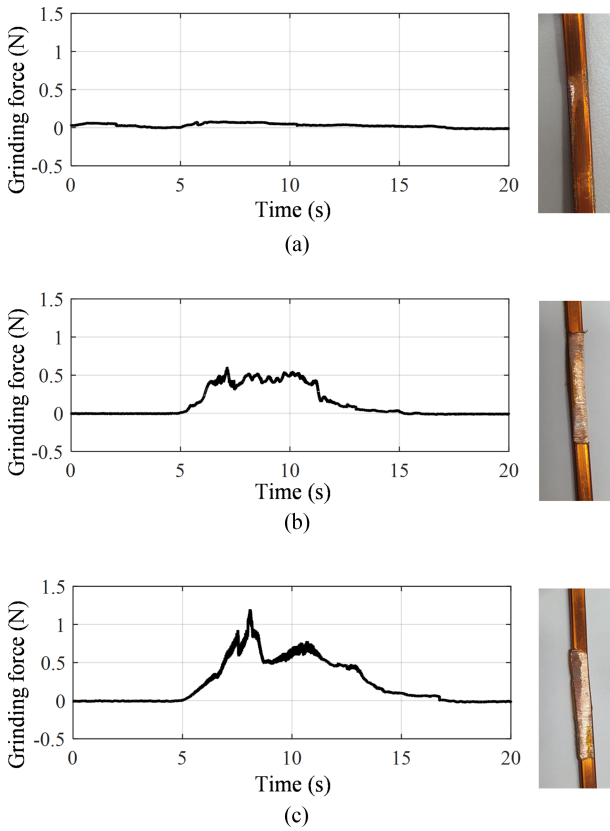


Fig. 4 Grinding force and machined copper wire in accordance with the machining depth

후반부에 가공부하의 편차가 크게 나타났으며, 가공 표면이 고르지 않다. 이는 구축된 테스트베드의 강성이 낮아 동선 가공 시 가공부하에 의한 변형이 발생했기 때문인 것으로 판단되며, 추후 재설계를 통해 이를 보완할 예정이다. 실험 결과를 바탕으로 동선 손실률 저감을 위해 목표 가공부하를 0.54 N으로 설정하였으며, 적응제어기술 적용 시 T_R 을 0.0135 Nm로 설정하였다.

Figs. 5(a)부터 5(c)는 공구 표면 상태와 연삭가공비의 상관관계를 알아보기 위한 실험 결과로, 각각 가공 면적에 따른 가공부하, 배분력, 연삭가공비 측정결과이다. 알루미늄 6061 시편을 주축 회전속도 3,000 RPM, 가공 깊이 0.025 mm, 공구 이송속도 90 mm/min의 조건으로 가공하였다. 연삭가공비(R_G)는 가공 중 측정된 주축 부하(T_{load}), 무부하 상태에서 3,000 RPM으로 회전 시 측정한 주축부하($T_{no-load}$), 추지석의 반경(r), 배분력(F_N)을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$R_G = \frac{T_{load} - T_{no-load}}{r F_N} \quad (1)$$

가공면적이 400 mm² 이하인 경우 로드셀에서 측정된 배분력의 크기가 작아 잡음에 의해 연삭가공비가 제대로 계산되지 않았다. 하지만 이후 구간에서는 가공이 진행될수록 연삭가공비가 감소하는 추세를 보임을 알 수 있다. 이를 통해 연삭가공비

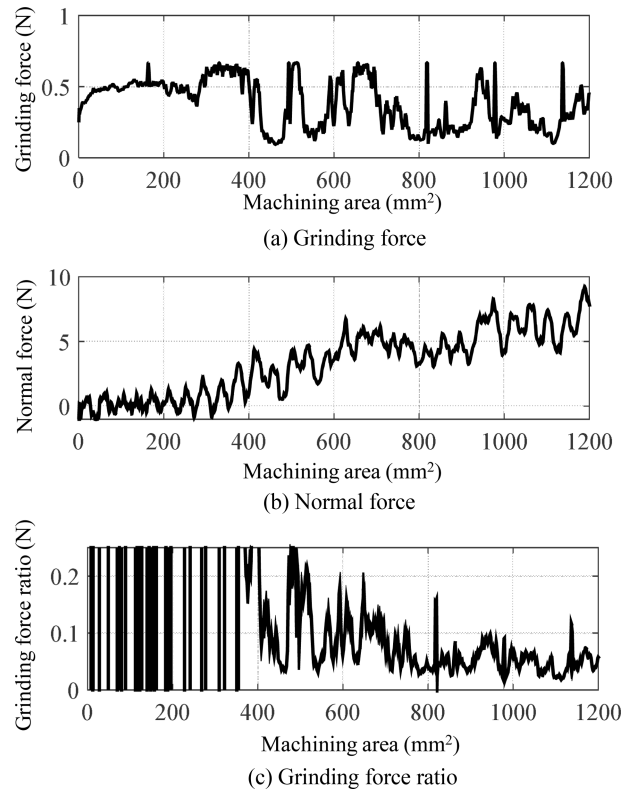


Fig. 5 Relationship between machining area and grinding force ratio

감소율을 바탕으로 공구의 교환 또는 드레싱이 필요한 시점을 감지할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다.

3.2 적응제어 알고리즘 적용

Fig. 6은 적응제어 알고리즘 적용 여부에 따른 가공부하와 X축 이송계의 위치 비교결과이다. 적응제어 알고리즘을 적용하지 않았을 때 가공부하는 최소 0.48 N에서 최대 1.20 N으로 가공 구간에서 편차가 크게 발생하였으며, 동선 손실률은 30.5%로 측정되었다. 적응제어 알고리즘 적용 시 가공부하는 최소 0.44 N에서 최대 0.60 N으로 X축 이송계의 위치를 제어하여 가공부하가 3.1절에서 도출한 목표 가공부하인 0.54 N을 추종하였다. 동선 손실률은 9.7%로 적응제어 알고리즘을 적용하지 않았을 때보다 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 친환경자동차 구동용 헤어핀 모터 제조공정 중 에나멜 피막 제거를 위한 연삭가공공정 적응제어기술을 제안하였다. 적응제어기술 구현 및 검증에 위해 주축부하와 공구-소재 사이에 작용하는 수직방향 힘의 실시간 모니터링이 가능한 테스트베드를 구축하였다. 적응제어기술 적용 시 가공부하를 일정하게 유지하도록 가공 깊이를 실시간으로 조절하며, 그 결과

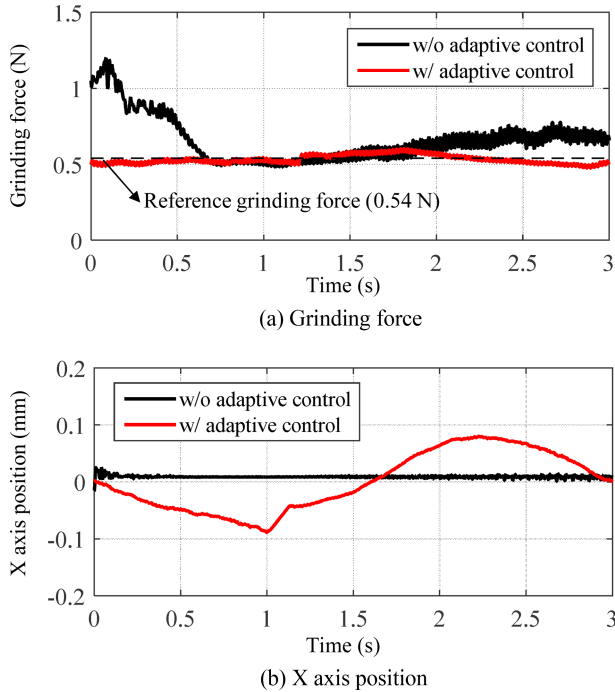


Fig. 6 Comparison of grinding force and X axis position before and after the application of the proposed adaptive control algorithm

에나멜 피막 제거 후 동선 손실률이 30.5%에서 9.7%로 감소하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 충남대학교 학술연구비, 한국산업기술진흥원 (P0020616), 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20018521).

REFERENCES

1. Zou, T., Gerada, D., La Rocca, A., Moslemin, M., Cairns, A., Cui, M., Bardalai, A., Zhang, F., Gerada, C., (2022), A comprehensive design guideline of hairpin windings for high power density electric vehicle traction motors, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(3), 3578-3593.
2. Jung, D.-S., Kim, Y.-H., Lee, U.-H., Lee, H.-D., (2012), Optimum design of the electric vehicle traction motor using the hairpin winding, *Proceedings of the 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-4.
3. Nuzzo, S., Barater, D., Gerada, C., Vai, P., (2021), Hairpin windings: An opportunity for next-generation e-motors in transportation, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 16(4), 52-59.
4. Ghahfarokhi, P. S., Podgornovs, A., Cardoso, A. J. M., Kallaste,

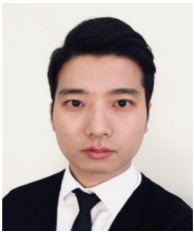
- A., Belahcen, A., Vaimann, T., (2021), Hairpin windings manufacturing, design, and ac losses analysis approaches for electric vehicle motors, *Proceedings of the 2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 1-7.
5. Kuehl, A., (2022), Effects of insulation residues on the contacting process of copper flat wire connections, *Proceedings of the 2022 IEEE 67th Holm Conference on Electrical Contacts (HLM)*, 1-8.
6. Koren, Y., (1988), Adaptive control systems for machining, *Proceedings of the 1988 American Control Conference*, 1161-1167.
7. Amitay, G., Malkin, S., Koren, Y., (1981), Adaptive control optimization of grinding, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 103(1), 103-108.
8. Watanabe, T., (1986), A model-based approach to adaptive control optimization in milling, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 108(1), 56-64.
9. Chen, P., Zhang, X., Feng, M., Li, S., Pan, X., Feng, W., (2022), Research on adaptive control of grinding force for carbide indexable inserts grinding process based on spindle motor power, *Machines*, 10(9), 802.
10. Rowe, W. B., (2013). *Principles of modern grinding technology*, William Andrew.

**Sung-Jin Choi**

Master student in the Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is machining process control.
E-mail: tjdwls5513@naver.com

**Jun-Young Oh**

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

**Jin-Seo Kim**

Director in Planning Department, DKTEC Industry Corporation. His work interest is entrepreneurial strategy and policy, technology commercialization.
E-mail: jskim@dktec.co

**Sang-Kyung Lee**

Director in R&D research center, DKTEC Industry Corporation. His work and research interest is robot control technology and mechanical precision engineering.
E-mail: lsk@dktec.co

**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

• 특집 • 제조 지능화-제조현장에 도입되는 디지털전환기술

고속 금속 3D프린터용 적응형 5축 경로생성 CAM S/W 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Adaptive 5-axis Path Generation CAM S/W for High Speed Metal 3D Printer

이성근¹, 김현철^{2,#}
Sung Gun Lee¹ and Hyun Chul Kim^{2,#}

¹ 비카누스 (Vicanus)

² 공주대학교 미래자동차공학과 (Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University)

Corresponding Author / E-mail: khc@kongju.ac.kr, TEL: +82-41-521-9273

ORCID: 0000-0003-4634-4522

KEYWORDS: Direct energy deposition (직접 에너지 증착), 5-axis toolpath (5축 공구경로), Additive manufacturing (적층가공), CAM S/W (캠 소프트웨어), Metal 3D printing (금속 3D프린팅)

This research developed a CAM S/W, which generates an adaptive 5-axis tool path, to optimize the quality of Direct Energy Deposition (DED) 3D printing. After reconstructing part shapes and generating printing paths in each shape, the path simulation including automatic collision detection was implemented. Productivity and printing quality were improved through equipment improvement and process optimization. In addition, high-quality parts with desirable physical and mechanical properties were produced by generating an adaptive 5-axis path specialized in the printing process that reflects various physical phenomena and monitoring results. Finally, the performance of CAM S/W was verified through the production of prototypes for industrial components.

Manuscript received: March 13, 2023 / Revised: April 18, 2023 / Accepted: April 19, 2023

1. 서론

산업용 금속부품을 제작하기 위한 기존방식은 재료를 자르거나 깎아 생산하는 절삭가공방식이 대표적이거나, 복잡한 제품 제작 한계, 기존 부품에 대한 수리 및 이종 재질 적용의 어려움 등 다양한 문제점들을 가지고 있다. 이에 반해 재료를 적층하여 제조하는 3D프린팅 기술은 상대적으로 복잡하고 긴 기존 공정과 비교하여 다양한 종류의 재료를 빠르게 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다[1-3]. 3D프린팅의 구현은 소재기술 또는 성형기법에 따라 다양하게 구현이 가능하며, 미국재료시험학회(ASTM)에서 대표적인 7가지 3D프린팅 기술방식을 분류하였고, 이 중

산업용 금속부품의 제조에는 PBF (Powder Bed Fusion)나 DED (Direct Energy Deposition) 기술 기반의 장비가 주로 이용되고 있다[3,4].

용접과 유사한 원리를 가지는 DED 공정은 레이저 헤드를 통하여 금속 분말과 고출력 레이저를 모재의 특정 위치에 조사할 때, 모재와 금속 분말이 순간 용융 및 응고되는 원리를 이용한 프린팅 기술로, Fig. 1에서 보는 것과 같이 신규 부품의 제작뿐만 아니라, 기존 부품에 대한 수리가 가능해 고부가가치 제품이나 장납기 부품 등에 적용이 가능하다. 뿐만 아니라, 기존 부품의 재질과 다른 이종소재를 이용하여 부품에 고경도, 내식성 등 기능성 부여가 가능하므로, 다양한 산업의 금속 부품, 특히 기존



Fig. 1 DED applications

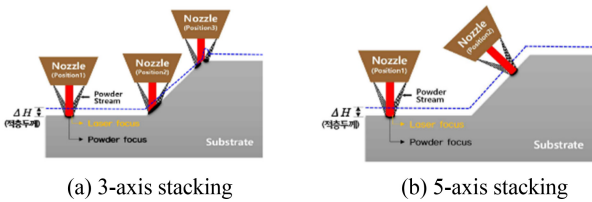


Fig. 2 Laminating thickness uniformity by laminating path

부품보다 더 우수한 성능 또는 내구성을 가진 부품제작에 활용이 가능하다[5-11].

특히, DED를 이용한 금속적층 공정은 전통적인 가공 공정에 비해 생산 비용이 높기 때문에 부가가치가 높은 기계 부품의 제조나 기계부품의 특성 강화를 위한 이종 재료 표면 코팅, 금형 외관 보수 등에 활용되고 있다. 한층씩 쌓아 올리는 일반적인 3D프린팅과 다르게 DED는 자유곡면 형상에 금속적층이 필요하고, 자유곡면 형상의 적층을 위해서는 금속 분말이 적층부와 수직으로 분사되어야 적층 두께의 편차를 최소화하며 높은 적층 품질을 유지할 수 있으므로, Fig. 2와 같이 5축 적층경로 생성이 필수적이다. 기존의 적층경로 생성은 기계가공에 적용되고 있는 CAM 소프트웨어를 기반으로 하고 있어, 기하학적인 형상 정보만을 고려하고 있다. 하지만, 금속 3D프린팅 공정은 레이저를 조사하여 소재를 적층하는 공정으로서 레이저가 조사되는 경로와 레이저 용융풀(Melt Pool)의 응고 특성으로 가공형상이 형성되므로, 금속 3D프린팅 공정에서는 레이저 용융풀의 유동 특성에 따라 적층 형상이 변하기 때문에 적층공정 특성을 반영하는 경로생성이 매우 중요하다[12-18].

따라서, 본 논문에서는 소재의 제거가 아닌 적층에 초점을 맞춘 적층공정의 물리적인 현상을 고려하고, 공정 노하우를 적용할 수 있는 금속 3D프린터용 적응형 5축 경로생성 CAM 소프트웨어를 개발하였다. 레이저 용융 풀 특성을 반영한 현장 적응형

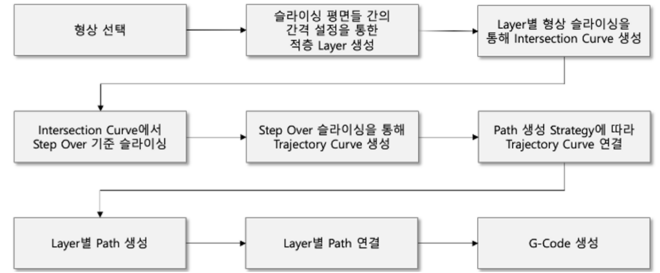


Fig. 3 Path generation process

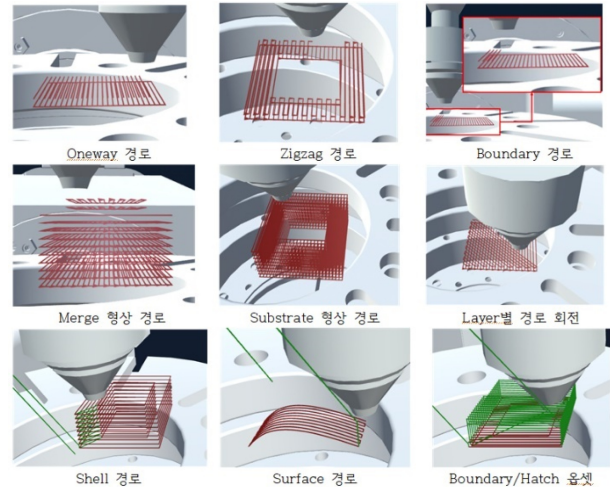


Fig. 4 Path generation and verification

경로 간격을 산출하고 공정 적응형 적층 경로를 생성하여 다양한 형상을 갖는 기계부품 가공에 대응할 수 있도록 하였으며, 5축 적층 경로 생성을 통해 적층 공정 적용 분야를 확대하는 목표를 가지고 적층 공정 최적화 및 레이저 출력 제어용 적층 폭 설정 기술 개발과 용융풀 모니터링 및 공정 데이터베이스를 적용한 통합 운영 시스템을 구축하였다.

2. 적응형 CAM SW 개발

2.1 3축 적층경로 생성 및 시뮬레이션 기능

적층경로 생성을 위해서는 3D파트 모델의 기하학적인 형상 정보를 활용할 필요가 있어 본 연구에서는 상용 CAD 소프트웨어의 플러그인(Plug-in)으로 사용자 인터페이스(UI)를 개발하여 적층경로 생성 전 필요한 CAD 기능을 최대한 활용하였다. 적층 높이에 따라 절단 평면으로 절단 후 폐곡선을 획득하고, 기존 허용공차 내에서 직선으로 분할하여 적층경로 패턴 생성 알고리즘을 구현하였다. 또한, 각 층의 경로를 연결할 수 있는 알고리즘과 레이저 온오프(On/Off) 기능을 조합하여 최종 적층경로 패턴 생성 기능을 구현하였다.

Fig. 4와 같이 실제 적층 시 열누적, 금속의 용융상태 등을 고려하여 적층성능을 높이기 위한 다양한 적층경로 패턴을 생성하고

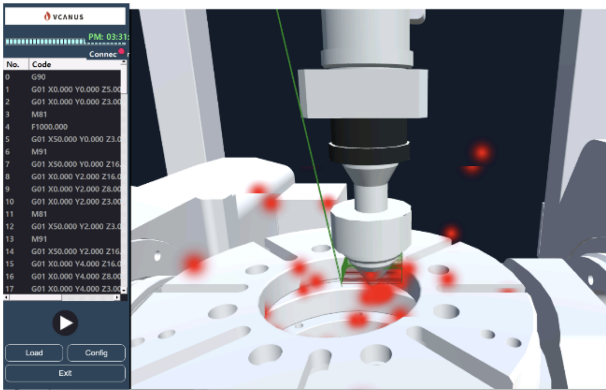


Fig. 5 Simulation and collision detection

검증하였다.

생성된 적층경로는 실제 구동 시 장비 모듈 간/모듈 및 적층 경로 간 충돌이 발생할 수 있어 이에 적층 경로 시뮬레이션 및 자동 충돌 체크 기능이 요구된다. 이를 위해 장비 구동을 위한 G코드 파싱(Parsing)을 통해 장비의 이동명령을 분석하여 모션 명령 블록들을 순차적으로 실행함과 동시에 이에 따른 모션 좌표를 기준으로 삼차원 객체들을 움직이고 적층 경로를 시각화하였다. 레이저 헤더에 영역을 설정하고 모델 객체와 충돌을 검사할 수 있는 CAD 내부의 모듈을 활용하여 메쉬 간 오버랩을 찾아 충돌을 검출하였다.

2.2 자유곡면 표면 적층용 5축 적층경로 생성 기능

자유곡면 표면을 따라가면서 적층을 수행하는 경로 개발을 위해서는 자유곡면의 CC점(Cutter Contact Point)을 찾고 그 점에서 법선 벡터를 기반으로 CL점을 생성하여야 한다. 허용공차 내에서 직선으로 분할하여 적층경로 생성 시에 활용하였지만, 원래 슬라이싱된 곡선에 대한 정보를 기반으로 해당 매개변수를 통해 곡면에 대한 곡률을 이용하여 법선 방향을 계산하였다. 또한 적층 실험을 통해 기하학적으로 계산된 적층경로의 물리적 현상을 반영하기 위해 레이저 열원에 의해 발생하는 미적층 및 과적층 최소방안 도출 및 적층경로 간 높이 설정 변경 등의 기능을 구현하여 기존 CAM 소프트웨어의 한계를 극복하고 적층공정에 특화된 CAM 소프트웨어를 구현하였다.

2.3 레이저 출력 제어용 적층 폭 설정기술

한 단면에서 적층을 위한 적층 폭 설정을 위해 적층 폭과 레이저 출력의 상관관계 실험을 진행하였다. AnyX-M250 DED 금속 3D프린터를 이용하여 45도 기울기, 평면부, 모서리부를 갖는 표준시험편에 Fig. 7과 같이 단일폭 적층 실험을 통하여 접합 형상에 따른 적층 품질 상관관계 실험을 수행하였다. 공정 조건에 따라 모서리 접합부, 평면 접합부, 빗면 접합부를 갖는 S45C 표준시험편에 SUS316 분말 소재를 이용하여 공정 테스트 후 형상에 따른 용융풀 크기를 측정한 결과 평면형상부는 표준 빔 사이즈인 0.8 mm에 근접한 평균 0.83 mm의 크기로 측정되었고,

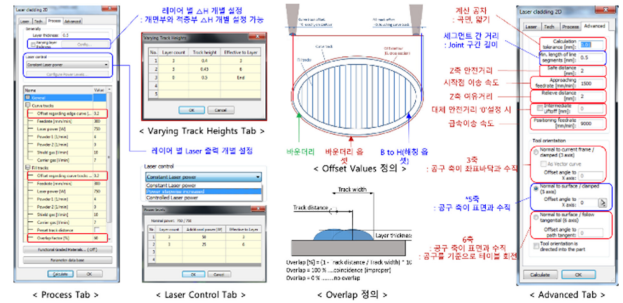


Fig. 6 5 axis printing specified path generation

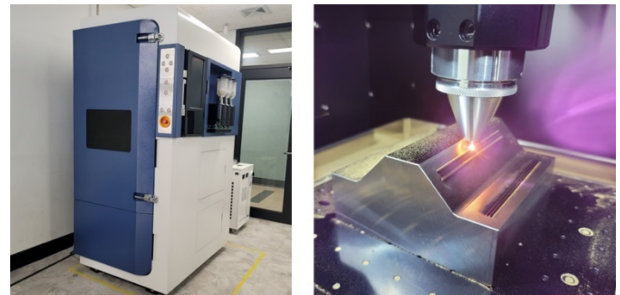


Fig. 7 Printing test on standard test specimens



Fig. 8 Cross-sections according to shape using standard test specimens

45도 경사면 형상부는 빔의 조사면적이 증가하여 평균 0.91 mm, 모서리 부위는 평균 0.75 mm로 감소하였고, 특히 이 부위에서는 용융풀의 크기가 불규칙적으로 관찰되었다. 이와 같이 0.8 mm 사이즈를 갖는 레이저빔이 조사 형상에 따라 면적이 달라지고, 적층공정이 달라짐으로 인해서 적층 품질이 다르게 나타나는 것을 실험을 통해 자료를 데이터베이스화하고, 3D프린팅 장비에 설치되어 있는 센서들로부터 실시간으로 추출되는 위치 데이터와 레이저, 가스 등의 공정 데이터 및 용융풀의 다양한 형상을 실시간으로 수집하고, 피드백하여 반영함으로써 적층품질을 높일 수 있는 통합 운영시스템을 구현하였다.

용융풀에 대한 모니터링 및 공정 데이터베이스와 CAM에서 정의된 형상정보 등을 조합한 피드백 제어를 구현하여 실시간 반응제어가 가능한 레이저 출력을 조절하여 적층품질을 최적화하는 공정기술을 적용하였다. 이때, 근적외선(NIR) 카메라를 이용하여 획득한 용융풀 이미지를 머신비전 알고리즘에 적용하여 크기를 예측하고 적층 폭 값을 추출하도록 하였다.

2.4 3차원 자유곡면 클래딩 설정기술

5축 적층 레이저 클래딩을 적용하기 위해서는 적용 가능한

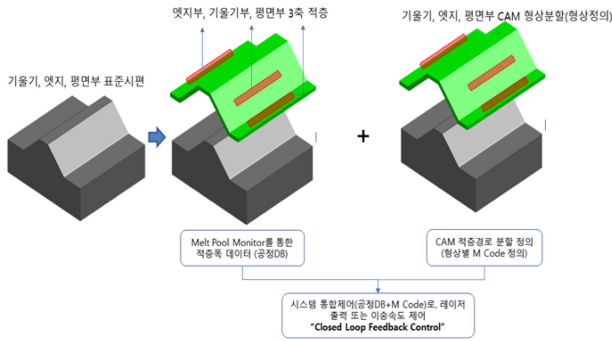


Fig. 9 Laser power control for constant set width

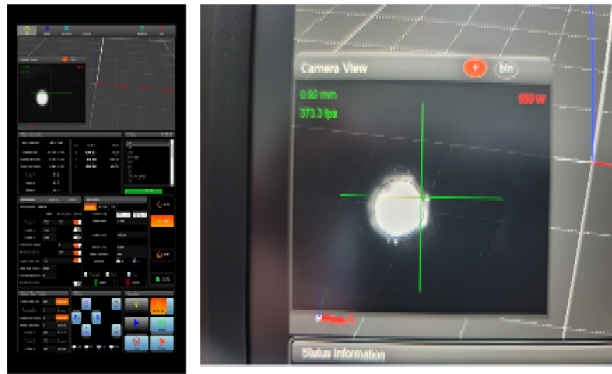


Fig. 10 Integrated operating program and real-time measurement and feedback

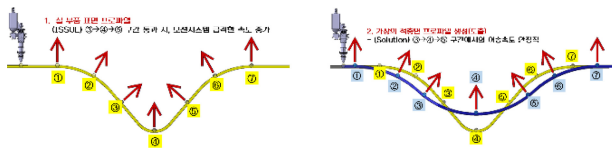


Fig. 11 Curved cladding technology

최소 곡률반경 및 최적화된 모션시스템이 필요하다. 우선 오목, 볼록의 표준시험편을 통해 적층헤드의 간섭 및 적층 가능한 최소곡률 반경을 도출하고, 두가지 형상(사각, 원형)의 적층실험을 통해 가감속 및 형상구현에 최적화된 모션시스템의 이송속도, 즉 각가속도를 설정하였다. 최적이송속도 및 최소곡률반경을 토대로 모듈, 적층소재, 경로 길이, 깊이나 높이 등의 비율, 최대/최소 이송속도(각가속도) 등을 종합하여, 곡률반경에 따른 시스템별 가상의 최적 적층경로를 생성하여 3차원 자유곡면 적층기술을 구현하였다.

3. 산업용 금속 부품 제작 및 평가

3.1 초고강도 제품의 냉간 프레스 전단금형 제작

최근 자동차 업계는 차량 경량화를 통한 연비향상과 승객의 안전을 높이기 위하여 차체의 고강도 강판 사용비율을 높이고 있어

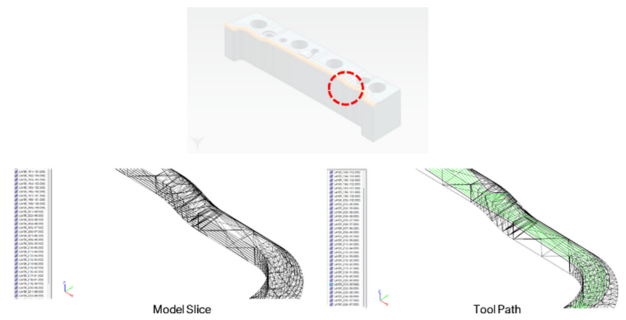


Fig. 12 Tool path for cold press shear mold

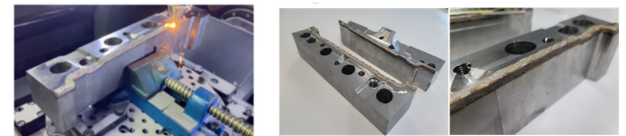


Fig. 13 3D Printing of cold press shear mold using developed CAM S/W

기존에 사용되는 전단금형보다 내구성이 향상된 솔루션에 대한 요구가 높아지고 있다. 이를 위해 고경도 금형강들이 사용되고 있으나, 고가의 소재비로 인하여 접근이 용이하지 않을 뿐 아니라 기존 방법으로 가공이 어려워 새로운 제작 방법이 요구되고 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 개발한 CAM 소프트웨어를 활용한 DED 기술을 적용하여 모재는 저가의 소재를 이용하고, 전단부만을 고강도용 금형소재로 적층하여 산업에서의 평가를 통한 검증을 진행하였다.

금형의 베이스 부분은 저가의 S45C 소재를 이용하여 1차 절삭가공을 수행한 후, 적층시스템의 전용치구에 장착하고 전단부의 자유곡면 형상을 고강도용 G6 소재를 이용하여 적층하였다. 개발된 CAM 소프트웨어를 이용하여 적층부 형상설계 파트를 0.4 mm 간격으로 슬라이싱하고, 적층공정 최적화 데이터베이스의 레이저조건, 재료공급조건, 적층속도 등의 적층공정을 조합하여 적층경로를 생성하고, 경로생성검증 및 작업시간, 경로 누락등 적응용 CAM 소프트웨어의 유효성 검증 및 평가를 수행하였다. 기존의 방법으로는 제작이 어려운 선택적 형상 복원을 통한 전단금형을 5축 CAM 소프트웨어와 DED를 이용해 구현하였으며, 요구하는 형상정밀도 및 표면조도를 확보하고 인장강도 1,500 MPa 이상의 초고강도 강판의 블랭킹, 트리밍, 펀칭, 피어싱 성형 등에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

3.2 우주발사체 압력 용기 제작

다품종 소량생산에 유리한 3D프린팅 기술의 수요가 빠르게 증가하고 있으며, 항공우주 분야는 생산품의 기술적 요구도와 부가가치 창출 수준이 높아 3D프린팅 적용 적합도가 가장 높은 분야이다. 해외에서는 수년 전부터 NASA, Boeing, GE, SpaceX 등 공공·민간 영역의 선진 항공우주 개발 주체들이 3D프린팅 기술을 적용함으로써 생산단가 절감 및 납기 단축 성과를 만들어



Fig. 14 3D Printing of pressure vessel

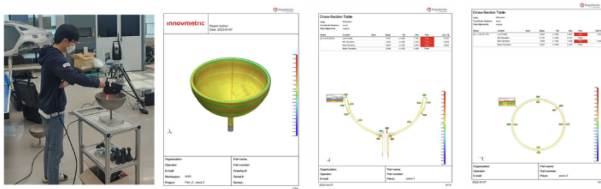


Fig. 15 Measurement and results

내고 있다. 따라서 본 연구의 성과를 검증하기 위해 우주발사체의 추진력을 발생시키기 위한 추진기관 시스템에 탑재되는 고압용기를 제작하고 성능을 검증하였다. 압력용기는 반구형태의 형상을 가지고 있으며 절반으로 이등분하여 반구 형태로 적층 작업을 수행하였다.

SUS316 소재를 이용하여 300 mm 직경에 높이 150 mm의 반구형상을 레이어당 1 mm의 로봇시스템을 통해 적층을 완료하였다. 최종제품의 적층경로 성능 및 완성도를 평가하기 위해, 적층 제작된 압력용기 제품과 3D CAD 모델을 비교하여, 치수 정밀도(적층부 표준편차 비율 10%) 분석을 수행하였다. Polyworks 제품을 이용하여 적층제조된 용기의 3D 스캔을 통한 치수 분석 및 3D CAD 데이터와 비교분석을 통해 제품의 위치 및 두께 단면분석으로 10% 이내의 표준편차를 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 5축 3D프린팅의 품질을 최적화하기 위한 에너지원의 최적 적응형 공구경로를 생성하는 CAM 소프트웨어를 개발하고 성능을 검증하였다. 부품형상을 재구성하고 각 형상에서 적층경로를 생성한 후 자동 충돌 검사를 포함한 경로 시뮬레이션 기능을 수행하는 기능을 구현하고, 장비개선 및 공정 최적화를 통해 적층속도 및 적층품질을 향상하였다. 또한 공정 실험 및 모니터링 결과에 기반하고 적층공정에 특화된 적응형 5축 적층경로를 생성함으로써 기계부품의 물리적 특성을 만족하는 고품질 적층형상을 제작하였다. 마지막으로, 산업용 부품에 대한 시제품 제작을 통해 CAM 소프트웨어의 성능을 검증하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 정

보통신기획평가원, 연구재단 및 지자체-대학 협력 기반 지역혁신 사업의 결과입니다(Nos. 2021-0-00447, NRF-2021R111A3048752, and 2021RIS-004). 또한, 본 연구는 2020년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2020R1A6C101A187).

REFERENCES

1. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., Hui, D., (2018), Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
2. Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., Han, B., (2019), A review of the current progress and application of 3D printed concrete, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105533.
3. DebRoy, T., Mukherjee, T., Milewski, J., Elmer, J., Ribic, B., Blecher, J., Zhang, W., (2019), Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions, *Nature Materials*, 18(10), 1026-1032.
4. Froes, F., Dutta, B., (2014). The additive manufacturing (AM) of titanium alloys, *Advanced Materials Research*, 1019, 19-25.
5. Ko, K.-H., Bae, Y.-J., Moon, J.-Y., Kang, H.-Y., Hwang, Y.-W., (2019), An economic effect analysis on remanufacturing part of automobile, *Resources Recycling*, 28(4), 37-43.
6. Ahn, D.-G., (2016), Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(4), 381-395.
7. Wasono, R., Wahab, D., Azman, A., (2019), Additive manufacturing for repair and restoration in remanufacturing: An overview from object design and systems perspectives, *Processes*, 7(11), 802. <https://doi.org/10.3390/pr7110802>
8. Lahrou, Y., Brissaud, D., (2018), A technical assessment of product/component re-manufacturability for additive remanufacturing, *Procedia CIRP*, 69, 142-147.
9. Foster, J., Cullen, C., Fitzpatrick, S., Payne, G., Hall, L., Marashi, J., (2019), Remanufacture of hot forging tools and dies using laser metal deposition with powder and a hard-facing alloy Stellite 21®, *Journal of Remanufacturing*, 9, 189-203.
10. Kim, S. W., Lim, S. L. and Chun, C. K., (2020), Repair properties of desulfurization pump part layers by direct energy deposited additive manufacturing process, *Journal of Welding and Joining*, 38(1), 92-97.
11. Ahn, D.-G., (2021), Directed energy deposition (DED) process: State of the art, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 703-742.
12. Lee, I. H., Kim, H. C., Ahn, D. G., (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.
13. Kim, D., Lee, K., Ahn, D., (2021), Investigation into the effects of process parameters of DED process on deposition and residual stress characteristics for remanufacturing of mechanical parts, *Transactions of Materials Processing*, 30(3), 109-118.
 14. Hwang, J., Shin, S., Lee, J., Kim, S., Kim, H., (2017), A study on surface and cross-section properties depending on the process parameters of laser depositions with metal powders (SUS316L and IN718), *Journal of Welding and Joining*, 35(3), 28-34.
 15. Zhu, L., Wang, S., Pan, H., Yuan, C., Chen, X., (2020), Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology, *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 344-354.
 16. Yang, Q., Zhang, P., Cheng, L., Min, Z., Chyu, M., To, A. C., (2016), Finite element modeling and validation of thermomechanical behavior of Ti-6Al-4V in directed energy deposition additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 12, 169-177.
 17. Biegler, M., Marko, A., Graf, B., Rethmeier, M., (2018), Finite element analysis of in-situ distortion and bulging for an arbitrarily curved additive manufacturing directed energy deposition geometry, *Additive Manufacturing*, 24, 264-272.
 18. Zhang, Z., Ge, P., Yao, X., Li, T., Liu, W., (2020), Numerical studies of residual states and scaling effects in laser-directed energy deposition additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 1233-1247.

