

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 6

June 2024

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

Jonghan Jin
Korea Research Institute of Standards & Science

Maolin Jin
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

Dong Sung Kim
POSTECH

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

Jongkil Lee
Andong National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Chul Ki Song
Gyeongsang National University

Duck Hyun Wang
Kyungnam University

Sung Ho Yoon
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

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Bongchul Kang
Kookmin University

Hyun-Wook Kang
UNIST

Beomjoon Kim
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

Donghun Lee
Soongsil University

Howon Lee
Seoul National University

Kwang-II Lee
Kyungil University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

Jungjae Park
Korea Research Institute of Standards & Science

Jung Whan Park
Yeungnam University

Simon Park
University of Calgary

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 6 / June 2024

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 June 1, 2024 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Byung-Kwon Min (President, KSPE)

Manuscript Editor Eunhee Park

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

Printed by Hanrimwon Co., Ltd.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

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

목차

일 반

- 417 폴리머 결찰 클립의 강성인자 해석
정구한, 나종서, 이시우, 이상욱
- 423 미세 홀 레이저 가공 시 AOM을 적용한 홀 품질 개선
김영훈, 최상환, 천세경, 이지원, 조두현, 김명운
- 429 폴리아세탈 수지의 건식 인덱서블드릴 가공에서 가공오차 감소를 위한 최적조건 선정
천세호
- 435 자율주행 차량의 고속 주행 안정성 향상을 위한 곡률 기반 경로 추종 제어 알고리즘 개발 및 검증
김형규, 이명규, 김종탁, 김원균
- 451 자동변속기 스러스트 베어링 동력 손실에 대한 유성기어 세트 설계의 헬릭스 방향과 헬릭스 각의 영향에 관한 연구
권현식
- 459 절삭력 물리 모델 기반 가공용 로봇 생산 시스템 디지털 트윈 플랫폼
하주형, 김동민
- 467 TGV 인터포저의 디싱 제어를 위한 2-step CMP 전략
정승훈, 신영일, 정종민, 정선호, 정해도
- 473 다물체동역학기반 실시간 원격주행 시뮬레이터 개발
박수현, 손정현, 주향전
- 481 뇌-컴퓨터 인터페이스를 위한 뇌파 기반 보행 인식 분류 CNN-BiLSTM 모델 개발
이서현, 장윤성, 이현주, 태기식
- 489 비접촉식 의료용 초음파미스트 분무를 위한 노즐 팁 성능 개선
정승혁, 전종혁, 원지영, 김성민, 임홍석

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 6 / June 2024

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

CONTENTS

REGULAR

- 417 Analysis of Stiffness Factors of Polymeric Ligation Clip
Gu Han Jeong, Jong Seo Na, Si Woo Lee, and Sang Wook Lee
- 423 Improving Micro-hole Laser Drilling Performance Using an AOM
Young Hoon Kim, Sang Hwan Choi, Se Kyung Chun, Ji Won Lee, Doo Hyun Cho, and Myung Woon Kim
- 429 Selection of Optimal Condition for Reducing Dimensional Error of Holes in Dry Cutting of Polyacetal Resin with Indexable Drill
Seho Chun
- 435 Development and Verification of Curvature-based Path Tracking Control Algorithm to Enhance High Speed Driving Stability in Autonomous Vehicles
Hyung Gyu Kim, Myeong Gyu Lee, Jong Tak Kim, and Won Gun Kim
- 451 Influences of Helix Directions and Helix Angles of Planetary Gear Set Designs on Thrust Bearing Power Losses in an Automotive Gear Train
Hyun Sik Kwon
- 459 Digital Twin Platform for Machining Robotic Production System based on Cutting Force Physics Models
Ju-Hyung Ha and Dong-Min Kim
- 467 2-step CMP Strategy for Dishing Control of TGV Interposers
Seunghun Jeong, Yeongil Shin, Jongmin Jeong, Seonho Jeong, and Haedo Jeong
- 473 Development of Real-time Remote Driving Simulator based on Multi-body Dynamics
Suhyun Park, Jeonghyun Sohn, and Xiangqian Zhu
- 481 Development of an EEG-based Gait Recognition Classification CNN-BiLSTM Model for Brain-Computer Interfaces (BCI)
Seohyun Lee, Yoonsung Jang, Hyunju Lee, and Kisik Tae
- 489 Improvement of Nozzle Tip Performance for Noncontact Medical Ultrasonic Mist Spraying
Seung Hyeok Jung, Jong Hyeok Jeon, Ji Young Won, Sung Min Kim, and Hong Seok Lim

폴리머 결찰 클립의 강성인자 해석

Analysis of Stiffness Factors of Polymeric Ligation Clip

정구한¹, 나종서¹, 이시우², 이상욱^{1,#}

Gu Han Jeong¹, Jong Seo Na¹, Si Woo Lee², and Sang Wook Lee^{1,#}

¹ 순천향대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University)

² (주) 티니코 연구생산부 (Design Team, Tiniko Co.,Ltd.)

Corresponding Author / E-mail: swlee@sch.ac.kr, TEL: +82-41-530-1356

ORCID: 0000-0002-2595-1377

KEYWORDS: Polymer ligation clip (폴리머 결찰 클립), Stiffness analysis (강성 해석), Clip applicator (클립용 기구), Taguchi method (다꾸치법), Finite element analysis (유한 요소 해석)

With the increasing frequency of laparoscopic surgery, interest in the application of polymeric ligation clips as a method for ligating blood vessels has grown. Automatic clip applicators with built-in polymeric ligation clips have been developed to reduce ligation time. As the built-in clip is loaded into the jaw of the applicator for ligation, a high spring constant, the elastic property of the clip is required to load properly. As the built-in clip loses its elastic properties due to stress relaxation over time, a polymeric ligation clip with a high spring constant is needed to increase the shelf life of the applicator. In this study, four design factors of the cavity at the clip hinge (length, width, eccentricity, and angle of the cavity) were derived and applied to the Taguchi optimization method using finite element analysis to evaluate which factor was critical. The four design factors explained 93.5% of the variation in the spring constant. The factors related to cavity width and eccentricity were significant at $p < 0.05$. Cavity width was the most crucial factor, explaining 70.8% of the variation in the spring constant. The spring constant of the improved clip model increased by 55.4% compared with the existing model.

Manuscript received: January 18, 2024 / Revised: April 3, 2024 / Accepted: April 9, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

NOMENCLATURE

E	=	Young's Modulus
ν	=	Poisson's Ratio
k	=	Spring Constant
F	=	Reaction Force
δ	=	Displacement

1. 서론

복강경을 이용한 수술은 최근 의료기기의 급속한 발달과 외과의사의 경험 축적 등으로 점차 수술 범위가 확대되고 이용

빈도도 늘어나고 있다[1]. 복강경 수술에서 지혈 방식으로 최근 Fig. 1과 같이 결찰 클립(Ligation Clip)을 활용한 방식이 많이 연구되고 있다. 기존 지혈 방식과 결찰 클립 방식을 서로 비교하여 장단점을 평가하거나[2,3], 결찰 클립 방식의 유용성, 이점 등을 평가하는 연구가 이루어지고 있다[4,5]. 또한 클립용 기구의 구조 개선에 관한 연구가 제시되었다[6].

폴리머 결찰 클립은 사출을 통해 제작되며 그 형상은 Fig. 2와 같다. 클립용 기구(Clip Applicator)를 이용하여 힌지(Hinge)를 굽혀서 수레그(Male Leg)가 암레그(Female Leg)에 결찰되도록 하는 구조이다. 이때 굽힘을 원활하게 하기 위해 힌지에는 공동(Cavity)을 두고 있다.

클립용 기구는 수동형과 자동형으로 나뉜다. 수동형은 먼저 외부에서 클립을 기구 끝에 끼운 후 복강경 흡을 통해 삽입하여 결찰하는 방식으로 매 클립마다 기구를 넣었다 빼기를 반복해야

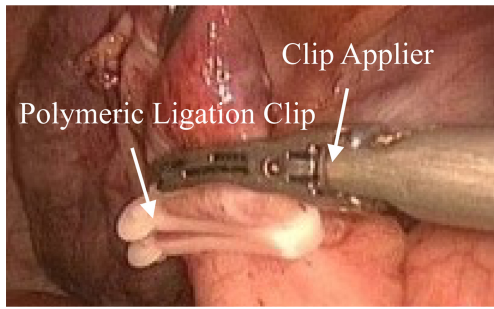


Fig. 1 Polymeric ligation clips applied by clip applicator [4] (Adapted from Ref. 4 on the basis of OA)

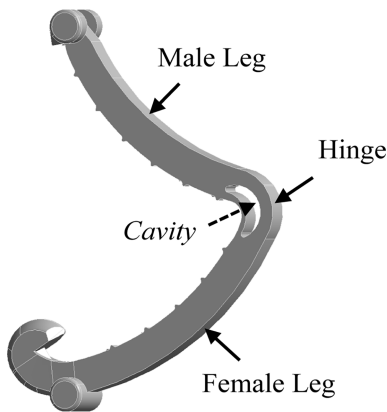


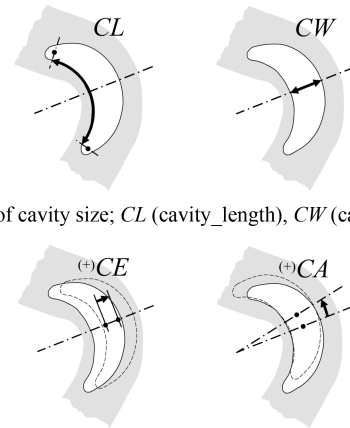
Fig. 2 Structure of polymeric ligation clip



Fig. 3 Automatic clip applicator with built-in polymeric ligation clips [7] (Adapted from Ref. 7 on the basis of OA)

하는 번거로움이 있다. 이에 반해 자동형은 Fig. 3과 같이 클립들이 기구의 가이드 내에 미리 내장된 채 하나씩 밀어서 사용하기 때문에 수동형의 문제점인 반복 작업을 크게 줄일 수 있다. 다만, 내장된 클립이 기구 끝에 있는 죠(Jaw)에 장전될 때 수레그와 암레그가 충분히 잘 벌어져야 제 기능을 발휘할 수 있기에, 이 특성을 대표하는 폴리머 결찰 클립의 스프링상수 값이 충분히 높아야 할 필요가 있다. 이 특성은 또한 클립용 기구 제품의 유통기한과도 직결된다. 폴리머 결찰 클립은 내장된 채로 오랫동안 보관되면 응력이완(Stress Relaxation) 현상으로 인해 클립의 탄성 특성을 점차 잃기 때문이다.