**Sung Gun Lee**

CEO in the VCANUS. His research interest is 3D printing and smart manufacturing.
E-mail: sglee@vcanus.com

**Hyun Chul Kim**

Professor in the Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University. His research interest is CAD/CAM and precision machining.
E-mail: khc@kongju.ac.kr

· 특집 · 제조 지능화-제조현장에 도입되는 디지털전환기술 절삭가공의 디지털 전환을 위한 디지털 스레드 Digital Thread for Machining Process

이훈희¹, 이동윤^{2,#}
Hoon Hee Lee¹ and Dong Yoon Lee^{2,#}

¹ 한국생산기술연구원 정밀기계공정제어연구그룹 (Precision Mechanical Process and Control R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)
² 한국생산기술연구원 디지털전환연구부 (Digital Transformation R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)
Corresponding Author / E-mail: dylee@kitech.re.kr, TEL: +82-31-8040-6169
ORCID: 0000-0001-7981-125X

KEYWORDS: Machining (절삭가공), Digital thread (디지털 스레드), Virtual machining (가상 가공), Process monitoring (공정 모니터링), Inspection (검사)

Currently digital transformation has a huge impact on human lives. Digital transformation does not just mean a transformation of a (non-) physical element to a digitally identifiable element. It focuses on the utilization of digital technology for transforming (improving) procedures or routines of business and operation. The manufacturing industry has been adopting the most recent digital technology, and lots of digital data are being created. To utilize the stored data, data analysis is essential. Because the manufacturing data is created in a different format at every manufacturing step, the integration of the data is always the bottleneck of the data analysis. Querying of the right data at the proper time is fundamental for high-level data analysis. The digital thread is introduced to provide the inter-reference of digital data based on a context. This paper proposes a digital thread framework for the machining process. The context of the proposed framework consists of the questions of how the product will be machined, how it is (was) being produced, and how it was made. A prototype software was developed to verify the proposed framework by implementing the creating, storing, and querying modules for simulation, monitoring, and inspection data.

Manuscript received: March 21, 2023 / Accepted: April 16, 2023

1. 서론

4차 산업혁명과 COVID19 팬데믹 등 거대 전환점에서 제조 산업에 급격한 변화 요구가 있어왔고, 그 중심에 디지털화가 있다[1]. 디지털 전환(Digital Transformation)은 정보와 컴퓨팅, 통신 및 연결 기술 조합을 통해 중대한 변화를 촉발하여 대상을 개선하는 것을 목표로 하는 일련의 프로세스로 정의되고 있다[2]. 제조 산업에서는 수없이 발생하는 경험적, 아날로그적 데이터가 디지털로 전환되면서 제조 공정의 첨단화, 지능화가 진행되고 있다.

디지털 전환의 중요 요소인 정보(Information)는 디지털화된 데이터(Digitalized Data, D)로부터, 통신(Communication)은 자산

(Asset) 간의 네트워크(Network, N)로부터, 개선(Improvement)은 인공지능(Artificial Intelligence, AI)과 같은 솔루션으로 연결된다. 즉, 디지털 전환의 핵심인 D, N, A. 각 요소는 유기적이고 자율적으로 제조 공정이 운영되어 효율성과 품질향상 등의 목적을 달성하도록 활용된다.

제조 디지털 전환과 관련되어 디지털 트윈(Digital Twin), 디지털 그림자(Digital Shadow), 디지털 스레드(Digital Thread) 등 다양한 개념들이 정의되고 일부는 표준으로 제정되고 있다[3,4]. Grieves는 2002년 제품 수명주기 관리(Product Lifecycle Management) 관련 발표에서 현재의 디지털 트윈 개념을 처음으로 소개하였고, 물리적 시스템에 대한 디지털 정보 구조로서 개체(Entity)를 자체적으로 생성하고 해당 물리적 시스템과 연결된

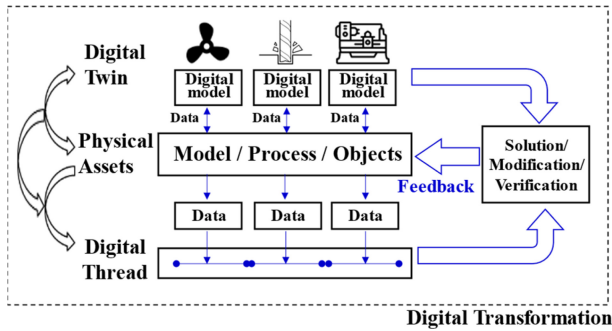


Fig. 1 Components for digital transformation

형태로 정의하였다[5,6]. Negri는 제조산업에서의 디지털 트윈은 감지된 데이터와 연결된 스마트 장치(Device), 수학적 모델 및 실시간 데이터 처리를 통해 생산시스템의 동작을 각 수명 주기 단계에서 실시간으로 예측하고 최적화하는 것으로 정의하였다[7]. 디지털 트윈과 유사한 개념인 디지털 그림자는 실제 자산에서 디지털 객체로의 데이터 흐름은 자동으로 되지만, 디지털 객체에서의 실제 자산의 상태 변경은 자동으로 되지 않아 상호연계성 측면에서 낮은 단계로 구분된다[5]. 한편, Levina는 기능적으로 구분되어 있던 시각을 뛰어넘어서, 자산의 생명 주기(Lifecycle) 전반에 걸쳐 연결된 데이터의 흐름과 통합적 조화를 제공하는 통신 체계(Framework)로 디지털 쓰레드를 정의하였다[8]. 기능, 장비, 모델, 신호 등이 모두 디지털 쓰레드의 대상이 될 수 있다. 디지털 쓰레드는 Fig. 1과 같이 디지털 트윈 객체와 자산 간의 데이터/모델 연결성을 높이고, 다양한 산업군의 각 프로세스에서 발생하는 데이터를 활용하여 효율 개선 및 최적화 등을 위해 활용되고 있다[9-12]. Singh은 설계 및 제조 측면에서 고려되어야 하는 하중, 소재 특성, 제조관련 인자, 비용 등을 수학적 모델링과 측정을 병행한 디지털 쓰레드를 통해 항공부품을 설계하는 가이드 라인을 제시하였다[9]. Zhang은 항공기 조립 공정의 실시간 예측과 최적화를 위해 디지털 쓰레드 기반의 디지털 트윈 프레임워크를 제안하고, 드릴링, 리벳팅 등 각 공정 단계마다의 공정 및 품질 예측/분석을 통해 개선한 사례를 소개하였다[10]. Jagusch는 조선(Shipbuilding)에서의 제품 설계 단계, 공정계획 등을 디지털 쓰레드로 연결하는 모델을 통해 디지털 트윈에 반영함으로써 개별적인 프로세스를 연결하고, 최적화하는 방법을 제안했다[11]. Feldhausen은 CNC 기반의 적층-절삭 하이브리드 제조에서 열화상 모니터링과 NC통신을 통한 기계 및 프로세스 정보를 기반으로 한 디지털 쓰레드를 구현하고 동적 드웰(Dwell)을 통한 품질 최적화 개념을 소개하였다[12]. 절삭가공은 인구절벽 및 숙련자의 감소로 인한 영향이 큰 산업이며 디지털 전환 요구도가 높고 자율제조 기술 개발이 시급히 필요한 제조 공정이다. 절삭가공 기반 제조 공정의 개선을 위해서 절삭공구의 마모 예측이나 가공공정의 정확성 추정 등에 디지털 트윈을 적용한 연구 및 사례가 있어왔으나[13,14], 절삭가공 공정 전주기에 걸쳐 사용되거나 생성되는 다양한 정보 간 연계를 제공하는 디지털 쓰레드와 관련한 연구는 심도 깊게

이루어지지 않았다.

본 논문은 제조공정의 디지털 전환을 위한 데이터 연결 및 상호연용 기술, 즉 디지털 쓰레드를 절삭가공에 적용한 연구를 소개한다. 2장에서는 절삭가공을 위한 디지털 쓰레드 프레임워크 개념을 소개하고, 3장에서는 디지털 쓰레드 중 공정의 예측/분석을 위한 가상가공과 모니터링기술, 4장에서는 품질정보 관리를 위한 측정 및 표준화 연계 기술을 소개한다. 5장에서는 제안된 디지털 쓰레드를 구현하여 활용성을 검토한 내용을 설명한다.

2. 절삭가공과 디지털 쓰레드

2.1 디지털 쓰레드

디지털 쓰레드는 고려하는 대상에 따라 다양한 형태를 가질 수 있다. 서론에서 설명한 바와 같이 디지털 쓰레드는 고립된 데이터 간 연결을 바탕으로 통합된 조회 기능을 제공하기 위해 제안되었다. 제조현장에서 사용하거나 발생하는 데이터는 생성하는 주체에 따라 다양한 형태를 갖고 있고 대부분 생성된 장소에 저장되고 있다. 데이터 통합의 필요성이 강조됨에 따라 데이터를 중앙에서 관리하고자 하는 노력이 많이 이루어지고 있으나, 데이터를 모아두고 있을 뿐 각 데이터를 조회하기 위한 색인 및 데이터 간의 연계가 부족하다. 이럴 경우, 데이터 생성에 관여하지 않은 사용자가 필요한 데이터를 검색하는 데 많은 어려움을 겪게 된다. 제조현장에서 디지털 쓰레드를 구축하는 가장 큰 이유는 데이터의 재활용을 위한 토대로 활용할 수 있기 때문이다. 특히, 스마트공장에 대한 관심이 일반화됨에 따라 제조현장에서 사용되거나 생성되는 데이터를 분석하여 제조공정을 최적화하기 위해 저장된 데이터를 적절하게 조회할 필요성이 높아지고 있어 데이터를 효율적으로 저장하고 조회하는 기능에 대한 필요성이 대두되고 있다. 디지털 쓰레드는 데이터 간 연계 정보를 갖고 있기 때문에 임의의 데이터를 시작점으로 관련된 데이터를 모두 조회할 수 있게 해준다. 이를 통해 일반적으로 데이터를 분석할 때 필요한 원인과 결과 간의 정합성을 확보할 수 있게 된다.

2.2 절삭가공용 디지털 쓰레드

Fig. 2는 본 논문을 통해 고려하고 있는 절삭가공 분야의 디지털 쓰레드의 범위를 보여주고 있으며, 절삭가공이 이루어지는 현장에서 필요하거나 생성되는 데이터를 생성되는 순서대로 나열하고 있다.

절삭가공은 가공해야 하는 제품의 형상을 표현하는 CAD 모델에서 시작한다. CAD 모델은 가공물의 형상을 정의하기 위해 사용되는 점, 선, 면의 정보를 갖고 있으며, 추가적으로 품질 정보를 갖고 있어 향후 검사 공정과 연계하는데 활용할 수 있다.

CAM 시스템은 CAD 시스템을 통해 정의된 형상 모델을 입력 받아 CNC 동작기계를 운용하는데 필요한 공구경로를 생성한다.

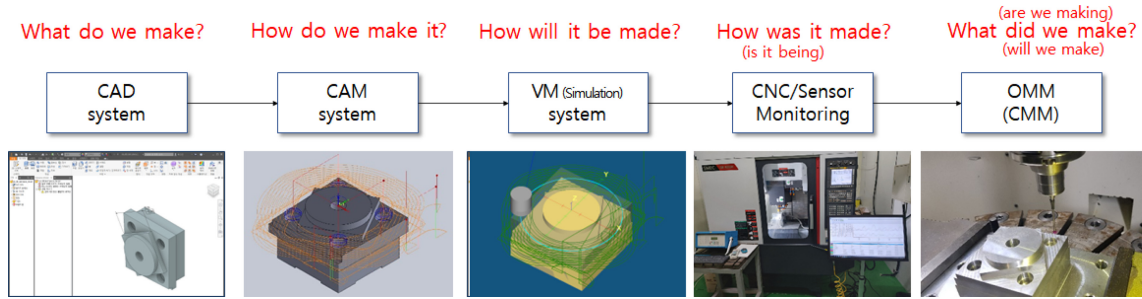


Fig. 2 Digital thread for machining process

CAM 시스템은 형상정보 이외에 공정계획이라는 중요한 정보를 필요로 한다. 공정계획은 품질과 생산성을 결정하는 중요한 요소로서 가공전략과 가공조건을 포함하고 있다. 가공전략은 황삭, 중삭 및 정삭과 같이 원소재에서 불필요한 소재를 제거하는 단계에 대한 정보를 갖고 있기도 하고, 등고선 가공이나 지그재그 가공과 같이 불필요한 소재를 제거하는 방법을 표현하고 있기도 하다. 가공조건은 불필요한 소재가 제거되는 양을 결정하는 요소인 가공 깊이와 이송속도, 추가적으로 한 번의 공구-소재 맞물림으로 제거되는 소재의 양을 결정하기 위해 필요한 스피indle 회전속도로 구성된다. 가공조건은 피삭재의 재질, 공구의 형상 및 소재 등의 정보를 바탕으로 결정된다.

CAD 시스템과 CAM 시스템에서 활용하거나 생성한 정보들은 각각의 시스템에서 정의된 전용의 형식으로 저장되기 때문에 현장에서 활용하기에 제약이 있는 경우가 많아 국제표준에 근거하여 중립적인 형태로 정보를 저장하는 방법이 활용되고 있다. 본 연구에서도 CAD 시스템과 CAM 시스템의 정보를 분석하고 저장하기 위해서 STEP 표준을 사용했으며, CAD 정보를 분석하기 위해서는 ISO 10303 AP242 표준을 이용했고, CAM 정보는 CAM 시스템이 제공하는 API를 이용해서 수집한 정보를 ISO 14649 표준에 기반하여 저장하였다.

제품의 형상정보와 공정계획정보를 이용해 생성된 공구경로는 가상가공기술을 이용해서 검증할 수 있으며, 예측된 절삭 물리량을 바탕으로 공정을 최적화하는데 활용할 수도 있다.

지금까지 설명한 데이터들은 대부분 사무실에서 생성되어 왔으나, 최근 작업현장에서 생성되는 경우가 많아지고 있다. 또한, 새롭게 갱신되는 경우도 있으나 대부분 하나의 제품과 하나의 공정을 기준으로 일회성으로 생성되는 특징이 있다. 반면 작업현장에서 가공 중에 발생하는 모니터링신호와 제품을 측정할 때 데이터는 제품이 가공될 때 마다 생성되는 특징이 있다.

제품을 가공할 때 수집되는 모니터링정보를 원인으로 가공된 제품의 측정값을 결과로 놓고 상관관계를 분석하는 것이 보통 과거에 모니터링기술을 활용하는 방법이었다. 본 논문을 통해 제안된 디지털 쓰레드를 통해 가상가공기술의 예측 물리량을 조회할 수 있으면, 모니터링신호와 측정값 간의 상관관계 분석에 도움이 될 것이다. 특히, 가상가공기술을 통해 공구의 이송에 따라 계산된 가공 깊이 및 가공 폭과 같은 가공조건은 추가적인 원인으로 상관관계 분석에 활용할 수 있다.

제품의 품질은 디지털 쓰레드를 구성하는 마지막 데이터로 제조공정의 결과를 보여주는 가장 중요한 데이터이다. 품질은 종류도 다양하고 측정하는 방법도 다양하며, 많은 측정기 제조사들이 전용의 형식을 이용해서 측정 데이터를 관리하고 있기 때문에 디지털 쓰레드를 구성하는 큰 걸림돌이 될 수 있다. 본 논문에서는 품질 데이터 중 ISO 10303 AP242 표준의 기하치수 및 공차(Geometric Dimensioning and Tolerancing, GD&T)를 대상으로 검사데이터를 관리하고 있다. AP242에서는 기하공차(Geometric Tolerance)가 치수공차(Dimensional Tolerance)를 포함하는 개념이지만, 국내 제조현장에서는 기하공차와 치수공차를 구분하여 이해하기도 하여, 본 논문에서는 혼동을 방지하고자 GD&T로 표현하였다.

본 논문은 제안된 절삭가공의 디지털 쓰레드 중 공구경로가 생성된 이후의 단계인 가상가공기술부터 모니터링기술 및 품질 측정까지 작업현장에서 사용되고 생성되는 데이터들을 관리하는 방법에 대해 설명하고 있다.

3. 가상가공기술과 모니터링기술

3.1 가상가공기술

가상가공은 공구와 소재 간 상대운동을 통해 이루어지는 절삭가공을 컴퓨터환경에서 모사하는 시뮬레이션 기술이다. 가상가공은 절삭력 예측을 통해 공정조건을 선정하는데 주로 사용되고 있으며, 과거에 정적특성만을 고려하였으나, 최근에는 동적특성까지도 고려하여 공정조건을 최적화하는데 사용되고 있다. 또한, 가상가공기술은 공정조건을 선정하는 단계를 넘어 공구경로를 검증하고 최적화하기 위해 활용되고 있다. CAM 시스템이 생성한 원시 공구경로를 대상으로 공구의 이송에 따른 절삭력 변화를 예측하여 다양한 전략을 바탕으로 이송속도를 최적화하는 것이 일반적이며 적극적으로 공구경로 자체를 변경하는 경우도 있다. 일반적으로 가상가공기술은 실제 가공을 수행하기 전에 활용하는 기술이었으나 최근 가공을 수행하는 중에 활용하는 방법도 제안되고 있다[15].

가상가공을 수행하는 가상가공모듈은 컴퓨터의 메모리상에 수치적으로 정의된 피삭재모델과 공구모델을 이용하여 주어진 공구경로에 의해 발생하는 피삭재와 공구간의 상대운동을 모사한다.

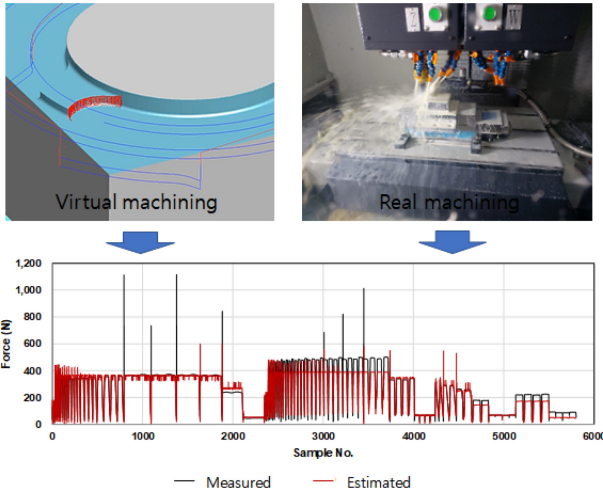


Fig. 3 Verification of estimated cutting force with measured cutting force

가상가공모듈은 이러한 상대운동을 통해 발생하는 맞물림 (Engagement) 양을 계산하고 그 결과와 절삭모델을 이용하여 절삭력 등의 절삭 물리량을 계산한다. Fig. 3은 가상가공기술을 통해 예측된 절삭력과 실가공을 통해 측정된 절삭력을 비교해서 보여주고 있다. 일반적으로 주어진 공구경로를 일정한 간격으로 분할하여 맞물림 양과 절삭 물리량을 계산하게 되며, 본 논문에서는 가상가공모듈에서 생성한 공구의 이송거리에 따른 피삭재-공구간 맞물림 양과 절삭 물리량을 JSON (Javascript Object Notation) 형식으로 저장하고 조회할 수 있게 가상가공 데이터를 관리하도록 구현했다.

3.2 모니터링기술

절삭가공은 국소적으로 과도한 힘이 걸림에도 불구하고 절삭 현상이 이루어지는 부분을 실시간으로 직접 확인할 방법이 제한적이기 때문에, 절삭가공을 대상으로 연구하는 연구자들은 대부분 자연스럽게 모니터링기술에 관심을 갖게 된다. 절삭가공을 모니터링하기 위해서 다양한 센서들이 현장에서 활용되고 있다. 절삭가공 모니터링의 대상이 되는 물리량은 적절하게 선정된 센서를 통해 전기신호로 변환되고 변환된 전기신호를 다시 사람, 혹은 컴퓨터가 처리할 수 있는 정보, 일반적으로 숫자로 변환시켜 활용하게 된다. 절삭가공은 대부분 공작기계가 수행하게 되며, 최근의 공작기계는 대부분 CNC를 탑재하고 있다. CNC는 공작기계를 제어하는 핵심 부품으로 공작기계 현재 상태에 대한 다양한 정보를 갖고 있다. CNC가 내부에서 관리하는 정보는 CNC 제조사가 공작기계 제조사를 위해 다양한 방법으로 제공하고 있는데, 그 방법은 CNC 제조사에 따라 다르고 같은 제조사의 경우도 모델에 따라 다른 경우도 있다. 과거에는 공작기계 제조사만 CNC의 내부 정보를 활용하였으나, 공정 모니터링에 대한 관심이 높아짐에 따라 다양한 주체들이 CNC의 정보를 요구하게 되었으며, 이에 따라 CNC 제조사들도 자체적으로 관리 하던 내부 정보들을 개방하고 있다. 그러나, 제조현장에는 필요에

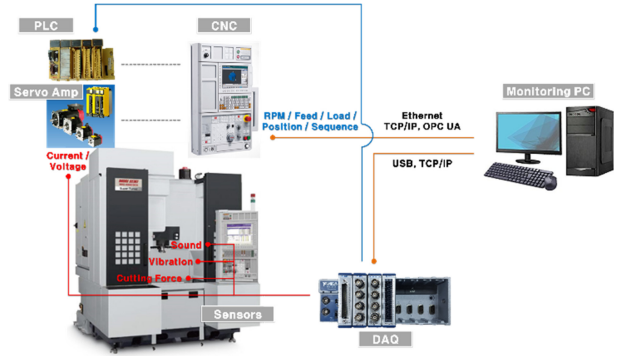


Fig. 4 Monitoring system of machining process (KITECH)

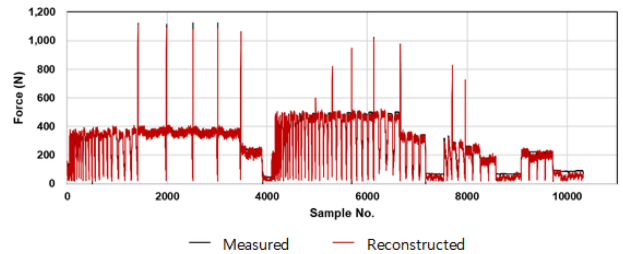


Fig. 5 Verification of reconstructed cutting force from supplied currents with measured cutting force

따라 제조사와 모델이 서로 다른 다양한 CNC가 활용되기 때문에, 공작기계를 모니터링하기 위해서는 CNC 제조사가 제공하는 서로 다른 방법을 이용해야만 했다. 이러한 문제는 자연스럽게 일원화된 CNC 인터페이스에 대한 요구로 이어졌으며 현재 대한민국에는 TORUS라는 HMI 플랫폼이 공개되어 활용되고 있다[16]. 본 논문에서 활용한 공작기계 모니터링시스템 중 정보를 수집하는 모듈은 2개의 세부 모듈로 구성되는데, TORUS를 이용해서 개발한 CNC 정보 수집 모듈과 NI사의 DAQ와 라이브러리를 이용해서 개발한 센서 신호 수집 모듈이다. Fig. 4는 한국생산기술연구원에서 개발한 절삭가공 모니터링시스템으로 연구에 활용할 목적으로 가능한 많은 정보를 수집하기 위해 설계되었다. 개발된 모니터링시스템은 TORUS를 이용한 CNC와의 통신을 통해 공구의 이송과 관련한 대부분의 CNC 정보를 수집하고 있으며, 공구동력계, 가속도계, 전류/전압계, 마이크 등 공작기계 모니터링을 위해 사용되는 대부분의 센서를 이용할 수 있도록 DAQ를 선정하여 절삭력, 진동, 소음 및 각종 모터에 공급되는 전압/전류를 측정할 수 있게 구성했다. 절삭력은 절삭가공과 관련된 물리량 중 가장 중요한 정보로 공구동력계를 이용해서 측정하는 것이 가장 정확하다고 알려져 있으나, 비용 및 공간상의 제약으로 작업 현장에서의 활용에 제한적이기 때문에, 비교적 손쉽게 사용할 수 있는 다른 센서들을 이용해서 절삭력을 추정(Reconstruction)하는 연구들이 많이 소개되고 있다[17,18]. Fig. 5는 공작기계의 스핀들 모터에 공급되는 전류값으로 추정한 절삭력과 공구동력계를 이용해서 측정된 절삭력을 비교해서 보여주고 있다.

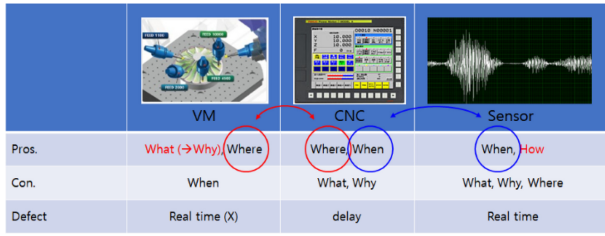


Fig. 6 Integration of virtual machining data with sensor signals

3.3 가상가공기술과 모니터링기술의 통합

절삭가공 분야에서 가상가공기술은 공구의 이송에 따른 물리량을 예측하는 기술이고 모니터링기술은 공구의 이송에 따른 물리량을 측정, 혹은 추정하는 기술이다. 본 논문은 현장에서의 활용성을 높이기 위해서 측정된 절삭력을 활용하지 않고 추정된 절삭력을 활용하여 수행되었다. Fig. 6은 예측 물리량과 추정 물리량을 통합하는 원리를 보여주고 있다. 가상가공기술을 통해 생성된 물리량은 가공거리를 기준으로 저장되어 있다. 즉, 공구의 이송거리에 따른 다양한 기하량과 물리량 정보를 갖고 있다. 모니터링기술을 통해서 추정된 물리량은 시간을 기준으로 생성된다. 예측값과 추정값을 동기화하기 위해서 모니터링시스템에서 수집하는 CNC 정보를 활용하였다. 예측된 물리량은 공간에 대한 정보를 함께 갖고 있고, 추정된 물리량은 시간에 대한 정보를 함께 갖고 있는데, CNC 정보는 공간과 시간에 대한 정보를 모두 갖고 있기 때문 예측값과 추정값을 동기화하는데 기준으로 활용할 수 있다. 예측값은 공간상의 오차가 있고, CNC 통신의 예측 불가능한 약 0.1초 이내의 시간 지연에 따른 시간/공간의 오차로 인해 동기화의 오류가 발생할 가능성이 있으나, 예측값의 공간 분해능을 높이고 CNC 통신의 속도를 일정 수준으로 유지한다면, 동기화 오차는 공구의 이송속도를 고려하여 예측 가능한 수준으로 관리할 수 있다.

예측된 물리량과 추정된 물리량을 동기화해서 비교하면 다양한 기능을 수행할 수 있다. 우선, 절삭력을 예측하기 위해 사용하는 절삭계수를 현장 상황에 맞게 최적화할 수 있다[19]. 또한, 예측된 값과 추정된 값에 일정 수준 이상의 오차가 발생한 경우 공구 마모/파손 및 소재 장착 불량 등의 공정 이상을 검출할 수도 있어, 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

4. 품질 검사

4.1 품질과 제조의 디지털 쓰레드

모델 기반 기업활동(Model Based Enterprise, MBE)은 제품의 3D 형상을 제품 수명 주기 전체에서 사용하는 것이며, 설계 형상 외에도 GD&T, 소재 사양, 부품 리스트, 공정 사양 등을 포함하는 개념이다[20]. 디지털 쓰레드는 이러한 모델 기반의 정의, 제조 및 검사를 결합하는 데이터의 총체(Ensemble)를 정의할 수 있으며, 전체 프로세스의 추적성을 높이는데 효과적으로

활용된다[21]. 부품의 품질 정보와 검사 결과는 설계-제조-검사에 대한 제조산업 디지털 쓰레드의 결과 데이터로서 중요하며, ISO/TC184/SC4에서는 이러한 검사 결과를 포함하여 품질정보의 상호 운용성을 높이기 위한 프레임워크를 ISO 23952로 표준화하고 있다[22]. 본 논문에서는 GD&T 검사 결과를 절삭가공 후 부품의 품질을 나타내는 지표로 선정하였고, 기계상 측정(On-machine Measurement, OMM)으로 취득한 좌표데이터를 이용하여 GD&T 결과를 연산한다. 또한, 품질 검사의 디지털 쓰레드를 위해서 CAD 정보, GD&T 정보, GD&T 검사 결과가 상호 조회될 수 있는 데이터 구조를 설계하였다. 검사 데이터는 실제 가공된 형상에 대한 정보 제공 외에도 3절의 가상가공 및 모니터링 데이터와 연계하여 예측 모델을 보완하는 참조데이터로도 활용할 수 있다.

4.2 디지털 쓰레드를 위한 표준화 CAD 정보 데이터

부품의 솔리드 모델은 CATIA, NX UG, SolidWorks 등 다양한 CAD 프로그램에서 작성되며, 일반적으로 객체를 면(Surface)의 집합으로 표현하는 B-Rep (Boundary Representation)으로 설계된다[23]. ISO 10303은 각 CAD 프로그램의 모델링 데이터 간 호환이 어려운 문제를 해결하고자 제정된 표준으로, 제품 모델 데이터 교환을 위한 표준화된 데이터 형식이다[24]. 특히 ISO 10303 AP242는 Fig. 7과 같이 3차원 형상정보뿐만 아니라 모델기반(Model Based Definition, MBD)으로 제품 및 제조정보(Product & Manufacturing Information, PMI), 공정계획(Process Plans) 등을 포함하고 있다[25]. 본 연구에서는 CAD 프로그램에 중립적인 디지털 쓰레드 구축을 위해서 AP242를 기준으로 하였고, AP242의 CAD 정보와 GD&T 정보를 추출하여 데이터화하는데 활용하였다.

CAD 형상정보는 AP242 스키마에 의거하여 Fig. 8과 같이 B-Rep의 정의로부터 상호 참조관계를 통해 형상을 정의하는 점과 법선 벡터까지 연결되어 있다. 품질과 설계의 디지털 쓰레드를 위해서 상호 참조를 위한 기준 특성(Feature)의 정의가 필수적으로 설정되어야 하고, 본 연구에서는 AP242의 GD&T에서 지정하는 기하 특성인 ‘ADVANCED_FACE’로 결정하였다. 이 특성은 면의 범위(Face Bound)를 정의하여 기본 구성단위인 점과 법선 벡터를 결정한다. AP242 규격 파일(STP)을 입력하면 CAD 정보 데이터는 ‘ADVANCED_FACE’ 정보를 포함하여 Fig. 9(a)와 같은 데이터 구조로 디지털 쓰레드 조회 모듈로 전송되며, 전송 형식은 데이터 교환에 용이한 개방형 표준 형식인 JSON으로 선정했다.

4.3 디지털 쓰레드를 위한 GD&T 데이터

절삭가공 부품의 품질 검사 데이터를 절삭가공 디지털 쓰레드와 연계하기 위해, 본 연구에서는 AP242를 기반으로 GD&T 정보와 검사 결과를 저장하는 데이터 구조를 설계하였다. 제조현장에서 부품의 GD&T 검사 데이터는 3차원측정기(Coordinate Measuring Machine, CMM), 기계상 측정, 머신 비전(Machine

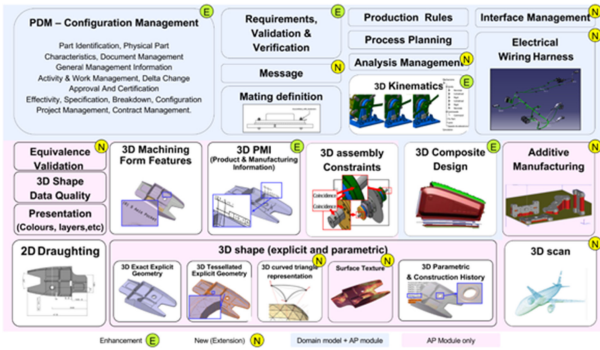


Fig. 7 Overview of ISO 10303 STEP AP242 edition 2 “Managed model based 3D engineering” [26] (Adapted from Ref. 26 on the basis of website)

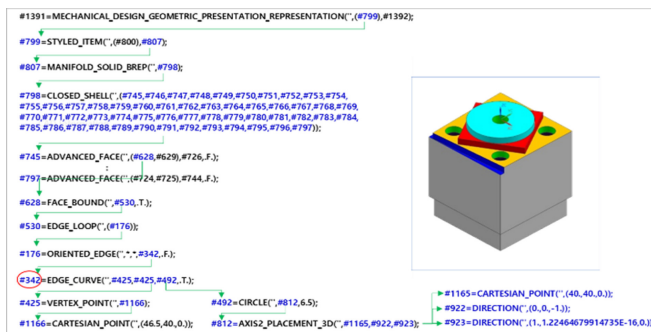


Fig. 8 Reference system for 3D model definition in ISO 10303-AP242

Table 1 Entities in ISO 10303-AP242 for obtaining geometrical tolerance

Geometrical tolerance		
Type	with datum system	without datum system
Entity	ANGULARITY_TOLERANCE	CYLINDRICITY_TOLERANCE
	CIRCULAR_RUNOUT_TOLERANCE	FLATNESS_TOLERANCE
	COAXIALITY_TOLERANCE	LINE_PROFILE_TOLERANCE
	CONCENTRICITY_TOLERANCE	POSITION_TOLERANCE
	PARALLELISM_TOLERANCE	ROUNDNESS_TOLERANCE
	PERPENDICULARITY_TOLERANCE	STRAIGHTNESS_TOLERANCE
	SYMMETRY_TOLERANCE	SURFACE_PROFILE_TOLERANCE
	TOTAL_RUNOUT_TOLERANCE	

Vision) 등을 통해 취득되며, 본 연구에서는 검사 절차의 간소함을 위해 터치프로브 기반의 기계상 측정 모듈을 통해 측정된 GD&T 검사 결과를 디지털 쓰레드에 연계할 수 있게 제공하였다.

치수공차는 ‘DIMENSIONAL_CHARACTERISTIC_REPRESENTATION’ 정보로부터 해당 GD&T를 참조하도록 하였다. GD&T는 Table 1과 같이 분류되고, 데이텀(Datum) 유무에 따라서 구분하여 참조하도록 하였다. GD&T 정보 데이터는 AP242의 GD&T 및 참조 정보로부터 공차의 표현, 크기, 대상 기하 특성을 각 공차 항목마다 저장되도록 하였고, Fig. 9(b)와 같이 데이터 구조를 수립하였다. 데이텀이 필요한 GD&T인 경우, 각 공차 항목은 데이텀에 대한 정의와 기하 특성을 참조하여 GD&T

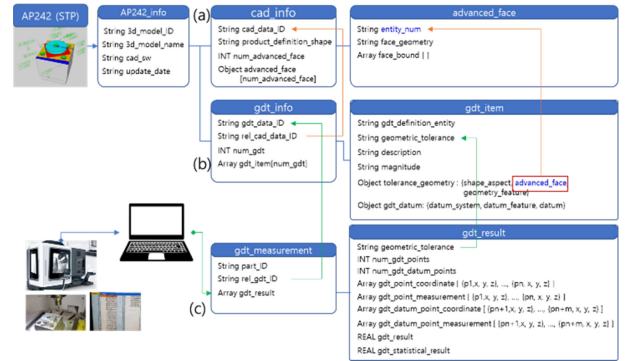


Fig. 9 Data structure of CAD, GD&T information and inspection result relative to json format

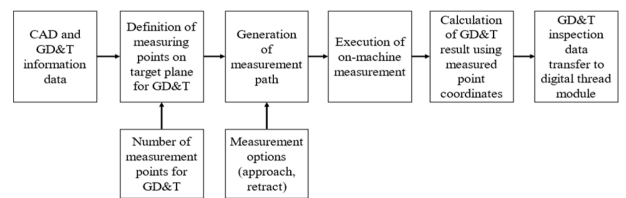


Fig. 10 GD&T inspection procedure via on-machine measurement for the digital thread

정보 데이터에 포함시킨다.

공작기계에서 기계상 측정을 통한 GD&T 검사 결과는 Fig. 10과 같은 절차로 디지털 쓰레드 조회 모듈로 전송된다. 측정되는 대상 점 위치는 GD&T 정보로부터 정의된 공차와 CAD 형상 정보에 의해 면이 결정되면, 사전에 설정한 GD&T별 측정 점 개수를 고려하여 결정한다. 프로브 충돌을 방지하기 위한 안전거리, 접근거리 등 측정관련 설정 정보와 결정된 측정 점 위치 정보를 통해 측정경로가 생성된다. 생성된 측정 경로를 CNC 공작기계에 입력하여 실행하면, 해당 점의 측정된 3차원 좌표 데이터가 유저 변수(User Variable) 저장 또는 직접 통신을 통해 취득된다. GD&T 검사 결과는 이 좌표 데이터와 공차별 계산식에 따라 연산된다. GD&T 검사 결과 데이터는 Fig. 9(c)와 같이 연관된 CAD 정보와 GD&T 정보를 참조하여 디지털 쓰레드 조회 모듈에 전달될 수 있도록 식별자를 부여하였다. 이 검사 데이터는 GD&T 검사 대상 점 및 측정된 좌표, 데이텀 측정 대상 점 및 측정된 좌표와 GD&T 계산 결과를 포함한다. ISO23952에서는 이러한 품질 검사에 대한 결과뿐 아니라 계획, 실행, 통제 등을 QIF (Quality Information Framework) 형식으로 범용적 데이터 교환이 되도록 표준화하고 있고, AP242와 비교 및 연계를 위한 연구도 진행되고 있다[27].

5. 절삭가공 디지털 쓰레드 구현

본 논문에서 제안한 절삭가공 분야의 디지털 쓰레드 프레임워크의 기능을 검토하기 위해 디지털 쓰레드 조회 및 가시화 모듈을

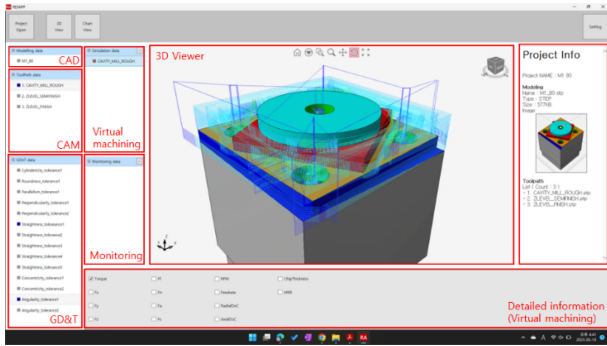


Fig. 11 Digital thread viewer (Virtual machining data)

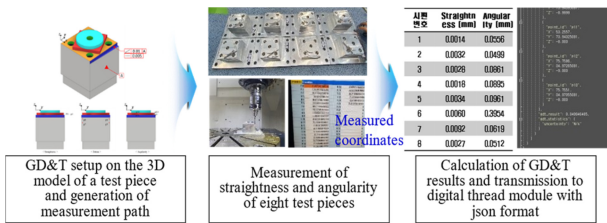


Fig. 12 Test steps and result for measuring straightness and angularity of test pieces

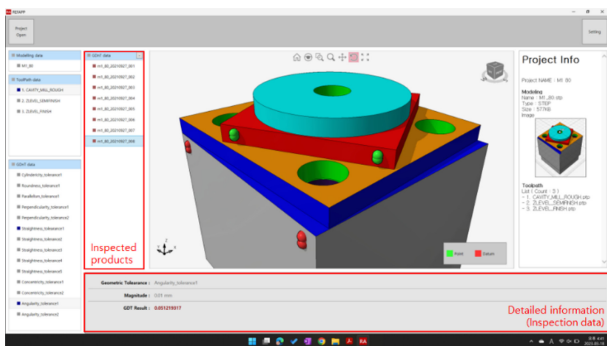


Fig. 13 Digital thread viewer (Inspection data)

구현했다. 제안된 디지털 스레드 프레임워크를 통해 관리되는 정보는 생성 순서대로 품질정보가 포함된 CAD 정보, CAM 정보, 가상가공정보, 모니터링정보 및 측정 정보이다. 공작기계의 기계능력지수를 평가하기 위해 사용되는 KS B ISO 10791-7을 참조하여 NX UG를 활용하여 대상 모델을 설계하였고, 진직도 (Straightness)와 경사도 (Angularity)를 GD&T 정보로 삽입한 후 AP242 규격으로 저장하였다. NX CAM을 활용하여 공구경로를 생성하였으며, 한국생산기술연구원이 보유한 가상가공기술을 활용하여 절삭 물리량을 생성하였다.

Fig. 11은 개발된 가시화 모듈을 보여주고 있다. 프로젝트의 간단한 설명부터 CAD, CAM, GD&T, 가상가공 데이터 및 모니터링 데이터를 선택하여 가시화할 수 있으며, 하단의 세부 정보를 통해 자세한 정보를 조회할 수 있다. Fig. 11은 황삭 가공 경로를 대상으로 가상가공기술을 통해 예측한 절삭토크의 크기를 색으로 비교하여 보여주고 있다.

Fig. 12는 품질 검사 데이터 모델을 검증하는 순서를 보여주고 있다. 개발된 AP242 규격 파일 해석 모듈을 이용하여 CAD와 품질 정보 데이터를 추출하였으며, CAD 및 GD&T 정보 데이터와 앞서 제안한 검사 절차를 통해 측정을 위한 터치프로브 이송경로를 생성하였다. 절삭가공 공정이 완료된 직후 절삭공구를 대신해 장착된 터치프로브가 측정 경로를 따라 이송하며 기계상에서 좌표를 측정하였다. 측정된 좌표를 이용하여 진직도 및 경사도를 계산한 후 디지털 스레드 프레임워크에 전달하였다. 총 8개의 제품에 대해 측정이 이루어졌으며, Fig. 13은 경사도 검사 결과를 보여주고 있다. 경사도이기 때문에 데이터가 필요하며, 목표치가 0.01 mm인데 측정값이 0.05 mm 이상이기 때문에 빨간색으로 표기되었다.

6. 결론

디지털 스레드는 디지털 트윈과 함께 절삭가공 기반 산업의 제조현장의 디지털 전환을 위한 핵심 기술이다. 본 연구에서는 절삭가공 기반 제조현장의 전주기에서 발생하는 데이터의 상호운용성(Interoperability)을 제고하기 위해 CAD, CAM, 가상가공, 공정 모니터링, 검사로 이어지는 절삭가공 디지털 스레드 프레임워크를 제안하였다. 이를 구현하기 위한 디지털 스레드 조회 모듈을 개발하여 3차원 CAD 모델을 시작으로 가상가공, 모니터링, 검사 데이터가 상호 참조되어 조회될 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 가상가공, 모니터링 및 측정 데이터를 위치상으로 동기화하고 분석하여 상호 간 연관성을 규명하는 연구가 추가로 진행 중이다. 더불어 가공품의 품질을 결정하는 주요 요인 중 하나인 공구마모를 관리하는 방안에도 고려하고 있다.

국제표준인 AP242 형식으로 저장된 형상정보와 품질정보를 기반으로 절삭가공 현장에서 필요하거나 생성되는 정보를 관리하였다. 이때, 정보 관리의 기준은 각 제조 단계에서 공정 행위가 이루어지는 면(Surface)으로 하였다. 가상가공 데이터와 모니터링 데이터를 동기화하여 예측치와 추정치 간 비교 분석을 가능하도록 하였으며, 일원화된 CNC 통신 방식을 적용하여 CNC 의존성을 낮추었다. 가공 직후 기계상에서 측정된 GD&T 검사 데이터를 제품별, 품질별로 조회하는 것도 가능하다. 공구경로 생성에 필요한 가공전략 및 가공조건을 ISO 14649를 기반으로 저장하는 모듈은 개발하였으나, 상용 모듈을 활용해서 공구경로를 생성할 때 AP242의 면정보가 변경되는 점은 향후 해결해야 하는 과제이다. 서로 다른 식별자로 저장된 면을 일치시키는 형상모델링 분야의 다양한 방법을 검토하여 적용할 예정이다. 국내 산업현장에서는 여전히 2D 도면으로 GD&T를 관리하고 있고, 3D 모델 기반의 GD&T 표현과 검사가 보편화되지 않고 있다. 하지만, 3D 모델 기반의 GD&T 표현은 자동으로 공차정보가 기입된 2D 도면을 생성하거나 CMM 측정 경로를 생성하는데 활용될 수 있으며, 3차원 CAD 활용 비중이 높은 상황을 고려할 때, 가까운 미래에 보편화될 것으로 예상된다.

제안된 디지털 스레드는 범용성을 확보하기 위해 국제표준을 기반으로 데이터를 관리하였으나, 작업현장에서 활용되는 대부분의 CAD/CAM 및 측정 솔루션은 저마다의 방식으로 데이터를 관리하고 국제표준은 데이터 교환을 위해 최소한으로 활용되고 있으며, 가상가공이나 모니터링데이터는 표준으로 논의되고 있지도 않는 단계라는 점이 디지털 스레드를 적용할 때 걸림돌이 될 수 있다. 그러나, 디지털전환의 큰 흐름속에 데이터 간 상호 참조가 가능한 디지털 스레드에 대한 현장의 요구는 계속해서 높아질 것이며 다양한 방법으로 해결 방안이 제시될 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 한국생산기술연구원 “[Key-Tech] DNA 플랫폼 기반 자율제조 기술(1/5) (kitech EH-23-0006)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

REFERENCES

- Jones, M. D., Hutcheson, S., Camba, J. D., (2021), Past, present, and future barriers to digital transformation in manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 936-948.
- Vial, G., (2019), Understanding digital transformation: A review and a research agenda, *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 118-144.
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., Devine, D., (2021), Digital twin: Origin to future, *Applied System Innovation*, 4(2), 36.
- ISO23247-1, (2021), Automation systems and integration-Digital twin framework for manufacturing-Part 1: Overview and general principles.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W., (2018), Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, *Ifac-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- Grieves, M., Vickers, J., (2017), Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems, *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*, 85-113.
- Negri, E., Fumagalli, L., Macchi, M., (2017), A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems, *Procedia Manufacturing*, 11, 939-948.
- Leiva, C., (2016), Demystifying the digital thread and digital twin concepts, *IndustryWeek*. https://info.ibaset.com/hubfs/Demystifying_the_Digital_Thread_and_Digital_Twin.pdf
- Singh, V., Willcox, K. E., (2018), Engineering design with digital thread, *AIAA Journal*, 56(11), 4515-4528.
- Zhang, Q., Zheng, S., Yu, C., Wang, Q., Ke, Y., (2022), Digital thread-based modeling of digital twin framework for the aircraft assembly system, *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 406-420.
- Jagusch, K., Sender, J., Jericho, D., Flügge, W., (2021), Digital thread in shipbuilding as a prerequisite for the digital twin, *Procedia CIRP*, 104, 318-323.
- Feldhausen, T., Saleeby, K., Kurfess, T., (2021), Spinning the digital thread with hybrid manufacturing, *Manufacturing Letters*, 29, 15-18.
- Qiao, Q., Wang, J., Ye, L., Gao, R. X., (2019), Digital twin for machining tool condition prediction, *Procedia CIRP*, 81, 1388-1393.
- Armendia, M., Cugnon, F., Berglind, L., Ozturk, E., Gil, G., Selmi, J., Evaluation of machine tool digital twin for machining operation in industrial environment, *Procedia CIRP*, 82, 231-236.
- Altintas, Y., Aslan, D., (2017), Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring, *CIRP Annals*, 66(1), 349-352.
- TORUS. HMI platform product. http://www.torus.co.kr/product_list.html.php
- Kim, J., Yoon, J., Lee, D., (2019), Estimation of tangential cutting force using spindle load of CNC machining center, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 28(6), 343-349.
- Mostaghimi, H., Park, C. I., Kang, G., Park, S. S., Lee, D. Y., (2021), Reconstruction of cutting forces through fusion of accelerometer and spindle current signals, *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 990-1003.
- Kang, G., Kim, J., Choi, Y., Lee, D. Y., (2022), In-process identification of the cutting force coefficients in milling based on a virtual machining model, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 23(8), 839-851.
- Lubell, J., Chen, K., Horst, J., Frechette, S., Huang, P., (2012), Model based enterprise/technical data package summit report, NIST Technical Note. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1753>
- Hedberg, T., Lubell, J., Fischer, L., Maggiano, L., Barnard Feeney, A., (2016), Testing the digital thread in support of model-based manufacturing and inspection, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16(2). <https://doi.org/10.1115/1.4032697>
- ISO23952. (2020), Automation systems and integration-Quality information framework (QIF)-An integrated model for manufacturing quality information.
- Lienhardt, P., (1991), Topological models for boundary representation: A comparison with n-dimensional generalized maps, *Computer-aided Design*, 23(1), 59-82.
- ISO10303-1, (2021), Industrial automation systems and integration-Product data representation and exchange-Part 1: Overview and fundamental principles.

25. ISO10303-242, (2020), Industrial automation systems and integration-Product data representation and exchange-Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering.
26. STEP AP242 Project, AP242 Ed2. <http://www.ap242.org/edition-2/>
27. Heysiattalab, S., Morse, E. P., (2016), From STEP to QIF: Product and manufacturing information, Proceedings of the 31th American Society of Plumbing Engineers Annual Meeting, 312-317.

**Hoon Hee Lee**

Senior Researcher in the Precision Mechanical Process and Control R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is machine tool metrology and precision process control.

E-mail: hhlee84@kitech.re.kr

**Dong Yoon Lee**

Principal Researcher in the Digital Transformation R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology. His current research topics are in-process monitoring/control using CNC communication and sensors, virtual machining, and process optimization.

E-mail: dylee@kitech.re.kr

소형 드론을 위한 주파수 영역 식별과 모델 기반 외란 관측기

Frequency Domain Identification and Model-based Disturbance Observer for a Mini Drone

정규환¹, 안형준^{1,#}
Kyu-Hwan Chung¹ and Hyeong-Joon Ahn^{1,#}

¹ 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)
Corresponding Author / E-mail: ahj123@ssu.ac.kr, TEL: +82-820-0654
ORCID: 0000-0002-4947-2311

KEYWORDS: Mini drone (소형 드론), Frequency domain identification (주파수 영역 식별), Model-based disturbance observer (모델 기반 외란 관측기)

Drone is an innovative industry that can combine the application of various technologies in the fourth industrial era, such as big data, artificial intelligence, and ICT. Although the synergy effects of these technologies will be great in various industrial ecosystems, drones are vulnerable to gusts such as 'building wind' or 'valley wind'. Herein, the frequency domain of a mini drone was identified and a model-based disturbance observer (DOBs) was applied to implement the drone robust resistance against gusts. The frequency response of the Parrot Mambo or mini drone was measured with multi-sine excitation and the system dynamic parameters were identified. Based on the identified model, DOBs were designed and applied to the drone's altitude, position, and yaw control. The effectiveness of the DOBs was verified with a sinusoidal disturbance. With the model-based DOB, 84.5% of the drone altitude responses, 50.7% of x responses, 52.1% of y responses, and 79.7% of yaw responses against sinusoidal disturbances were reduced. Flight responses were measured against wind disturbances with changing speed and direction. With the model-based DOBs, the drone's altitude decreased by 87.7%, the x position by 53.0%, the y position by 60.6%, and the yaw angle by 56.2%.

Manuscript received: November 17, 2022 / Accepted: December 27, 2022

NOMENCLATURE

b	= Thrust Coefficient
d	= Drag Coefficient
F_d	= Disturbance
\hat{F}_{dis}	= Estimation of Disturbance
f	= Thrust Force of Motor
g	= Gravity Acceleration
g_{DOB}	= Bandwidths of DOB
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	= Rolling, Pitching, Yawing Moment of Inertia
J_r	= Rotor Moment of Inertia
K	= Thrust Coefficient of DOB
l	= Length of Lateral Moment Arm of Drone

m	= Mass
s	= Laplace Complex Variable
T_s	= Sampling Time
U	= Motor Thrust for Unit Control Value
U_z	= Control Thrust Input of Altitude
U_ϕ, U_θ, U_ψ	= Control Torque Input of Roll, Pitch, Yaw
x, y, z	= Relative Position of Inertial Frame
Z	= Z-transform Complex Variable
Φ, θ, Ψ	= Roll, Pitch, Yaw Angle
Φ_c, θ_c, Ψ_c	= Control Input for Roll, Pitch, Yaw
Ω_d	= Total Angular Velocity of the Motor
τ_M	= Motor Torque

ω	=	Motor Angular Velocity
i	=	i^{th} Value
n	=	Nominal Value

1. 서론

드론은 4차 산업 시대의 다양한 기술을 응용할 수 있는 첨단기술 융합산업으로, 조종이 쉽고 비용이 저렴하며 수직 이착륙이 가능하여 교육, 군사, 레저 등 다양한 분야에 활용되고 있다[1].

실내보다 상대적으로 많은 외란이 발생하는 실외에서는 ‘빌딩풍’이나 ‘골짜기 바람’ 같은 돌풍으로 드론이 추락하거나 임무 완료시간이 지연될 수 있다[2]. 특히, 소형 드론은 가볍고 작기 때문에 실외에서 제어 성능이 저하될 수 있어 외란 제거를 위한 기술이 필요하다.

드론의 외란 제거를 위해 인공신경망 등 여러 기법들이 사용되고 있지만 돌풍과 같은 불규칙적인 환경에서는 학습 및 제어의 복잡성 등 한계점이 있다[3]. 모델 기반 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 간단한 구조로 유입된 등가 외란을 추정하여 효과적으로 외란을 제거할 수 있다[4].

모델 기반 외란 관측기 적용을 위한 공칭 모델은 시스템 모델링이나 식별로 구할 수 있다. 질량, 관성 모멘트 그리고 공진 주파수와 같은 기계 시스템의 동역학 모델 정보를 얻기 위해 시간 영역보다는 주파수 영역 시스템 식별이 유리하다[5].

Matlab과 Simulink는 드론 제어 시스템 개발 및 성능 분석에 많이 사용된다. Matlab과 연동되는 드론 중 Parrot Mambo는 비교적 저렴하며 높은 기동성을 가진다[6].

이 논문에서는 소형 드론 주파수 영역 식별을 수행하고 모델 기반 외란 관측기를 적용하여 돌풍에 강건한 드론을 구현하였다. Matlab과 Simulink를 이용하여 다중 정현파 가진에 대한 소형 드론의 주파수 응답을 측정하고 시스템 식별을 수행한다. 식별한 모델 기반으로 외란 관측기를 설계하고 정현파 외란 제거 성능을 비교하여 그 유효성을 실험적으로 검증한다. 최종적으로 서큘레이터를 이용해 실제 돌풍 외란을 가하고 외란 관측기 성능을 실험적으로 확인하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 드론의 수학 모델

Fig. 1에 드론 좌표계를 나타냈다. S 는 \sin , C 는 \cos , x, y, z 는 관성 좌표계 내 상대위치, g 는 중력 가속도, ϕ, θ, ψ 는 오일러 각, I 는 관성 모멘트, J_r 는 모터 회전자 관성 모멘트, Ω_d 는 모터의 각속도 총합, $U_z, U_\phi, U_\theta, U_\psi$ 는 제어 추력 및 토크 입력을 의미한다.



Fig. 1 The coordinate for mathematical model of the drone

뉴턴-오일러 방정식을 기반으로 유도한 드론의 수학적 모델 [7]은 식(1), 식(2)와 같다. 식(1)은 병진 운동을 나타내고, 식(2)는 회전 운동을 나타낸다. 드론은 호버링 상태에서 식(3)을 만족한다[8]. 회전하는 모터는 추력과 토크를 생성하며 식(4)가 성립한다[9].

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} U_z \begin{bmatrix} S\psi S\phi + C\phi S\theta C\psi \\ -C\psi S\phi + C\phi S\theta S\psi \\ C\phi C\theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(I_{yy} - I_{zz})}{I_{xx}} \\ \frac{(I_{zz} - I_{yy})}{I_{yy}} \\ \frac{(I_{xx} - I_{yy})}{I_{zz}} \end{bmatrix} - J_r \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} \Omega_d + \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{xx}} U_\phi \\ \frac{1}{I_{yy}} U_\theta \\ \frac{1}{I_{zz}} U_\psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[U_z, U_\phi, U_\theta, U_\psi] = [mg, 0, 0, 0]$$

$$[\ddot{\phi}, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}] = [0, 0, 0]$$

$$[\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}] = [0, 0, 0] \quad (3)$$

$$[\phi, \theta, \psi] = [0, 0, \psi]$$

$$[x, y, z] = [x, y, z]$$

$$f_i = b\omega_i^2$$

$$\tau_{M_i} = d\omega_i^2 + J_r\dot{\omega}_i \quad (4)$$

f_i 는 모터 축 방향 추력, τ_{M_i} 는 모터 토크, b 는 추력 계수, d 는 항력 계수, ω 와 $\dot{\omega}$ 는 각각 모터 각속도와 각가속도를 의미한다. 보통 $\dot{\omega}_i$ 의 영향은 매우 작기 때문에 $J_r\dot{\omega}_i$ 항은 생략된다.

드론 고도 및 롤, 피치, 요 전달함수는 식(1)부터 식(3)을 통해 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

Table 1 Physical parameters of the Parrot Mambo

Specifications	Para.	Unit	Value
Mass	m	kg	0.063
Lateral moment arm	l	m	0.0624
Thrust coefficient	b	Ns ²	0.0107
Drag coefficient	d	Nms ²	0.78264×10^{-3}
Moment of inertia	Rolling	I_{xx}	0.58286×10^{-4}
	Pitching	I_{yy}	0.71691×10^{-4}
	Yawing	I_{zz}	0.0001
	Rotor	J_r	0.1021×10^{-6}

$$G(s)_z = \frac{z}{f} = \frac{1}{ms^2}$$

$$G(s)_R = \frac{\phi}{\tau} = \frac{1}{I_{xx}s^2}$$

$$G(s)_P = \frac{\theta}{\tau} = \frac{1}{I_{yy}s^2}$$

$$G(s)_Y = \frac{\psi}{\tau} = \frac{1}{I_{zz}s^2}$$

(5)

2.2 소형 드론 Parrot Mambo

Parrot Mambo는 180 × 180 × 58 mm 크기의 소형 드론이다. 3축 가속도와 3축 자이로를 포함한 6자유도 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서, 초음파 센서, 기압 센서, 120 × 160픽셀 해상도 60FPS 카메라가 장착되어 있다. 또한 Matlab과 Simulink 패키지를 지원하여 드론 비행 및 제어 알고리즘을 변경할 수 있으며 블루투스를 이용하여 0.005초마다 센서 정보를 수집할 수 있다[8]. Table 1은 Parrot Mambo 드론의 물리 정보를 나타냈다.

2.3 제어 시스템 구성

Parrot Mambo 제어시스템에는 Fig. 2와 같이 위치, 자세, 요, 고도 PID 제어를 사용한다. 각각의 제어를 통해 기준 입력에 대응하는 제어값인 $U_z, \phi_c, \theta_c, \psi_c$ 가 출력된다. U_z 는 필요 추력 제어값, ϕ_c, θ_c, ψ_c 는 각각 필요 롤, 피치, 요 각도 제어값을 의미한다. 각 모터가 내야 할 추력인 U_1, U_2, U_3, U_4 는 단위 제어값 당 추력을 나타내는 Mixer 블록을 통해 식(6)과 같이 계산된다. 이후, Motor Command 블록을 통해 추력 값이 모터 각 속도 명령인 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & -5.666 & -5.666 & 103.574 \\ 0.25 & 5.666 & -5.666 & -103.574 \\ 0.25 & 5.666 & 5.666 & 103.574 \\ 0.25 & -5.666 & 5.666 & -103.574 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_z \\ \phi_c \\ \theta_c \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

(6)

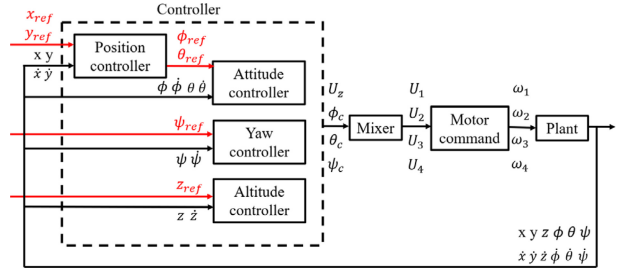


Fig. 2 Control system of the drone

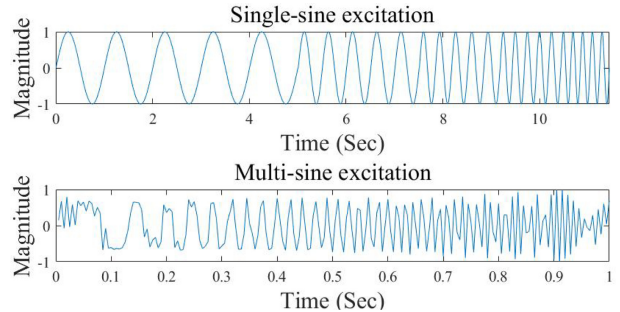


Fig. 3 Single-sine and multi-sine excitation signals

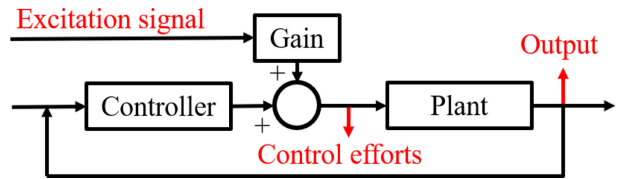


Fig. 4 Input and outputs for frequency domain identification

Table 2 Gain of excitation signals

Gain	Single sine	Multi-sine
Altitude [N]	7.5e-2	2.25e-1
Roll [rad]	6.3e-4	5.67e-3
Pitch [rad]	5.4e-4	4.86e-3
Yaw [rad]	3.0e-4	9.0e-4

3. 주파수 응답

3.1 드론 주파수 응답 측정

Fig. 3과 같이 1에서 5 Hz까지 1 Hz 간격의 정현파와 다중 정현파로 가진하고 Fig. 4의 Control Efforts와 Output에서 응답을 받아 소형 드론 주파수 응답을 측정하였다. 적절한 응답을 위해 가진 응답이 드론이 호버링 시 발생하는 응답의 3배가 되도록 가진 신호 크기를 결정하였다. Table 2는 각 외란 입력의 이득 값을 정리한 표이다.

식(6)에서 계산한 U_1, U_2, U_3, U_4 는 각 모터가 내야 할 추력이기 때문에 관성모멘트에 대한 보드 선도를 작성하기 위하여 토크 입력으로 변환해야 한다. 식(4), 식(6) 그리고 Table 1을 통해 롤, 피치, 요에 대한 제어값-토크 계수를 구할 수 있다.

요에 대한 1번 모터의 토크를 구하면 식(7)과 같고 모든 모터의 토크 값을 더하면 식(8)과 같다. 또한, 롤에 대한 1번 모터의 토크를 구하면 식(9), 식(10)과 같다. 피치에 대한 제어값-토크 계수도 롤과 같은 방식으로 구할 수 있다.

$$\tau_{M_1, \psi} = \frac{d}{b} U_{1, \psi} = \frac{0.78264 \cdot 10^{-3}}{0.0107} \cdot 103.5736 \cdot \psi_c = 7.58 \psi_c \quad (7)$$

$$\tau = \tau_{M_1} + \tau_{M_3} - (\tau_{M_2} + \tau_{M_4}) = 30.3 \psi_c \quad (8)$$

$$\tau_{M_1, \phi} = \frac{l}{2} U_{1, \phi} = \frac{0.624}{2} \cdot (-5.6659) \cdot \phi_c = -1.77 \phi_c \quad (9)$$

$$\tau = -(\tau_{M_1} + \tau_{M_3}) + \tau_{M_2} + \tau_{M_4} = 7.07 \phi_c \quad (10)$$

3.2 주파수 응답 측정 결과

측정한 주파수 응답으로 드론 물리 모델을 식별하였고 Fig. 5에서와 같이 이론 모델과 비교하여 그 신뢰성을 확인하였다. Table 3은 정현파와 다중 정현파로 가진하여 측정한 주파수 응답과 이론적으로 예측한 응답 차이를 나타낸다. 정현파 가진을 통한 시스템 식별이 이론 모델을 더 잘 근사함을 알 수 있다.

4. 외란 관측기

4.1 외란 관측기 설계

이 논문에서는 고도, 위치, 요 제어기에 외란 관측기를 사용하였으며 사용한 외란 관측기 구조는 Fig. 6과 같다[6]. F_n 는 외란, m_n 는 공칭 질량, m 는 실제 질량, g_{DOB} 는 외란 관측기 대역, K_n 는 공칭 추력 계수, K 는 실제 추력 계수, \hat{F}_{dis} 는 외란 추정치를 의미한다. 외란 관측기 기반 제어 시스템은 플랜트에 유입된 외란과 동일한 등가 외란을 추정하여 그 차이를 보상한다. 실험으로 식별한 공칭 질량은 고도 외란 관측기에 사용하고, 공칭 롤, 피치 관성 모멘트는 위치 외란 관측기, 공칭 요 관성 모멘트는 요 외란 관측기에 사용하였다. 외란 관측기 대역은 외란 주파수의 10배, 추력 계수는 제어값-토크 계수인 외란 관측기를 설계하였다.

4.2 정현파 외란 제거 실험

0.5와 1 Hz 정현파 외란을 가하고 외란 관측기 적용 여부에 따른 정현파 외란 제거 성능을 Fig. 7에 나타냈다. Table 4는 외란 관측기 적용 여부에 따른 외란 응답 크기와 외란 응답 감소를 나타냈다. 모델 기반 DOB를 적용하여 드론 고도 응답의 84.5%, x 응답의 50.7%, y 응답의 52.1%, 요 응답의 79.7%가 제거되었다. 식(1)의 롤, 피치, 요가 결합된 비선형 모델 때문에 고도나 요의 외란 제거 성능이 위치 외란 성능보다 우수하게 나온다.

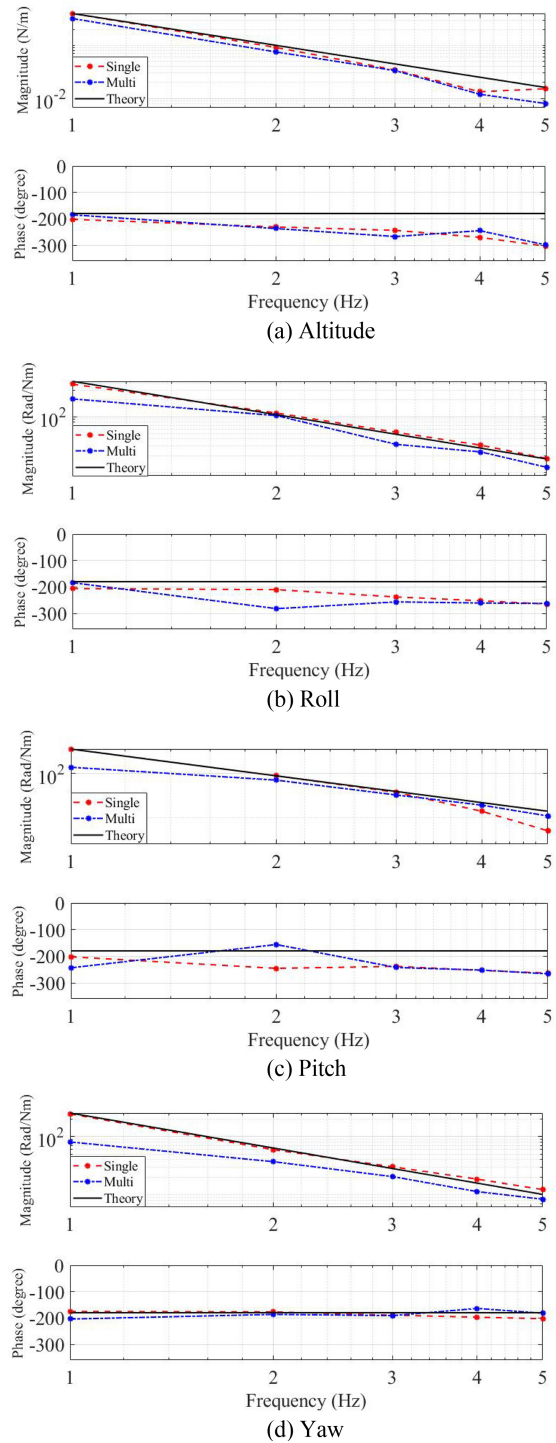


Fig. 5 Bode plot of drone

Table 3 Magnitude, phase errors of system identification

	Mag. error [%]		Phase error [%]	
	Single	Multi	Single	Multi
Altitude	16.89	34.49	34.70	37.01
Roll	8.49	26.61	30.18	38.50
Pitch	21.02	26.25	33.68	34.25
Yaw	11.09	36.59	6.35	6.68

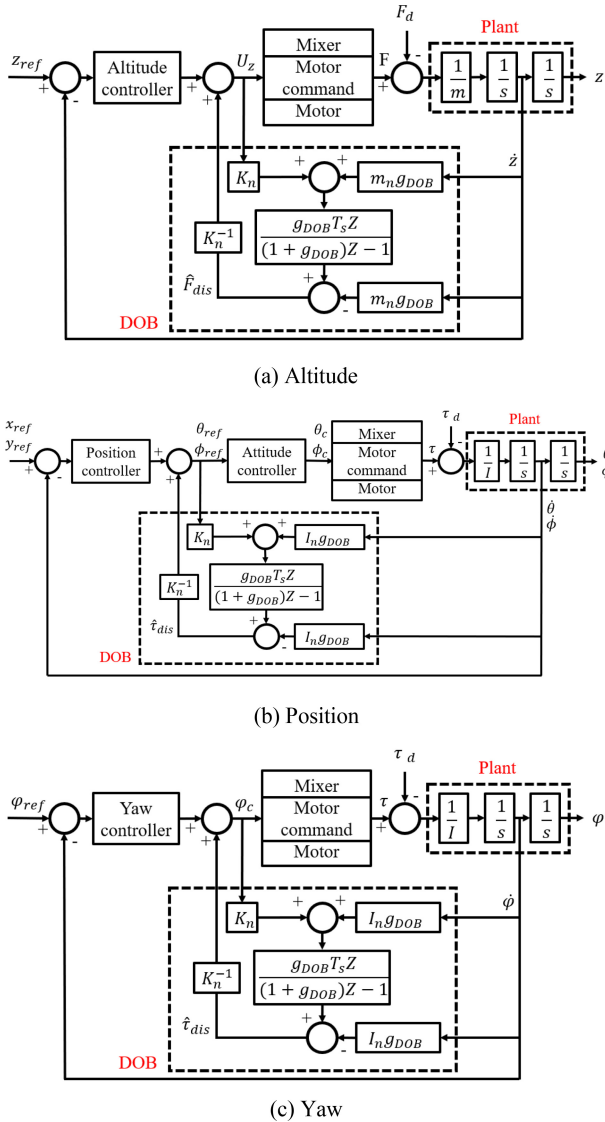


Fig. 6 DOB structure of a drone controller [6] (Adapted from Ref. 6 with website)

Table 4 Sinusoidal disturbance removal rate of the drone W/T and W/O DOB

Dir.	W/O Dist.	W/O DOB	W/T DOB	Removal rate [%]
Altitude [m]	1.08e-2	5.38e-2	8.3e-3	84.5
X [m]	4.51e-2	4.18e-2	2.06e-2	50.7
Y [m]	2.39e-2	5.33e-2	2.55e-2	52.1
Yaw [rad]	9.50e-3	2.01e-1	4.08e-2	79.7

4.3 돌풍 외란 제거 실험

330 × 300 × 403 mm 크기 신일전자 SIF-KC15 서클레이터로 풍속과 풍향을 변경시키며 외란을 부가하고 외란 관측기가 고도 및 롤, 피치, 요 제어기에 적용된 드론의 비행안정성을 Fig. 8과 같이 실험적으로 확인하였다. 서클레이터의 풍속은 1.5 m/s, 서클레이터와 드론 사이 거리는 2 m, 상하 풍향은 0.464 rad로

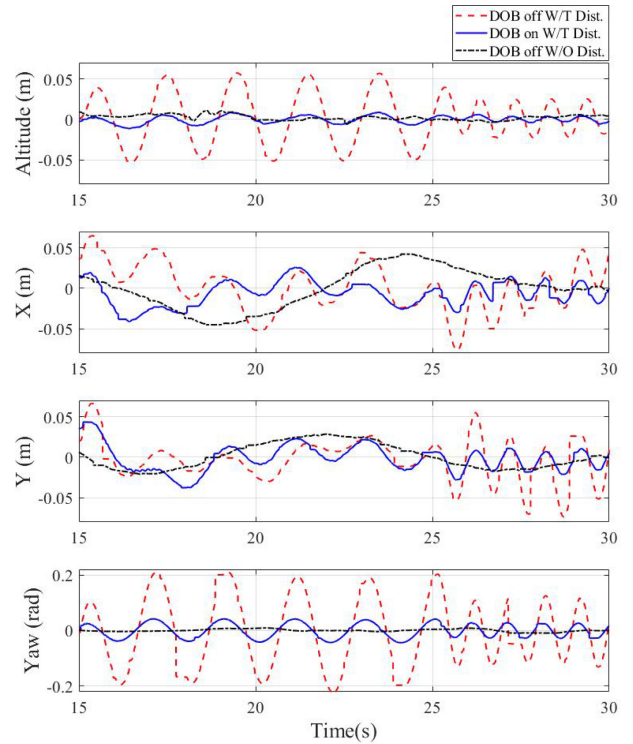


Fig. 7 Sinusoidal disturbance rejection of the drone W/T and W/O DOB



Fig. 8 Disturbance rejection experiments with a circulator

결정하였고, 좌우 풍향은 1.31 rad 범위에서 0.131 rad/s로 변화시켰다. 확장 칼만 필터(EKF)를 사용하여 드리프트 현상에 따른 IMU 센서의 불확실성을 제거하였으며 Fig. 9와 Table 5에 외란 관측기 적용 여부에 따른 드론의 외란 제거 성능을 나타냈다. 모델 기반 DOB를 적용하여 드론의 고도 변화가 87.7%, x 위치 변화가 53.0%, y 위치 변화가 60.6% 그리고 요 각도 변화가 56.2% 감소하였다.

5. 결론

이 논문에서는 소형 드론의 주파수 영역 식별을 수행하고

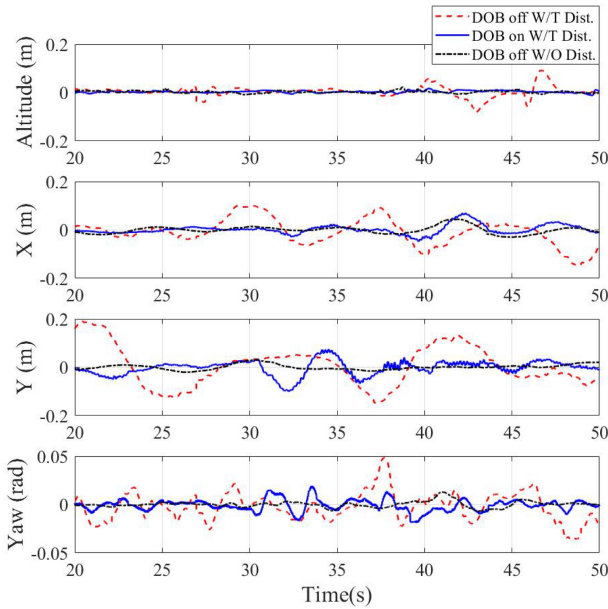


Fig. 9 Disturbance rejection results with a circulator

Table 5 Disturbance removal rate with a circulator

DOB	Off	On	Removal rate [%]
Altitude [m]	9.17e-2	1.13e-2	87.7
X [m]	1.46e-1	6.86e-2	53.0
Y [m]	1.89e-1	7.45e-2	60.6
Yaw [rad]	4.84e-2	2.12e-2	56.2

모델 기반 외란 관측기를 적용하여 돌풍에 강건한 드론을 구현했다. Matlab과 Simulink를 이용하여 다중 정현파 가진에 대한 소형 드론의 주파수 응답을 측정하고 시스템 식별을 수행했다. 모델 기반 DOB를 적용한 후 정현파 외란에 대해 드론 고도 외란 응답의 84.5%, x 외란 응답의 50.7%, y 외란 응답의 52.1%, 요 외란 응답의 79.7%가 제거되었다. 마지막으로 서클레이터를 이용해 바람의 속도 및 풍향이 변하는 외란을 드론에 가하고 외란 응답 측정 실험을 하였다. 모델 기반 DOB 적용 후 드론의 고도 변화가 87.7%, x 위치 변화가 53.0%, y 위치 변화가 60.6% 그리고 요 각도 변화가 56.2% 감소하였다.