이에 따라 본 연구에서는 폴리머 결찰 클립의 스프링상수 값을 최대화하기 위해 유한요소해석을 통한 스프링상수 값 계산 및 다투치 최적화(민대특성)를 실시한다. 이를 통해 개선된 모델을 제시한다.



(a) Factors of cavity size; CL (cavity_length), CW (cavity_width)

(b) Factors of cavity location; CE (cavity_eccent), CA (cavity_angle)

Fig. 4 Four design factors related to cavity size and location

Table 1 Design factors and their levels used in Taguchi method

Design factor	Level-1	Level-2	Level-3
CL [mm]	1.45	1.61	1.77
CW [mm]	0.48	0.54	0.59
CE [mm]	-0.054	0	0.054
CA [deg]	-3	0	3

2. 연구 방법

폴리머 결찰 클립은 기능적 특성상 힌지를 중심으로 탄성 변형하도록 설계되었다. 수레그와 암레그의 변형은 이에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 폴리머 결찰 클립의 탄성적 특성은 힌지, 그중에서도 힌지 내 공동의 모양과 위치에서 나온다고 할 수 있다. 이에 따라 폴리머 결찰 클립의 스프링상수 값을 결정하는 요인으로 Fig. 4에 나타난 것처럼 공동의 크기와 관련된 두 개의 인자(공동 길이 CL , 공동 폭 CW)와 공동의 위치와 관련된 두 개의 인자(공동 편심 CE , 공동 각 CA)를 선정하였다.

폴리머 결찰 클립의 스프링상수 값은 이러한 네 개의 설계인자에 의해 통합적으로 결정되는 값이다. 통합적 평가를 위해 실험계획법 중 하나인 다투치법을 활용하면 스프링상수 값에 대한 인자들 간 기여도를 평가할 수 있어 매우 유용하다[8].

네 개의 인자별로 각각 세 개의 수준(Level)을 Table 1과 같이 선정하였다. 수준 2 조합이 원래 모델을 나타낸다. 각 수준은 수준 2의 값을 기준으로 힌지 기능에 문제가 없고 제작이 가능한 범위 내로 설정하였다.

인자 평가에는 다투치 직교 테이블 L18을 사용한다. L18을 사용하면 Table 1의 네 가지 설계인자의 각 세 가지 수준으로부터 총 열 여덟 가지의 공동(Cavity) 디자인을 도출할 수 있다. 각각의 공동 디자인이 반영된 폴리머 결찰 클립 형상을 생성한 후 이를 유한요소해석 상용 코드인 Ansys를 활용하여 탄성변형

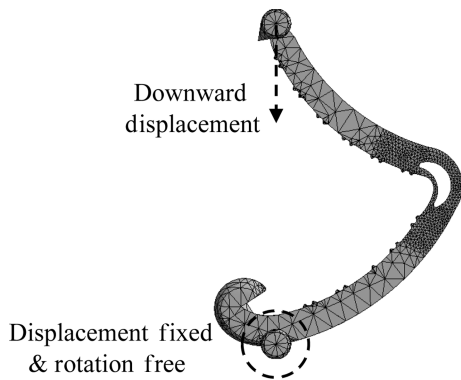


Fig. 5 Finite element mesh model of a clip with all four factors set to level-1 and applied boundary conditions

Table 2 Material property of POM (PolyOxyMethylene) [9] (Adapted from Ref. 9 on the basis of OA)

Parameter	Material property	Value
E	Young's modulus (MPa)	2,824
ν	Poisson's ratio	0.44

Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

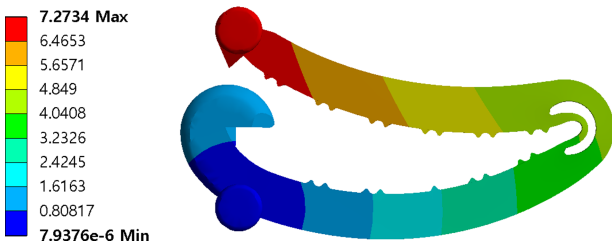


Fig. 6 Deformation shape of the clip by a displacement of 7.2 mm

해석을 실시한다. 이를 통해 폴리머 결찰 클립이 가이드에 내장된 위치에 있을 때의 스프링상수 값을 최종적으로 구할 수 있다.

해석 과정은 다음과 같다. 네 가지 인자가 모두 수준 1의 값을 가지는 경우를 예로 든다. Fig. 5는 그러한 공동 형상을 가진 클립의 유한요소 메시 모델과 적용된 경계조건을 보여준다.

유한요소 절점 수는 56,711개, 요소 수는 36,677개이다. 공동을 포함하는 힌지에 유한 요소를 매우 조밀하게 배치하여 해석의 정확도를 기하였다.

경계조건으로 하단부 암레그 머리에는 변위는 고정하되 회전은 자유롭도록 설정하고 상단부 수레그 머리에는 아래 방향 변위(최대 7.2 mm)를 가하였다.

폴리머 결찰 클립은 폴리머의 한 종류인 POM (PolyOxyMethylene) 재질로 만들어지며 그 물성치는 Table 2와 같다.

Fig. 6은 최대 변위가 가해졌을 때의 클립의 변형 형상을 보여주고 있다. 힌지 중심으로 변형이 일어남을 알 수 있다.

암레그 머리의 변위에 따른 수레그 머리 고정부의 반력을 Fig. 7에 나타내었다. 변형이 진행될수록 클립의 반력의 증가폭이

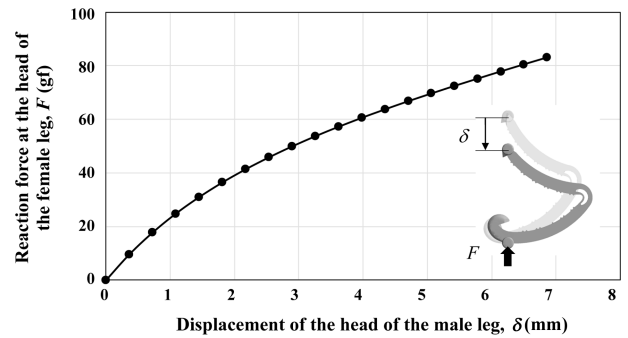


Fig. 7 Reaction force (F) vs. displacement (δ) of the clip

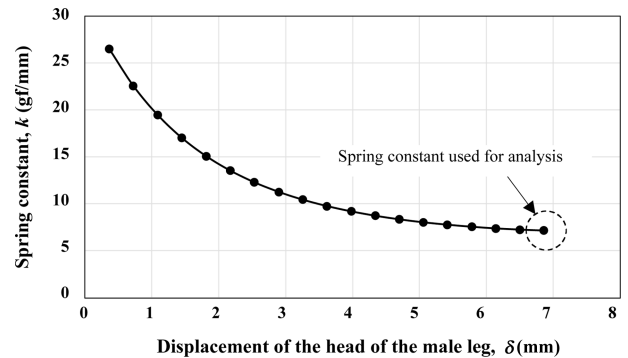


Fig. 8 Spring constant (k) vs. displacement (δ) of the clip

줄어들고 있어 비선형적 탄성 특성이 나타나는 것을 알 수 있다. 이로부터 매 순간의 스프링상수 값 k 는

$$k = \Delta F / \Delta \delta \tag{1}$$

식(1)로 계산할 수 있으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 스프링상수 값은 클립이 변형될수록 줄어들며 특정 값에 수렴함을 알 수 있다. 클립이 내장된 상태에서의 스프링상수 값은 최종값이다. 본 해석 예에서는 $k = 7.195 \text{ gf/mm}$ 이다. 이 값을 다꾸치 최적화 분석에 사용한다.

3. 결과 및 토의

다꾸치 직교 테이블 L18의 인자 배치에 따른 열 여덟 가지 해석 조건에 따른 최종 스프링상수 값을 Table 3에 나타내었다. 앞선 예는 해석번호 1번에 해당한다. 전체적으로 설계인자 변동에 따른 스프링상수 값의 범위는 2.8-7.2 gf/mm로 나타났다.

네 가지 설계인자가 스프링상수 값 변화에 어느 정도로 기여하고 민감하게 변화하는지 확인하기 위하여 해석 결과에 대해 분산분석 및 평균분석을 실시하였다. 분산분석을 통해서는 스프링상수 값에 가장 기여하는 인자와 그 기여 정도를 파악할 수 있고 평균분석을 통해서는 인자의 변동에 따른 스프링상수 값 변동의 민감도를 평가할 수 있다[8].