REFERENCES

1. Korea Institute of Aviation Safety Technology, Domestic and foreign drone industry trends analysis report. http://www.kdrone.org/bbs/board.php?bo_table=data_rep&wr_id=18&sst=wr_hit&sod=desc&sop=and&page=1
2. Aviation and Railway Accident Investigation Board, Aircraft accident report. https://araib.molit.go.kr/USR/airboard0201/m_34497/lst.jsp

3. Chen, Z., Liu, C., Su, H., Liang, X., Zheng, M., (2022), A hybrid disturbance observer for delivery drone’s oscillation suppression, *Mechatronics*, 88, 102907.
4. Sariyildiz, E., (2021), A guide to design disturbance observer-based motion control systems in discrete-time domain, *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 1-6.
5. Grauer, J. A., Boucher, M. J., (2020), Aircraft system identification from multisine inputs and frequency responses, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 43(12), 2391-2398.
6. MathWorks, Parrot minidrones support from Simulink. <https://kr.mathworks.com/hardware-support/parrot-minidrones.html>
7. Noordin, A., Basri, M., Mohamed, Z., (2020), Simulation and experimental study on PID control of a quadrotor MAV with perturbation, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(5), 1811-1818.
8. Kaplan, M. R., Eraslan, A., Beke, A., Kumbasar, T., (2019), Altitude and position control of parrot mambo minidrone with PID and fuzzy PID controllers, *Proceedings of the 2019 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 785-789.
9. Luukkonen, T., (2011), Modelling and control of quadcopter. https://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf



Kyu-Hwan Chung

Undergraduate student at the School of Mechanical Engineering, Soongsil University.
E-mail: rocrucium1@naver.com



Hyeong-Joon Ahn

Professor at the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is mechatronics including sensors, actuators and control.
E-mail: ahj123@ssu.ac.kr

M.2 NVMe SSD의 신뢰성 향상을 위한 히트싱크 열 설계

Thermal Design of Heatsink for M.2 NVMe SSD Reliability

김찬호¹, 노진성², 김종배^{1,#}
Chan Ho Kim¹, Jinsung Rho², and Joong Bae Kim^{1,#}

¹ 공주대학교 기계자동차공학부 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University)
² 한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University)
Corresponding Author / E-mail: joongbae.kim@kongju.ac.kr, TEL: +82-41-521-9249
ORCID: 0000-0003-1769-7361

KEYWORDS: M.2 NVMe SSD, Heatsink (히트싱크), Thermal design (열 설계), Optimization (최적화)

M.2 NVMe SSD (Non-Volatile Memory express Solid-State Drive), which have higher computational speed and reliability than conventional devices, have come to be widely used. Recent studies have reported that M.2 NVMe SSD are beginning to have thermal issues due to the increasing heat generation occurring with the high chip density and high-performance operation in a limited space. Thermal issues in the controller and memory units of M.2 NVMe SSD lead to increased failure rates and decreased data retention times. In this study, we propose a compact and optimized thermal solution for commercial M.2 NVMe SSD installed between the mainboard and GPU (Graphic Processing Unit). A thermal and fluid dynamics simulation of an M.2 NVMe SSD, including the heatsink, was performed, and the Genetic Algorithm method was used to optimize the heatsink size.

Manuscript received: December 30, 2022 / Revised: February 26, 2023 / Accepted: March 2, 2023

NOMENCLATURE

C_p	=	Specific Heat at Constant Pressure
V	=	Velocity
T	=	Temperature
T_{max}	=	Maximum Temperature
T_{min}	=	Minimum Temperature
T_{case}	=	Case Temperature
W	=	Watt
L	=	Length
w	=	Width
(x)	=	Heatsink Fin Height
(y)	=	Heatsink Base Height
t	=	Heatsink Fin Thickness

1. 서론

최근 반도체 기술의 발달 및 전자기기의 고성능화에 따라 요소 부품들의 고집적 발열이 고장을 증가, 시스템 불안정성의 문제를 야기하며 열 설계의 중요성이 더욱 강조되고 있다[1-4]. 컴퓨터 저장장치 분야에서도 이러한 문제는 마찬가지이다. 반도체 구조에 정보를 저장하는 Solid-State Drive (SSD)는 디스크 회전 방식의 Hard Disk Drive (HDD) 대비 빠른 데이터 전송 속도, 높은 내충격성, 적은 전력 소비 등과 같은 장점이 있어 최근 컴퓨터의 일반적인 주 저장장치로 사용되고 있다[5,6]. 그 중에서도 M.2 NVMe SSD는 기존의 SATA 방식을 사용하는 SSD 대비 높은 읽기/쓰기 속도를 가지며, SATA 방식 SSD 대비 25%의 면적을 가지고 있어 일반 데스크탑 뿐만 아니라 노트북과 태블릿 PC 등 휴대용 전자 기기에서 높은 활용성을 보여준다[7-9]. 최근 출시된 M.2 NVMe SSD의 경우 7,000 MB/s 까지 연산 속도가 향상되었으나, 고성능/고집적화로 인한 전력밀도의 상승으로 발열량이 급격하게 증가했다[9,10]. 선행 연구를 통해 보고된 바에 따르면 온도가 66°C에서

85°C로 상승할 때 데이터 보유 시간은 1/10으로 단축되고[11], 고장을 또한 60°C 이상에서 급격하게 증가한다고 한다[12]. 따라서 M.2 NVMe SSD의 작동 온도를 낮추는 것은 전자기기의 데이터 보호 및 신뢰성 측면에서 매우 중요하다.

M.2 NVMe SSD를 냉각시키기 위한 가장 일반적인 방법은 제한된 공간에서 노출 면적을 극대화하는 Heatsink를 장착하는 방식이다[13,14]. Heatsink는 간단한 구조와 뛰어난 경제성을 가지고 있어 다양한 분야에서 방열장치로 두루 사용되고 있다[15,16]. M.2 NVMe SSD 열관리와 관련해서는 최근 Heat Pipe와 Heatsink를 결합한 연구가 보고된 바 있고[17], 그래픽카드 슬롯에 직접 연결하여 냉각하는 방식 또한 보고되었다[18]. 하지만 실용적 측면에서 M.2 NVMe SSD가 메인보드와 그래픽카드 사이에 장착될 경우 공간이 협소하여(폭 10 mm) Heat Pipe의 설치가 불가능하고, 그래픽카드 슬롯에 직접 연결하는 방식 또한 다른 장치 연결이 어렵다는 한계가 있다. 따라서 M.2 NVMe SSD의 원활한 활용을 위해서는 제한된 공간에서 쉽게 적용이 가능하며 냉각 성능이 우수한 Heatsink가 필수이다.

본 연구에서는 제한된 공간에서 M.2 NVMe SSD의 냉각 성능을 극대화할 수 있는 Heatsink의 형상을 제안한다. 구체적으로는 열 해석을 통해 M.2 NVMe SSD의 발열 문제를 분석하고, 이를 극복하기 위해 Genetic Algorithm으로 Fin의 개수/높이/두께가 최적화된 Heatsink를 제안한다.

2. 연구 방법

2.1 열/유동 해석 모델 및 물성

Fig. 1은 M.2 NVMe SSD, Thermal Pad, Heatsink를 포함하는 열/유동 해석 모델의 개략도이다. M.2 NVMe SSD의 크기는 상용 2280 규격(22 × 80 mm²)으로 하였고, 주요 발열원인 Controller (CTRL), DRAM, NAND를 포함하여 모델링하였다. M.2 NVMe SSD의 상단에는 최적화 대상인 Heatsink를 위치시켰고, Heatsink와 M.2 NVMe SSD 사이의 열 저항을 최소화하기 위해 Thermal Pad를 배치하였다. 최적화된 열설계를 적용하기 전 기본 모델에는 Thermal Pad와 Heatsink를 포함하지 않는다.

Heatsink의 크기는 M.2 NVMe SSD와 동일한 2280 규격으로 하였으며, 높이는 그래픽카드와의 여유 공간 1 mm를 제외한 최대 높이인 5.7 mm, 개수는 가변적으로 설정하였다.

열/유동 해석을 위한 Domain은 메인보드(ASUS PRIME B660M-K)와 그래픽카드(INNO3D RTX3050) 사이에 위치하는 경우를 고려해 가로 40 mm, 세로 240 mm, 높이 15 mm으로 모델링 하였다.

해석에 사용된 요소들의 열 물성은 Table 1과 같다.

2.2 모델링 해석 Mesh

열/유동 해석의 정확도는 해석 모델의 Mesh 크기, 형상 등에 의존적이기 때문에 해석 모델 수립에 앞서 Mesh 크기의 의존도 분석을 수행하였다. Mesh 크기의 의존도 분석은 0.2 mm부터

Table 1 Thermophysical properties of M.2 NVMe SSD components

	Material	Density [kg/m ³]	C _p [J/kg·K]	Thermal Conductivity [W/m·K]
Domain	Air	1,225	1,006.43	0.0242
Heatsink	Al	2,719	871	202.4
PCB	FR4	2,719	871	0.2
CTRL	Si	2,329	713	124
CTRL cover	Cu	8,978	381	387.6
NAND	Si	2,329	713	124
NAND cover	Plastic epoxy	1,800	1,209	0.7
DRAM	Si	2,329	713	124
DRAM cover	Plastic epoxy	1,800	1,209	0.7
Thermal Pad	Silicone	3,100	713	2.9
Mainboard	FR4	2,719	871	0.2
Pillar	Al	2,719	871	202.4
Slot	Al	2,719	871	202.4

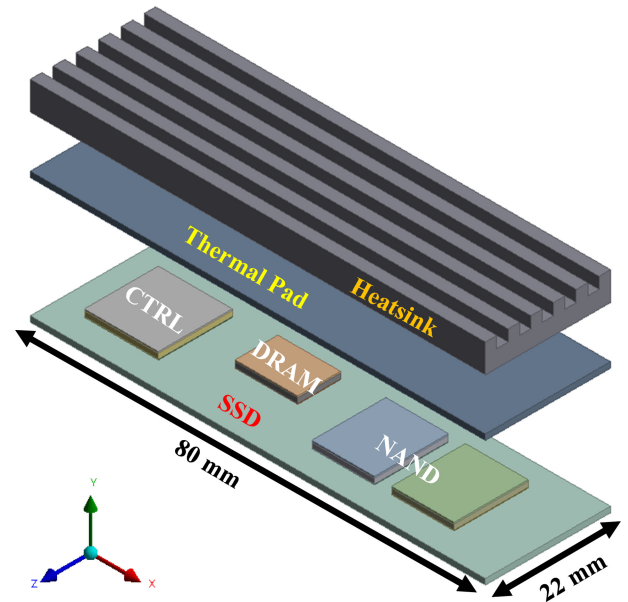


Fig. 1 Schematic of M.2 NVMe SSD

0.1 mm까지 0.005 mm 간격으로 수행하였다. Mesh는 열/유동 해석에서 효과적인 Multizone으로 생성하고, Mesh 크기는 M.2 NVMe SSD의 각 구성 요소 온도가 수렴하는 0.105 mm로 결정하였다.

Fig. 2를 통해 열/유동 해석 모델의 Mesh를 확인할 수 있다. Fig. 2는 열/유동 해석 Domain을 수직 방향으로 자른 후 X-Y 평면에서 나타낸 그림이다. M.2 NVMe SSD와 인접한 Mesh의 최소 크기는 0.105 mm로, M.2 NVMe SSD와 멀리 떨어진 Inlet과

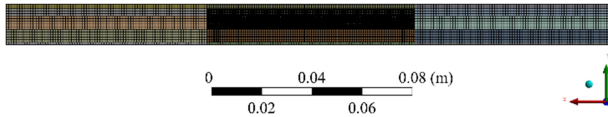


Fig. 2 Mesh for the numerical simulation

Outlet 부근의 Mesh 크기는 1.05 mm로 설정하였다. 그 결과 Node 수는 4,101,367개, Element 수는 3,578,167개로 생성되었다. 여기서, Mesh Quality를 나타내는 지표인 Skewness의 최댓값은 6.5752×10^{-6} 으로 나타났다. Skewness는 0-1의 값을 가지고 0.5 미만이면 좋은 품질을 가진 Mesh로 판단할 수 있어[19-22] 해당 해석 모델의 Mesh는 좋은 품질을 가진 것으로 판단된다.

2.3 경계 조건

열/유동 해석의 경계 조건은 Table 2와 같다. 본 연구의 목적은 M.2 NVMe SSD의 신뢰성 향상을 위한 열 설계 제안이기 때문에 열/유동 해석의 경계조건에서는 그래픽카드가 최고의 성능을 내는 극한의 상황을 가정하였다. 연구에서 사용한 그래픽카드 INNO3D RTX3050의 최대 작동 온도는 93°C이다.

본 연구에서는 그래픽카드와 인접한 상단면을 제외한 열/유동 해석 모델의 좌우/하단 면의 경계조건을 현실적으로 설정하기 위해 적외선 카메라를 이용하여 데스크탑의 작동환경에서의 온도 분포를 확인하였다. Fig. 3은 적외선 카메라를 통해 촬영한 메인보드와 그래픽 카드의 표면 온도 분포이다. 데스크탑의 최대 부하 상황을 강제로 구현하기 위해 본 연구에서는 그래픽카드 Benchmark 소프트웨어인 Superposition과 저장장치 테스트 소프트웨어인 나래온 DirtyTest를 활용하였다. 정상 상태인 열/유동 해석 모델과 동일하게 적외선 이미지 또한 충분한 시간을 두고 정상 상태에 도달하였을 때 촬영하였다.

Domain으로 유입되는 Inlet/Outlet의 풍속은 데스크탑에서 활용된 시스템 팬(DEEPCOOL GAMER STORM TF120S, 64.4 CFM)의 풍량 및 단면적 정보를 기준으로 설정하였으며, 온도는 테스트 환경에서의 실내 온도를 측정하여 활용하였다. M.2 NVMe SSD의 발열량은 기존 연구를 참고하여 각각 CTRL 2 W, DRAM 0.5 W, NAND 1.3 W로 설정하였다[23].

열/유동 해석 프로그램으로 ANSYS Fluent를 사용하였다. 난류 해석 모델로는 Re 수를 고려하여 ϵ 에 대한 보다 정확한 계산이 가능한 Realizable K- ϵ 을 선택하였고, 수치 해법으로는 정확한 결과를 얻기 위하여 Coupled를 사용하여 해석을 진행하였다[22].

2.4 Genetic Algorithm (GA)을 활용한 최적화

Genetic Algorithm (GA)은 자연의 현상을 모방한 최적화 방법이다[24]. Fig. 4에서 나타난 것과 같이 GA는 세대를 거치며 교차(Crossover), 변이(Mutation)를 반복하여 최적해를 탐색하는 최적화 기법이다. GA는 수학적으로 명확하게 정의되지 않는 문제를 해결할 수 있고, 다양한 분야에 적용할 수 있다는 장점이 있어[25-27] 하이브리드 자동차의 에너지 관리, 건물의 에너지 소비 최적화, 폐기물 관리 등 다양한 최적화 연구에서 활용된 바 있다[28-

Table 2 Boundary conditions

Top surface T [°C]	93
Side surface T [°C]	52.2
Mainboard surface T [°C]	50.3
Inlet T [°C]	27
Inlet V [m/s]	0.672

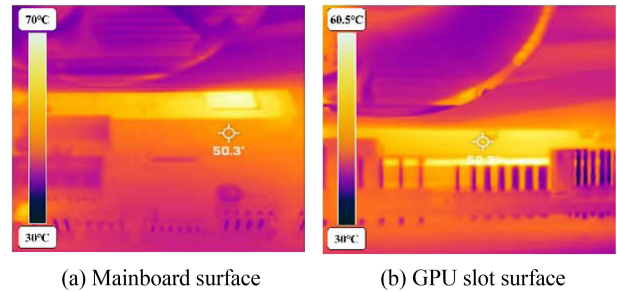


Fig. 3 Measurement temperature of IR camera

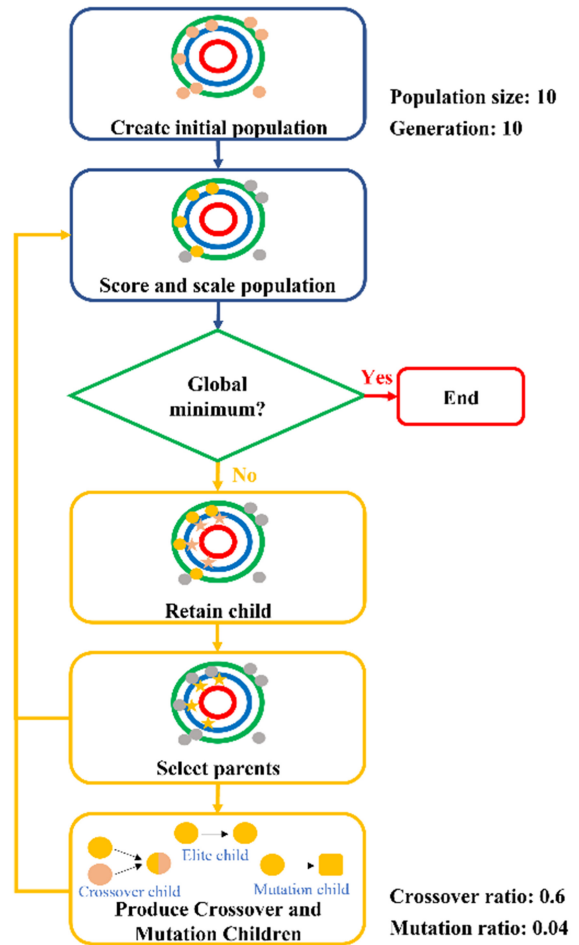


Fig. 4 Flow chart of GA (Genetic Algorithm)

30]. 본 연구에서는 간단하고 빠르게 정형화되지 않은 Heatsink 최적화 문제를 해결하기 위하여 ANSYS Fluent와 MATLAB Global Optimization Toolbox를 다양한 최적화 프로그램의 연동이

Table 3 Design variables and constraint conditions

Optimization target	CTRL T Minimization	
Heatsink width	w = 22	
Heatsink length	L = 80	
Fin number	Fin : 4-8	
Fin height	1 ≤ (x) ≤ 4.7	
Total height	(x) + (y) ≤ 5.7	
Fin thickness	4.75	[4Fin]
	3.6	[5Fin]
	2.83	[6Fin]
	2.285	[7Fin]
Fin thickness	1 ≤ t ≤ 1.875	[8Fin]

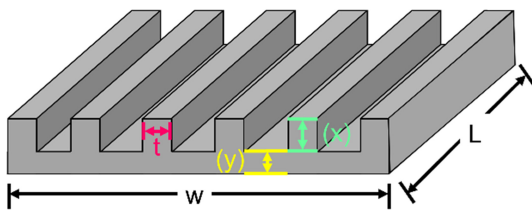


Fig. 5 Design variables of the heatsink

가능한 Direct Optimization을 활용하여 사용하였다.

본 연구에서는 M.2 NVMe SSD의 핵심 구동 요소인 CTRL의 최고 온도 최소화를 목적 함수로 설정하고 Heatsink Fin의 개수, 높이, 두께 등을 변수로 두어 최적화를 수행했다. Fig. 5에서 Heatsink 형상의 변수를 확인할 수 있다. Fin의 개수, 높이, 두께에 따라 Heatsink의 표면적, Fin의 전도 열 저항, 공기 유속은 상충관계에 있기 때문에 각각을 변수로 설정하였다.

GA에서 활용한 세부 정보는 Fig. 4와 같고, 제한 조건은 Table 3과 같다.

Heatsink의 폭과 길이는 앞서 언급한 2280 규격(22 × 80 mm²)으로 설정하였고, Fin의 높이는 그래픽카드와의 여유공간 1 mm를 제외한 최대 높이로 설정하였다. Fin의 두께는 Fin의 최소 간격을 1 mm로 하였을 때 Fin 개수에 따른 최대 두께로 제한 조건을 설정하였다.

최적화 과정에서 빠른 계산을 위하여 기본 M.2 NVMe SSD 해석 모델과 달리 Mesh 크기를 0.2 mm로 늘려 최적화를 진행하였고, 이 때 기본 모델 기준 Node 수는 691,935개, Element 수는 546,169개로 나타났고, Skewness의 최댓값은 2.0235 × 10⁻³으로 나타났다. 이때 케이스당 해석 시간은 약 2시간이다.

3. 결과 및 분석

3.1 Heatsink가 없는 기본 모델

Fig. 6은 Heatsink를 장착하지 않았을 때 M.2 NVMe SSD의 온도 Contour이다. 이 때 세부 구성 요소의 온도는 CTRL 105.2°C, DRAM 79.4°C, NAND는 각각 105°C, 107.2°C로 나타났다. 이는

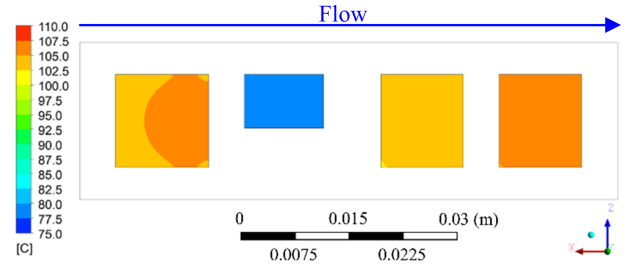


Fig. 6 Temperature contour of M.2 NVMe SSD without the heatsink

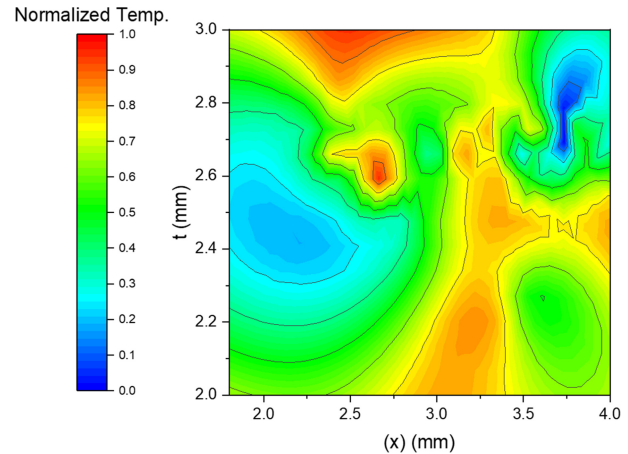


Fig. 7 Normalized temperature of CTRL depending on design variables

작동 온도(85°C) 이상으로 온도가 상승하였음을 의미하고, 추가적인 냉각 장치 없이는 읽기/쓰기 속도 감소, 고장률 증가, 데이터 보유시간 감소 등의 문제가 발생할 수 있다[7-10].

3.2 최적화 결과

ANSYS Fluent와 MATLAB Global Optimization Toolbox를 연동하여 최적화를 진행한 결과는 설계 변수에 따른 목적 함수(CTRL 최고 온도)의 값으로 표시할 수 있다. Fig. 7은 Fin이 5개 일 때 설계 변수에 따른 CTRL 최고 온도의 정규화 결과이다. 최적화 결과에서 활용된 정규화 온도 수식은 다음과 같다.

$$Normalized\ Temperature = \frac{T_{case} - T_{max}}{T_{max} - T_{min}} \quad (1)$$

결국 Fin이 5개일 경우, Heatsink의 최적 열 설계는 Fin 높이 3.73 mm, 두께 2.7 mm로 결정되었으며, 이때 CTRL의 최고 온도는 68.2°C로 가장 낮은 온도를 나타냈다. Table 4는 Fin 개수에 따른 Heatsink 최적 설계 결과와 CTRL 최고 온도를 보여준다.

Fig. 8은 Fin 개수에 따른 최적 설계점에서의 M.2 NVMe SSD 세부 구성 요소의 온도 비교 그래프이다. Fin이 5개일 때 CTRL 68.2°C, DRAM 66.6°C, NAND는 각각 70.0°C, 70.6°C로 세부 구성 요소의 온도가 가장 낮게 나타났다. 이를 통해 Heatsink가 적용되지 않은 기본 모델 대비 CTRL 기준 최고 온도가 37°C 감소한다는 것을 확인할 수 있고 이는 앞서 언급한 M.2 NVMe SSD의

Table 4 Optimization results

	(x) [mm]	t [mm]	CTRL T_{max} [°C]
4Fin	2.1	3.4	74.6
5Fin	3.73	2.7	68.2
6Fin	2.92	1.87	70.6
7Fin	2.19	1.55	73.8
8Fin	2.11	1.71	74.8

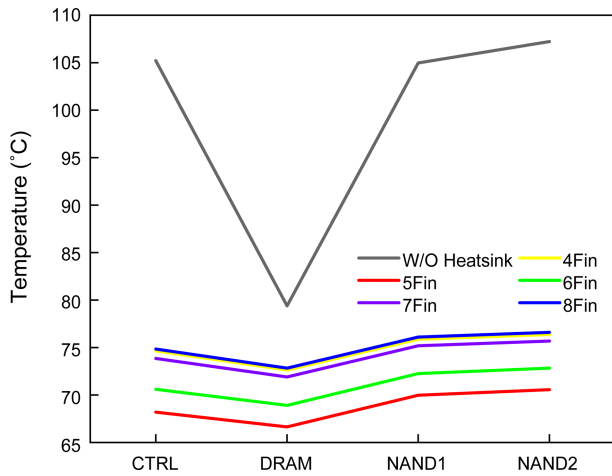


Fig. 8 Temperature of each component depending on the number of fin

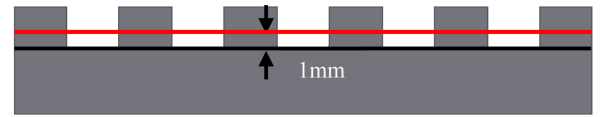
최대 허용 작동 온도(85°C) 내에 포함되는 값이다.

3.3 M.2 NVMe SSD 구성 요소 온도 분석

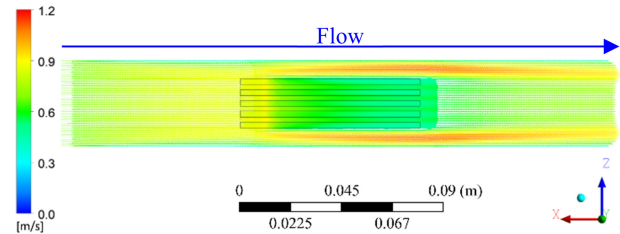
본 연구는 앞선 경계조건에서 CTRL, DRAM, NAND의 발열량을 각각 2 W, 0.5 W, 1.3 W(11.8 W/cm³, 6.06 W/cm³, 8.6 W/cm³)로 설정했다. 단위 부피당 발열량에 따르면 CTRL의 최고 온도가 가장 높을 것으로 예상할 수 있지만, NAND의 온도도 CTRL과 비슷한 수준이라는 것을 Fig. 8을 통해 확인할 수 있다. 이러한 결과는 1) 각각 요소의 커버 재질 2) 유동의 속도/온도 측면에서 분석할 수 있다.

먼저, CTRL 커버는 열전도도가 높아 방열에 유리한 Cu(387.6 W/m·K)이지만, NAND의 커버는 열전도도가 0.7 W/m·K인 Plastic epoxy이다. 따라서 CTRL는 열 소산(Heat dissipation)이 용이하지만, NAND의 경우 열 소산이 어려워 내부 Hotspot 발생을 피하기 어렵다.

Heatsink Fin 사이의 유동 속도와 유동 평균 온도도 구성 요소 온도에 영향을 끼친다. Fig. 9(b)는 Fin이 5개인 케이스의 유동 속도 분포를 보여준다. 유동 속도 분포는 Fig. 9(a)와 같이 Fin의 바닥면에서 1 mm 떨어진 위치에서 확인했다. 유동 속도 분포를 살펴보면 입구 영역에서는 약 0.9 m/s로 흐르던 유동이 Heatsink를 따라 흐를수록 감소하여 0.6 m/s에 달하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Heatsink 표면의 Non-slip Condition으로 인해 유동 속도가 점차 감소한 것으로 해석할 수 있다. 나아가 감소한 유동 속도는 열전달 측면에서 대류 열전달계수 감소와 직결되고, 이는 시간당

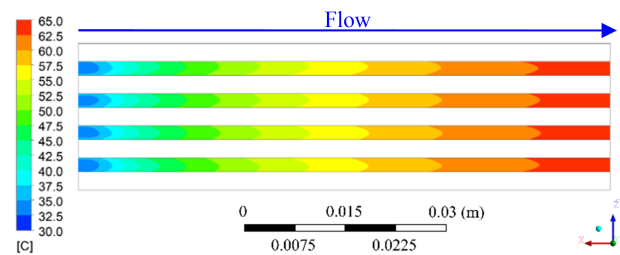


(a) Monitoring plane for flow velocity

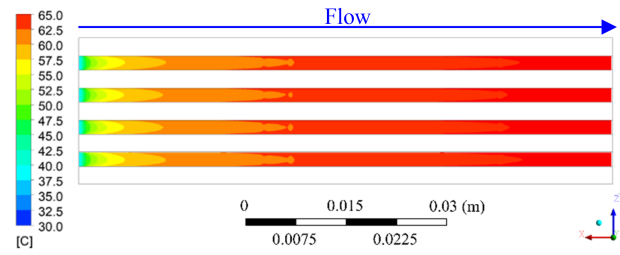


(b) Flow velocity contour in the monitoring plane

Fig. 9 Flow velocity contour in the monitoring plane



(a) Monitoring plane



(b) Bottom plane

Fig. 10 Temperature contour between heatsink fins

전달되는 열 에너지량, 즉 열전달량 감소를 야기하기 때문에 NAND1, NAND2의 발열량이 상대적으로 작지만 높은 온도에 도달한 것이라고 분석할 수 있다.

마지막으로 유체 온도에 의한 영향이다. Fig. 10은 Fin의 바닥면에서의 온도와 그로부터 1 mm 떨어진 위치에서의 유체 온도를 보여준다. Fig. 10을 통해 확인할 수 있듯이 CTRL가 위치한 Heatsink의 입구 영역에서의 유체 온도는 30°C-45°C, 바닥면의 온도는 50°C-55°C이다. 즉 대류 열전달 현상이 일어나기 위한 바닥면과 유체 간의 온도 차가 최소 10°C 이상 발생한다. 하지만 NAND가 위치한 영역에서의 유체 온도는 60°C-65°C, 바닥면 온도는 62.5°C-65°C로 대류 열전달 현상이 일어나기 위한 온도 차이가 2.5°C 정도로 비교적 작다. 따라서 Heatsink의 입구 영역에서는 대류 열전달 현상을 일으키기 위한 모멘텀(온도 차)이 크기 때문에 열전달량이 크지만, NAND가 위치한 출구 영역에서는 열전달량의 값이 상대적으로 작아 NAND의 고온 현상이 발생했다고 분석할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 제한된 공간에서 M.2 NVMe SSD의 신뢰성을 극대화할 수 있는 Heatsink의 최적 열 설계를 제안하였다. 본 연구에서는 상용 M.2 NVMe SSD의 규격/물성을 활용하고 적외선 카메라 및 그래픽카드의 작동 조건 등을 이용하여 현실적이며 극한인 경계 조건을 가정하였다. 이를 통해 해석한 Heatsink 미장착 상태에서 M.2 NVMe SSD의 CTRL 최고 온도는 105.2°C 였고, 본 연구에서는 이를 허용 온도 이내로 만들기 위한 방안을 제시하였다. 상층관계에 있는 Heatsink의 노출 면적과 Fin 사이 유동저항의 최적점을 찾기 위해 Genetic Algorithm을 활용한 결과, Fin 5개(Fin 높이 3.73 mm, Fin 두께 2.7 mm) 조건에서 최적점을 확인하였다. 결국 최적화된 Heatsink의 열 설계를 통하여 M.2 NVMe SSD 세부 구성 요소 온도는 CTRL 68.2°C, DRAM 66.6°C, NAND는 각각 70.0°C, 70.6°C로 최소 12.8°C 이상 감소하여 허용온도 이내가 되었다.

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 제안한 Heatsink 형상은 협소한 공간에서 최적화되었으며, 제한된 공간에서 M.2 NVMe SSD의 연산 성능 극대화와 고장률 감소 등 신뢰성 향상의 효과를 기대할 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 과학기술정보통신부와 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본 연구 및 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(Nos. NRF- 2022R1F1A1065175 and 2021RIS-004).

REFERENCES

- Kim, J. H., (2007), CFD analysis in electronic equipment cooling, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 47(5), 63-66. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00832587>
- Choi, J., Kwon, O., Cha, D., Yun, J., Kim, Y., (2010), Experimental study of liquid cooling system for computer, *Journal of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 867-872.
- Kim, J. M., Jang, H. Y., Park, H. S., (2022), Experimental study on heat transfer performance of microchannel applied with manifold, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(12), 923-929.
- Kim, J.-K., Nakayama, W., Lee, S.-K., (2010), Characterization of a thermal interface material with heat spreader, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(1), 91-98.
- Michelsoni, R., (2017), Solid-state drive (SSD): A nonvolatile storage system, *Proceedings of the IEEE*, 105(4), 583-588.
- Rizvi, S. S., Chung, T.-S., (2010), Flash SSD vs HDD: High performance oriented modern embedded and multimedia storage systems, *Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Engineering and Technology*, 297-299.
- Cho, Y. W., Kim, T. S., (2021), A SSD simulator supporting a multistream feature, *Proceedings of the Korean Information Science Society*, 1513-1515.
- Lee, E. C., Rho, J., Kang, H., Lee, B. J., (2018), Thermal analysis of ball grid array non-volatile memory express solid-state drive in vacuum, *IEEE Electron Device Letters*, 39(12), 1908-1911.
- Ye, N., Liu, Y., Ji, Z., Vaysman, D., Yoon, I.-S., Takiar, H., (2018), Thermal challenges and solutions of M. 2 solid state drive, *Proceedings of the 2018 IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 979-983.
- Zhang, H., Thompson, E., Ye, N., Nissim, D., Chi, S., Takiar, H., (2019), Ssd thermal throttling prediction using improved fast prediction model, *Proceedings of the 2019 IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 1016-1019.
- Liu, Y., Ye, N., Thompson, E., Vaysman, D., Yoon, I.-S., Takiar, H., (2018), Fast prediction of thermal throttling design in M. 2 solid state drive, *Proceedings of the 2018 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 1022-1026.
- Lee, S.-W., Lee, H.-K., (2008), Reliability prediction of electronic components on PCB using PRISM specification, *Journal of the Korea Safety Management & Science*, 10(3), 81-87.
- Ong, K., Tan, C., Lai, K., Tan, K., (2017), Heat spreading and heat transfer coefficient with fin heat sink, *Applied Thermal Engineering*, 112(1), 1638-1647.
- Park, B. S., Park, H. J., Kim, B. H., (2015), Optimal design of a plate-fin heat sink with slip flow, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 32(2), 219-227.
- Yoon, S.-U., Kim, J.-Y., Gao, J.-C., (2018), An experimental study on cooling characteristic according to fin array of aluminum heat sink, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(1), 138-143.
- Jung, T.-S., Kang, H.-K., (2012), Evaluation on the cooling performance to design heat sinks for led lightings, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 29(7), 778-784.
- Yuan, D., Chen, J., Yang, Y., Zhang, L., Liu, S., Jiang, H., Qian, N., (2022), Thermal performance of the thin heat pipe for cooling of solid-state drives, *Metals*, 12(11), 1786.
- Jánó, R., Fodor, A., (2020), Cooling techniques for M. 2 to PCI (e) adapters, *Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 382-385.

19. ANSYS, Inc., (2010), ANSYS FLUENT meshing user's guide (Release 13.0).
20. Tiwari, A. K., Javed, S., Oztop, H. F., Said, Z., Pandya, N. S., (2021), Experimental and numerical investigation on the thermal performance of triple tube heat exchanger equipped with different inserts with WO₃/water nanofluid under turbulent condition, *International Journal of Thermal Sciences*, 164, 106861.
21. Santana, H. S., da Silva, A. G., Lopes, M. G., Rodrigues, A. C., Taranto, O. P., Silva Jr, J. L., (2020), Computational methodology for the development of microdevices and microreactors with ANSYS CFX, *MethodsX*, 7, 100765.
22. ANSYS, Inc., (2013), ANSYS FLUENT theory guide (Release 15.0).
23. ZZhang, H., Wang, H., Braha, S., Thompson, E., Ye, N., Ai, N., Kao, C., Amir, N., (2018), Transient thermal analysis for M. 2 SSD thermal throttling: Detailed CFD model vs network-based model, *Proceedings of the 2018 IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 1009-1014.
24. Yeom, S.-H., Lee, J.-H., Woo, H.-K., (2007), A study on the optimal preform shape design using fem and genetic algorithm in hot forging, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 16(4), 29-35.
25. Katoch, S., Chauhan, S. S., Kumar, V., (2021), A review on genetic algorithm: past, present, and future, *Multimedia Tools and Applications*, 80, 8091-8126.
26. Jung, S. H., (2010), Selective mutation for performance improvement of genetic algorithms, *The Korea Information Processing Society Transactions: PartB*, 17(2), 149-156.
27. Lambora, A., Gupta, K., Chopra, K., (2019), Genetic algorithm-A literature review, *Proceedings of the 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)*, 380-384.
28. Lü, X., Wu, Y., Lian, J., Zhang, Y., Chen, C., Wang, P., Meng, L., (2020), Energy management of hybrid electric vehicles: A review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm, *Energy Conversion and Management*, 205, 112474.
29. Ilbeigi, M., Ghomeishi, M., Dehghanbanadaki, A., (2020), Prediction and optimization of energy consumption in an office building using artificial neural network and a genetic algorithm, *Sustainable Cities and Society*, 61, 102325.
30. Movahed, Z. P., Kabiri, M., Ranjbar, S., Joda, F., (2020), Multi-objective optimization of life cycle assessment of integrated waste management based on genetic algorithms: A case study of Tehran, *Journal of Cleaner Production*, 247, 119153.

APPENDIX

A1. Mesh 의존도 테스트

Fig. A1은 최소 Mesh 크기의 Parameter 값에 따른 각 구성 요소의 온도 변화 그래프이다. 0.2 mm부터 0.1 mm까지 0.005 mm 단위로 Parameter 값을 설정하였다. 최소 Mesh 크기에 따른 구성 요소의 온도를 비교한 결과 0.115 mm부터 0.105 mm까지 0.3 K 으로 온도가 수렴하였다. 계산의 정확성을 고려하였을 때, 최소 Mesh 크기는 0.105 mm로 설정하여 해석에 필요한 Mesh를 생성 하였다.

A2. 최적화 결과 및 세부 구성 요소의 온도

Table A1는 GA를 활용하여 최적화를 진행하였을 때 세부 구성 요소의 온도를 나타내며, Fig. A2는 이에 따른 온도 분포이다. 최적화 결과, Fin의 개수가 5개일 때 세부 구성 요소의 온도가 가장 낮게 나타났으며, 6Fin < 4Fin < 8Fin 순서로 나타났다.

Table A1 Temperature of detail components

	CTRL	DRAM	NAND1	NAND2
4Fin [°C]	74.6	72.6	75.9	76.4
5Fin [°C]	68.2	66.6	70.0	70.6
6Fin [°C]	70.6	68.9	72.3	72.8
7Fin [°C]	73.8	71.9	75.2	72.7
8Fin [°C]	74.8	72.8	76.1	76.6

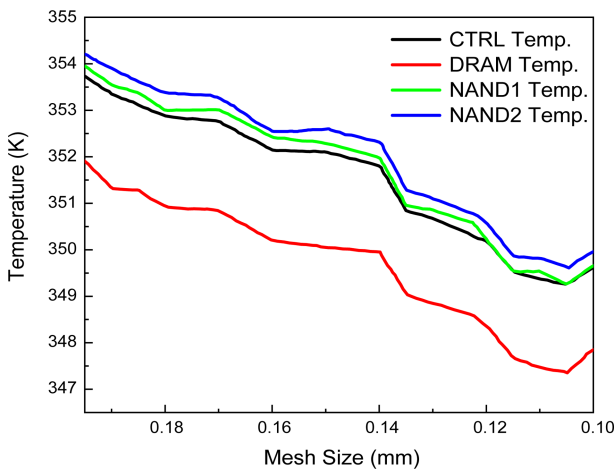
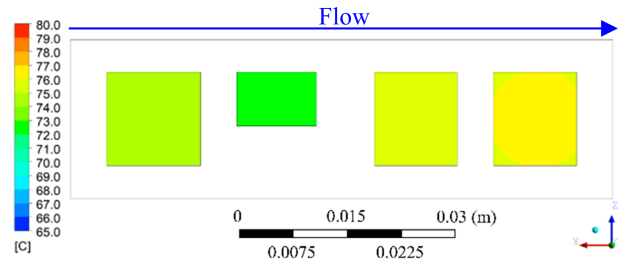
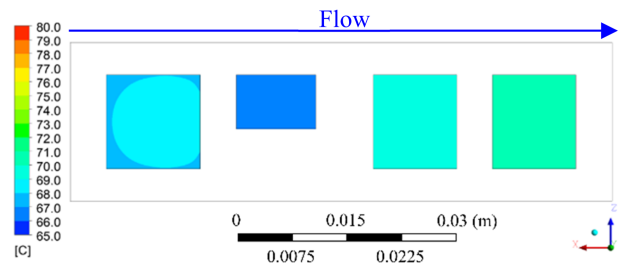


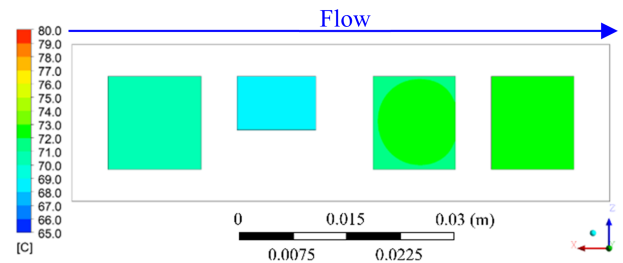
Fig. A1 Simulation results depending on the minimum mesh size



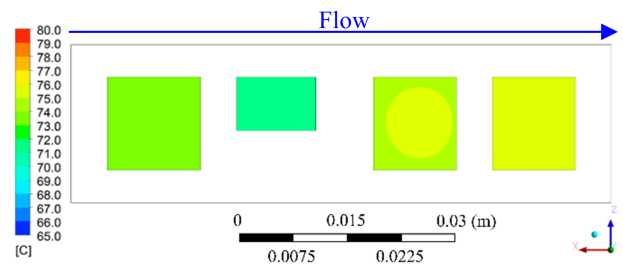
(a) 4Fin



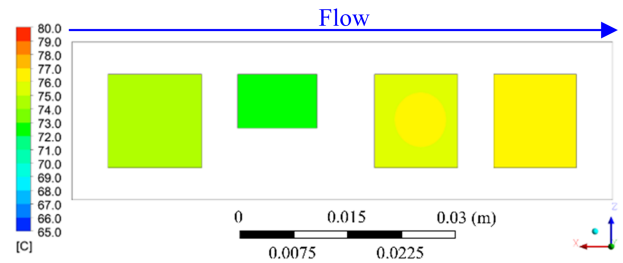
(b) 5Fin



(c) 6Fin



(d) 7Fin



(e) 8Fin

Fig. A2 Temperature contour of detail components



Chan Ho Kim

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. His research interest is electric device cooling and optimized thermal design.

E-mail: kch9703@smail.kongju.ac.kr



Jinsung Rho

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University. His research interest is metrology and manufacturing technology for semiconductor structures.

E-mail: jinsung.rho@hanbat.ac.kr



Joong Bae Kim

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. His research interest is thermal management system for electric devices.

E-mail: joongbae.kim@kongju.ac.kr

코일전류 계산 및 AISI 1552 상변태를 고려한 주차기어의 고주파 열처리 시뮬레이션

High-frequency Heat Treatment Simulation of Park Gear considering Coil Current Calculation and AISI 1552 Phase Transformation

최진규¹, 이석순^{1,#}
Jin Kyu Choi¹ and Seok Soon Lee^{1,#}

¹ 경상국립대학교 대학원 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University)
Corresponding Author / E-mail: leess@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1622
ORCID: 0000-0002-1785-8623

KEYWORDS: High-frequency heat treatment (고주파 열처리), Park gear (주차기어), Resonance RLC circuit (공진 RLC 회로), Electromagnetic analysis (전자기장 해석), Heat transfer analysis (열전달 해석), Metal phase transformation (상변태 해석)

This study performed high-frequency heat treatment experiments and simulations of the park gear of an automobile transmission. The heating temperature and hardening depth were measured during high-frequency heat treatment. Moreover, by applying the resonance RCL circuit, the current value of the coil during high-frequency heat treatment, the electromagnetic and heat transfer material properties dependent on the temperature, and the phase transformation function were all applied to the simulation. In the high-frequency heat treatment experiment, the heating temperature was 977.4°C and the 1st direction hardening depth was 1.5 mm, the 2nd direction hardening depth was 3 mm, and the 3rd direction hardening depth was 2.5 mm, and the reliability was verified by comparing the simulation heating temperature of 1,097°C and the 1st direction predicted hardening depth of 1.6 mm, the 2nd direction predicted hardening depth of 2.8 mm, and the 3rd direction predicted hardening depth of 2.7 mm. The error rate of the heating temperature results was 12.2% whereas that of the hardening depth results was 7.1%.

Manuscript received: November 29, 2022 / Revised: January 24, 2023 / Accepted: January 30, 2023

1. 서론

열처리 산업의 가장 큰 문제인 에너지 문제 해결을 위해 효율 향상, 품질 고도화 및 환경오염물질 발생 최소화, CO₂(이산화탄소) 배출 감소 등 열처리 공정의 청정화 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 고주파 열처리는 기존의 가스 및 기름 등을 이용한 기존 열처리 방식과 다르게 전기를 이용하여 열에너지를 만들기 때문에 친환경적이고 경제적인 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인해 국부 경화 열처리 기술로 많이 사용되고 있다.

고주파 열처리는 코일의 형상, 가열물의 형상 및 재질, 주파수의 세기, 입력 전력, 가열시간 및 냉각시간 등 여러 가지 변수에

의해서 품질이 결정된다. 현재 이러한 변수는 숙련된 작업자의 경험에 의존하여 결정하고 실행작업을 거쳐서 제품을 생산한다. 이러한 불필요한 손실을 줄이기 위하여 유한요소해석을 적용한 연구가 1970년대 이래 다양하게 진행되어 왔다. Han et al. [1]은 용접 된 파이프에 860-1,150 Hz의 주파수로 유도가열 시뮬레이션으로 공정변수를 최적화하였고 Li et al. [2]은 고주파 열처리 중 시뮬레이션을 사용하여 볼스크류의 공정변수를 최적화하였다. Lee et al. [3]은 AISI 4140 환봉을 고주파 유도 가열 후 온도측정 실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였으며, Oh et al. [4]은 유한요소해석을 통하여 유도가열 코일의 반경, 간격 등의 설계인자에 따라 온도분포를 계산하였다. Ji et al. [5]은 고주파 유도가열을 이용한 기어 제조를 위한 압연공정을

설계하기 위해 유한요소해석을 사용하였다. 또한 Tak et al. [6]은 유도가열로 대상물을 가열하여 성형성을 향상시키는 연구를 하였다. Tong et al. [7]은 JIS-SCM440의 원통형 부품에 대하여 전자기장-열전달 해석으로 가열 온도 및 냉각 온도를 계산하고 온도에 따른 상변태를 고려한 유한요소해석을 수행하였다. Choi et al. [8-10]은 스프라켓을 고주파 열처리 후 유한요소해석결과와 경화 깊이를 실험으로 측정하여 결과를 비교하였으며, AISI 1045 환봉의 고주파 열처리 과정 중 입력전류를 유한요소해석에 입력하고 가열, 냉각해석으로 얻은 온도와 상변태 결과와 실험 결과로 얻은 경화영역을 비교하였다.

다양한 변수와 관련된 많은 선행 연구들이 존재하지만, 자기장 세기와 연관된 코일 전류에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 코일 전류 및 상변태를 고려한 고주파 열처리 시뮬레이션 방법을 제안하고자 한다. 이는 공진 RLC 회로를 사용하여 구한 코일 전류와 전자기-열전달-상변태를 적용한 고주파 열처리 시뮬레이션을 다음과 같이 검증하였다.

2. 주차기어의 고주파 열처리

주차기어는 자동차의 트랜스미션에서 동력 전달을 못하도록 잠금 역할을 담당하고 있다. 이 기어의 표면은 높은 피로수명과 내마모성을 가져야 하기에 고주파 열처리로 표면을 경화한다.

주차기어의 고주파 열처리 실험에 사용된 장비는 Table 1에 정리하였다. 고주파 열처리 시 실험 조건은 20 kHz 주파수, DC 203 V 입력전압, DC 409 A 입력전류로 총 83 kW의 입력전력으로 4.5초간 가열 후 8초간 냉각수를 분무하여 냉각시킨다. 고주파 열처리 후 요구되는 경화 깊이는 Fig. 1과 같으며 1번 방향의 요구 경화 깊이는 1 mm, 2번 방향은 3 mm, 3번 방향은 3.8 mm이다. 고주파 열처리는 탄소강을 A1 변태점 온도 이상으로 가열 후 Ms (Martensite Transformation Start) 이하로 급랭하는 과정이다. 탄소 함유량 0.5-0.55%의 AISI 1552의 A1 변태점 온도는 727°C이며 Ms 온도는 223°C이다[11]. 주차기어의 고주파 열처리 시 최대 가열 온도는 적외선온도계를 사용하여 5회 측정을 하였으며 측정결과는 Fig. 2와 같으며 평균 가열온도는 977.4°C이다. 최대 가열 온도 측정 결과 A1 변태점 온도 이상 가열된 것을 확인할 수 있다. 고주파 열처리가 된 주차기어를 3%의 나이탈 부식액을 사용하여 에칭(Etching)하여 경화 패턴을 확인 후 경화 깊이를 측정하였다. HV 450을 기준[12]으로 1, 2, 3의 방향으로 마이크로 비커스 경도계로 경화 깊이를 측정하였다. 측정 시 300 g의 하중으로 12초동안 압자를 누르고 시편 표면에 생긴 압흔의 표면적을 계산하여 경도를 산출한다. 산출된 경도를 Table 2에 나타내었다. 측정결과 1번 방향의 경화 깊이는 1.5 mm, 2번 방향의 경화 깊이는 3 mm, 3번 방향의 경화 깊이는 2.5 mm임을 확인하였다.

Table 1 Experimental equipment for park gear high-frequency heat treatment

	Brand	Model
High-frequency heating machine	-	150 kW
Infrared thermometer	InfRamax	Gemini P4.0
Oscilloscope	OWN	HDS3102M-N
Micro Vickers hardness tester	Mitutoyo	HM-112

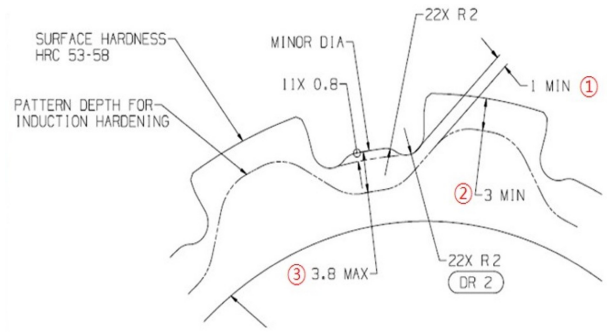


Fig. 1 The required hardening depth of park gear



Fig. 2 Measurement temperature of park gear during induction heating

3. 고주파 열처리 시 코일 전류 계산

주차기어의 고주파 열처리 시뮬레이션을 위하여 가열 시 코일에 흐르는 전류 값을 알아야 한다. 고주파의 높은 전류는 직접 측정할 수 없기에 전압을 측정하여 공진 RLC 회로에 적용하여 계산한다. Fig. 3(a)와 같이 고주파 유도가열 시스템의 공진탱크

Table 2 Measurement hardening depth result of the park gear

Depth [mm]	1st direction hardening depth [HV]	2nd direction hardening depth [HV]	3rd direction hardening depth [HV]
0.05	626	614	610
0.10	622	624	602
0.20	627	630	617
0.30	626	626	622
0.50	621	622	618
1.00	623	625	605
1.50	523	616	603
2.00	598	626	592
2.50		603	499
3.00		584	402
3.50		338	

Table 3 Measurement results for the alternating current voltage and frequency in measurement sections 1 and 2

	AC voltage [V]	Frequency [kHz]
Measurement section 1	840	19.78
Measurement section 2	90	19.82

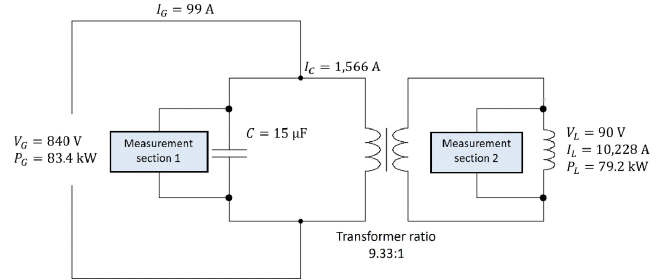
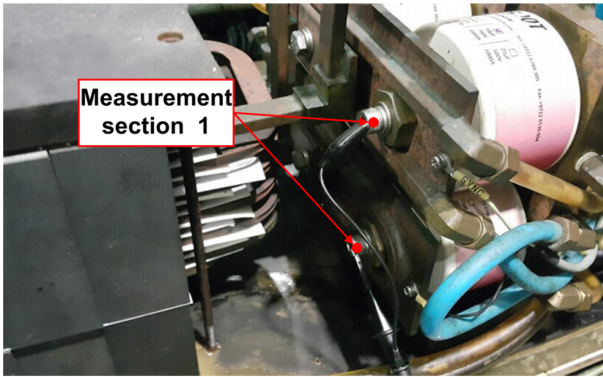
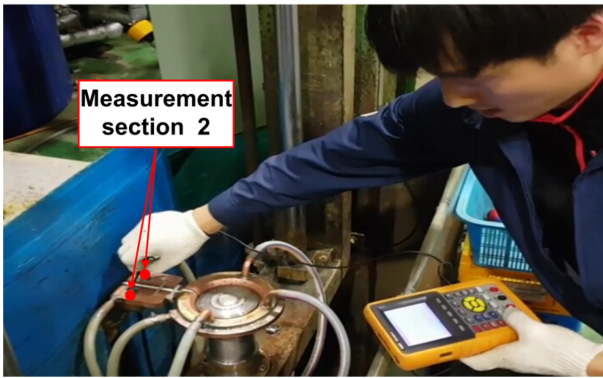


Fig. 4 Parallel resonance RLC circuit of resonance tank



(a) Measurement section 1 in resonance tank



(b) Measurement section 2 in resonance tank

Fig. 3 AC voltage and the frequency measurement

(Resonance Tank)의 커패시터(측정부위 1)와 Fig. 3(b)의 코일(측정부위 2)에서 전압 및 주파수를 오실로스코프를 사용하여 측정하였다. 측정부위 1에서의 전압 및 주파수는 Table 3에서 표시한 것과 같이 AC 840 V, 19.77 kHz이다. 측정부위 2에서의 전압 및 주파수는 AC 90 V, 19.82 kHz의 측정결과를 얻었다. 코일에 흐르는 전류를 계산하기 위해 고주파 유도가열 시스템의

공진탱크를 병렬 공진 RLC 회로에 적용하였다. 입력전압, 전류, 전력, 주파수와 커패시터 용량 15 μF를 적용하여 병렬 공진 RLC 회로를 계산[13]하기 위해서는 저항, 인덕턴스를 알아야 한다. 식(1)을 통하여 인덕턴스 L을 구한 뒤 공진탱크의 전체저항 전류를 식(2)와 같이 계산한다. 옴(Ohm)의 법칙을 사용하여 식(3)과 같이 저항을 계산한다. 커패시터에 흐르는 전류를 계산하기 위하여 식(4)와 같이 품질계수(Q-factor) 또는 식(5)와 같이 커패시터 리액턴스를 먼저 구한다. 식(6)을 통하여 커패시터의 전류를 계산할 수 있다. 변압기의 전송비는 식(7)과 같이 커패시터의 전압과 코일에서의 전압을 사용하여 계산한다. 고주파 유도가열 시스템의 전송 효율은 75%이고 변압기 및 리드 손실은 5%이므로 총 효율은 70%이다[11]. 식(8)과 같이 코일에 흐르는 전류는 10,228 A를 계산하였고 Fig. 4에 고주파 유도가열 시스템의 공진탱크의 병렬 공진 RLC 회로에 계산한 결과를 표시하였다.

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = 4.316 \times 10^6 \text{ H} \tag{1}$$

$$L = \frac{P_G}{V_{C,rms}} = \frac{83400}{594} = 140 \text{ A} \tag{2}$$

$$R = \frac{V_{C,rms}}{I_{R,rms}} = \frac{594}{140} = 4.243 \Omega \tag{3}$$

$$Q = \frac{R}{2\pi f L} = 2\pi f C R = R \sqrt{\frac{C}{L}} = 7.91 \tag{4}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f L} = 0.5364 \Omega \tag{5}$$

$$I_C = \frac{V_C}{X_C} = Q \times I_R = 1,566 \text{ A} \tag{6}$$

$$n = \frac{V_C}{V_L} = \frac{840}{90} = 9.33 \quad (7)$$

$$I_L = n \times I_C \times \eta = 9.33 \times 1,566 \times 0.7 = 10,228A \quad (8)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_c) \quad (15)$$

$$h = h_k + h_s \quad (16)$$

$$h_s = \sigma_0 \epsilon_r F^*(T^2 + T_c^2)(T + T_c) \quad (17)$$

4. 주가기어의 고주파 열처리 시뮬레이션

4.1 전자기장 수학적 모델

고주파 열처리 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 먼저 전자기 수학적 모델이 필요하다. 전자기장의 계산은 일반적으로 맥스웰 방정식을 기본으로 한다. 전자기 특성의 고유 방정식은 다음 식 (13)부터 식(15)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 B 는 자속밀도이고 H 는 자기장 강도이다. D 및 E 는 전속 밀도 및 전자기장 강도를 나타내고 J 는 전류 밀도를 나타낸다. 보고된 연구에서 교류전류 주파수는 1 MHz 미만일 때 변위전류 $\partial D/\partial t$ 는 준 정적 근사를 이용한 전도 전류밀도에 비해 무시될 수 있다[14]. ϵ , μ 및 σ 는 유전율, 투자율 및 전기전도도이며 온도에 따라 비선형적으로 변하는 특성이 있다.

$$D = \epsilon E \quad (9)$$

$$E = \mu H \quad (10)$$

$$J = \sigma E \quad (11)$$

전자기장 계산에서 가열된 부분의 와전류 영역과 비와전류 영역으로 구성된다. 변수의 양을 줄이고 맥스웰 방정식을 단순화하기 위해 Sadeghipour et al. [15]에 의해 제안된 자기 벡터 전위 A 와 전기 스칼라 전위 ϕ 를 도입 후 쿨롱 게이지(Coulomb Gauge) [16]를 적용한 시간 조화 조건의 와전류 영역 지배 방정식은 식(12), 식(13)과 같이 나타낸다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{A} \right) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \dot{A} \right) + j\omega \sigma \dot{A} + j\omega \sigma \dot{\phi} = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \cdot (-j\omega \sigma \dot{A} -) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \dot{A} \right) + j\omega \sigma \dot{\phi} = 0 \quad (13)$$

4.2 열전달 수학적 모델

전자기장 계산에서 계산된 열에너지 전달에는 푸리에 편미분 방정식이 사용되며 식(14)와 같이 표시한다. λ 는 열전도도, ρ 밀도, c 는 비열, Q 는 와전류 열을 포함한 내부 열원이다. 가열 대상물 및 주변과 대상물 표면 사이의 열전달은 식(15)와 같이 설명할 수 있다. 여기서 $\partial T/\partial n$ 은 표면의 온도구배, T_c 는 주위 온도, h 는 식(16), 식(17)과 같이 대류계수 h_k 및 열 복사 h_s 를 포함한 총 열전달 계수이다. σ_0 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수이며, ϵ_r 는 방사율, F^* 는 열복사의 각각 인자이다.

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

4.3 상변태 수학적 모델

오스테나이트화 같은 확산 변태에는 미분 공식이 일반적으로 사용된다. 유도가열 시 탄소강의 오스테나이트화는 리블론드-드보(Leblond-Deaux) 모델[17-22]을 사용한다. 온도에 따라 새로운 상변태 및 성장은 식(18)과 같이 나타낸다. 여기서 P 는 상분율, t 는 시간, T 는 온도, \bar{P} 는 평형상태의 상분율을 나타내고 TR 은 시간 지연과 온도의 함수로 사용된다. 상변태는 금속 내부에서 발생하고 각각의 발생률은 다른 상변태에 의존한다. 온도와 냉각속도의 함수 TR 을 식(19)와 같이 표현이 가능하고 냉각 속도에 따른 상변태에 대한 변수 F, F' 를 도입하고 $F = F'$ 라고 가정하면 식(20)과 같이 상의 변태율을 계산한다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\bar{P} - P}{TR} \quad (18)$$

$$TR = \frac{\tau}{P_{eq}F + (1 - P_{eq})F'} \quad (19)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{eq} - P}{\tau(\theta)} F(\theta) \quad (20)$$

마르텐사이트 상변태의 경우 냉각되는 시점의 온도에 의존적으로 반응하며, 코이스티넨-마르부르크(Koistinen-Marburger)의 모델에 기초하여 식(21)과 같이 계산한다[24-27]. 여기서 P_m 은 냉각에 의한 상변태 가능 분율이며, M_s 와 b 는 상변태 시작온도와 변태율을 나타낸다.

$$P_m(\theta) = P_m(1 - e^{-b(\theta - M_s)}) \quad (21)$$

4.4 고주파 열처리 시뮬레이션

병렬 공진 RLC 회로로 계산된 전류를 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 1/11 축대칭 형상으로 주차기어와 코일을 모델링하였다. 상용 유한요소 해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics로 209,471개의 전자기-열전달-상변태 사면체 요소를 사용하였고 시뮬레이션 프로세스는 Fig. 6에 나타났다. 자기장에 의해 생성되는 와전류는 유도 가열 중에 생성된다. 와전류에 의해 줄열이 발생하여 온도가 상승하게 되며 온도가 A1 변태점 이상으로 가열되면 탄소강의 경우 상변태가 발생하여 페라이트에서 오스테나이트 조직으로 상변태되고 냉각 과정에서 온도가 A1 변태점에서 M_s 온도로 급격히 냉각되면 오스테나이트에서 마르텐사이트로 다시 상변태한다. 온도에 따른 탄소 함유량 0.5-0.55% AISI 1552의 열 및 전자기 특성 곡선[14]을 보여주며 Fig. 7(a)는 온도에 따른 열전도율 및 비열, Fig. 7(b)는 온도에 따른 상대

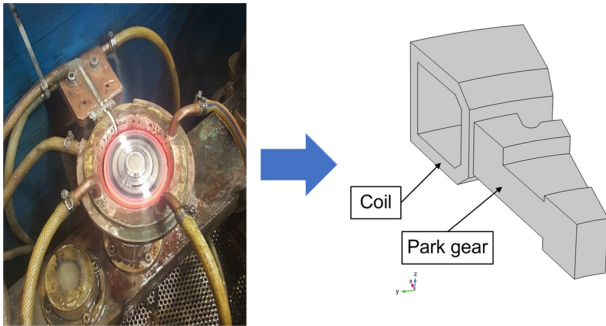


Fig. 5 1/11 symmetry FEA model of park gear and coil

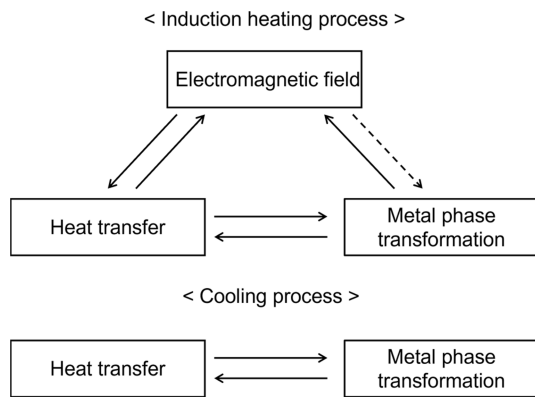
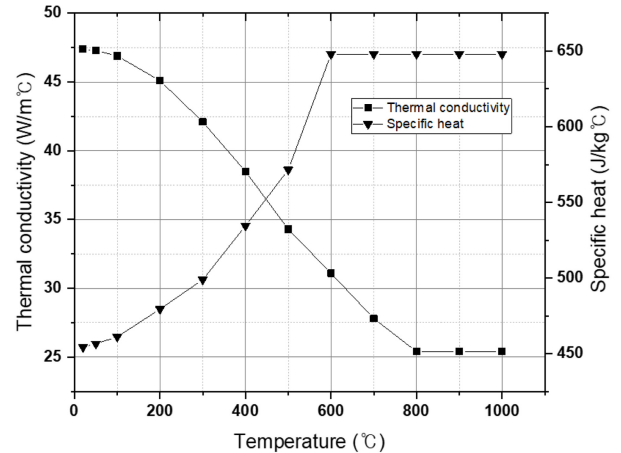


Fig. 6 High-frequency heat treatment simulation process: The dashed line does not couple during the simulation

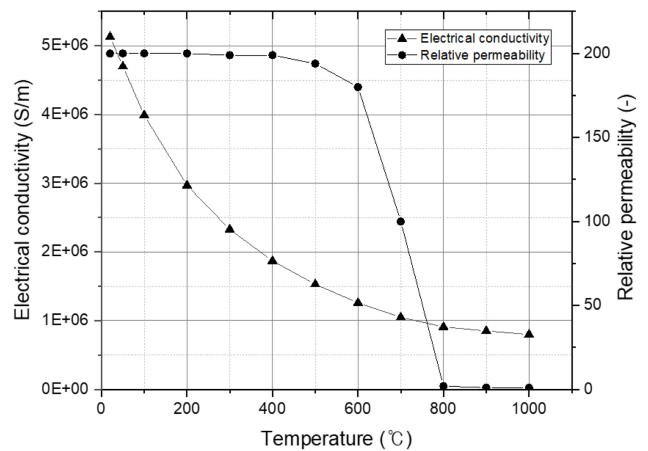
투자율 및 전기전도도를 나타낸다. AISI 1552 탄소강이 강자성체에서 상자성체로 변하는 전이온도인 큐리 온도는 약 770°C이다[4]. Fig. 7(b)에서 유도가열 중에 온도가 큐리 온도를 초과하면 강자성 특성이 손실되며 상변태로 인한 투자율 변화의 영향은 무시할 수 있다[14]. 고주파 열처리 중 상변태는 온도에 따라 달라지게 되며 오스테나이트에서 페라이트, 펄라이트 및 베이나이트 상변태는 리브론드-드보 모델을 사용한다. 페라이트에서 오스테나이트 상변태를 설명하는 온도 종속 함수는 Table 4에 나타냈다. 페라이트에서 형성되는 오스테나이트 분율의 시간 변태율은 식(22)와 같고 오스테나이트 상태에서 냉각되면 여러 상의 형태로 될 수 있다. Table 5는 오스테나이트-베이나이트 온도의 함수를 나타내고, Table 6은 오스테나이트-베이나이트 온도 속도의 함수를 나타낸다. 오스테나이트에서 형성된 베이나이트 분획 시간 변태율은 식(23)과 같다[22]. 오스테나이트의 확산 상변태와 달리 마르텐사이트의 상변태는 분포하며, 형성된 마르텐사이트의 비율은 코이스턴-마르부르크 모델에 의해 주어진 M_s 온도 이하로의 과냉각에 비례한다. 마르텐사이트 변태율은 식(24)와 같으며 Table 7에 나타냈다[23].

$$\dot{\xi}^d = K(T)\xi^S - L(T)\xi^d \quad (22)$$

$$\dot{\xi}^d = F(T)H(\dot{T})\xi^S - G(T)H(\dot{T})\xi^d \quad (23)$$



(a) Thermal properties dependent temperature



(b) Electromagnetic properties dependent temperature

Fig. 7 Thermal and electromagnetic properties with temperature of park gear

Table 4 Ferrite to austenite, temperature-dependent functions

Temperature [°C]	K [1/s]	L [1/s]
750	0.22	1
770	0.53	1
790	1.05	0.97
810	2.02	0.94
830	4.55	0.87
840	5.6	0.76
860	7.37	0.45
880	10.77	0

Table 5 Austenite to bainite, temperature-dependent functions

Temperature [°C]	K [1/s]	L [1/s]
340	0	
350	0.0147	
450	0.067	0
550	0	0.067

Table 6 Austenite to bainite, temperature-rate-dependent functions

Temperature rate [K/h]	H [1]
-43,000	0.2
-15,000	1
-7,200	1.5
-1,500	0.22
-700	1
-70	0.0044

Table 7 Austenite to martensite parameters

Parameter	Value
M_s	223 [°C]
β	0.011 [1/K]

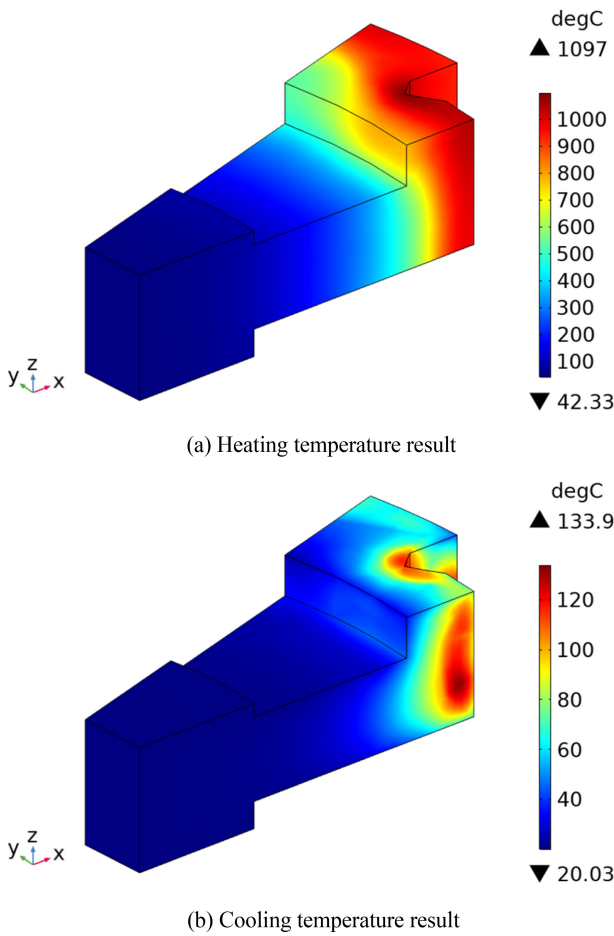
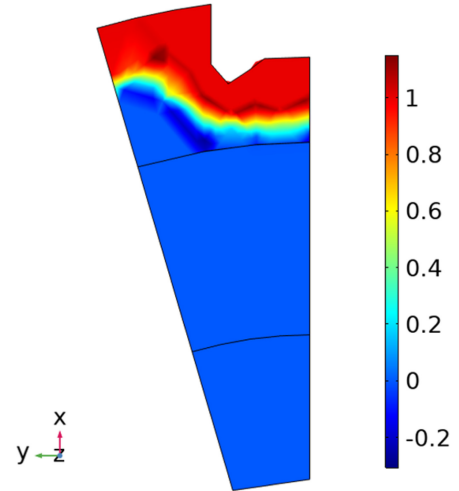


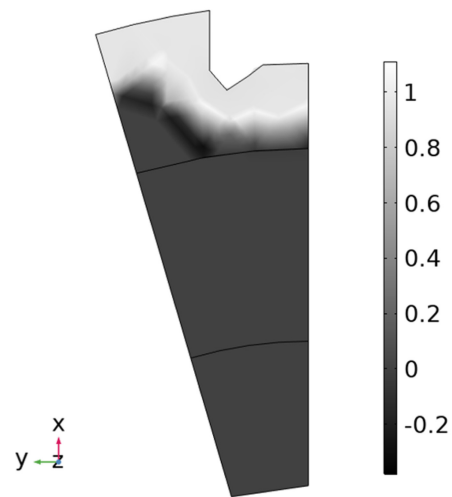
Fig. 8 High-frequency heat treatment simulation results of park gear

$$\dot{\xi}^d = -\xi^s \beta \dot{T} \tag{24}$$

주차기어를 20 kHz에서 10,228 A의 고주파 전류로 4.5초 동안 가열했을 때 가열 중 도달한 최대 온도는 Fig. 8(a)와 같이 1,097°C이며 가열 후 8초 간 에델바우어(Edelbauer) 등[28]의 물 분무 열 전달 계수를 참조하여 냉각 결과는 Fig. 8(b)와 같이



(a) Austenite phase distribution rate



(b) Martensite phase distribution rate

Fig. 9 Phase transformation simulation results of park gear

최대 온도 133.9°C이다. 탄소 함유량 0.5-0.55%의 AISI 1552의 A1 변태점 온도인 727°C 이상 가열되어 페라이트에서 오스테나이트로 상변태가 시작됨을 확인할 수 있다. 가열 후 냉각되는 동안 오스테나이트 상이 M_s 온도 223°C 이하로 냉각되어 마르텐사이트로 상변태될 것을 예측할 수 있다. Fig. 9(a)는 4.5초 동안 가열 했을 때 주차기어의 상변태 분포를 나타낸다. A1 변태점 온도 이상 가열되었기에 페라이트에서 오스테나이트로 상변태 된 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 가열 후 8초간 냉각 후 주차기어의 상변태 분포를 나타낸다. 물 분무로 인해 급격히 M_s 온도 이하로 냉각되어 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태가 된 것을 확인할 수 있다. 주차기어의 경화 깊이를 예측하기 위하여 Fig. 10과 같이 마르텐사이트 분포도에서 예측 경화 깊이를 측정하였으며 1번 방향의 예측 경화 깊이는 1.6 mm, 2번 방향의 예측 경화 깊이는 2.8 mm, 3번 방향의 예측 경화 깊이는 2.7 mm으로 예측했다.