스프링상수 값 해석 결과에 따른 분산분석 결과를 Table 4에

Table 3 Spring constant by means of Taguchi method L18

Run No.	Design factor				<i>k</i> [gf/mm]
	<i>CL</i>	<i>CW</i>	<i>CE</i>	<i>CA</i>	
1	1.45	0.48	-0.054	-3	7.195
2	1.45	0.54	0	0	4.890
3	1.45	0.59	0.054	3	5.161
4	1.61	0.48	0	3	6.109
5	1.61	0.54	0.054	-3	4.978
6	1.61	0.59	-0.054	0	4.614
7	1.77	0.48	0.054	0	6.359
8	1.77	0.54	-0.054	3	6.518
9	1.77	0.59	0	-3	2.893
10	1.45	0.48	0	0	6.367
11	1.45	0.54	0.054	3	5.545
12	1.45	0.59	-0.054	-3	4.436
13	1.61	0.48	-0.054	3	6.435
14	1.61	0.54	0	-3	4.617
15	1.61	0.59	0.054	0	3.728
16	1.77	0.48	0.054	-3	5.871
17	1.77	0.54	-0.054	0	5.513
18	1.77	0.59	0	3	3.509

Table 4 Analysis of variance (ANOVA) of each design factor

Source	DoF	Adj. SS	Adj. MS	<i>F</i>	<i>p</i>
<i>CL</i>	2	1.0181 (4.4%)	0.5091	3.06	0.097
<i>CW</i>	2	16.3795 (70.8%)	8.1898	49.28	0.000*
<i>CE</i>	2	3.3356 (14.4%)	1.6678	10.03	0.005*
<i>CA</i>	2	0.9039 (3.9%)	0.4519	2.72	0.119
Error	9	1.4958 (6.5%)	0.1662		
Total	17	23.1329 (100%)			

$R^2 = 0.9353, *p\text{-value} < 0.05$

나타내었다. 수정된 제곱합(Adj. SS)을 보면 네 가지 설계인자 전체는 스프링상수 값 전체 변동의 약 93.5%를 대표하고 있음을 알 수 있다. 이것은 네 가지 설계인자가 잘 선택된 인자들임을 말해준다.

유의 확률 $p < 0.05$ 를 기준으로 했을 때, 공동 폭(*CW*)과 공동 편심(*CE*) 설계인자가 유의미한 것으로 나타났다. 특히, 공동 폭 인자는 전체 변동의 70.8%를 대표하는 매우 중요하고 결정적인 인자임을 알 수 있다. 공동 편심 인자는 그 다음으로서 전체 변동의 14.4%를 대표하고 있다. 이에 비해 공동 길이(*CL*)와 공동 각(*CA*) 설계인자는 스프링상수 값에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

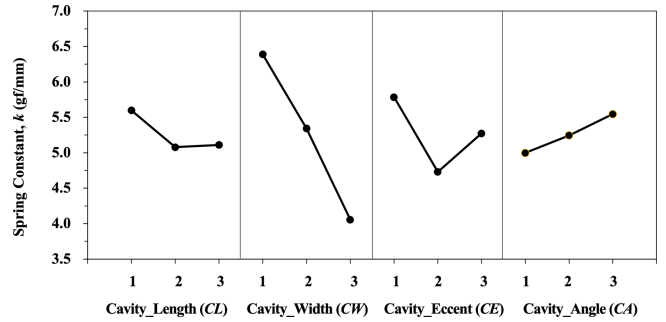


Fig. 9 Main effect plot about spring constant *k*

Table 5 Increase of spring constant by the improved combination

Model	<i>k</i> [gf/mm]	Increase
Existing (<i>CL</i> -2, <i>CW</i> -2, <i>CE</i> -2, <i>CA</i> -2)	4.675	-
Improved (<i>CL</i> -1, <i>CW</i> -1, <i>CE</i> -1, <i>CA</i> -3)	7.263	55.4%

설계 인자별로 수준 변화에 따른 스프링상수 값에 대한 평균 분석을 실시한 결과를 Fig. 9에 보였다. 분산분석 결과에서 논의된 바와 같이 공동 폭의 수준 변화에 따라 스프링상수 값이 매우 민감하게 변하고 있음을 볼 수 있다. 이에 비해 공동 길이와 공동 각에 의해서는 크게 민감하지 않다. 다만 공동 각에 의한 변화량이 각도가 증가할수록 커지는 경향이라는 점은 참고할 만하다.

Fig. 9로부터 스프링상수 값을 가장 크게 만드는 설계인자 조합은 *CL*-1, *CW*-1, *CE*-1, *CA*-3 임을 알 수 있다. 이로부터 개선된 해석모델을 만들어 확인 해석을 수행한 결과를 원래 모델의 결과와 비교하여 Table 5에 나타내었다. 개선된 모델은 스프링상수 값이 55.4% 증가하였고 이로부터 다투치법에 의한 최적화 수행이 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

4. 결론

폴리머 절찰 클립이 높은 스프링상수 값을 갖도록 형상 디자인을 개선하는 과정에서 클립 힌지의 공동 형상에 관한 네 가지 설계인자가 스프링상수 값에 미치는 영향을 평가하여 다음의 결론을 도출하였다.

네 가지 설계 인자(공동 길이, 공동 폭, 공동 편심, 공동 각)는 스프링상수 값 변동의 93.5%를 대표함으로써 주요 인자임이 확인되었다.

공동 폭과 공동 편심 설계인자는 유의확률 0.05를 기준으로 각각 스프링상수 값 변동의 70.8, 14.4%를 대표하면서 유의미하였으며, 특히 공동 폭 설계인자가 결정적인 인자임을 알 수 있었다.

스프링상수 값을 가장 크게 만드는 조합으로 설계된 개선 모델은 기존 모델 대비 스프링상수 값이 55.4% 증가하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 과제(결과물)은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC3.0)의 연구 결과입니다(No. 1345356224).

REFERENCES

1. Kim, K.-A., Kim, Y.-K., (2004), The effects of semi-Fowler's position on post-operative recovery in recovery room for patients with laparoscopic abdominal surgery, *Journal of the Korean Society of Adult Nursing*, 16(4), 566-574.
2. Elgandy, A., Khirallah, M. G., (2019), Hem-o-lok clip versus hand-made loop in base closure during laparoscopic appendectomy in children, *Journal of Pediatric Endoscopic Surgery*, 1(3), 127-132.
3. Lucchi, A., Berti, P., Grassia, M., Siani, L. M., Gabbianelli, C., Garulli, G., (2017), Laparoscopic appendectomy: Hem-o-lok versus endoloop in stump closure, *Updates in Surgery*, 69(1), 61-65.
4. Hue, C. S., Kim, J. S., Kim, K. H., Nam, S. H., Kim, K. W., (2013), The usefulness and safety of Hem-o-lok clips for the closure of appendicular stump during laparoscopic appendectomy, *Journal of the Korean Surgical Society*, 84(1), 27-32.
5. Soll, C., Wyss, P., Gelpke, H., Raptis, D. A., Breitenstein, S., (2016), Appendiceal stump closure using polymeric clips reduces intra-abdominal abscesses, *Langenbeck's Archives of Surgery*, 401(5), 661-666.
6. Han, S. H., Choi, B. L., (2023), A Study on the structural improvement of ligation parts of a polymer clip blood vessel ligator, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(8), 593-598.
7. Teleflex, Weck Auto Endo5 Automatic Clip Applier, <https://www.teleflex.com/sea/en/product-areas/surgery/>
8. Lee, S.-W., Ko, C.-W., (2023), A study on the design factors of contact pressure by femur fixation grip made of shape memory alloy used for human femoral fracture, *Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society*, 24(1), 290-296.
9. SAM HWA, POM (Acetal), <http://www.wangkang.kr/bs/?subAct=view&bid=PRODUCT&seq=16>



Gu Han Jeong

B.S. in the Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University.
E-mail: goo9498@naver.com



Jong Seo Na

B.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University.
E-mail: jln0624@naver.com



Si Woo Lee

M.S. in the Department of Chemistry, Incheon National University. His research interests are medical non-absorbable polymer clips and related applications.
Tiniko Co.,Ltd.
E-mail: tiniko.sw@gmail.com



Sang Wook Lee

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University. His research interests are shape memory alloy applications, nonlinear FE analysis, plastic metalworking.
E-mail: swlee@sch.ac.kr

미세 홀 레이저 가공 시 AOM을 적용한 홀 품질 개선

Improving Micro-hole Laser Drilling Performance Using an AOM

김영훈¹, 최상환¹, 천세경¹, 이지원¹, 조두현¹, 김명운^{1,#}
Young Hoon Kim¹, Sang Hwan Choi¹, Se Kyung Chun¹, Ji Won Lee¹, Doo Hyun Cho¹, and Myung Woon Kim^{1,#}

¹ 삼성전기 설비개발연구소 (Equipment Engineering R&D Institute, Samsung Electro-Mechanics)
Corresponding Author / E-mail: myungwoon.kim@samsung.com, TEL: +82-31-210-6872
ORDIC: 0009-0004-6448-542X

KEYWORDS: High density interconnection (고밀도 배선기판), Via hole (비아 홀), Laser drilling (레이저 드릴링), Black oxidation (흑화 처리)

PCBs (Printed circuit boards) have been widely used in electronic products such as wearables, smartphones, and table computers. Recent trends of miniaturizing electric components require improvement of component density and electronic functionality by decreasing the size of micro via holes (50-110 μm), which interconnect electric signals between adjacent layers in high density interconnection (HDI) PCBs. To generate micro via holes, we studied CO₂ laser drilling with the help of pulse shape controlling using acousto-optic modulator (AOM). Pulse shape controlling is one of the key factors to reduce heat effect during the laser drilling process. To increase laser absorption, the substrate was subjected to black oxidation prior to CO₂ laser drilling. We designed a diffractive optical system using a circular aperture. Micro via holes were obtained by optimizing the optical distance. The laser drilled via hole was studied both experimentally and theoretically.

Manuscript received: January 17, 2024 / Revised: May 2, 2024 / Accepted: May 13, 2024

1. 서론

PCB 기판은 최근 Smart Phone, PDA 등 소형 전자 기기의 발전에 따라 널리 적용되고 있다. 크게 본다면 메인 보드 역할을 하는 HDI (High Density Interconnection) 기판 외, 컴퓨터 CPU와의 접속을 지원하는 FCB (Flip-chip Ball Grid Array) 및 Smart Phone의 AP 칩과의 전기 접속을 지원하는 FCCSP (Flip-chip Chip Scale Package) 등으로 분류할 수 있으며, 최근 COVID-19 등의 영향으로 자택 근무 및 화상 회의가 많이 진행되면서 고성능의 PCB 기판 개발이 많이 요구되고 있다[1-4].

HDI 기판의 경우 인쇄회로 기판에 탑재한 전자 부품간 신호를 주고받을 수 있도록 고밀도 회로를 형성한 기판으로 전자 기기의 메인 부품 실장 및 신호 전달을 위한 용도로 제작되고 있으며, Fig. 1과 같다.

HDI 기판의 경우 여러 층을 압착 및 적층하는 방식으로 제작되며, 신호 전송을 위해 각 Layer 내부에 미세 비아 홀(Micro Via Hole)을 만들고 비아 홀 내부에 동도금을 진행하여 Layer

간의 신호 연결을 담당한다. 최신 Smart Phone의 성능 향상으로 고밀도, 고집적화에 대응하기 위해 신호 선의 선평과 비아 홀의 직경 또한 점점 축소되는 방향으로 개발되고 있다[5-8].

CO₂ 레이저 가공에 대한 열적 영향 분석 등이 많이 진행되었으나, 실제 Via Hole을 조절하기 위한 광학계 및 Hole을 만드는 구체적인 방법에 대한 제시가 부족하였다. 본 연구에서는 광학계 설계 및 제작을 통해 HDI 기판에 홀 직경 50-110 μm 크기를 구현하는 실제적인 방법과 가공 품질 확보를 위한 품질 최적화 등에 관한 평가 내용을 다루었다.

2. 시편 및 실험 장치

2.1 시편

본 실험에 사용한 HDI 제품의 한 층(Layer)은 Fig. 2와 같은 구조를 가진다. Epoxy Resin, Silica 및 Glass Fabric으로 복합된 절연체인 PPG (Prepreg)를 10-15 μm 두께의 Cu 층이 상, 하부에서



Fig. 1 Premium smart phone and main PCB board

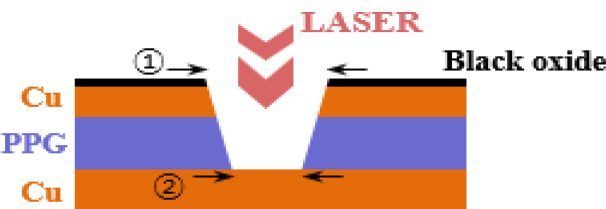


Fig. 2 Internal structures of HDI circuit board

감싸고 있으며, 레이저 가공이 용이하도록 상부 Cu층 위 2-3 μm 를 흑화(Black Oxidation) 처리하였다. 흑화 처리는 PCB 제조 시 상부 절연층과의 접합 강도 향상을 통하여 밀착력을 확보하고, 열 및 물리적 충격에도 견딜 수 있도록 하기 위해서 Cu 표면을 화학적으로 산화 처리하며, 산화 후 표면은 검은색을 띠게 된다. 흑화 층의 경우 CO₂ 파장의 흡수율이 최대 40%까지 증가되게 된다[9-11]. 레이저 가공 시 Fig. 2에서 보는 것처럼 하부 Cu 상부까지 제거하며, Via 홀을 형성하며 홀의 크기는 상부 (Top, ①) 및 하부(Bottom, ②)로 구성된다[11].

2.2 실험 장치

본 실험 장치는 Fig. 3과 같이 구성되어 있다. CO₂ 레이저 발진 후 가공 홀의 직경을 결정하는 어퍼처(Aperture, AP), 펄스 길이 및 출력을 조절하는 AOM (Acousto-optic Modulator), 원하는 가공 영역 내 홀 가공을 위한 Scanner 및 빔을 가공단에 집광시켜 초점에 맞히게 해주는 F-theta 렌즈로 구성되어 있다. CO₂ 레이저에서 발생되는 빔의 펄스 폭은 최대 30 μs 이상으로 가공 시 열적인 영향을 줄 수 있기 때문에 펄스 폭 및 세기의 실시간 조절이 필요하며 관련 기능 적용을 위하여 AOM 광학 장치를 사용하였다. 레이저에서 발진되는 빔은 AOM을 통하여 회절되어 경로가 변경되는 경우에 1차빔(1st Beam)이 되며, 회절되지 못하는 빔은 투과하여 진행되는 0차빔(0th Beam)이 되고 Dump를 설치하여 0차 빔을 방열시키는 구조를 사용한다. 가공 단으로 내려온 빔은 Galvano 모터 2개로 구성된 Scanner 및 F θ Lens를 통과하여 PCB 기판 표면에 홀 가공을 하게 된다.

CO₂ 레이저는 Slab 구조로서 내부에 Gas를 충전 한 후 RF

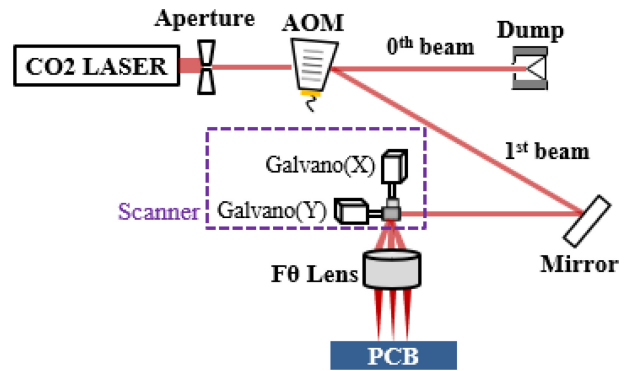


Fig. 3 Optical layout of HDI laser drill

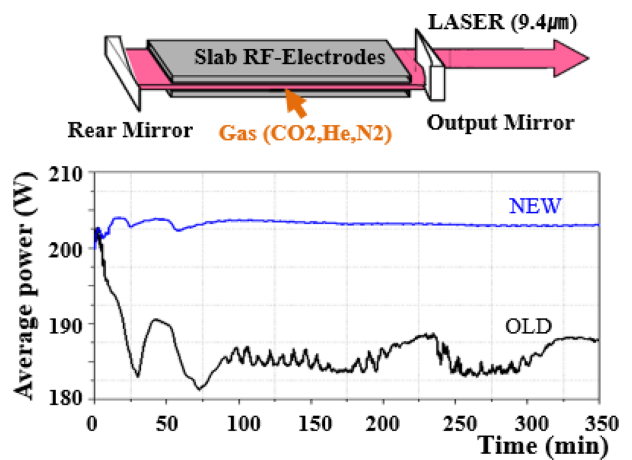


Fig. 4 Power stability of new CO₂ laser (Coherent, J5-V)

전극을 통해 Gas들간의 충돌로 인하여 레이저 Beam을 발생시키는 Gas 레이저이다. 이때 사용한 레이저는 기존(OLD) Slab 구조 대비 광로 길이 확대, Gas 조성 비율 변경 및 고전압 RF 설계 등을 통하여 전체적으로 출력을 낮추면서 짧은 펄스 폭 구현 및 출력 안정성 부분을 개선하였다. 출력 안정성은 Fig. 4에서 보는 데로, 기존 대비 출력의 변동이 최대 2% 내외로 안정적으로 유지된다.

비아 홀 가공에서 핵심적인 부분은 가공 시 레이저에 의한 열 영향을 최소화하기 위해 광학 부품인 AOM을 이용하여 기관 가공 시 필요한 레이저 출력 및 펄스 폭을 가변 조절할 수 있는 기술이다. Fig. 5에 보인 데로, 레이저 Trigger 신호에 의해 발생된 레이저 펄스는 초기 Spike 및 긴 펄스 폭을 가지고 있어 가공 시 열에 의한 누적으로 인한 품질 저하가 발생할 가능성이 많다. 펄스 폭의 조절을 위해서 AOM은 레이저 Trigger 신호가 입력된 후 원하는 펄스 발생 시간 동안 AOM Trigger 신호를 발생하여 빔을 회절시켜 1st Order 방향으로 회절시켜 보내게 된다. 아래 그림에서는 전체 펄스 폭 25 μs 중 약 10 μs 만 펄스를 사용하여 가공하는 방법을 보여준다. 또한 레이저 및 AOM Trigger 시 약 5 μs 의 지연 시간을 가지고 있다.