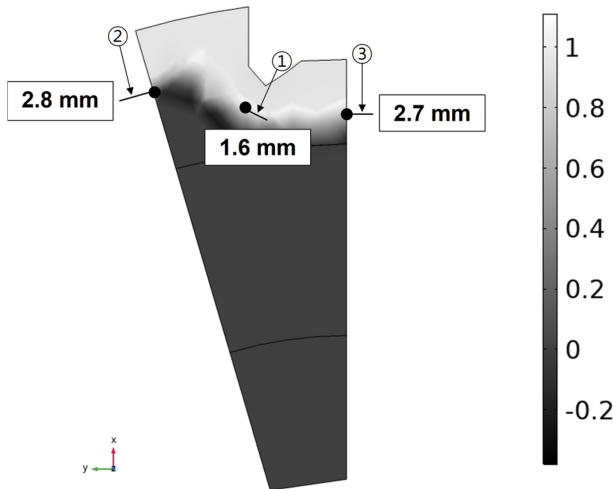


Fig. 10 Prediction of the hardening depth in the park gear using simulation

5. 주차기어 고주파 열처리 결과 비교 검증

주차기어의 고주파 열처리 온도 측정 실험과 시뮬레이션 결과를 비교 검증하였다. Fig. 2와 같이 고주파 열처리 시 측정된 평균 온도는 977.4°C였으며, 시뮬레이션 된 최대 가열온도는 Fig. 8(a)와 같이 1,097°C로 11%의 오차가 발생하였다. 그리고 Table 2과 Fig 10의 경화 깊이 측정 결과와 시뮬레이션에 의한 예측 경화 깊이를 비교 결과 1번 방향의 경화 깊이는 1.5 mm, 예측 경화 깊이는 1.6 mm로 오차 6.3%이다. 2번 방향의 경화 깊이는 3 mm, 예측 경화 깊이는 2.8 mm로 오차 6.7%이다. 3번 방향의 경화 깊이는 2.5 mm, 예측 경화 깊이는 2.7 mm로 오차 7.4%의 결과를 도출했다. 실험과 시뮬레이션 비교 결과 1, 2, 3 번 방향 경화 깊이 오차가 10% 미만인 결과를 통하여 병렬 공진 RLC 회로로 유도가열 시 코일에 흐르는 전류를 올바르게 계산 후 시뮬레이션 되었다는 것을 검증했다.

6. 결론

병렬 공진 RLC 회로와 전자기-열전달-상변태를 이용한 고주파 열처리 시뮬레이션을 AISI 1552 주차기어에 적용했다. 고주파 열처리 시 공진 탱크의 커패시터 용량, 커패시터의 전압, 코일 전압, 주파수, 가열시간, 냉각시간, 가열 온도 및 경화 깊이를 분석하였다. 측정된 커패시터 용량, 커패시터 및 코일의 전압, 주파수를 병렬 공진 RLC 회로를 이용하여 최종적으로 코일에 흐르는 전류를 계산하였다. 온도에 따른 전기적, 열전달 물성치 및 온도에 따른 상변태 함수 및 냉각계수를 적용하여 고주파 열처리 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 가열 온도, 냉각 온도, 상변태 분포를 분석하여 예상 경화 깊이를 도출하였다. 시뮬레이션 결과 가열 온도는 87.8%의 정확도, 경화 깊이는 92.9%의 정확도로 산출하였다. 주차기어의 고주파 열처리 연구

결과를 통하여 정립된 고주파 유도가열 및 고주파 열처리 시뮬레이션의 신뢰성을 확인하였다.

1) 고주파 유도가열 장치의 저항, 커패시터 용량, 인덕터의 값에 따라 가열 대상물에 침투 전류 깊이와 전류세기가 변하는 특성을 이용하여 공진 RLC 회로에 적용하여 코일 전류 계산이 가능하다.

2) AISI 1552 고주파 유도가열 시 상온에서 650°C까지 도달하는데 2초, 650°C에서 최종 가열 온도까지 도달하는데 2.5초로 가열 효율이 낮아지는 현상이 발생한다. 이는 중탄소강이 600-650°C일 때 자성체에서 비자성체로 변하는 과정에서 투자율이 급격히 낮아지기 때문이다(Fig. 7(b) 참조).

3) 오스테나이트 조직에서 마르텐사이트 조직으로 상변태가 발생하기 위해서는 Ms 온도까지 10초 이내에 냉각되어야 한다. 이를 위하여 물 분사 냉각계수뿐만 아니라 상황에 맞는 냉각계수가 필요하다.

4) 고주파 열처리는 탄소강의 조직을 마르텐사이트 조직으로 상변태 시켜 표면경도와 내피로성, 내마모성을 향상시키는 열처리이다. 이를 시뮬레이션하기 위해서는 온도에 따라 페라이트에서 오스테나이트, 오스테나이트에서 베이나이트 또는 마르텐사이트 상변태를 계산할 수 있는 함수가 필요하다.

본 논문에서 제안된 코일 전류 및 AISI 1552 상변태를 고려한 고주파 열처리 시뮬레이션을 적용하여 다양한 제품의 데이터베이스 구축을 통하여 작업자의 경험과 시행착오로 인한 고주파 열처리 공정을 대체하고, 최적의 작업조건 도출 및 기술개발에 기여할 수 있을 것이라 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1F1A1065983).

REFERENCES

- Han, Y., Yu, E., Zhang, H., Huang, D., (2013), Numerical analysis on the medium-frequency induction heat treatment of welded pipe, Applied Thermal Engineering, 51(1-2), 212-217.
- Li, H., He, L., Gai, K., Jiang, R., Zhang, C., Li, M., (2015), Numerical simulation and experimental investigation on the induction hardening of a ball screw, Materials & Design, 87, 863-876.
- Lee, I., Tak, S., Pack, I., Lee, S., (2017), Comparative study on numerical analysis using co-simulation and experimental results for high frequency induction heating on SCM440 round bar, Journal of Aerospace System Engineering, 11(3), 1-7.
- Oh, D.-W., Kim, T. H., Do, K. H., Park, J. M., Lee, J., (2013), Design and sensitivity analysis of design factors for induction

- heating system, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, 26(5), 233-240.
5. Ji, H., Wang, B., Fu, X., (2017), Study on the induction heating of the workpiece before gear rolling process, *AIP Conference Proceedings*, 1896(1), 567120010.
 6. Tak, S.-M., Kang, H.-B., Baek, I.-S., Lee, S.-S., (2019), Improved workability using preheating in the electromagnetic forming process, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(6), 2809-2815.
 7. Tong, D., Gu, J., Totten, G. E., (2017), Numerical simulation of induction hardening of a cylindrical part based on multi-physics coupling, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 25(3), 035009.
 8. Choi, J.-K., Park, K.-S., Lee, S.-S., (2018), Predicting the hardening depth of a sprocket by finite element analysis and its experimental validation for an induction hardening process, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(3), 1235-1241.
 9. Choi, J.-K., Park, K.-S., Lee, S.-S., (2018), Prediction of high-frequency induction hardening depth of an AISI 1045 specimen by finite element analysis and experiments, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19(12), 1821-1827.
 10. Choi, J., Lee, S., (2020), High-frequency heat treatment of AISI 1045 specimens and current calculations of the induction heating coil using metal phase transformation simulations, *Metals*, 10(11), 1484.
 11. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. L., (2017). *Handbook of induction heating*, Routledge.
 12. KS D 0027, (2002), Methods of measuring case depth for steel hardened by flame or induction hardening process. <https://standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do>
 13. Electronics Tutorials, Parallel resonance circuit. <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/parallel-resonance.html/>
 14. Di Luozzo, N., Fontana, M., Arcondo, B., (2012), Modelling of induction heating of carbon steel tubes: Mathematical analysis, numerical simulation and validation, *Journal of Alloys and Compounds*, 536, S564-S568.
 15. Sadeghipour, K., Dopkin, J., Li, K., (1996), A computer aided finite element/experimental analysis of induction heating process of steel, *Computers in Industry*, 28(3), 195-205.
 16. Power, E. A., Zienau, S., (1959), Coulomb gauge in non-relativistic quantum electro-dynamics and the shape of spectral lines, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 251(999), 427-454.
 17. Mondelin, A., Rech, J., Feulvarch, E., Coret, M., (2014), Characterisation of surface martensite-austenite transformation during finish turning of an AISI S15500 stainless steel, *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 7, 15(1-2), 101-121.
 18. Leblond, J.-B., Devaux, J., Devaux, J., (1989), Mathematical modelling of transformation plasticity in steels I: Case of ideal-plastic phases, *International Journal of Plasticity*, 5(6), 551-572.
 19. Leblond, J.-B., (1989), Mathematical modelling of transformation plasticity in steels II: coupling with strain hardening phenomena, *International Journal of Plasticity*, 5(6), 573-591.
 20. Leblond, J.-B., Mottet, G., Devaux, J., (1986), A theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformations-I. Derivation of general relations, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 34(4), 395-409.
 21. Leblond, J.-B., Mottet, G., Devaux, J., (1986), A theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformations-II. Study of classical plasticity for ideal-plastic phases, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 34(4), 411-432.
 22. Leblond, J., Devaux, J., (1984), A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size, *Acta Metallurgica*, 32(1), 137-146.
 23. Koistinen, D. P., Marburger, R. E., (1959), A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels, *Acta Metallurgica*, 7(1), 59-60.
 24. Phadke, S., Pauskar, P., Shivpuri, R., (2004), Computational modeling of phase transformations and mechanical properties during the cooling of hot rolled rod, *Journal of Materials Processing Technology*, 150(1-2), 107-115.
 25. Reti, T., Fried, Z., Felde, I., (2001), Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model, *Computational Materials Science*, 22(3-4), 261-278.
 26. Reti, T., Bagyinszki, G., Felde, I., Verö, B., Bell, T., (1999), Prediction of as-quenched hardness after rapid austenitization and cooling of surface hardened steels, *Computational Materials Science*, 15(1), 101-112.
 27. Umemoto, M., Hiramatsu, A., Moriya, A., Watanabe, T., Nanba, S., Nakajima, N., Anan, G., Higo, Y., (1992), Computer modelling of phase transformation from work-hardened austenite, *Iron and Steel Institute of Japan International*, 32(3), 306-315.
 28. Edelbauer, W., Zhang, D., Kopun, R., Stauder, B., (2016), Numerical and experimental investigation of the spray quenching process with an Euler-Eulerian multi-fluid model, *Applied Thermal Engineering*, 100(5), 1259-1273.



Jin Kyu Choi

Ph.D. candidate in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is electromagnetic application and structural engineering.

E-mail: jinkyu87@gnu.ac.kr



Seok Soon Lee

He is working as a Professor in Mechanical and Aerospace Engineering at Gyeongsang National University. His research area includes finite element analysis and optimal design, electromagnetic application and he is involved in numerous innovative research.

E-mail: leess@gnu.ac.kr

PCAS 공정으로 제조된 WC-5wt.%TiC 소결체의 극저온처리 효과

Study of Cryogenic Treatment Effects on WC-5wt.%TiC Compact Fabricated by PCAS

이정한¹, 박범순¹, 박현국¹, 박재철^{1,#}

Jeong Han Lee¹, Bum Soon Park¹, Hyun Kuk Park¹, and Jae-Cheol Park^{1,#}

¹ 한국생산기술연구원 동력소재부품연구그룹 (Automotive Materials and Components R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)
Corresponding Author / E-mail: jerwual@kitech.re.kr, TEL: +82-62-600-6182
ORCID: 0000-0003-3615-3933

KEYWORDS: Pulsed current activated sintering (펄스전류 활성화 소결), Tungsten carbide (텅스텐 카바이드), Titanium carbide (티타늄 카바이드), Cryogenic treatment (극저온 처리), Hard materials (고강도 소재)

The WC-5wt.% TiC compacts, which was fabricated by pulsed current activated sintering process (PCAS), were cryogenically treated to improve the mechanical performance. The densely consolidated specimens were exposed to liquid nitrogen for 6, 12, and 24 h. All cryogenically treated samples exhibited compressive stress in the sintered body compared with the untreated sample. The cryogenically treated samples exhibited significant improvement in mechanical properties, with a 9% increase in Vickers hardness and a 52.6% decrease in the fracture toughness compared with the untreated samples. However, excessive treatment of over 12 h deteriorates the mechanical properties due to tensile stress in the specimens. Therefore, the cryogenic treatment time should be controlled precisely to obtain mechanically enhanced hard materials.

Manuscript received: September 27, 2022 / Revised: December 22, 2022 / Accepted: March 6, 2023

NOMENCLATURE

V = Voltage
A = Ampere
 ϵ = Densification Strain
m = Sintering Exponent
 τ = Crystallite Size
K = Shape Factor
 λ = X-ray Wavelength
 β = Full Width at Half Maximum
 θ = Bragg Angle
 H_v = Vickers Hardness
 K_{IC} = Fracture Toughness
f = Gravity Force

H = Hardness
P = Applied Load
E = Elastic Modulus
C = Length of Crack Propagation

1. Introduction

Tungsten carbide (WC), which contains cemented carbides, has attracted considerable attention owing to its high hardness, high elastic modulus, and wear resistance properties [1]. Cobalt, a typical binder material, improves the wettability of conventional cemented carbides and possess excellent sintering properties [2,3]. However, cobalt materials face certain disadvantages, including

high cost and environmental pollution; thus, a new metal binder is required to replace them. In recent years, several studies have been conducted to develop new hard materials using various cemented carbides, such as VC, Cr₃C₂, TiC, TaC, and NbC [4-6].

Composites sintered with WC-based cemented carbide materials can be strengthened not only by alloying but also by heat and cryogenic treatments. In particular, deep cryogenic treatment could have tremendous benefits, such as mitigating the thermal shock of materials, improving wear resistance, and extending tool life. Recently, several studies based on cryogenic treatment have been reported to significantly improve mechanical properties, such as hardness, compression strength, fatigue resistance, and wear resistance [7]. Kalsi et al. [8] reported that cryogenically treated tungsten carbide tools improved the flank wear resistance, thereby providing a better surface finish. Similarly, Yan et al. [9] observed an increase in the hardness and wear resistance of cryogenically treated tungsten carbide inserts. In addition, Yong and Ding [10] proved that cryogenic treatment improves the compressive as well as fatigue strength of cemented carbide tools without affecting their toughness and bending strength.

Therefore, the cryogenically treated WC-based cemented carbide improves the mechanical strength of the materials. However, studies have revealed that crystallographic changes in materials with cryogenic treatment time can have negative and positive effects on their mechanical performance. Therefore, in this study, the correlation between the crystallinity and mechanical strength of the WC-5wt.% TiC fabricated with different cryogenic treatment times was investigated.

2. Experimental Details

WC powder (W: 94.0 wt.% and C: 6.0 wt.%, $\leq 0.5 \mu\text{m}$, TaeguTec Ltd.), which has 99.9% purity and an average particle size of $0.5 \mu\text{m}$, was used as the starting material. Titanium carbide (TiC) powder (Alfa Aesar) with a purity of 99.5% and average particle size of $10 \mu\text{m}$ was used as an additive material. The WC-TiC mixed powders with a composition ratio of 95:5 wt.% were fabricated using a high-energy ball mill (Pulverisette5, FRITSCHE Ltd.) at 250 RPM for 10 h. WC compacts with a 5 wt.% TiC were fabricated using a pulsed current activated sintering (PCAS) system, including the 25 V and 1,000 A of DC power supply. First, the PCAS system was evacuated at a base pressure of 10^{-3} Pa, and subsequently, a uniaxial pressure of 60 MPa was applied. The heating rate was approximately $2^\circ\text{C}/\text{sec}$ during the entire process, and natural cooling was performed until the temperature of the sintered body

decreased to room temperature. Furthermore, the naturally cooled compact was cryogenically treated as direct contact between the cryogen and the samples. Liquid nitrogen was used as the cryogen, which allowed the ambient temperature of the sample to drop to -196°C . The structural and mechanical properties of WC-5 wt.% TiC compact, cryogenically treated in liquid nitrogen for 6, 12, and 24 h, were investigated in detail.

To confirm the microstructure of the sintered body, the cryogenically treated or untreated specimens were etched at room temperature for 30 s using a Murakami solution. This reagent was stirred for 3 min after mixing 10 g NaOH powder and 10 g potassium ferricyanide ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$) in 100 ml distilled water. The surface morphologies of the etched specimens were examined using field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM, Quanta 200). In addition, the crystallinity of the sintered body was analyzed using X-ray diffraction (XRD, PANalytical X'pert MPD), and the Vickers hardness test was used to analyze the mechanical properties of the WC-5 wt.% TiC hard materials.

3. Results and Discussion

Fig. 1(a) shows variations in the sintering temperature and shrinkage displacement of WC-5 wt.% TiC compact as a function of sintering time. As shown in Fig. 1(a), the WC-5 wt.% TiC compact had three distinguishable inflection points in terms of shrinkage displacement. The critical points were divided into three regions at specific temperatures: Stage I ($550\text{-}683^\circ\text{C}$), Stage II ($683\text{-}864^\circ\text{C}$), and Stage III ($864\text{-}1,081^\circ\text{C}$). Stage I is the initial stage of sintering, which represents the region in which the particle movement by thermal expansion forms a neck. The sintering properties are determined in stage II, where the grain growth and densification processes occur. The final densification region represented by Stage 3 involves the removal of closed pores caused by grain growth, diffusion, and plastic deformation of WC-5 wt.% TiC. After completion of the sintering process, WC-5 wt.% TiC sample had a relative density of 99.3%, thus confirming that the densification process was totally completed.

Densification can be inferred from the sintering exponent derived from the shrinkage displacement and sintering temperature. The sintering exponents were calculated using Eq. (1) [11], which can also be expressed as a logarithmic function:

$$\ln(\varepsilon) = (1/m) \ln(K/T) + (1/m) \ln(t) \quad (1)$$

The sintering exponents can be defined using the slope of the shrinkage strain vs. temperature plot, as shown in Fig. 1(b). The WC-5 wt.% TiC sample had two densification zones. In zone 1,

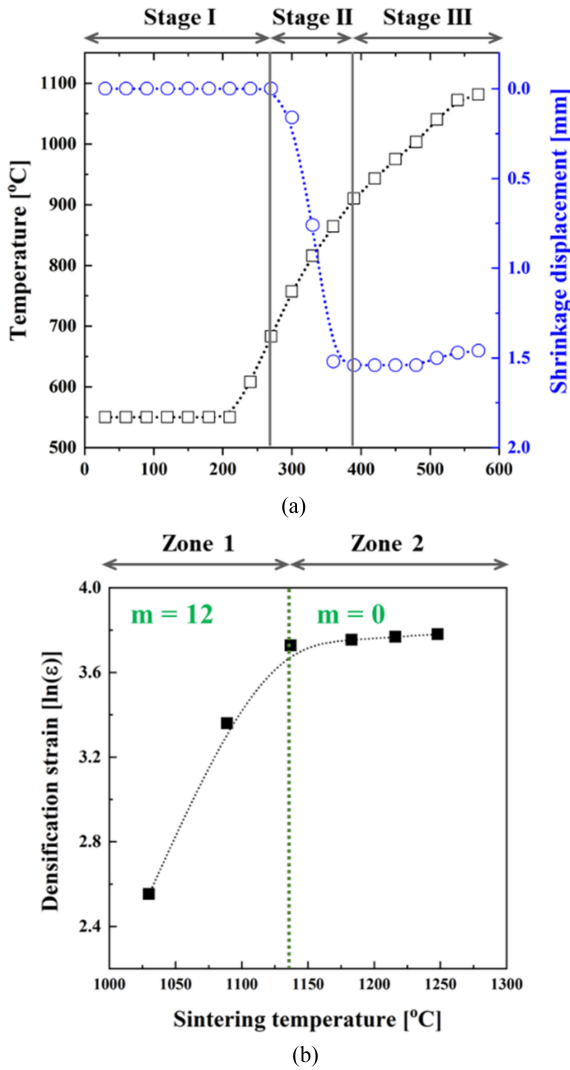


Fig. 1 (a) Temperature and shrinkage displacement of WC-5 wt.% TiC sample as a function of sintering time. (b) Variations in densification strain in the shrinkage zone

rapid densification occurs in the macro area. On the contrary, in zone 2, densification proceeds as open pores inside the sintered body are removed. Since the densification strain is defined only in the section where the change in shrinkage length is observed, the sintering exponent ($m = 12$) of the WC-5 wt.% TiC sintered was obtained as shown in Fig. 1(b).

Fig. 2 shows the surface morphologies of WC powder, TiC powder, WC-5 wt.% TiC compact and cryogenically treated WC-5wt.% TiC samples. Fig. 2(a) shows surface morphology of the WC powder, which is the starting material of the WC-5wt.% TiC compact, and has the average particle size below 500 nm. As shown in Fig. 2(b), TiC powder as an additive material, has the randomly distributed morphology with the average grain size below 10 μm. The WC-5 wt.% TiC sintered compact prepared with the above two powders showed a densely packed micro-

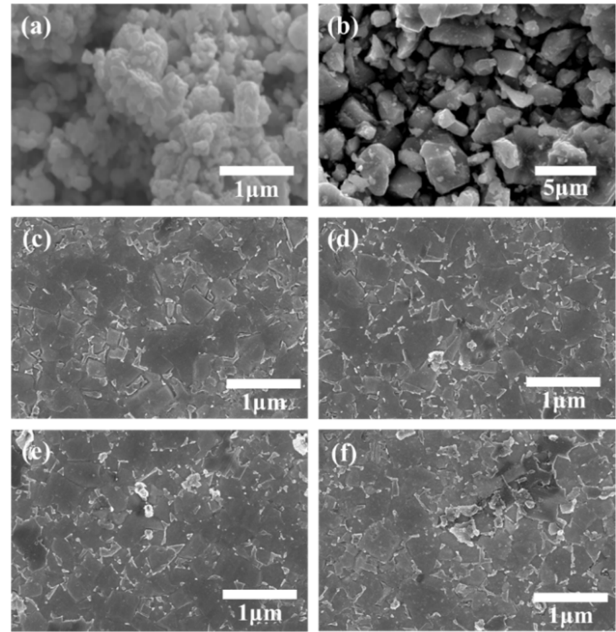


Fig. 2 Surface morphologies of (a) WC powder and (b) TiC powder. The surface images of WC-5 wt.% TiC compacts as a function of cryogenic treatment time: (c) untreated, (d) 6 h, (e) 12 h, and (f) 24 h

structure without pores, and the average grain size of the sintered compact had a value of 487 nm. The WC-5 wt.% TiC compact had a grain size similar to that of WC starting materials, which indicates that grain growth was considerably suppressed during the densification process. Samples (d)-(f) that were cryogenically treated for 6, 12, and 24, respectively, showed the similar morphology to that of the non-cryogenic treated samples. This means that the cryogenically treated compacts were not deformed by thermal shock; Therefore, it is necessary to further investigate the effect of the cryogenic treatment on the sintered body by clarifying the correlation between crystallinity and mechanical strength.

Figure 3(a) shows XRD patterns of cryogenically treated and untreated WC-5 wt.% TiC samples depending on the dipping time. In all cryogenically treated samples, only diffraction planes corresponding to hexagonal structures were observed, indicating that no secondary phases such as carbon or TiC additives were observed. As shown in Fig. 3(b), the diffraction peaks exhibited by all the cryogenically treated samples shifted to higher angles compared to the untreated samples. According to the Bragg's law, the diffraction angle and lattice constant are inversely proportional; hence, compressive strength can be inferred to exist in the cryogenically treated samples. However, in case of cryogenically treated samples, it was observed that the diffraction peaks gradually shifted to lower angles as the cryogenic treatment time increased. Furthermore, crystallite sizes of WC-5 wt.% TiC

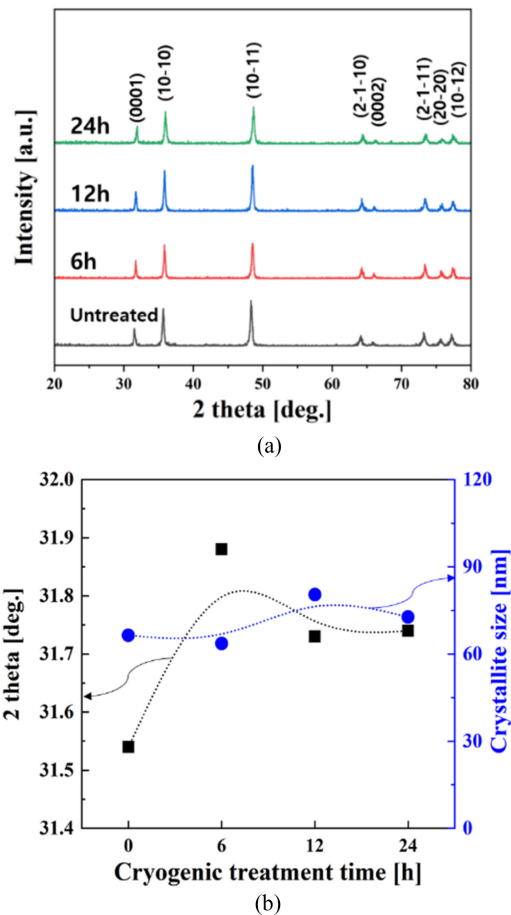


Fig. 3 (a) XRD patterns of WC-5 wt.% TiC samples as a function of cryogenic treatment time. (b) diffraction peak positions and crystallite sizes corresponding to (0001) diffraction plane

samples were calculated using the Scherrer equation ($\tau = K\lambda / \beta \cos\theta$). The crystallite size of WC-5 wt.% TiC samples were 66.5, 63.6, 80.4, 72.7 nm, respectively, as increasing cryogenic treatment times, showing that no remarkable changes are observed regardless of the cryogenic treatment times. The XRD results revealed that the cryogenic treatment of WC-5 wt.% TiC sample developed compressive stress in the sintered body, which significantly improved its mechanical properties. However, tensile stress was weakly expressed in the sintered body with a gradual increase in the cryogenic treatment time, thereby leading to a decrease in the mechanical strength of the sintered body. Therefore, the sintered body must be strengthened via proper cryogenic treatment conditions.

To examine the effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of the sintered body, variations in Vickers hardness and fracture toughness according to the cryogenic treatment time are presented in Table 1. The hardness and fracture toughness were determined through indentation cracking with a load of 10 kgf. In addition, fracture toughness (K_{IC}) obtained from the crack

Table 1 Variations in Vickers hardness and fracture toughness as a function of cryogenic treatment time

Cryogenic treatment time [h]	H_v [kg/mm ²]	K_{IC} [MPa*m ^{0.5}]
0	1,821.4±21.3	17.1±0.3
6	2,044.9±22.3	11.3±0.2
12	1,951.6±21.9	9.8±0.2
24	1,956.1±23.2	9.0±0.2

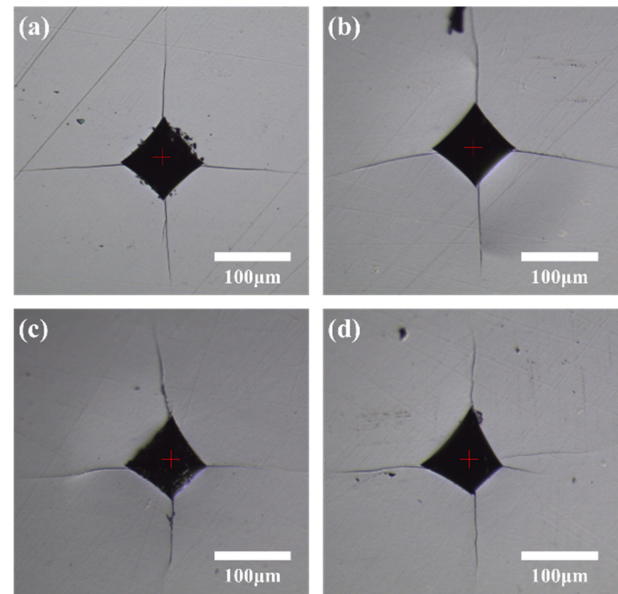


Fig. 4 Microstructure images with hardness indentations of WC-5 wt.% TiC sintered bodies according to the cryogenic treatment time: (a) 0 h, (b) 6 h, (c) 12 h, (d) 24 h

propagation lengths in the four directions of the indentations were used to determine the cracking resistance, which was calculated by the Antis formula [12].

$$K_{IC} = 0.016(E/H)^{1/2}P/C^{3/2} \quad (2)$$

where E is the elastic modulus, H is the hardness, P is the applied load, and C is the length of crack propagation.

The untreated sample exhibited Vickers hardness of 1,821.44±21.3 kg/mm² and fracture toughness of 17.1±0.3 MPa*m^{0.5}. In contrast, all the cryogenically treated samples exhibited an average Vickers hardness of 1,984.2±22.8 kg/mm², which was approximately 9% higher than that of the untreated sample. Furthermore, the fracture toughness of the cryogenically treated sample exhibited a decrease of more than 52.6% compared to the non-cryogenically treated sample, thus verifying that the mechanical properties were dramatically improved. The mechanical properties were closely related to the XRD results; in particular, the compressive and tensile stresses in the sintered body had a significant effect on mechanical strength. The XRD results

revealed that the cryogenically treated sample had excellent crystallinity compared with the untreated sample, which resulted in low crystallographic defects in the sintered body. Additionally, the XRD results of the cryogenically treated sample exhibited improved mechanical strength owing to the occurrence of compressive stress in the sintered body. Although it was confirmed that cryogenic treatment could have a positive effect on improving mechanical properties, a gradual decrease in Vickers hardness was observed as the cryogenic treatment time increased. This is believed that the TiC additives at the WC/TiC interface promote the grain growth biased toward the basal facet, which has relatively low energy during cryogenic treatment. As shown in Fig. 3(b), it can be confirmed that the crystallite size of samples cryogenically treated over 12 h increases, and this increase in crystallite sizes eventually leads to the deterioration in mechanical properties. Consequently, the results verified that the compressive stress formed in the sintered body through cryogenic treatment significantly contributed to the improvement of the Vickers hardness and rupture strength. Nonetheless, note that excessive cryogenic treatment may degrade the crystallinity and decrease the mechanical strength of the sintered body; therefore, precise control of the cryogenic treatment time is necessary.

4. Conclusions

The effects of cryogenic treatment in improving the mechanical properties of WC-5 wt.% TiC hard materials were studied in detail. Compressive stress in the sintered body emerged with increasing cryogenic treatment time owing to the decrease in the lattice constant. Regardless of the deep cryogenic treatment time, none of the samples showed phase changes, precipitation, or secondary phases in the specimens. However, the sample treated over 12 h revealed tensile stress, which resulted in degradation of the mechanical strength. As a result, it has been demonstrated that cryogenic treatment can have a beneficial effect on tool hardening as well as degrade performance with treatment time.

ACKNOWLEDGEMENT

This study has been conducted with the support of the Korea Institute of Industrial Technology as “Development of core technologies of AI based self-power generation and charging for next-generation mobility (KITECH EH-23-133)”.

REFERENCES

- Hur, M. G., Shin, M. K., Kim, D. J., Yoon, D. H., (2018), Defect control of the WC hardmetal by mixing recycled WC nano powder and tungsten powder, *Metals and Materials International*, 24(4), 301-305.
- Viswanathan, V., Agarwal, A., Ocelik, V., De Hosson, J., Sobczak, N., Seal, S., (2006), High energy density processing of a free form Nickel-alumina nanocomposite, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(3), 651-660.
- Liu, G., Guo, S., Li, J., Chen, K., Fan, D., (2017), Fabrication of hard cermets by in-situ synthesis and infiltration of metal melts into WC powder compacts, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 5(4), 418-421.
- Huang, S., Liu, R., Li, L., Van der Biest, O., Vleugels, J., (2008), NbC as grain growth inhibitor and carbide in WC-Co hardmetals, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 26(5), 389-395.
- Huang, S., Li, L., Vanmeensel, K., Van der Biest, O., Vleugels, J., (2007), VC, Cr₃C₂ and NbC doped WC-Co cemented carbides prepared by pulsed electric current sintering, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25(5-6), 417-422.
- Lauter, L., Hochenauer, R., Buchegger, C., Bohn, M., Lengauer, W., (2016), Solid-state solubilities of grain-growth inhibitors in WC-Co and WC-MC-Co hardmetals, *Journal of Alloys and Compounds*, 675, 407-415.
- Kaya, E., Ulutan, M., (2017), Tribological and mechanical properties of deep cryogenically treated medium carbon micro alloy steel, *Metals and Materials International*, 23(4), 691-698.
- Kalsi, N. S., Sehgal, R., Sharma, V. S., (2012), Comparative study to analyze the effect of tempering during cryogenic treatment of tungsten carbide tools in turning, *Advanced Materials Research*, 410, 267-270.
- Yan, H., Xu, H., Luo, X., (2010), The research on process of deep cryogenic treatment for YT15 carbide insert, *Proceedings of the 2010 International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface*, 725-728.
- Yong, J., Ding, C., (2011), Effect of cryogenic treatment on WC-Co cemented carbides, *Materials Science and Engineering: A*, 528(3), 1735-1739.
- Lee, J.-H., Oh, I.-H., Kim, J.-H., Hong, S.-K., Park, H.-K., (2021), Rapid consolidation of WC-ZrSiO₄ hard materials by spark plasma sintering: Microstructure, densification, and mechanical properties, *Metals and Materials International*, 27, 3409-3416.
- Dukino, R. D., Swain, M. V., (1992), Comparative measurement of indentation fracture toughness with Berkovich and Vickers indenters, *Journal of the American Ceramic Society*, 75(12), 3299-3304.

**Jeong Han Lee**

Ph.D. in the Automotive Materials and Components R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology.

E-mail: ljh88@kitech.re.kr

**Bum Soon Park**

M.D. candidate in the Automotive Materials and Components R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology.

E-mail: bsbspark@kitech.re.kr

**Hyun Kuk Park**

Ph.D. in the Automotive Materials and Components R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology.

E-mail: hk-park@kitech.re.kr

**Jae Cheol Park**

Ph.D. in the Automotive Materials and Components R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology.

E-mail: jerwual@kitech.re.kr

그리퍼 내에서 물체의 위치를 인지하기 위한 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서 개발

Development of 5-axis Force/Moment Sensor of Gripper to Recognize the Position of an Object within the Gripper

김진¹, 김갑순^{2,#}
Jin Kim¹ and Gab-Soon Kim^{2,#}

¹ 경상국립대학교 대학원 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University)

² 경상국립대학교 제어로봇공학과 (Department of Control and Robot Engineering (ERI), Gyeongsang National University)

Corresponding Author / E-mail: gskim@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1745

ORCID 0000-0002-1753-3319

KEYWORDS: 5-axis force/moment sensor (5축 힘/모멘트센서), Intelligent gripper (지능형 그리퍼), Intelligent robot (지능로봇), Strain gage (스트레인게이지), Rated output (정격출력), Nonlinearity error (비직선성오차)

In this paper, we describe the development of a 5-axis force/moment sensor of an intelligent gripper designed to grasp the weight of an unknown object and the position of the object in the gripper. The 5-axis force/moment sensor consists of an F_x force sensor, F_y force sensor, and F_z force sensor to measure weight, along with an M_x moment sensor and M_z moment sensor to determine the position of an object in the gripper. These sensors are all built within a single body. Each sensor sensing part of the 5-axis force/moment sensor was newly modeled and custom designed using software, and each sensor was manufactured by attaching a strain gauge. The results of the characteristic test of the fabricated 5-axis force/moment sensor showed that the rated output error was within 0.1%, the reproducibility error was within 0.05%, and the nonlinearity error was within 0.04%. Therefore, the 5-axis force/moment sensor developed in this paper can be attached to an intelligent gripper and be used to grasp the weight of an unknown object as well as the position of the object in the gripper.

Manuscript received: December 1, 2022 / Revised: January 26, 2023 / Accepted: January 27, 2023

1. 서론

로봇의 그리퍼는 다양한 종류의 미지물체를 안전하게 잡은 후에 테이블 등의 위에 놓는 작업, 상자 등에 넣는 작업 등을 수행해야 한다. 그리고 로봇이 물체를 정확한 위치에 놓기 위해서는 물체의 중심이 그리퍼의 어느 위치에 있는지를 인지해야 한다. 로봇의 그리퍼가 금속 물체를 잡을 때에는 단단하고 강성이 높으므로 떨어지지 않을 정도로 잡는 힘을 가하여 잡으면 된다. 그러나 금속 이외의 물체는 파괴되지 않고, 떨어지지 않도록 안전하게 잡아야 한다. 현재의 로봇 그리퍼는 다양한 미지물체를 안전하게 잡아 드는 것을 수행하기가 매우 어렵다.

Bicchi [1]는 로봇 손을 조작 손동작, 견고성, 조작성 등을

고려하여 인체공학적으로 설계하였고, Kyberd [2]는 손의 상태, 잡는 힘, 미끄러짐 등의 정보를 마이크로프로세서가 읽어 1개 이상의 자유도를 제어할 수 있는 로봇손을 설계하였다. Chelpanov [3]은 산업용 로봇의 그리퍼의 기계적인 동작에 대해 분석하였고, Tai [4]는 그리퍼의 기능을 향상시키기 위해 압전, 형상 기억 합금, 스마트 유체, 탄소 섬유 등을 이용하여 설계하였고, 이것은 부드럽거나 깨지기 쉬운 물체를 잡기 위한 것이다. Honarpardaz [5]는 산업용 로봇에 부착하기 위해 자동으로 동작하는 손가락을 설계하였고, Birglen [6]은 다양한 물체를 감아칠 수 있는 손가락 관절 액츄에이터가 없는 로봇손가락을 설계하였다. Fantoni [7]는 물체의 특성에만 의존하지 않고 공급 조건, 취급 특성, 배치 및 해제 조건과 같은 많은 다른 매개변수를 고려한 그리퍼 선택에

대해 연구하였고, Roberge [8]는 그리퍼가 미끄러지지 않고 최대의 힘과 모멘트를 발휘할 수 있도록 촉각센서를 이용한 그리퍼를 설계하였다. Huang [9]는 로봇의 위치제어와 그리퍼의 힘제어를 수행할 수 있는 제어장치를 설계하였다.