제어 구성도는 Fig. 6에 나와 있다. 레이저 및 Scanner와 같이 고속으로 동작하는 장치는 FPGA (Field-programmable Gate Array)에

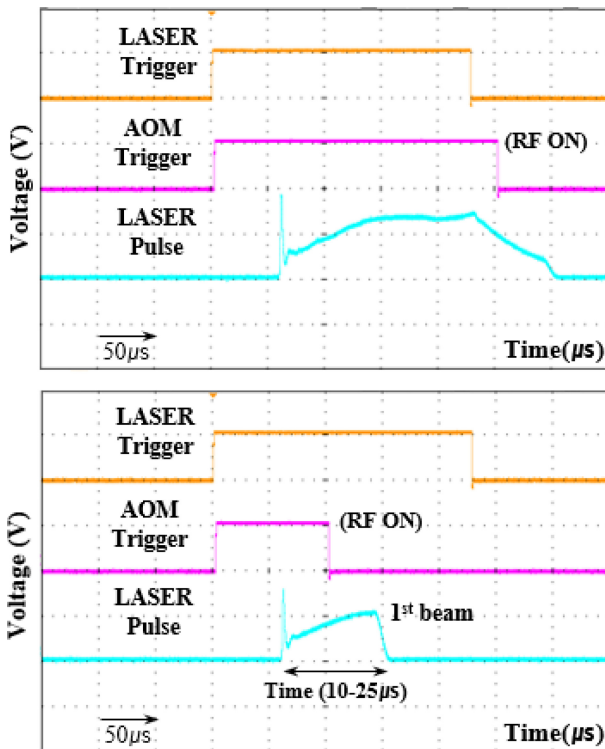


Fig. 5 Pulse shape control by using on time and delay of AOM

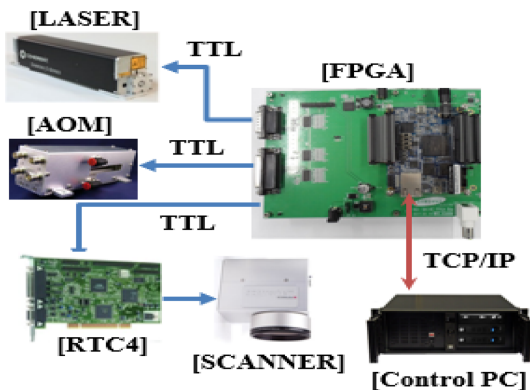


Fig. 6 Schematics of the control diagram with FPGA

연동되어 제어되는 방식으로 작동한다. Scanner의 경우에는 내부에 Galvano Motor에 의해 고속으로 실시간 동작이 필요하여 별도의 Real Time 제어 보드인 RTC4를 통하여 통신하는 방식을 적용하였다. Control PC는 각 핵심 부품과 통신하며 가공 시 발생할 수 있는 여러 가지 오류를 모니터링하며 제어하는 역할을 수행한다.

3. 레이저 Drilling 실험 검증

3.1 Drilling 조건 설정

PCB 기판에 Drilling 평가를 위한 광학계 설정 조건들은 Table 1에 나와 있다. 레이저는 생산성 및 Peak Power를 고려하여

Table 1 Control parameters of the optical layout

	Item	Specification
Laser	Frequency [kHz]	4.5
	Duty [%]	8
	Pulse energy [mJ]	4.22-10.4
	F-theta lens [mm]	120 (Tele-centric)
	Scanner angle [rad]	±0.35
	Working field [mm ²]	70 × 70
	Optical path [mm]	2,800

주파수 및 Duty 값을 고정하였고, 각 Via 홀 가공을 위한 펄스 Energy는 4.22-10.4 mJ의 값을 사용하였다. 이때 펄스 Energy는 AOM을 이용하여 가공단으로 회절 되는 빔의 에너지만을 나타내며, 내부 RF 신호의 진폭으로 조절한다. 초점 거리 120 mm 렌즈를 사용하며 보호 윈도우는 가공 시 이물에 의한 영향을 방지할 수 있도록 DLC (Diamond-like Coating)이 적용되어있다. Scanner의 내부에 있는 Galvano Motor는 최대 ±0.35 rad 이동할 수 있게 설정되어 있어 최대 가공 가능한 영역(Working Field)는 f•Scanner Angle(±0.35)로 정의되며 외곽 부 수차 등을 고려하여 실제 가공 시 약 70 × 70 mm의 영역을 사용한다. 이때 적용된 Optical Path의 길이는 최대 2,800 mm이다. Optical Path는 Fig. 3에서 어퍼쳐부터 Scanner 입구 까지의 거리로 정의한다.

3.2 광학 부품 성능 검증

초점 설정 시 진원도에 가장 큰 영향을 주는 변수는 어퍼쳐의 정렬이다. 어퍼쳐는 원형 홀 형상으로 X 및 Y축 기구 정렬 Jig에 장착되어 조정되는 구조로 정확하게 중심부가 통과되지 않는 경우 빔의 형상이 타원형으로 변형될 수 있기 때문에 정밀한 정렬이 중요한 부분으로 본 실험에서는 Beam Profiler를 가지고 실제 어퍼쳐를 통과한 빔의 형상을 측정하면서 광학 정렬을 진행하였고 관련 결과가 Fig. 7에 나와 있다. Beam Profiler를 통과하는 빔의 진원도를 측정하여 평균 95% 이상 확보되는 경우 가공 후 Hole의 진원도가 90% 이상 만족됨을 확인하였다. 측정 시 Beam Profile의 센서 Size 한계로 인하여 Beam Reducer를 장착하여 입력 빔의 크기를 3배로 축소하여 측정하는 방식을 적용하였다. 진원도는 단축/장축 ×100(%)로 계산하였다.

조건 설정을 위해서 먼저 개별 어퍼쳐 별로 초점의 위치를 찾아야한다. 회절 광학계에 적용되는 수식은 식(1)부터 식(3)과 같다. 어퍼쳐의 지름(D), 1st Order 회절 빔을 고려할 경우 진행 거리(d)에서 얻어지는 회절 세기는 식(1)에 의해서 표현된다. I₀는 Peak 세기, J₁은 1차 Bessel 함수를 표시하며 ρ는 세기의 Radial 방향을 가리킨다[12]. 어퍼쳐를 통과한 후 빔의 회절 각도 및 렌즈에 입사되는 빔의 입력 반경(S)는 식(2)에 의해서 주어진다. 위 내용을 종합하여 렌즈 초점에서 Gaussian Beam인 경우 식(3)에 의해서 상에 맺혀지는 Spot Size를 예상할 수 있다. 이때 λ(9.4 μm)는 레이저 파장, M²는 빔의 Quality Factor(1.2), f는 렌즈의 초점 거리

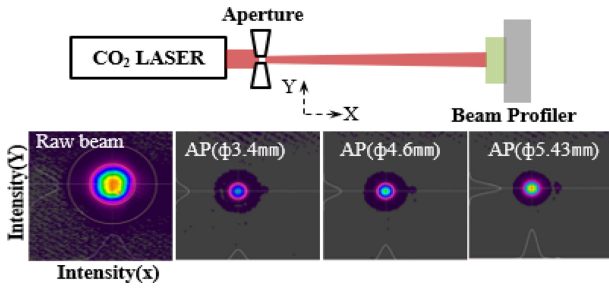


Fig. 7 Experimental setup of the beam profile measurement

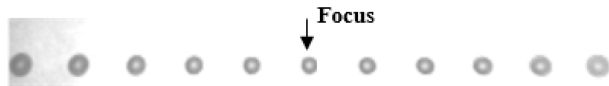


Fig. 8 Drilled hole shape on the acrylic plate with 1 shot with pulse duration of 10 μs

(120 mm) 및 빔의 입력 반경(S)를 나타낸다.

가공 시 초점을 확인하는 일반적인 방법으로 아크릴(PET) 재질을 이용하여 Z축 방향을 이동하면서 1 Shot (10 W, 10 μs) 조건으로 가공을 진행한다. Fig. 8에 보는 것처럼 PET 재질에 간격 50 μm 기준으로 Shot 가공 후 내부 Vision으로 형상 및 크기를 확인하여 진원도가 90% 이상이며 Hole 크기가 작고 좌, 우로 대칭으로 커지게 되는 조건을 확인하여 해당 부분을 초점으로 선정한다. 위와 같은 방법을 적용하여 모든 어퍼처 Size에 대하여 개별 초점을 확보한다.

$$I(x, y) = I_0 \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi D \rho}{\lambda d}\right)}{\frac{\pi D \rho}{\lambda d}} \right]^2, \rho = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}, S = d \tan(\theta) \quad (2)$$

$$Spot\ size = \frac{4\lambda M^2 f}{\pi 2S} \quad (3)$$

Hole 진원도에 영향을 주는 두 번째 변수는 F-theta Lens의 성능이다. Lens는 넓은 가공 영역을 가공하기 위해서 여러 장의 ZnSe 및 Ge 재질로 구성되어 있으며 가공 시 빔의 꺾이는 각도에 따른 수차의 영향으로 진원도 및 가공 정밀도가 저하되는 부분들이 있기 때문에 사전 평가 검증이 필요하다. 렌즈 설계 Data를 기준으로 Zemax 설계 Software를 통하여 초점에서 각 위치별 형상에 대한 평가를 진행하였고 관련 결과가 Fig. 9에 나와 있다. Acrylic Plate에 초점 설정과 동일한 가공 조건으로 AP (5.43 mm)에서 가공 후 가공 형상을 확인하였을 때 Simulation 결과와 유사하게 진원도 90% 이상 및 빔의 회전 방향 등이 일치함을 확인하였다.

3.3 어퍼처 Size 별 최적 조건 설정 및 검증 결과

각 핵심 부품에 대한 기본 성능 평가를 완료하고 각 어퍼처 별 실 기관 가공 평가를 진행하였다. 이때 각 어퍼처 Size 별로

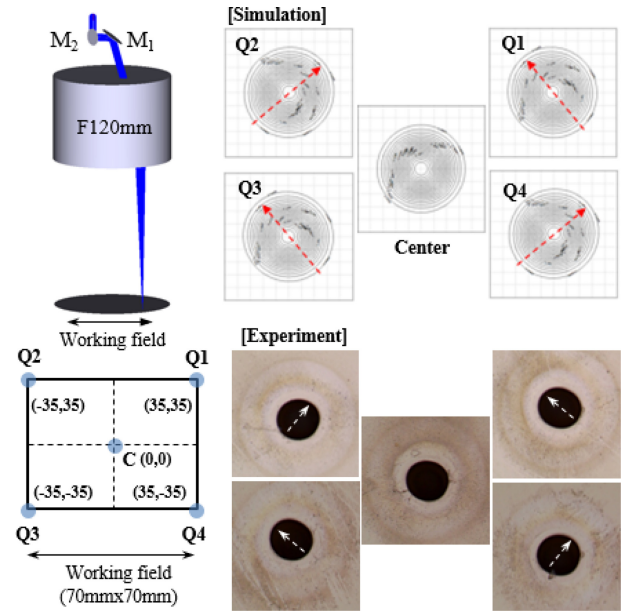


Fig. 9 Simulation and experimental confirmation of the F-theta lens

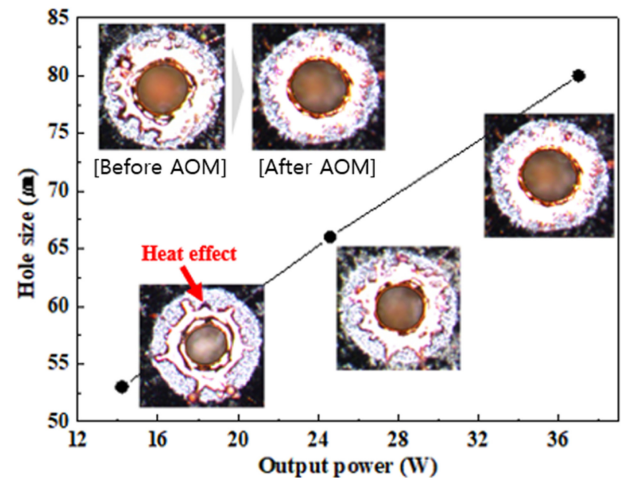


Fig. 10 Hole shape variation by controlling the laser power of 1st shot

최적의 Power 조건을 설정하는 것이 중요하다. 어퍼처 4.6 mm 기준으로 1 Shot 가공 시 AOM의 주기 변화를 통하여 펄스 길이를 25 μs로 고정한 후 AOM 진폭 변화를 통하여 출력을 제어하는 방식으로 출력 변화에 따른 홀 형상이 Fig. 10에 나와 있다[13]. 이때 가공 홀의 주변부 열 영향(Heat Effect)을 줄이기 위해 Fig. 5에 보인 대로 펄스의 시작 및 끝점의 열 영향 부위를 제거하였다. 열 영향은 펄스 주기 및 출력에 의존하는 부분으로 두 변수의 DOE 평가를 통하여 최적 조합을 결정한다. 그림에서 미세 Resin들이 남아 있고 2nd Shot을 이용하여 홀 내벽의 Resin 잔사를 제거하게 된다. 또한, AOM 적용 전에는 홀 주변부 열 영향으로 용융된 표면이 보이며, AOM 적용한 경우에는 표면 용융이 최소화됨을 알 수 있다.

동일한 방법으로 어퍼처 Size 별로 가공 조건을 설정하여

Table 2 Optimal experimental results for via hole drilling

Hole [mm]	Aperture [mm]	AOM (1st/2nd) [μs]	Power (1st) [W]
50	2.8	25/18	19.18
65	3.4	25/18	26.53
78	4.37	25/18	33.45
80	4.6	25/18	37.28
88	5.43	25/18	43.39
110	6.22	25/18	47.34

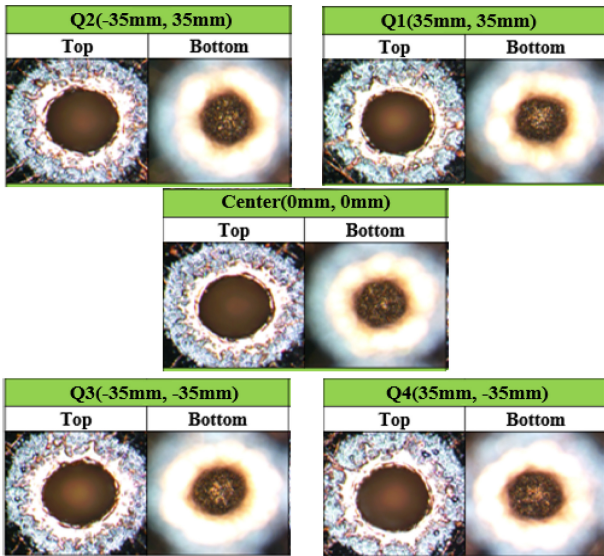


Fig. 11 Microscopic view of the top and bottom image for 80 μm via holes

최적화한 결과가 Table 2에 나와 있다. 1st Shot 조건으로 홀 가공을 진행하고 2nd Shot으로 홀 하부에 남아있는 Resin을 제거한다 [13]. 이때 레이저 출력은 동일하며 AOM의 RF on Time 조절을 통하여 펄스 발진 시간만 Shot 별 제어하여 사용한다. 1st Shot으로 전체 영역을 가공한 후 다시 2nd Shot으로 원위치로 돌아와 가공하는 Cycle 공법으로, 추가적인 위치에 따른 열의 누적에 의한 영향을 방지하기 위한 방법이다.

Table 2의 결과 중 Via Hole 80 μm 조건에 대하여 현미경을 통하여 Top 및 Bottom 형상을 관측하여 분석한 자료가 그림 11에 나와 있다. 이때 형상은 Fig. 9처럼 전체 영역 (70 × 70 mm) 중 총 5개 지점을 선정하여 측정하였고, 관련 결과가 Fig. 11에 나와 있다. 홀 가공 후 주변에 열에 의한 영향으로 용융 및 기화 후 남은 부분들이 쌓이게 된다. 이 부분 또한 후공정 진행 시 식각 공정을 통해 제거할 수 있지만 많이 쌓이게 되면 후공정에서 제거되지 않기 때문에 최대한 열 영향 제거가 필요하며, 제거를 위해서 AOM을 이용하여 레이저 펄스 간을 조절하여 최적화한다.

어퍼쳐 Size 별 초점 설정 및 가공 조건 평가를 진행한 후 상부(Top), 하부(Bottom) 홀 크기 및 진원도에 대하여 현미경 측정을 진행하였고, 관련 결과를 Fig. 12에 종합하였다. Hole

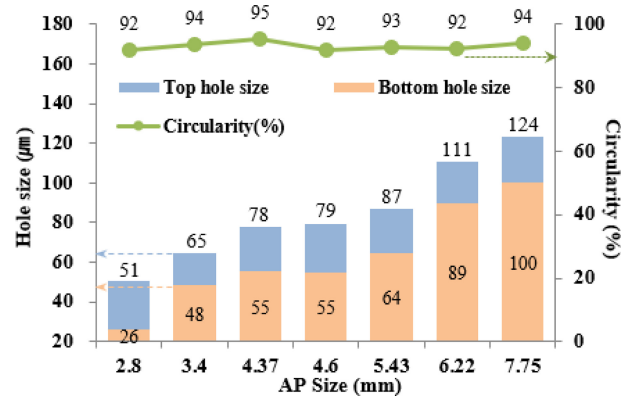


Fig. 12 Hole size of the top and bottom for each aperture size

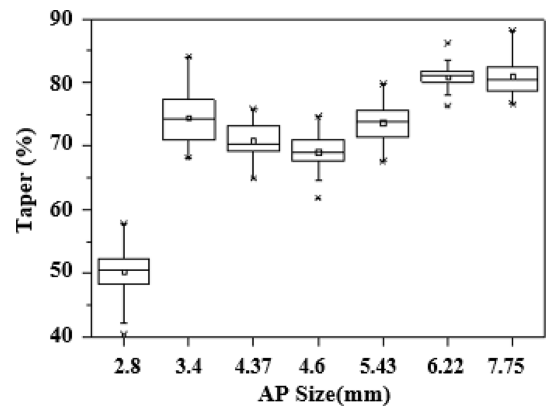


Fig. 13 Hole taper ratio for each aperture size

Size 65 μm 이상에서 70% 이상 만족하는 것을 확인하였다.

후공정인 동 도금 공정에서 안정적인 도금을 위하여 레이저 가공 후 Taper는 70% 이상 확보가 필요하며, 관련 결과가 Fig. 13에 나와 있다. AP 2.8 mm인 경우에는 Taper 50%로 가공 시 Energy가 부족하여 향후 고출력 레이저 등을 적용하여 추가 평가 검증이 필요하다. 그림에서 Taper는 (홀 하부/홀 상부) × 100(%)로 정의한다.

4. 결론

HDI 흑화 기판에 CO₂ 레이저를 이용하여 Hole 가공 평가를 진행하였다. Hole의 크기는 실험을 통하여 어퍼쳐 Size, 광학계 거리 및 가공 출력 등에 따라서 변화함을 확인하였다. 또한 가공 시 홀 주변 용융에 의한 열 현상을 줄이기 위해서 AOM 광학 부품을 사용하였고, 이를 통하여 레이저 자체의 주파수는 유지하면서 펄스의 길이만 조절하는 방법을 적용하여 평가하였다. 실제로 펄스의 파형을 포토 다이오드와 오실로스코프를 이용하여 확인하였다. 어퍼쳐 크기를 변경하면서 가공 출력, AOM 펄스 길이 조절 및 1st/2nd Shot 가공 방법을 통해서 최종적으로 Hole Size 사양 50-110 μm을 HDI 흑화 기판 기준으로 확보할 수 있음을 검증하였다.