산업체에서 금속 공작물을 처리하기 위해 사용되는 공압식 그리퍼는 금속의 무게 등을 고려하여 작업자가 수동으로 공기압을 조정하고 그것에 따라 항상 일정한 공기압을 가하여 잡는다. 전기식 그리퍼는 공압식 그리퍼와 마찬가지로 작업자가 잡는 힘에 상응하는 모터 드라이브에 공급되는 전류값을 결정하고, 그것을 기준으로 제어하여 잡는다. 위와 같이 현재까지 개발된 로봇 그리퍼는 다양한 물체를 스스로 안전하게 잡기 못한다. 이것은 그리퍼 스스로 물체에 따라 적당한 잡는 힘을 결정하지 못하기 때문이다. 그리퍼가 미지물체를 안전하게 잡기 위해서는 그리퍼가 물체를 잡아 드는 순간 무게의 무게를 측정하고, 그 무게에 따라 잡는 힘을 조절해야 한다. 그리퍼가 미지물체를 무게를 측정하기 위해서는 물체를 잡는 그리퍼 판에 3축 힘센서(F_x 힘센서, F_y 힘센서, F_z 힘센서)를 부착해야 한다. 그리고 물체가 그리퍼 판의 중심으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 정량적으로 파악하기 위해서는 모멘트센서가 부착되어야 한다. 즉, 그리퍼가 물체의 무게를 측정하여 잡는 힘을 결정한 후 안전하게 잡고, 그리퍼 내에 물체의 위치를 정량적으로 인지하기 위해서는 5축 힘/모멘트센서가 그리퍼 판에 부착되어야 한다.

지금까지 다양한 모양과 크기로 다축 힘/모멘트센서가 개발되었다. Kim [10]과 Jung [11]은 각각 하지재활로봇의 종아리 링크와 허벅지 링크에 2축 센서를 설계 및 제작하였으나 센서길이가 300 mm 이상이고, 힘 F_x 와 F_y 만 동시에 측정할 수 있는 단점을 가지고 있다. Song [12]는 4축 힘/토크센서를 설계 및 제작하였으나 힘 F_x 와 F_y , 토크 M_x 와 M_y 를 동시에 측정할 수 있어 물체의 무게를 측정할 수 없는 단점을 가지고 있다. ATI [13]은 2축-6축 힘/토크센서를 제작하여 판매하고 있으나 센서의 모양이 사각형 혹은 원형으로 되어 있어 그리퍼의 손가락에 부착하기 어려울 뿐만 아니라 가격이 1천만원대로 매우 고가이므로 사용하기 어렵다. 그러므로 지능형 그리퍼에 부착되어 물체의 무게와 그리퍼 내의 물체의 위치를 인지하기 위한 5축 힘/모멘트센서의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 물체의 무게와 그리퍼 내에서 물체의 위치를 인지하기 위한 지능형 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서(F_x 힘센서, F_y 힘센서, F_z 힘센서, M_x 모멘트센서, M_z 모멘트센서)를 설계 및 제작하였다. 5축 힘/모멘트센서의 감지부를 설계하였고, 감지부의 크기를 결정하기 위한 구조해석을 실시하였으며, 스트레인지지를 각 센서 감지부에 부착하여 제작하였다. 그리고 제작한 5축 힘/모멘트센서의 특성실험을 실시하였다.

2. 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서 설계

2.1 그리퍼의 물체 위치인지 원리

Fig. 1은 5축 힘/모멘트 센서를 이용한 지능형 그리퍼의 물체

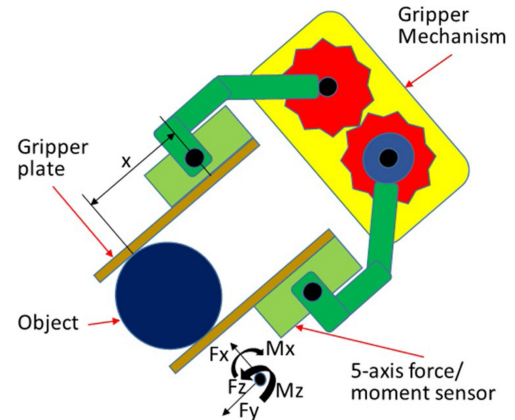


Fig. 1 Object position recognition principle of intelligent gripper using the 5-axis force/moment sensor

무게측정 및 위치인지 원리를 나타내고 있고, 이것은 그리퍼 기계장치(Gripper Mechanism), 그리퍼 판(GRIPPER PLATE), 두개의 5축 힘/모멘트센서(5-axis-force Sensor) 등으로 구성된다. 그리퍼 기계장치는 액츄에이터의 모터의 회전에 따라 스퍼어기어가 회전되고, 이것에 의해 레버에 부착된 그리퍼 판이 수평으로 이동되어 물체를 잡는다. 그리퍼가 물체를 잡아 들게 되면 5축 힘/모멘트센서의 F_x 힘센서, F_y 힘센서, F_z 힘센서가 무게를 측정하고, 무게에 따른 잡는 힘을 결정하여 잡는 제어를 실시한다. 동시에 M_x 모멘트 센서와 M_z 모멘트센서를 이용하여 그리퍼 내에서의 물체의 위치를 인지한다.

물체의 무게를 측정하여 계산하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W = \sqrt{(F_{x1} - F_{x2})^2 + (F_{y1} - F_{y2})^2 + (F_{z1} - F_{z2})^2} \quad (1)$$

여기서, W 는 미지물체의 무게[N], F_{x1} 과 F_{x2} 는 5축 힘/모멘트센서1과 2의 각 힘센서로부터 측정된 x 방향의 힘[N], F_{y1} 과 F_{y2} 는 5축 힘/모멘트센서1과 2의 각 힘센서로부터 측정된 y 방향의 힘[N], F_{z1} 과 F_{z2} 는 5축 힘/모멘트센서1과 2의 각 힘센서로부터 측정된 z 방향의 힘[N]이다.

잡는 힘제어를 위한 잡는 힘 F_x 계산식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_x = |F_{x1} - F_{x2}| \quad (2)$$

그리퍼 내에서의 물체의 위치 인지는 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$X = \frac{M_{z1}}{F_{x1}} = \frac{M_{z2}}{F_{x2}} \quad (3)$$

$$X = \frac{M_{x1}}{F_{z1}} = \frac{M_{x2}}{F_{z2}} \quad (4)$$

여기서, X 는 물체의 중심으로부터 그리퍼의 중심까지의 거리 [m], M_{x1} 와 M_{x2} 는 5축 힘/모멘트센서1과 2의 각 모멘트센서로부터 측정된 x 방향의 모멘트[Nm], M_{z1} 와 M_{z2} 는 5축 힘/모멘트

센서1과 2의 각 모멘트센서로부터 측정된 z방향의 모멘트[Nm]이다.

2.2 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서 구조

Fig. 2는 지능형 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서의 구조를 나타내고 있다. 이것은 Fx 힘센서와 Mz 모멘트센서 감지부(Sensing Element of Fx Force Sensor and Mz Moment Sensor), Fy 힘센서 감지부(Sensing Element of Fy Force Sensor), Fz 힘센서와 Mx 모멘트센서 감지부(Sensing Element of Fz Force Sensor and Mx Moment Sensor), 상부 고정(Upper Fixture), 하부 고정구1과 2(Lower Fixture 1 and 2) 등으로 구성되고, 이것들은 한 몸체로 되어 있다. 각각의 감지부는 평행평판으로 구성되어 있고, 두개의 감지부가 하나 혹은 두개의 센서를 제작하는데 사용된다. 각 센서의 제작은 스트레인게이지를 평판에 부착하여 브리지 회로를 구성한다. Fx 힘센서/Mz 모멘트센서 감지부의 크기인 길이, 폭, 두께는 l_1, b_1, t_1 이고, Fy 힘센서 감지부의 크기는 l_2, b_2, t_2 이며, Fz 힘센서/Mx 모멘트센서 감지부의 크기는 l_3, b_3, t_3 이다. 그리고 상부 고정구는 링크와 고정되어 있고, 하부 고정구 1과 2는 그리퍼 판과 고정되어 있다.

2.3 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서의 설계

Fig. 3은 지능형 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서의 스트레인게이지 부착위치를 나타내고 있고, Fx 힘센서의 부착위치는 S5-S8, Fy 힘센서는 S1-S4, Fz 힘센서는 S9-S12, Mx 모멘트센서는 S13-S16, Mz 모멘트센서는 S17-S20이다.

Fig. 4는 각 센서의 휘스톤브리지를 나타내고 있고, 이것은 5개의 각 센서를 제작할 때 부착된 4개의 스트레인게이지로 구성된다. 각각 스트레인게이지 부착위치는 T1 (S1, S5, S9, S13, S17)과 T(S3, S7, S11, S15, S17)는 인장 스트레인게이지, (S2, S6, S10, S14, S18)과 C2 (S4, S8, S12, S16, S20)는 압축 스트레인게이지이다. 인장 스트레인게이지 부착위치는 5축 힘/모멘트센서에 힘을 가하였을 때 스트레인게이지 부착위치에서 양의 변형률이 발생되고, 압축 스트레인게이지 부착위치는 5축 힘/모멘트센서에 힘을 가하였을 때 스트레인게이지 부착위치에서 음의 변형률이 발생된다.

각 센서를 설계할 때는 먼저 정격출력을 결정하고, 정격출력에 맞도록 각 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률이 정격변형률에 맞도록 구조해석을 실시해야 한다. 즉, 센서의 감지부 크기는 정격변형률을 고려하여 결정되어야 한다.

정격변형률을 계산하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \tag{5}$$

여기서, ε 는 각 센서의 정격변형률, ε_{T1} 는 각 센서의 스트레인게이지 부착위치 T1에서의 인장변형률, ε_{C1} 는 각 센서의 스트레인게이지 부착위치 C1에서의 압축변형률 ε_{T2} 는 각 센서의 스트레인게이지 부착위치 T2에서의 인장변형률 ε_{C2} 는 각 센서의 스트레인게이지 부착위치 C2에서의 압축변형률이다.

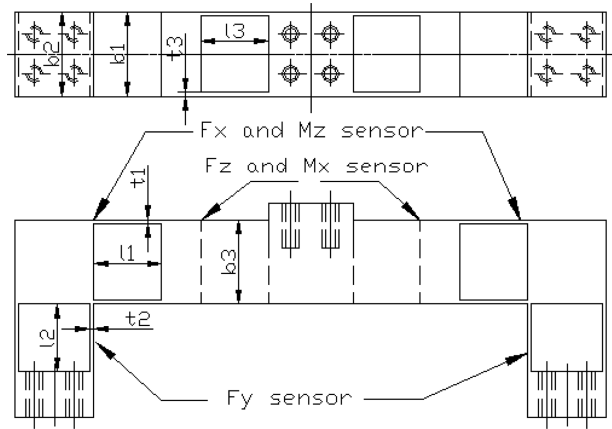


Fig. 2 Structure of the 5-axis force/moment sensor of intelligent gripper

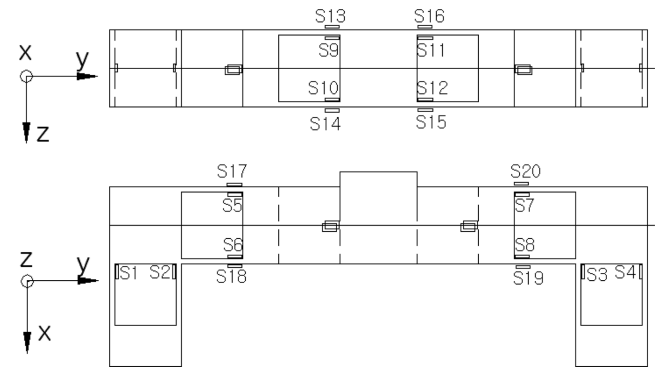


Fig. 3 Strain gage location of each sensor of the 5-axis force/moment sensor

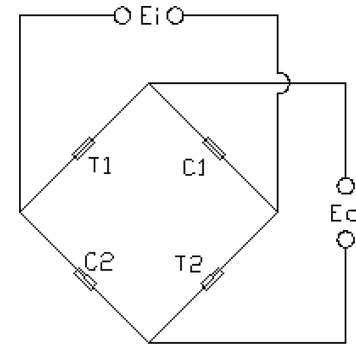


Fig. 4 Wheatstone bridge circuit of each sensor

5축 힘/모멘트센서의 각 힘센서와 모멘트센서의 정격출력을 계산하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4}K\varepsilon \tag{6}$$

여기서, E_o 는 각 센서의 휘스톤브리지 회로의 출력전압, E_i 는 각 센서의 휘스톤브리지 회로의 입력전압, K는 각 센서의 스트레인게이지의 게이지 상수이다.

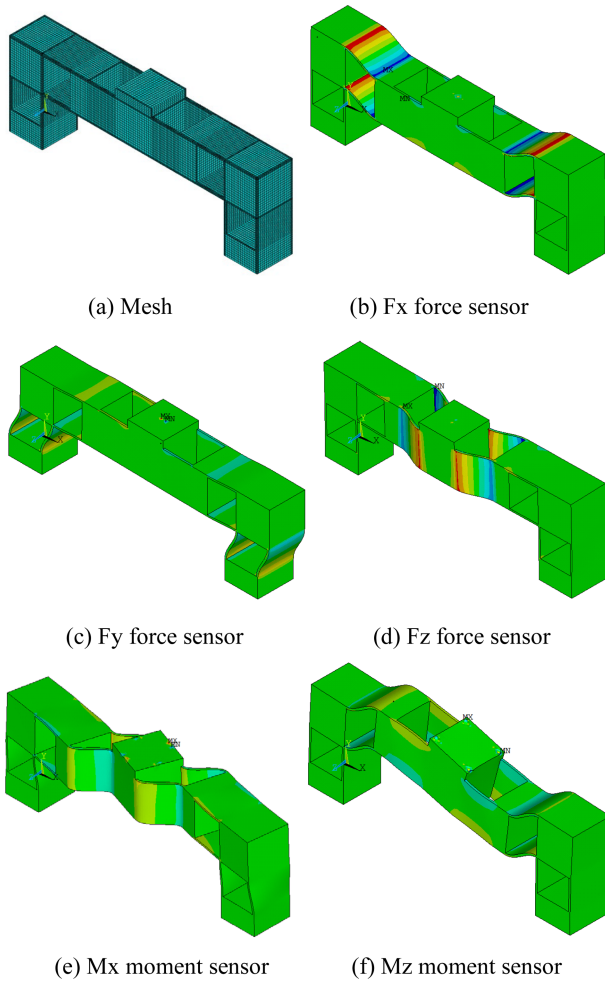


Fig. 5 Structural analysis of 5-axis force/moment sensor

구조해석을 통하여 5축 힘/모멘트센서의 각 감지부의 크기를 결정하기 위해서는 각 센서의 설계변수가 필요하다. 설계변수는 5축 힘/모멘트센서의 각 힘센서와 모멘트센서의 정격출력을 각각 0.5 mV/V, 각 힘센서의 정격용량을 각각 30 N, Mx 모멘트센서와 Mz 모멘트센서의 정격용량을 각각 3 Nm와 2 Nm, 각 힘센서와 모멘트센서의 정격변형률을 각각 1,000 $\mu\text{m/m}$, 각 힘센서와 모멘트센서의 감지부 길이 11, 12, 13은 각각 12 mm, 폭 b1, b2, b3는 각각 15 mm로 결정하였고, 스트레인게이지 부착위치는 감지부 폭의 중심선과 보의 시작점부터 2 mm 떨어진 지점이다. 이것은 스트레인게이지의 크기(3 × 5.2 mm)를 고려하였기 때문이다. 재료의 종단성계수는 5축 힘/모멘트센서의 재질이 알루미늄 70계열이므로 70 GPa, 프와송의 비는 0.3이다. 각 힘센서와 모멘트센서의 정격출력을 0.5 mV/V로 결정한 것은 감지부가 평행평판이므로 안전성을 고려하였기 때문이다. 5축 힘/모멘트센서의 구조해석은 결정한 각각의 설계변수를 소프트웨어(ANSYS)에 입력하여 실시하였다. Fig. 5는 지능형 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서의 구조해석 결과를 나타내고있다. Fig. 5(a)는 5축 힘/모멘트센서의 격자를 나눈 것을 나타내고 있고, 격자 크기는 각 센서 감지부의 길이방향으로는 0.5 mm, 폭방향으로는 20등분,

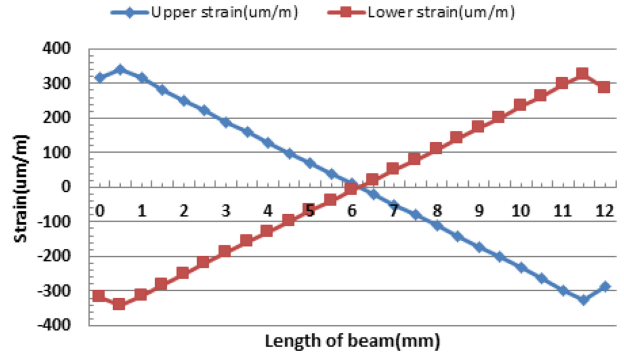


Fig. 6 When a force of 30 N (rated capacity of the Fx force sensor) is applied to the 5-axis force/moment sensor, the strain of Fx force sensor sensing part

두께 방향으로는 3등분으로 하였다. Figs. 5(b)는 Fx 힘센서의 결과, 5(c)는 Fy 힘센서의 결과, 5(d)는 Fz 힘센서의 결과, 5(e)는 Mx 모멘트센서의 결과, 5(f)는 Mz 모멘트센서의 결과를 각각 나타내고 있고, 이것들은 각각 가해진 힘과 모멘트 방향으로 변형됨을 보이고 있으며, 모두 예상했던 것과 같이 변형되었다.

Fig. 6은 Fx 힘센서의 정격용량인 힘 30 N이 5축 힘/모멘트센서에 가해졌을 때 Fx 힘센서 감지부의 변형률을 나타내고 있다. 변형률이 0 $\mu\text{m/m}$ 인 지점은 보의 시작지점으로부터 6.2 mm 지점이며, 보의 양쪽 끝부분 쪽으로 변형률이 증가되었다. 이것은 평행판보의 특징으로 나타나는 현상이다. 그리고 보의 양끝의 변형률은 감소하는 경향을 보였고, 이것은 보와 블록이 겹치는 부분에서 발생하는 소프트웨어의 끝효과 때문이다. 그리고 Fy 힘센서 감지부의 변형률은 $\pm 6 \mu\text{m/m}$ 이내를 나타내고 있고, Fz 힘센서/Mx 모멘트센서 감지부의 변형률은 $\pm 1 \mu\text{m/m}$ 이내를 나타내고 있다. Fig. 7은 Fy 힘센서의 정격용량인 힘 30 N이 5축 힘/모멘트센서에 가해졌을 때 Fy 힘센서 감지부의 변형률을 나타내고 있다. 변형률이 0 $\mu\text{m/m}$ 인 지점은 보의 시작지점으로부터 6.3 mm 지점이며, 보의 양쪽 끝부분 쪽으로 변형률이 증가되었다. 그리고 Fx 힘센서/Mz 모멘트센서 감지부의 변형률은 약 4 mm 지점에서 0 $\mu\text{m/m}$ 이었고, 양쪽 끝으로 갈수록 최대 62 $\mu\text{m/m}$ 까지 증가하는 경향을 보였다. 그리고 Fz 힘센서/Mx 모멘트센서 감지부의 변형률은 $\pm 8 \mu\text{m/m}$ 이내를 나타내고 있다.

Fig. 8은 Fz 힘센서의 정격용량인 힘 30 N이 5축 힘/모멘트센서에 가해졌을 때 Fz 힘센서 감지부의 변형률을 나타내고 있다. 변형률이 0 $\mu\text{m/m}$ 인 지점은 보의 시작지점으로부터 5.4 mm 지점이며, 보의 양쪽 끝부분 쪽으로 변형률이 증가되었다. 그리고 Fy 힘센서와 Fx 힘센서/Mz 모멘트센서 감지부의 변형률은 $\pm 0 \mu\text{m/m}$ 정도이었다. Fig. 9는 Mx 모멘트센서의 정격용량인 모멘트 2.272 N이 5축 힘/모멘트센서에 가해졌을 때 Mx 모멘트센서 감지부의 변형률을 나타내고 있다. 변형률이 0 $\mu\text{m/m}$ 인 지점은 보의 시작지점으로부터 8.1 mm 지점이며, 보의 양쪽 끝부분 쪽으로 변형률이 증가되었다. 그리고 Fy 힘센서와 Fx 힘센서/Mz 모멘트센서 감지부의 변형률은 $\pm 0 \mu\text{m/m}$ 정도 이었다.

Fig. 10은 Mz 모멘트센서의 정격용량인 모멘트 3.675 N이

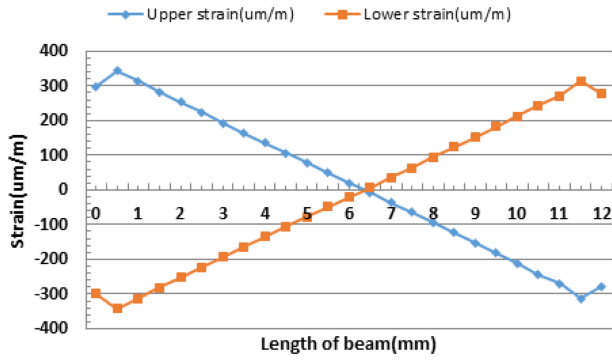


Fig. 7 When a force of 30 N (rated capacity of the Fy force sensor) is applied to the 5-axis force/moment sensor, the strain of Fy force sensor sensing part

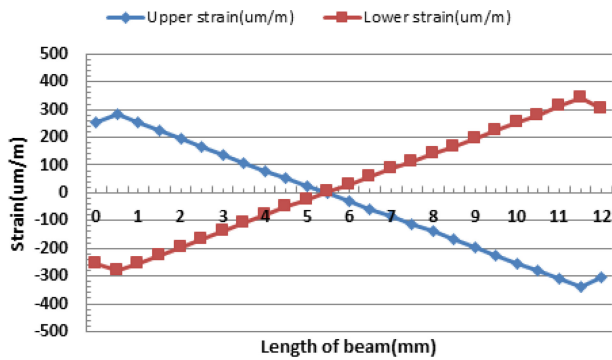


Fig. 8 When a force of 30 N (rated capacity of the Fz force sensor) is applied to the 5-axis force/moment sensor, the strain of Fz force sensor sensing part

5축 힘/모멘트센서에 가해졌을 때 Mz 모멘트센서 감지부의 변형률을 나타내고 있다. 변형률이 0 $\mu\text{m}/\text{m}$ 인 지점은 보의 시작지점으로부터 7.4 mm 지점이며, 보의 양쪽 끝부분 쪽으로 변형률이 증가되었다. 그리고 Fy 힘센서 감지부의 변형률은 보의 중간부분에서 $\pm 36 \mu\text{m}/\text{m}$ 정도로 가장 크게 나타났고 양 끝 쪽으로 갈수록 감소함을 보였다. Fz 힘센서/Mx 모멘트센서 감지부의 변형률은 $\pm 0 \mu\text{m}/\text{m}$ 정도부터 $\pm 42 \mu\text{m}/\text{m}$ 까지 점점 증가함을 보이고 있다.

Table 1은 구조해석 결과로부터 얻은 5축 힘/모멘트센서의 스트레인게이지 부착위치에서의 인장과 압축변형률을 각각 나타내었고, 이것은 Figs. 6부터 10(a)의 각 보의 끝으로부터 2 mm 떨어진 위치에서 발생한 변형률이다. 각 힘센서와 모멘트센서 감지부의 정격변형률은 식(5)에 의해 계산되었고, 오차는 각 센서의 설계목표로 설정한 정격변형률 1,000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 를 기준으로 계산되었다. 오차는 최대 1.2%이었고, 이것은 보의 두께를 0.01 mm 단위로 설계하였기 때문이다.

소프트웨어를 이용하여 구조해석을 실시한 결과로부터 얻은 Fx 힘센서/Mz 모멘트센서 감지부의 크기인 길이, 폭, 두께(l_1, b_1, t_1)는 각각 12.00, 15.00, 0.70 mm이었고, Fy 힘센서 감지부의 크기(l_2, b_2, t_2)는 각각 12.00, 15.00, 0.70 mm이었으며, Fz 힘센서/Mx 모멘트센서 감지부의 크기(l_3, b_3, t_3)는 각각 12.00,

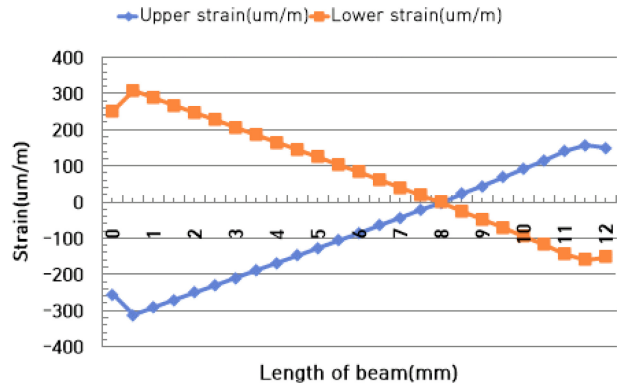


Fig. 9 When a moment of 3 Nm (rated capacity of the Mx moment sensor) is applied to the 5-axis force/moment sensor, the strain of Mx moment sensor sensing part

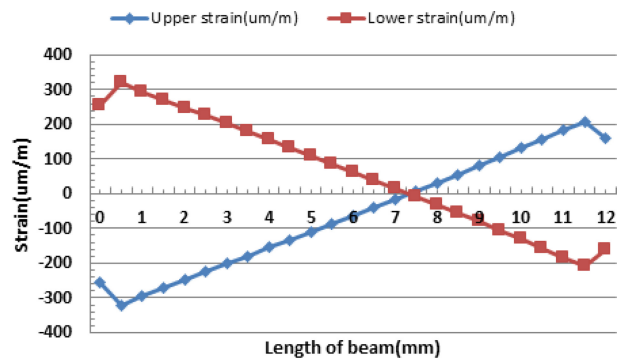


Fig. 10 When a moment of 2 Nm (rated capacity of the Mz moment sensor) is applied to the 5-axis force/moment sensor, the strain of Mz moment sensor sensing part

Table 1 Rated strain at strain gage attachment location of 5-axis force/moment sensor

Sensor	ϵ_{T1}	ϵ_{C1}	ϵ_{T2}	ϵ_{C2}	ϵ	Error [%]
Fx	253	-253	253	-253	1,012	1.2
Fy	252	-252	252	-252	1,008	0.8
Fz	253	-253	253	-253	1,012	1.2
Mx	248	-248	248	-248	992	-0.8
Mz	249	-249	249	-249	996	-0.4

Table 2 Rated output of each sensor of 5-axis force/moment sensor

Sensor	Rated output [mV/V]	Error [%]
Fx	0.51359	2.7
Fy	0.51156	2.3
Fz	0.51359	2.7
Mx	0.50344	0.7
My	0.50547	1.1

15.00, 0.70 mm이었다. Table 2는 5축 힘/모멘트센서의 각센서의 정격출력을 나타내고 있고, 이것은 센서를 제작하기 위해 사용 예정인 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350)의 게이지 상수

2.03과 Table 1의 정격변형률을 식(6)에 대입하여 계산되었다. 정격출력오차는 설계기준으로 설정한 각 센서의 정격출력 0.5 mV/V를 기준으로 계산되었다. 5축 힘/모멘트센서 중 가장 큰 정격출력 오차는 Fx 힘센서와 Fz 힘센서가 각각 2.7% 이내이었다. 그러므로 5축 힘/모멘트센서의 설계는 우수하게 진행된 것으로 판단된다.

3. 그리퍼의 5축 힘/모멘트센서 제작 및 특성실험

Fig. 11은 제작된 지능형 그리퍼 5축 힘/모멘트센서를 나타내고 있고, 이것은 각 힘센서와 모멘트센서의 스크레인게이지 부착위치에 스트레인게이지(MM 사, N2A-13-S1452-350, 미국)를 부착하였고, 휘스톤브리지를 구성하였으며, 부착된 스트레인게이지를 보호하기 위해 실리콘치리를 실시하였다. 제작된 5축 힘/모멘트센서가 사용되기 위해서는 정격출력 특성실험이 실시되어야 한다.

제작된 5축 힘/모멘트센서가 설계변수로 결정한 정격출력과 사용이 가능한지를 확인하기 위해서는 특성실험을 실시해야 하고, 그 결과를 이용하여 비직선성오차와 재현도오차, 상호간섭오차 등을 계산해야 한다.

Figs. 12는 제작된 5축 힘/모멘트센서를 특성실험하기 위한 실험장치를 나타내고 있고, 12(a)는 다축 힘/모멘트센서 교정장치(6-axis Force/Moment Sensor Calibration System) [14], 제작된 5축 힘/모멘트센서의 정격출력을 측정하기 위한 정밀측정장치(Precision Measuring System: DMP40), 기준힘센서(Reference Force Sensor) 등으로 구성된다. 특성실험시, Figs. 12(b)는 힘 Fx, 12(c)는 힘Fy, 12(d)는 힘Fz, 12(e)는 힘Mx, 12(f)는 힘Mz를 각각 가하는 모습을 나타내고 있다. 특성실험은 다음과 같이 실시하였다. 첫째, 5축 힘/모멘트센서를 다축 힘/모멘트센서 교정장치에 고정한다. 둘째, 각 센서의 정격힘/모멘트를 5등분(Fx 힘센서: 증가순 힘 0, 6, 12, 18, 24, 30 N, 감소순 힘은 증가순 힘의 역순임)하여 힘 혹은 모멘트를 증가순과 감소순으로 가한다. 셋째, 각 힘/모멘트의 힘을 가한 후 정밀측정장치로 측정한다. 넷째, 측정된 값들을 이용하여 각 센서의 정격출력, 비직선성오차, 재현도오차 등을 계산한다.

Table 3은 제작된 5축 힘/모멘트센서의 각 센서의 정격출력, 비직선성오차, 재현도오차를 각각 나타내고 있다. 최대 정격출력오차는 -1.95% 이내이었고, 최대 비직선성오차와 재현도오차는 각각 0.05% 이내이었다. 이들 오차는 기존의 다축 힘/모멘트센서의 각 오차들과 유사하다. Figs. 13(a)는 5축 힘/모멘트센서의 각 센서의 비직선성오차를 나타내고 있고, 12(b)는 재현성오차를 나타내고 있다. Table 3에서 나타난 것과 같이 각각의 오차는 0.05% 이내를 나타내고 있다.

따라서 본 논문에서 제작한 5축 힘/모멘트센서는 지능형 그리퍼에 부착하여 사용될 수 있고, 이것은 Fx 힘센서, Fy 힘센서, Fz 힘센서의 측정값과 식(1)을 이용하여 미지물체를 안전하게 잡고, Mx

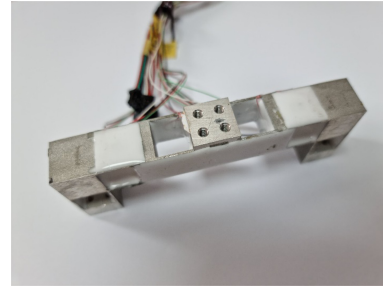
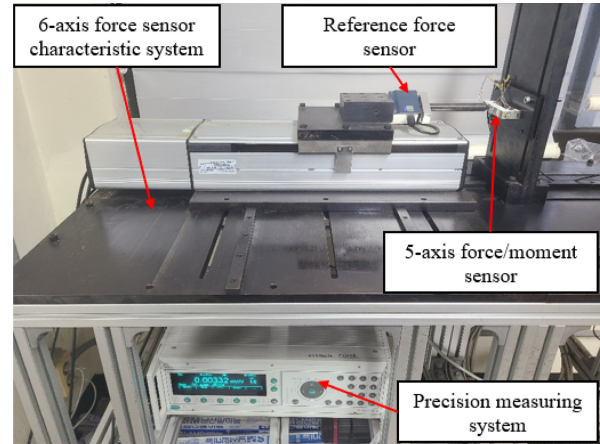
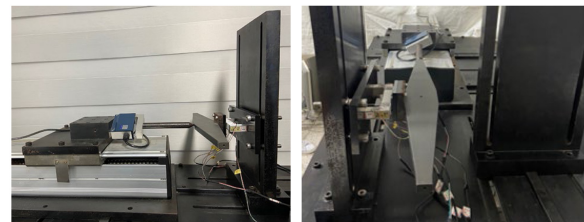


Fig. 11 Manufactured 5-axis force/moment sensor



(a) Characteristics test device



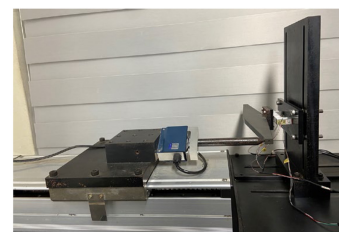
(b) Applied force Fx

(c) Applied force Fy



(d) Applied force Fz

(e) Applied moment Mx

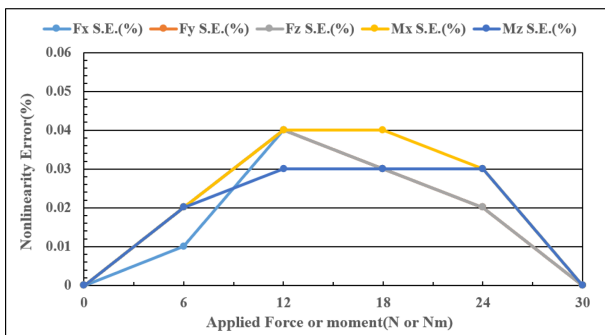


(f) Applied moment Mz

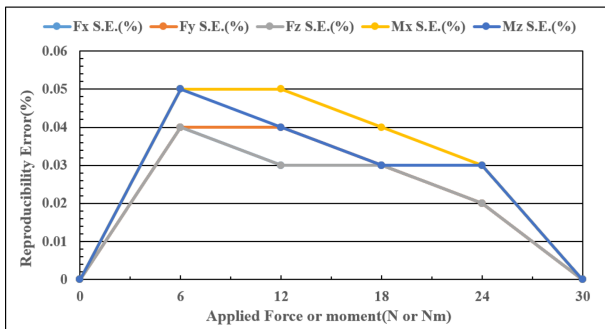
Fig. 12 Characteristic test of manufactured 5-axis force/moment sensor

Table 3 Rated output error, nonlinearity error and reproducibility error of each sensor of 5-axis force/moment sensor

Sensor	R. O. [FEM, mV/V]	R. O. [test, mV/V]	R.O. error [%]	Nonlinearity error [%]	Reproducibility error [%]
Fx	0.51359	0.5078	-1.13	0.04	0.04
Fy	0.51156	0.5027	-1.73	0.04	0.04
Fz	0.51359	0.5036	-1.95	0.04	0.04
Mx	0.50344	0.5100	1.31	0.05	0.05
Mz	0.50547	0.5101	0.92	0.05	0.05



(a) Nonlinearity error



(b) Reproducibility error

Fig. 13 Nonlinearity error and reproducibility error of each sensor of 5-axis force/moment sensor

모멘트센서, Mz 모멘트센서와 식(2)와 식(3)을 이용하여 그리퍼 내에서의 물체의 위치를 인지하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 지능형 그리퍼가 미지물체를 안전하게 잡고 그리퍼 내에서 물체의 위치를 인지하는 것은 추후에 지능형 그리퍼가 제작되고, 이 그리퍼를 특성실험한 후에 실행될 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 미지물체를 안전하게 잡고 그리퍼 내에서 물체의 위치를 인지하기 위한 5축 힘/모멘트센서(Fx 힘센서, Fy 힘센서, Fz 힘센서, Mx 모멘트센서, Mz 모멘트센서)를 설계 및 제작하였다. 5축 힘/모멘트센서는 특수한 지능형 그리퍼에

부착되도록 모델링하였고, 소프트웨어를 이용하여 구조해석을 통해 각 센서의 감지부를 설계하였다. 5축 힘/모멘트센서의 각 센서의 최대 정격변형률오차는 1.2% 이내이었고, 최대 정격출력오차는 2.7% 이내이었다. Fx 힘센서/Mz 모멘트센서 감지부의 크기 l_1, b_1, t_1 는 각각 12.00, 15.00, 0.70 mm이었고, Fy 힘센서 감지부의 크기 l_2, b_2, t_2 는 각각 12.00, 15.00, 0.70 mm이었으며, Fz 힘센서/Mx 모멘트센서 감지부의 크기 l_3, b_3, t_3 는 각각 12.00, 15.00, 0.70 mm이었다. 제작된 5축 힘/모멘트센서를 특성 실험한 결과, 최대 정격출력오차는 -1.95% 이내, 비직선성오차와 재현도오차는 각각 0.05% 이내이었다. 따라서 제작한 5축 힘/모멘트센서는 지능형 그리퍼에 부착하여 물체의 무게와 위치를 인지하기 위하여 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

추후 연구로는 제작한 5축 힘/모멘트센서를 지능형 그리퍼에 부착하여 미지물체를 안전하게 잡고, 그리퍼 내에 물체의 위치를 인지하는 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 과제(결과물)는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-003).