REFERENCES

1. Michigami, N., Yamaga, M., Kawamura, M., Kuze, O., Nakamura, S., (2011), High-performance printed circuit board production equipment for ultra-high density multi-layer wiring, *Hitachi Review*, 60(5), 216-221.
2. Meier, D. J., Schmidt, S. H., (2002), PCB laser technology for rigid and flex HDI-via formation, structuring, routing, *Proceedings of the IPC Printed Circuits Expo*, 2002.
3. Rahim, K., Mian, A., (2017), A review on laser processing in electronic and mems packaging, *Journal of Electronic Packaging*, 139(3), 1-11.
4. Zhang, C., (2008), Thermal modeling and laser beam shaping for microvias drilling in high density packaging, Ph.D. Thesis, University of Central Florida.
5. Obata, K., Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K., (2012), Cu-direct laser drilling of blind via-hole in multi-layer PWBs: process visualization using high-speed camera images, *Key Engineering Materials*, 516, 30-35.
6. Hu, Y. Z., He, W., Xue, W. D., Tao, Z. H., Huang, Y. X., Xu, H., Lv, W. Q., (2012), A parameters optimization of the CO₂ laser drilling process for HDI microvia fabrication, *Applied Mechanics and Materials*, 214, 451-454.
7. Cho, K.-W., Park, H.-J., (2010), Laser drilling system for fabrication of micro via hole of PCB, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(10), 14-22.
8. Clyde, F. C. Jr., Happy, T. H., (2007), *Printed circuits handbook*, McGraw-Hill Professional Publishing.
9. Zhou, G., Li, W., Xiang, Q., He, W., Wang, S., Chen, Y., Hong, Y., Yang, W., Lai, M., Chen, S., Xu, H., (2019), Copper induced direct CO₂ laser drilling blind hole with the aid of brown oxidation for PCB CCL, *Applied Surface Science*, 479, 512-518.
10. Wood, N., Brooks, P., Thomas, T., Huelsmann, T., Koenigsmann, T., Liong, A., Haarmann, P., Cho, W., Chan, C., Kim, K., (2020), Copper surface preparation to enhance absorption of carbon dioxide laser energy in blind micro-via formation, *Proceedings of the 2020 15th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, 113-136.
11. Fang, X. Y., Yung, K. C., (2006), Copper direct drilling with tea hbox CO₂ laser in manufacture of high-density interconnection printed circuit board, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 29(3), 145-149.
12. Saleh, B. E. A., Teich, M. C., (1991), *Fundamentals of photonics*, John Wiley & Sons. Inc.
13. Okada, J., Okamoto, Y., Shudo, K., Yorozu, M., (2012), Modelling of Cu direct laser drilling process, *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 7(3), 369-374.

**Young Hoon Kim**

Ms.D. Research engineer of Equipment Engineering R&D Institute in the Samsung Electro-Mechanics.

His research interest is precision engineering with laser devices.

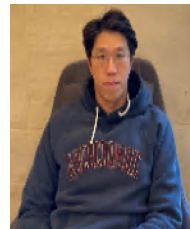
E-mail: yh0825.kim@samsung.com

**Sang Hwan Choi**

Bs.D. Research engineer of Equipment Engineering R&D Institute in the Samsung Electro-Mechanics.

His research interest is precision engineering with laser control devices.

E-mail: sanghwan.choi@samsung.com

**Se Kyung Chun**

Bs.D. Research engineer of Equipment Engineering R&D Institute in the Samsung Electro-Mechanics.

His research interest is precision engineering with laser control devices.

E-mail: sekyung.chun@samsung.com

**Ji Won Lee**

Ph.D. Research engineer of Equipment Engineering R&D Institute in the Samsung Electro-Mechanics

His research interest is precision engineering with laser devices.

E-mail: jiwon.87.lee@samsung.com

**Doo Hyun Cho**

Ph.D. Research engineer of Equipment Engineering R&D Institute in the Samsung Electro-Mechanics.

His research interest is precision engineering with laser and motion devices.

E-mail: dh9.cho@samsung.com

**Myung Woon Kim**

Ph.D. Research engineer of Equipment Engineering R&D Institute in the Samsung Electro-Mechanics.

His research interest is precision engineering with laser devices.

E-mail: myungwoon.kim@samsung.com

폴리아세탈 수지의 건식 인덱서블드릴 가공에서 가공오차 감소를 위한 최적조건 선정

Selection of Optimal Condition for Reducing Dimensional Error of Holes in Dry Cutting of Polyacetal Resin with Indexible Drill

천세호^{1,#}
Seho Chun^{1,#}

¹ 계명문화대학교 기계과 (Department of Mechanical Engineering, Keimyung College University)
Corresponding Author / E-mail: chunsh@kmcu.ac.kr, TEL: +82-53-589-7621
ORCID: 0009-0004-3252-3399

KEYWORDS: Polyacetal (폴리아세탈), Indexible drill (인덱서블 드릴), Hole accuracy (구멍 정밀도), Design of experiment (실험 계획법)

In this study, polyacetal plates were machined with an indexable drill (Ø18mm) to measure the dimensional error of holes according to the cutting conditions and investigate the influencing factors to obtain precision holes. Cutting velocity, feed, and depth of cut were selected as experimental variables, analyzed using design of experiment, and optimal cutting conditions were investigated. Cutting velocity and feed were significant factors affecting hole accuracy, whereas depth of cut had little effect. The factor with the greatest influence on hole accuracy was cutting velocity, and the dimensional error of the holes tended to increase as the cutting velocity increased. Dimensional error tended to decrease as feed increased. In addition, the interaction effect between cutting velocity and feed and cutting velocity and depth of cut were significant. In this experiment, the optimal cutting velocity, feed, and depth of cut needed to minimize the dimensional error of holes were 100 m/min, 0.15 mm/rev, and 2 mm, respectively.

Manuscript received: January 29, 2024 / Revised: March 2, 2024 / Accepted: March 27, 2024

NOMENCLATURE

ΔD_i = Dimensional Error
 D_T = Drill Diameter
 D_i = Hole Diameter
S/N = Signal to Noise Ratio
n = Number of Experiment
 y_i = Response of Experiment

1. 서론

산업용 플라스틱은 강도와 탄성이 좋으며 내충격성, 내열성,

내식성 등 우수한 기계적, 화학적 성질을 바탕으로 자동차, 항공기, 의료기기, 전자부품 등 산업 전반에 적용되고 있다. 더불어 생산성, 조형성 등 산업용 플라스틱의 장점을 바탕으로 사용량은 철강을 이미 넘어섰고 지속적으로 증가하고 있는 추세이다[1]. 산업용 플라스틱은 재료가 지닌 열적, 유변적 특성을 이용한 사출, 압출 등의 공정으로 대량생산 하는 방식이 일반적이었으나 최근 정밀기계, 광학 부품 등의 수요가 증가하며 절삭가공의 필요성과 중요성이 높아지고 있다[1-9]. 더불어 최근 다품종 소량 생산에 대한 요구와 함께 복잡한 형상에 대한 금형 비용 상승 등으로 산업용 플라스틱에 대한 절삭가공 연구의 필요성이 증가하는 실정이다[11,12]. 이러한 산업계의 요구로 산업용 플라스틱의 절삭가공에 관한 연구가 최근까지 활발히 진행되고 있다[10-14].

Xiao 등은 플라스틱의 선삭가공 시 점성변형(Viscous Deformation) 특성이 표면품질을 결정짓는 데 결정적인 역할을 한다고 하였다. 선삭가공 시 점성변형에 의한 표면뜯김을 방지하기 위해서는 절삭유 공급을 통한 냉각으로 소성변형을 억제할 필요가 있다고 하였다[3]. Davim 등은 산업용 플라스틱의 선삭가공 시 공구의 재종이 가공품질에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 실험 결과 동일한 절삭조건에서 소요 동력, 비절삭저항 지표에서는 공구재종 변화가 유의미한 차이를 보이지 않았으나, 표면거칠기 값에서는 초경(Tungsten Carbide)에 비해 PCD (Polycrystalline Diamond) 재종으로 실험한 시편이 낮은 측정값을 보였다고 하였다[4]. Fetecau 등은 산업용 플라스틱의 선삭가공 시 절삭조건 변화에 따른 표면거칠기, 온도, 그리고 절삭력 변화에 관해 실험하였다. 그 결과 절삭 속도와 이송량이 증가할수록 절삭력 역시 증가하며, 절삭 속도는 온도변화에 미치는 주요한 인자라는 것을 밝혔다. 그리고 절삭 속도가 증가함에 따라 표면품질은 개선되었다고 하였다[6]. 선삭가공에 이어 산업용 플라스틱의 1 mm 이하 소구경 드릴가공에 관한 연구에서는 절삭조건 변화 시 구멍의 정밀도에 미치는 영향에 대해 실험하고 분석하였다. 분석 결과 이송량이 낮고 회전수가 높은 경우 구멍의 정밀도는 낮아지며 드릴의 회전당 이송(Feed Rate per Unit Drill Rotation)이 구멍의 정밀도에 영향을 미치고 낮을수록 정밀도가 낮아진다고 밝혔다[5]. 이는 Davim 등의 연구 결과에서 회전당 이송량이 증가함에 따라 비절삭저항이 낮아졌다는 결론을 통해 드릴가공에서도 낮은 이송조건에서 비절삭저항이 상대적으로 증가하여 구멍의 정밀도가 낮아졌다고 추론해볼 수 있다[4]. 다음으로 Palanikuma는 엔지니어링 플라스틱의 일종인 GFRP (Glass Fibre-reinforced Polymer)의 드릴가공 시 절삭조건에 영향을 미치는 다구찌방법(Taguchi Method)을 활용하여 정량적으로 분석하였다. 분석결과 주축 회전수와 이송량 사이에는 교호 효과(Interaction Effect)가 있으며 높은 주축 회전수와 낮은 이송조건에서 더욱 두드러진다고 하였다[9]. 이와 더불어 Ramesh 등의 연구에서는 다구찌방법을 적용하여 GFRP의 드릴가공 시 주축 회전수와 이송량이 가공오차에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과에서 주축의 회전수가 증가함에 따라 가공오차가 증가하는 반면 이송량이 증가하면 가공오차가 감소하는 결과를 보였다고 하였다[10]. 이는 앞서 언급된 Endo 등의 연구와 비교해 볼 때 유사한 결과이며 주축 회전수와 이송이 가공오차를 결정짓는 주요 변수임을 알 수 있다[5]. 구멍 가공에 관한 비교적 최근 연구를 살펴보면 Uysal 등은 산업용 플라스틱의 드릴가공 시 가공조건이 구멍정밀도에 미치는 영향을 파악하기 위해 폴리아세탈(Polyacetal)과 캐스트폴리아미드(Cast Polyamide)를 피삭재로 선정하여 실험을 수행하였다. 연구 결과에서 주축 회전수와 이송량이 증가함에 따라 구멍의 정밀도가 낮아졌지만, 폴리아세탈의 경우 높은 주축 회전수에서 이송량의 증가에 따라 반대로 오차가 감소한다고 하였다[12]. 이는 이전 Palanikuma의 연구에서 밝힌 바와 같이 폴리아세탈 가공에서도 변수 간에 교호 효과가 있으며 드릴의 이송량이 구멍의 정밀도에 영향을 미친다는