REFERENCES

- Bicchi, A., (2000), Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road toward simplicity, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 16(6), 652-662.
- Kyberd, P. J., Evans, M., Te Winkel, S., (1998), An intelligent anthropomorphic hand, with automatic grasp, Robotica, 16(5), 531-536.
- Chelpanov, I., Kolpashnikov, S., (1983), Problems with the mechanics of industrial robot grippers, Mechanism and Machine Theory, 18(4), 295-299.
- Tai, K., El-Sayed, A.-R., Shahriari, M., Biglarbegian, M., Mahmud, S., (2016), State of the art robotic grippers and applications, Robotics, 5(2). <https://www.mdpi.com/2218-6581/5/2/11>
- Honarpardaz, M., Tarkian, M., Ölvander, J., Feng, X., (2017), Finger design automation for industrial robot grippers: A review, Robotics and Autonomous Systems, 87, 104-119.
- Birglen, L., (2015), Enhancing versatility and safety of industrial grippers with adaptive robotic fingers, Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2911-2916.
- Fantoni, G., Capiferri, S., Tilli, J., (2014), Method for supporting the selection of robot grippers, Procedia CIRP, 21, 330-335.

8. Roberge, J.-P., Ruotolo, W., Duchaine, V., Cutkosky, M., (2018), Improving industrial grippers with adhesion-controlled friction, IEEE Robotics and Automation Letters, 3(2), 1041-1048.
9. Huang, S.-J., Chang, W.-H., Su, J.-Y., (2017), Intelligent robotic gripper with adaptive grasping force, International Journal of Control, Automation and Systems, 15(5), 2272-2282.
10. Kim, H.-S., Kim, G.-S., (2017), Development of calf link force sensors of walking assist robot for leg patients, Journal of Sensor Science and Technology, 26(2), 114-121.
11. Joung, J. H., Kim, G. S., (2017), Design of a force sensor for thigh force measurement of a wearable walking robot, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 34(10), 707-713.
12. Song, A., Wu, J., Qin, G., Huang, W., (2007), A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor, Measurement, 40(9-10), 883-891.
13. ATI Industrial Automation, Multi-axis force / torque sensors. <https://www.ati-ia.com/products/ft/sensors.aspx>
14. Kim, G.-S., Yoon, J.-W., (2007), Development of calibration system for multi-axis force/moment sensor and its uncertainty evaluation, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 24(10), 91-98.



Jin Kim

M.Sc. candidate in the Department of Control and Instrumentation Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is sensor, industrial robot and Intelligent robot.

E-mail: geck@naver.com



Gab-Soon Kim

Professor in the Department of Control and Instrumentation Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is walking aid robot and intelligent robot.

E-mail: gskim@gnu.ac.kr

창간

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

목적 및 연구 범위

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

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

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

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

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

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고자)

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

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

제4조 (연구범위)

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

제5조 (투고 구분)

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

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

제6조 (접수)

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

제7조 (심사 및 게재 결정)

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

제8조 (저작권)

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

제9조 (자료공개)

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

제10조 (원고작성요령)

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

제11조(게재료)

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

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문집필요령

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고 및 접수)

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

제3조 (심사위원 선정)

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

제4조 (심사 방법)

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

제5조 (심사 기간)

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

제6조 (저자수정기한)

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

제7조 (게재 판정)

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

제8조 (특집논문심사)

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제9조 (비밀유지)

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

제10조 (이의제기)

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

제11조 (심사료)

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

제 1 장 총칙

제1조 (목적)

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

제2조 (윤리규정 적용범위)

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

제3조 (부정행위의 범위)

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

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

제 2 장 저자

제4조 (저자의 정직성)

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

제5조 (저자의 기준)

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

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

제6조 (저자의 준수사항)

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

제7조 (편집위원 준수사항)

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

제8조 (심사위원 준수사항)

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

제 4 장 검증 절차와 기준

제9조 (윤리위원회)

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

제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

제14조 (피조사자 권리 보호)

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

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

제16조 (조사결과의 보고)

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

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

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

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

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

회원(사) 구성

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

관련정부기관과의 관계

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

주요활동현황

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

발간자료

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

발행규정

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

부문위원회 활동

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

특별회원사 가입

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

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

생산기술상, 정밀기술상

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

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

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

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

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

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

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

KSPE Young Researcher Award

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

특별상

가헌학술상

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

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
- For the policies on the research and publication ethics not stated in this instructions, International standards for editors and authors (<http://publicationethics.org/international-standards-editors-and-authors>) can be applied.

Chapter 1 Overall Rules

Article 1 Purpose

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

Article 2 Application Area of Code of Ethics

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

Article 3 Scope of Misconduct

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

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

Chapter 2 Author

Article 4 Honesty of Author

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

Article 5 Authorship

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

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 6 Compliance of Authors

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

Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

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

Article 8 Compliance of Reviewers

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 4 Verification Process and Standard

Article 9 Ethics Committee

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

Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

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

Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

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

Article 12 Reporting Research Misconduct

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions

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

Article 14 Protection of Rights of Examinee

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

Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation

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

Article 16 Report of Investigation Result

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

Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

Title	Korean
	English
Authors	

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

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

**Corresponding
Author’s
Signature**

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

**Corresponding
Author**

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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 24 · Number 5 · May 2023

REGULAR PAPERS

Studying Crack Generation Mechanism in Single-Crystal Sapphire During Ultra-precision Machining by MD Simulation-Based Slip/Fracture Activation Model

S.B. Kwon · A. Nagaraj · D. Xi · Y. Du · D.N. Kim · W.K. Kim · S. Min 715

Study on Hot Deformation Behavior and Bending Forging Process of 7075 Aluminum Alloy

L. Li · R. Ma · J. Zhao · R. Zhai 729

Work Coordinate Setup in the Ultra-precision Machine Tool Using Electrical Breakdown

S. Maeng · S. Min 745

Robust Parameter Design of an Ascender Affecting Rope Deformation for High Repeatability

D. Hyun · S. Park · J. Yang · T. Seo 755

Motion Tracking of Four-Wheeled Mobile Robots in Outdoor Environments Using Bayes' Filters

D.-K. Choi 767

Process Modelling of an Analytic Control Machine in Virtual Reality Platform

K. Rono · J.B. Byiringiro · Edwell.T. Mharakurwa · A. Kibor 787

Machine Health-Driven Dynamic Scheduling of Hybrid Jobs for Flexible Manufacturing Shop

L. Yin · W. Zhang · T. Zhou 797

An Innovative Collaborative Design of Shape and Performance for Super-High-Contact-Ratio Spiral Bevel Gear

Y. Mu · X. Hou · S. Yang · X. He 813

A Phenomenological Model for Bolt Loosening Characteristics in Bolted Joints Under Cyclic Loading

M. Yang · S.-M. Jeong · J.-Y. Lim 825

Effect of Support Structures on the Deformation of AlSi10Mg Aircraft Parts Made Using DMLS

J. Kim · J.H. Park · S. Jang · H. Jeong · T. Kim · H.G. Kim 837

Comparative Study of Rapid Ice Investment Casting Vs Rapid Casting Processes of Aluminium Alloy

R. Hodgir · Y.G. Mittal · P. Kamble · G. Gote · Y. Patil · A.K. Patel · K.P. Karunakaran 853

Investigation of Fatigue Characteristics for Heat Exchanger Tube in Air Conditioner: Effect of Surface Defect and Environmental Factor

C. Han · J. Doh 867

SHORT COMMUNICATION

Design of a Variable Reference Current Controller for Micro-stepping Motor Based on Vibration and Missing Step Characteristic Data

J.-W. Yoo · J.-H. Kim · J.-H. Kim · E. Kim 877

CORRECTION

Correction: Review: Scaffold Characteristics, Fabrication Methods, and Biomaterials for the Bone Tissue Engineering

J.-W. Jang · K.-E. Min · C. Kim · J. Shin · J. Lee · S. Yi 887

Further articles can be found at link.springer.com

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

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at www.springer.com/12541

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 10 · Number 3 · May 2023

PREFACE

Preface for NetZero, Achievable by Manufacturing?

F.B. Prinz · S. Min · J. An 635

REGULAR PAPERS

Surface Polishing of Laser Powder Bed Fused Inconel 625 Surfaces Using Multi-jet Hydrodynamic Cavitation Abrasive Finishing: An Emerging Class of Cleaner Surface Enhancement Process

A.P. Nagalingam · B.L. Toh · S.H. Yeo 637

Modeling and Assessment of Power Consumption for Green Machining Strategy

J.-J. Won · Y.J. Lee · Y.-J. Hur · S.W. Kim · H.-S. Yoon 659

Investigation of Remanufacturing Methods Utilizing Mechanically-Generated and Gas-Atomized Feedstock Production for Directed Energy Deposition Processing Through Specific Energy Consumption Modeling

M.A. Jackson · D.J. Thoma · F.E. Pfefferkorn 675

Analysis and Optimization of Energy Consumption for Multi-part Printing Using Selective Laser Melting and Considering the Support Structure

Z. Ma · M. Gao · K. Guo · Q. Wang · L. Li · C. Liu · G. Zhu · Z. Liu 693

Sustainable Lubrication/Cooling Systems for Efficient Turning Operations of γ -TiAl Parts from the Aeronautic Industry

E. Benedicto · E.M. Rubio · L. Aubouy · M.A. Sáenz-Nuño 709

Improving Sustainability Index of Grey Cast Iron Finish Cutting Through High-Speed Dry Turning and Cutting Parameters Optimization Using Taguchi-Based Bayesian Method

J. Herwan · T. Misaka · S. Kano · H. Sawada · Y. Furukawa · O. Ryabov 729

Improved Energy Efficiency of Laser-Enhanced Nanoparticle Deposition System Analyzed with a Smart Power Monitoring Device

J.-H. Song · W.-K. Jung · S.-H. Ahn 747

Buoy-Inspired Hybridized Energy Harvester with Freestanding Dielectric Oscillator Towards Sustainable Blue Energy Harvesting

S.T. San · J. Yun · D. Kim 757

Nanometer Yttria-doped Ceria Shell by Atomic Layer Deposition over Porous Pt for Improved Oxygen Reduction Reactions

J.W. Shin · S. Lee · D. Go · B.C. Yang · T. Kim · S.E. Jo · P.-C. Su · J. An 773

Product Safety Risk Assessment Approach to Sustainable Design

B. He · J. Wu · J. Xiao 783

Corrosion Lifetime Estimation of Printed Circuit Board in Marine Atmosphere Environment Using Multiphysics Simulation

S.-I. Kim · D.-J. Kim · D.-H. Kim · D.-M. Jang · J.-W. Jang · S.-Y. Lee · H.-S. Kim 789

Fe₃O₄/Laser-Induced Graphene as an Adsorbent for Microplastics Emitted from Household Wastewater

S.-Y. Jeong · N. Sugita · B.-S. Shin 807

System Modelling for Collecting Life Cycle Inventory (LCI) Data in MSMEs Using a Conceptual Model for Smart Manufacturing Systems (SMSs)

I. Kaushal · A. Chakrabarti 819

A Comprehensive Rating Tool for Sustainability Assessment of Manufacturing Organizations: A Step Towards Sustainable Manufacturing

M.H. Saad · M.A. Nazzal · B.M. Darras 835

REVIEW

**Atomic Layer Deposition for Thin Film Solid-State
Battery and Capacitor**

D. Go · J.W. Shin · S. Lee · J. Lee · B.C. Yang · Y. Won ·
M. Motoyama · J. An **851**

*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

Further articles can be found at link.springer.com

Abstracted/Indexed in *Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC,
Dimensions, EBSCO Discovery Service, EI Compendex, Google
Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency
(JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation*

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 1 · Number 1 · January 2023

REGULAR PAPERS

Sound Recognition based on Convolutional Neural Network for Real-Time Cutting State Monitoring of Tube Cutting Machine

E. Kim · H. Yun · O. C. Araujo · M. B.-G. Jun 1

Prediction of Spread in Steel Wire Rod Rolling: Transferable and Explainable Approach

S. Amani · J. B. Lee · S. Park 19

Artificial Intelligence (AI)-Based Surface Quality Prediction Model for Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Milling Process

J. W. Kim · J. Nam · G. Y. Kim · S. W. Lee 35

A Rapid Learning Model based on Selected Frequency Range Spectral Subtraction for the Data-Driven Fault Diagnosis of Manufacturing Systems

S. Cho · H.-R. Seo · G. Lee · S.-K. Choi · H.-J. Choi 49

OPC UA-Based Machining Cell Monitoring System for Multi-Vendors' Machine Tools and Industrial Robots

J.-S. Yoon · Y.-D. Kim · J. Lee · D. Y. Lee 63

Surface Assessment of Transparent Glass Plate with Wavelength-Modulated Interferometry and Harmonic Phase-Iterative Method

S. Kim · Y. Kim · N. Sugita · M. Mitsuishi 71

Machine Learning Interatomic Potential to Investigate Fundamentals of Electrolytes for Li-ion Solid-State Batteries

K. Min 83

REVIEW

Key Enabling Technologies for Smart Factory in Automotive Industry: Status and Applications

J. Lee · P. C. Chua · L. Chen · N. P. Huat ·
Y. Kim · Q. Wu · S. Jeon · J. Jung · S. Chang ·
S. K. Moon 93

INDUSTRY CASE STUDY

Cyber-Physical Systems Framework for Predictive Metrology in Semiconductor Manufacturing Process

J. Lee · H. Dong · D.-Y. Ji · P. Kundu 107

2023년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

이석우(한국생산기술연구원)

수석부회장

민병권(연세대학교)

부회장

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

감사

김재환(인하대학교) 송창규(한국기계연구원)

총무이사

김동성(POSTECH) 김보현(송실대학교) 신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원) 송용남(고려대학교) 정영훈(경북대학교)

편집이사

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

사업이사

강태준(인하대학교)	권지연(동국대학교)	김무림(한국로봇융합연구원)	김승중(고려대학교)	김진호(영남대학교)
김태곤(한국생산기술연구원)	박상후(부산대학교)	박용재(강원대학교)	손용(한국생산기술연구원)	이경창(부경대학교)
이동원(전남대학교)	이문구(아주대학교)	이영수(삼성전자)	이인환(충북대학교)	이지혜(한국기계연구원)
임지석(영남대학교)	전용호(아주대학교)	주기남(조선대학교)	현승민(한국기계연구원)	홍성태(울산대학교)

기획홍보이사

노유정(부산대학교) 류시형(전북대학교) 이주연(서울과학기술대학교) 이현욱(한국철도기술연구원) 장원석(한국기계연구원)
 최영재(한국생산기술연구원)

국제이사

Martin B. Jun(Purdue Univ.)	Simon Park(Univ. of Calgary)	김대욱(Univ. of Arizona)	김범준(Univ. of Tokyo)	문승기(Nanyang Tech. Univ.)
민상기(Univ. of Wisconsin-Madison)	여운홍(Georgia Inst. of Tech.)	이동진(건국대학교)	이지현(Univ. of Calgary)	이차범(Texas A&M Univ.)
정용국(KTH Royal Inst. of Tech.)	정하승(Michigan State Univ.)	조영태(창원대학교)	차석원(서울대학교)	최재원(The Univ. of Akron)

대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원) 김경동(한국공작기계산업협회) 김종혁(현대위아) 서진호(부경대학교) 이강재(DN솔루션즈)
 조영환(LIG넥스원(주)) 조정대(한국기계연구원)

부문회장

김건희(한밭대학교)	진종한(한국표준과학연구원)	정재일(국민대학교)	이동윤(한국생산기술연구원)	박형욱(UNIST)
오정석(한국기계연구원)	김종백(연세대학교)	엄광문(건국대학교)	김호찬(안동대학교)	김영범(한양대학교)

특별회원사

다이아몬드

DN솔루션즈 (주)키슬러코리아	LIG넥스원(주) 한국화낙(주)	신도리코(주) 현대위아(주)	(주)이수페타시스 (주)화신정공	(주)케이씨텍 화천기공(주)
---------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------

플래티늄

HP Korea(유) SK실트론(주)

골드

(주)마리알로 (주)프로토텍	(주)에비던트코리아 핵사곤	(주)에이스나노켄	(주)엔도로보틱스	지애펀테크놀로지(주)
--------------------	-------------------	-----------	-----------	-------------

패밀리

(주)웨이퍼펍 한국공작기계산업협회

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구가톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김양진
부산대학교

김호찬
안동대학교

문두환
고려대학교

손정우
금오공과대학교

박민수
서울과학기술대학교

박상후
부산대학교

박형욱
UNIST

안지환
POSTECH

이인환
충북대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

정영훈
경북대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

김기주
동명대학교

김무림
한국로봇융합연구원

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

박준
한국광기술원

배창호
경성대학교

손용
한국생산기술연구원

송철기
경상국립대학교

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이봉기
전남대학교

이종길
안동대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

정재일
국민대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

태기식
건양대학교

황영국
조선이공대학교

김갑용
Iowa State Univ.

김범준
Univ. of Tokyo

김우균
Univ. of Cincinnati

민상기
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 5/ May 2023

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

월간 · 제40권 제5호 [통권 제386호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 4월 25일

발행일 2023년 5월 1일

발행인 이석우

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

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

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

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

IJPEM(GT) 이성경 / (02)518-0723 / ijpem@kspe.or.kr

학술대회 김영심 / (02)393-0725 / presm@kspe.or.kr

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

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



IJPEM Special Issue

Special Issue on Robots for Manufacturing Processes and Systems

IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 23 years and aims to disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to the international precision and manufacturing engineering community. The journal is indexed in SCIE (**Impact factor 2.041**) and downloaded more than 148,000 times a year around the world.

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of precision engineering and manufacturing - theories and applications.

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

- CAD/CAM for manufacturing robots
- Robotic machining
- Robot and machine tool integration
- Mobile robots for factory floor
- Next generation collaborative robots for advanced manufacturing
- Robotic material handling and assembly automation

Guest Editors

- **Prof. Michael Zäh**
Technische Universität München, Germany
- **Prof. Martin Byung-Guk Jun**
Purdue University, USA
- **Prof. Jihyun Lee**
University of Calgary, Canada

Publication Schedule

- Deadline for Submission Date

April 30, 2023

- Publication Date

September 1, 2023

- Volume, Number

Vol. 24, No. 9

- Impact Factor

2.041

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing **SMART TECHNOLOGY**



IJPEM-Smart Technology (hereinafter 'IJPEM-ST') is a new-launched academic journal which will be published by the Korean Society for Precision Engineering (KSPE).

Aims and Scope

Under the great wave of the 4th industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)** is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. **The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:**

- ✓ Big Data Analytics and Informatics
- ✓ Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- ✓ Prognostics and Health Management (PHM)
- ✓ Industrial Internet of Things (IIOT)
- ✓ Industrial Artificial Intelligence
- ✓ Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- ✓ Augmented, Virtual and Extended Reality
- ✓ Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- ✓ Autonomous Things

IJPEM-ST covers various kinds of papers:

Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

• Publication Date (Scheduled)

Vol. 1 No. 1 January 1, 2023
Vol. 1 No. 2 July 1, 2023

• Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

Editorial Board

Editor-in-Chief

Sang Won Lee / Sungkyunkwan University, Korea

Co-Editors-in-Chief

Jay Lee / University of Maryland, USA

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

Editors

Hyeong-Joon Ahn / Soongsil University, Korea

Hae-Jin Choi / Chung-Ang University, Korea

Chih-Hsing Chu / National Tsing Hua University, Taiwan

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

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Seungchul Lee / POSTECH, Korea

Sangkee Min / University of Wisconsin-Madison, USA

Seung-Ki Moon / Nanyang Technological University, Singapore

Duhwan Mun / Korea University, Korea

Simon Park / University of Calgary, Canada

Editorial Board

Seung-Kyum Choi / Georgia Institute of Technology, USA

Haseung Chung / Michigan State University, USA

Youngkuk Jeong / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Yongho Jeon / Ajou University, Korea

Jay-I. Jeong / Kookmin University, Korea

Hyungjung Kim / Seoul National University, Korea

Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

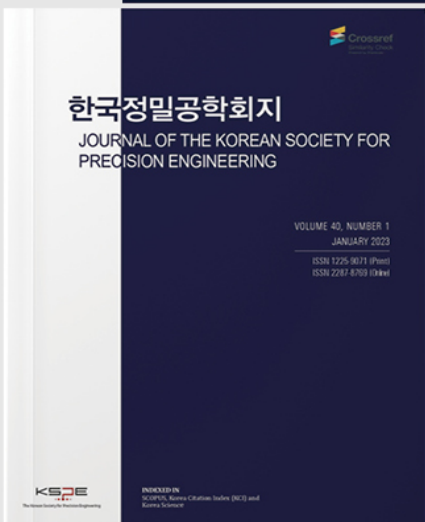
Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

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

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING



JKSPE Topical Issue

article.kspe.or.kr

jkspe.kspe.or.kr



Scopus, KCI
등재지



JKSPE
투고시스템



JKSPE
Homepage

스마트/디지털 헬스케어 기술

스마트 헬스케어(Smart Healthcare) 혹은 디지털 헬스케어(Digital Healthcare) 기술은 개인의 건강과 의료에 관한 정보, 기기, 시스템, 플랫폼을 다루는 산업 분야로서 IoT와 데이터 분석기술 및 클라우드가 융합된 정밀 의료서비스의 일종이다. 휴대형(Portable), 웨어러블(Wearable), 센서의 주변설치(Ambient-Installed) 방식 등으로 클리닉, 생활, 체육활동, 자동차 등에서 인간의 생활습관, 생체정보, 의료정보, 유전체정보 등을 실시간 수집, 모니터링하고 빅데이터 기술, 인공지능 기술, 가상현실 기술 등의 기술 등을 통해 새로운 지식과 정보를 창출해내는 기술을 포괄적으로 일컫는다. 이에 본 특집호에서는 정밀공학과 빅데이터를 기반으로 하는 스마트 헬스케어, 디지털 헬스케어 기술에 관한 논문을 모집하고자 한다.

Smart/Digital Healthcare Technology

Smart healthcare or digital healthcare technology deals with precision medical services that combine personal health and medical information, devices, systems, platforms, IoT, data analysis technology, and cloud. A term that collectively refers to technologies that create new knowledge and information by collecting and monitoring human lifestyle, biometric information, medical information, and genome information in real time through technologies such as big data technology, artificial intelligence technology, and virtual reality technology. In this special issue, we would like to recruit papers on smart healthcare and digital healthcare technology based on precision engineering and big data.

제출 기한

2023년 4월 30일

출판 날짜

2023년 7월 1일

권호수

Vol. 40, No. 7

책임편집인

김병희 (강원대학교)

한국정밀공학회지(JKSPE) 투고 안내

귀 회원님의 건승을 기원합니다.

한국정밀공학회지(Journal of the Korean Society for Precision Engineering, JKSPÉ)는 정밀공학과 관련된 우수한 논문을 게재하고 있으며 특히 기계공학뿐만 아니라 다학제적 학문을 바탕으로 정밀공학 분야에서 새롭고 독창적인 연구결과를 소개함으로써 정밀공학의 발전에 기여하는 것을 목표로 합니다. 한국정밀공학회지(JKSPE)에 대한 투고 안내를 드리오니 적극적인 관심과 참여 부탁드립니다.



※ SCOPUS, KCI 등재 학술지
 ※ 학술대회 Full Paper 논문, 영문 논문 제출 시
 게재료 면제

한국정밀공학회지(JKSPE)

- | | |
|--------------|---|
| 발행간기 | 월간 (매월 1일 발행) |
| 등재여부 | SCOPUS, KCI 등재지 |
| 투고방법 | <ul style="list-style-type: none"> • 온라인 투고 (http://article.kspe.or.kr/) • JKSPÉ 저널 홈페이지 (http://jkspe.kspe.or.kr/) |
| 투고자격 | 학회 회원 |
| 제출분야 | 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계및재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 |
| 관련 상훈 | <ul style="list-style-type: none"> • 한국정밀공학회지 최우수논문상 (상장, 상금) • 백암논문상 (상장, 상금) • 학술상 (상장, 상금) |



SCOPUS, KCI 등재 학술지

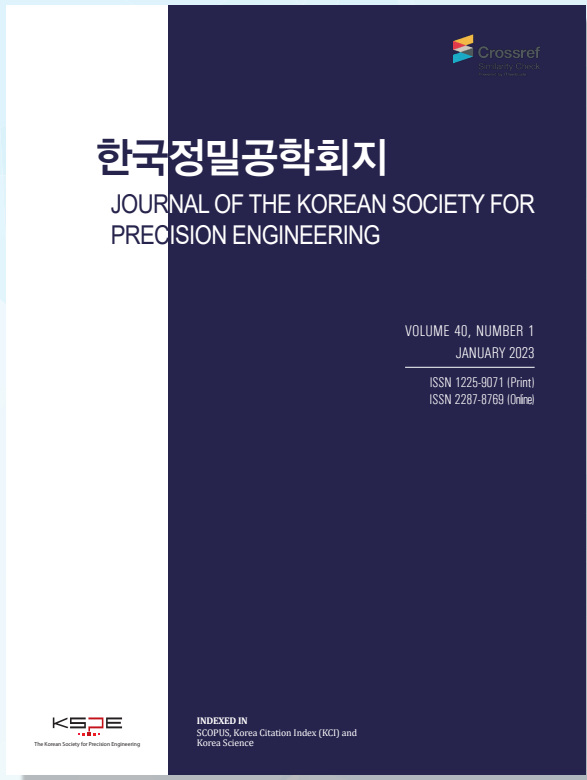
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

Scope

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

학술대회 Full Paper
논문을 투고 시 게재료가
면제됩니다.

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



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

Editorial Board

• Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim(Soongsil University)

• Editors

Jihwan An (Seoul National University of Science & Technology)

Baeksuk Chu (Kumoh National Institute of Technology)

Won-Shik Chu (Gyeongsang National University)

Doo-Man Chun (University of Ulsan)

Koo Hyun Chung (University of Ulsan)

Duhwan Mun (Korea University)

Jihong Hwang (Seoul National University of Science & Technology)

Young Hun Jeong (Kyungpook National University)

Jonghan Jin (Korea Research Institute of Standards & Science)

Dong Sung Kim (POSTECH)

Ho-Chan Kim (Andong National University)

Yang Jin Kim (Pusan National University)

Seung Hwan Ko (Seoul National University)

Moonkyu Kwak (Kyungpook National University)

Sung-Mook Kang (Daegu Catholic University)

Changwoo Lee (Konkuk University)

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

Hyunseop Lee (Dong-A University)

In Hwan Lee (Chungbuk National University)

Hyung Wook Park (UNIST)

Min Soo Park (Seoul National University of Science & Technology)

Sang-Hu Park (Pusan National University)

Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology)

AWARDS

한국정밀공학회지 최우수논문상

– 한국정밀공학회지에 발표된 논문 중 가장
탁월한 가치의 논문저자에게 포상

INDEXED IN

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

Submission to JKSP Search for JKSP

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



+82-518-2928(T)

+82-518-2937(F)



paper@kspe.or.kr

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



12F, SKY1004 Bldg., 50-1

Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,

04508, Republic of Korea

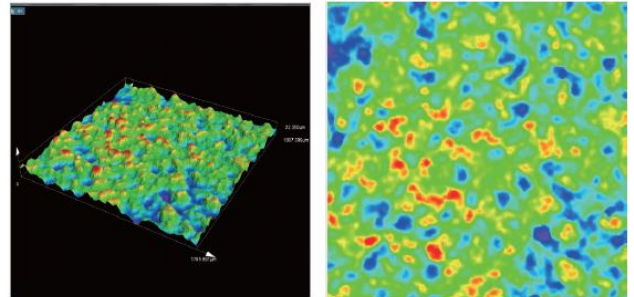
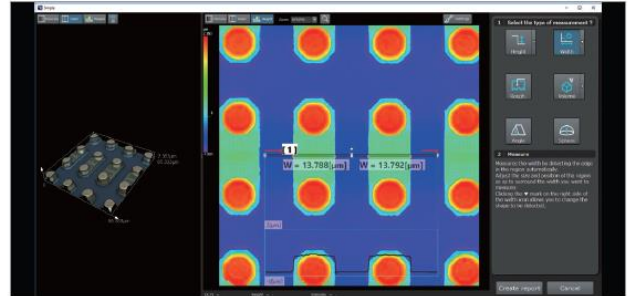
고해상도 3D 이미지와 러프니스에
특화된 OLS5100을 경험해보세요

LEXTM OLS5100 3D Measuring Laser Confocal Microscope



에비던트의 OLS5100은 정확성과 반복성의
동시 보증, 뛰어난 광학렌즈의 성능으로
서브미크론 수준의 모양과 표면 거칠기를 빠르고
효율적으로 정확하게 형상화하고 측정할 수
있습니다.

- 고해상도 3D 이미지를 수초 이내에!
- 17,000배의 비접촉 나노 단위 관찰
- 전문 러프니스 분석 (ISO 25178)
- 미세한 단차도 구현하는 레이저 DIC 기능



* 에비던트(EVIDENT)는 올림푸스사이언스솔루션 사업본부의 새로운 이름입니다.

본 제품에 대하여 궁금하시거나 제품 테스트를 희망하시면
에비던트코리아 의 카카오톡 문의하기 버튼을 이용해주세요

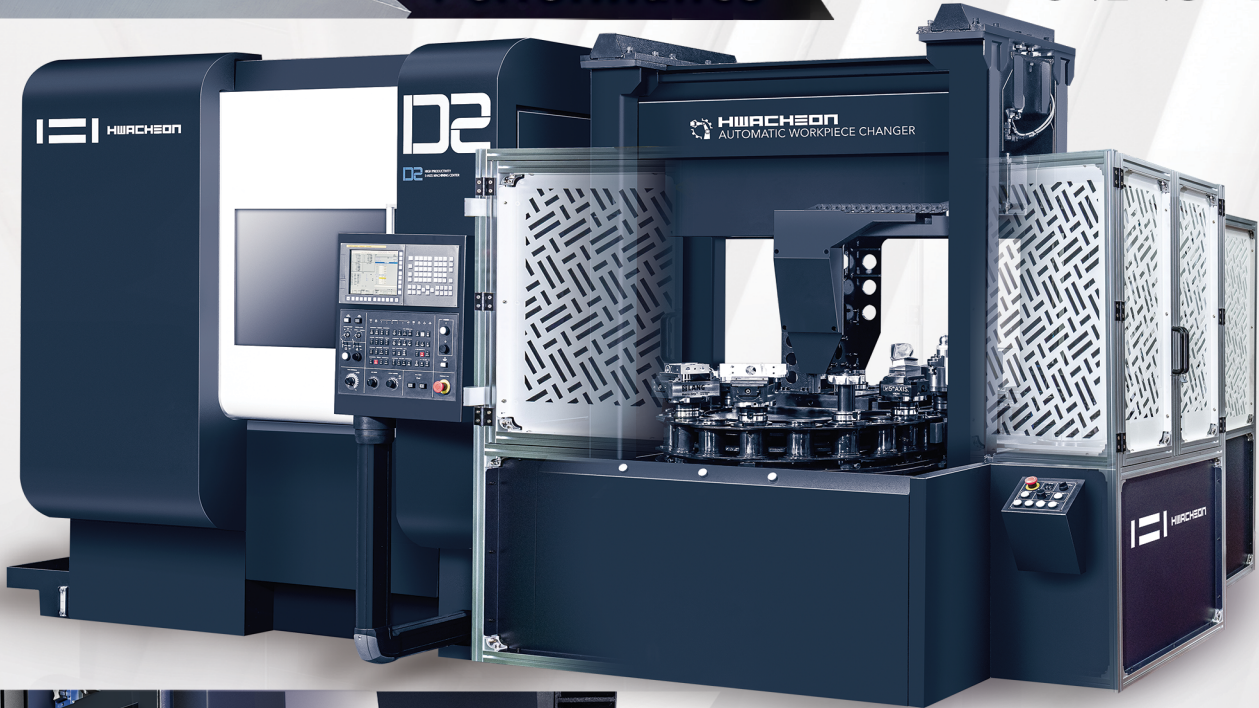




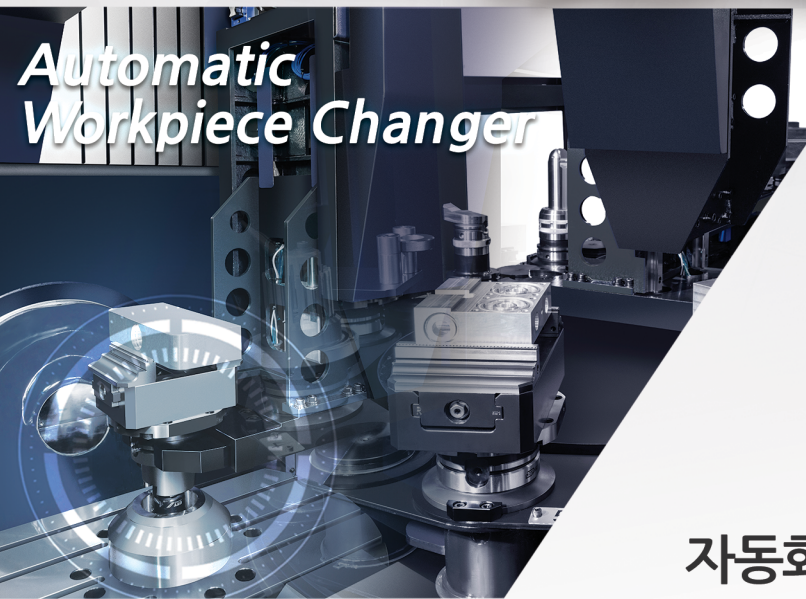
■ 경제적인 5축 가공 솔루션
뛰어난 생산성 / 설치공간 최소화

■ 뛰어난 접근성
작업자 / 로봇트
공작물 자동 교환장치

5-Axis Dynamic Performance



*본 제품의 설계 및 사양은 제품개선을 위하여 예고 없이 변경 될 수 있습니다.



Automatic Workpiece Changer

D2-5AX

자동화 시스템에 최적화된 5축 솔루션

화천

대한민국 대표 공작기계 전문기업, 화천

화천기계 본사
화천기공 본사

서울특별시 서초구 방배로 46 (방배동) TEL.(02)523-7766
광주광역시 광산구 하남산단4번로 123-17 (장덕동) TEL.(062)951-5111

www.hwacheon.com

www.facebook.com/hwacheonofficial
www.youtube.com/Thehwacheon
카카오톡에서 '화천기계'를 친구로 추가 해보세요!



한국정밀공학회

KSPE 2023 Autumn Conference

2023 추계학술대회

2023. 11/15 WED - 17 FRI | 쓸비치 삼척 호텔&리조트
(강원도 삼척시)

▶ 주요일정 Important Date

200단어 초록제출 마감	2023. 9. 22 FRI 24시
초록채택 통지 발송	2023. 10. 2 MON부터 발송
발표자 사전등록 마감	2022. 10. 10 TUE 24시

▶ 논문모집분야

- 정밀가공
Precision Manufacturing Processes
- 정밀측정
Precision Measurements
- 로봇제어자동화
Robotics, Control and Automation
- 스마트생산시스템
Smart Manufacturing System
- 설계및재료
Design and Materials
- 공작기계
Machine Tools
- 나노마이크로기술
Nano/Micro Technology
- 바이오헬스
Bio Health
- 적층제조시스템
Additive Manufacturing
- 녹색생산기술
Green Manufacturing Technology

**K-Precision
Smart & Green**

KSPE 2023 추계학술대회 문의처

한국정밀공학회 사무국

(02)518-0722, (02)393-0724, (02)393-0725

프로그램, 논문 발표문의 : conf@kspe.or.kr
회원, 회계, 등록문의 : account@kspe.or.kr

주최 및 주관 **KSPE** 신한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering



International Conference on
PRrecision Engineering and **S**ustainable **M**anufacturing

PRESM 2023

July 16 Sun – **21** Fri, 2023

Bankoku Shinryokan,
Okinawa, Japan

Important Dates

Deadline for Abstract Submission
of Regular Session:

February 15 (Wed), 2023

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

March 15 (Wed), 2023

Deadline for Early Registration/
Presenter Registration:

April 15 (Sat), 2023

Full Paper Submission (Optional):

May 1 (Mon), 2023

Awards & Honors

Best Paper Awards

Young Researcher Awards

Outstanding Presentation Awards

Organizer

 Korean Society for
Precision Engineering (KSPE, Korea)

Co-Organizers



The Japan Society for
Precision Engineering (JSPE, Japan)



Taiwan Society for
Precision Engineering (TSPE, Taiwan)

Secretariat

Homepage www.presm.org | Email presm@kspe.or.kr |
Tel +82-2-393-0725 | Fax +82-2-518-2937

Participating Journals

1 International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing (IJPEM)
*SCIE, SCOPUS / IF 2.041 (2021)

2 International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing-Green
Technology (IJPEM-GT)
*SCIE, SCOPUS / IF 4.660 (2021)

3 Journal of the Korean Society for
Precision Engineering (JKSPE)
*SCOPUS



2023년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023
Spring
Conference

춘계학술대회

2023.
5. 10(수) - 12(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
Precision Engineering and Sustainable Manufacturing

PRESM 2023

2023. 7. 16(일) - 21(금)

Bankoku Shinryokan
Okinawa, Japan

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023
Autumn
Conference

추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

썰비치삼척 리조트
(강원도 삼척시)

PIFOC Objectives Scanner



- 피에조 액추에이터를 사용하여 빠른 응답 시간 및 긴 수명
 - Z축으로 100, 400, 800 μ m의 이동 범위
 - 서브나노미터 분해능으로 정밀한 스캐닝 가능
 - Zero-play flexure guides로 높은 가이드 정확도 보장
 - Capacitive sensors로 직접 위치 측정: 높은 선형성
 - \varnothing 29 mm의 넓은 애퍼처
- >> 현미경, 3-D 이미징, 반도체 테스트, 생명공학, 오토포커스 시스템 등

적용분야



+ AFM, SEM, TEM, LSFM 등 현미경의 고정밀 Z-focus 포지셔닝에 적합!