Davim 등과 Endo 등의 선행 연구 결과와도 유사한 결론이다 [4,5,9]. 이와 더불어 Susac 등은 폴리아세탈, 폴리아미드, 그리고 폴리에틸렌(Polyethylene) 수지의 구멍 가공성을 파악하기 위해 실험계획법을 활용하여 각종 절삭변수와 구멍 가공성 간의 관계를 정량적으로 분석하였다. 실험 결과 구멍의 진원도 오차에 유의한 영향을 미치는 인자는 드릴의 직경, 즉 공구의 강성이 주된 인자이고 주축의 회전수 및 이송량은 종속변수에 미치는 영향력이 미미하다고 하였다[13]. 그러나 이는 드릴의 강성이 종속변수에 미치는 영향력이 매우 커서 나머지 변수의 영향력이 상대적으로 작게 검출된 것이라 판단된다.

선행연구를 기반으로 본 연구에서는 비교적 대구경 인서트 교환형 드릴(Indexible Drill)을 이용하여 연구를 수행하였다. 1 mm 이하 드릴가공 중심의 기존 연구와 차별하여 대구경 드릴 가공에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히 절삭 속도와 이송량과 더불어 이전 드릴가공에 관한 연구에서 반영하지 않았던 절입깊이의 영향도 함께 분석하였다. 이를 위해 산업용 플라스틱으로 널리 활용되는 폴리아세탈을 선정하여 실험계획법(Design of Experiment)을 통해 실험설계 및 결과분석, 그리고 최적 조건을 도출하였다.

2. 실험설계 및 방법

2.1 실험설계

본 실험에서는 종속변수에 영향을 주는 유의한 인자 선별과 최적 조건, 그리고 교호 효과까지 검출하기 위해 완전요인계획법(Full Factorial Design)에 의한 실험을 설계하였고 절삭 속도, 이송, 그리고 절입깊이의 3인자, 3수준으로 설계하였다. 각기 다른 조건으로 총 27회의 실험을 통해 종속변수와와의 관계를 파악하고자 하였다. 종속변수는 공구 직경 대비 구멍의 오차를 분석하고자 선행연구를 바탕으로 식(1)과 같이 정의하였다[9-12].

$$\Delta D_i = \text{abs}(D_T - D_i) \quad (1)$$

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

측정된 결괏값은 식(2)와 같이 망소특성(Smaller the Better Characteristics)을 적용하였는데 이는 종속변수의 특성상 작을수록 생산공정에 적합하기 때문이며 진동, 공구수명 등 잡음에 대한 신호의 선명도를 나타내고자 하였다. 각 실험변수에 따른 수준 및 조건은 Table 1과 같다. 모든 조건은 예비실험을 통해 안정적인 절삭이 가능한 영역 내에서 선정하였고 수준별 간격을 동일하게 하여 수준 변화에 따른 종속변수의 거동을 직관적으로 파악할 수 있도록 설계하였다. 그리고 이송의 최소값(0.05 mm/rev)은 인선부 형상(Edge Preparation)을 고려하여 적정 미반형칩두께(Undeformed Chip Thickness)를 유지하여 급격한 절삭 부하 상승과 이로 인한 진동을 방지하기 위함이다.

Table 1 Levels of the parameters

Factor	Level	Level		
		1	2	3
A	Cutting velocity [m/min]	100	200	300
B	Feed [mm/rev]	0.05	0.1	0.15
C	Depth of cut [mm]	2	4	6

Table 2 Properties of polyacetal

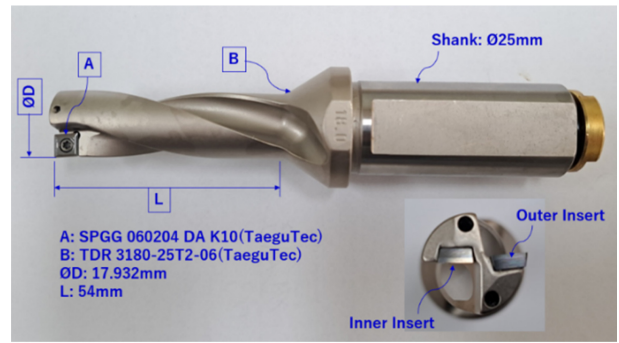
Properties	Units	Value
Density	g/cm ³	1.43
Tensile strength	MPa	63
Elongation at break	%	31
Notch impact strength	kJ/m ²	7
Coefficient of friction	-	0.2
Modulus of elasticity	MPa	2600
Melting temperature	°C	165

2.2 실험방법

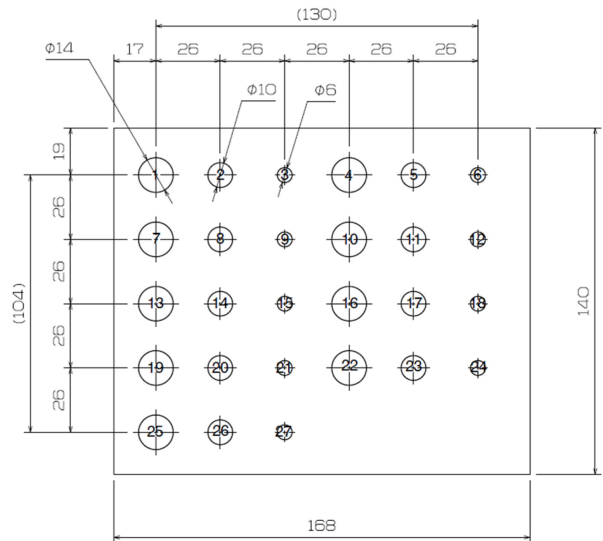
Table 2에서는 본 실험에 사용된 폴리아세탈 수지의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 본 실험을 위해 사용된 공구(Fig. 1(a))는 몸체를 구성하는 툴홀더(Tool Holder)와 절삭인선 부분인 인서트(Insert)로 구분된다. 또한 외측 인서트 1개, 내측 인서트 1개가 조합하여 전체 1날을 구성한다. 인서트는 초경재질의 코팅되지 않은 재종을 선택하였는데 Table 2에 나타난 재료의 기계적 성질을 바탕으로 추론해볼 때 공구의 마모가 구멍 오차에 미치는 영향이 비교적 낮을 것이라 판단되었고 코팅된 인선에 비해 코팅되지 않은 인선의 경우 예리한 공구 날 끝을 형성할 수 있기 때문이다.

이송은 동작기계에 입력하는 테이블 이송(mm/min)이 아닌 회전당 이송(mm/rev)을 변수로 선정하였는데 이는 절삭 속도에 영향을 미치는 회전수(RPM)와 독립적으로 조건을 부여하기 위함이다. 그리고 절입깊이 변수의 영향을 파악하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 예비 가공으로 실험조건에 따른 기초 구멍 가공을 미리 수행하였다. 이는 공차수준에 따라 황삭에서 정삭에 이르는 단계별 가공을 통해 요구 정도를 획득하는 일반적인 절차에 해당하며 절입깊이는 정삭 여유를 의미한다. 그리고 동작물을 탈거하지 않고 기초 구멍 가공(황삭)과 정삭이 동시에 이루어지도록 하여 위치오차를 최소화하였다.

가공된 시편은 버(Burr) 및 이물질 제거 후 3차원 측정기(CORDAX RS-50 DCC, Sheffield Measurement)를 통해 내경을 측정하였다. 측정 부분은 구멍 입구에서 15 mm 아래 부분으로 시편높이의 1/2 지점이다.



(a) Insert and tool holder of indexible drill



(b) Schematic of pre-drilled workpiece(168 × 140 × 30 T)

Fig. 1 Cutting tool and workpiece for experiment

Table 3 Analysis of variance for S/N ratios

Term	DF	SS	MS	F	P
A	2	30.937	15.4683	23.85	0.000*
B	2	21.966	10.9831	16.94	0.001*
C	2	3.776	1.8882	2.91	0.112
A × B	4	66.173	16.5433	25.51	0.000*
A × C	4	8.717	2.1792	3.36	0.068
B × C	4	5.693	1.4233	2.20	0.160
Error	8	5.187	0.6484		
Total	26				

*P<0.05 means significant difference

3. 결과분석

3.1 주효과 및 교호 효과 분석

측정된 자료를 바탕으로 분산분석을 실시하였고 그 결과는 Table 3과 같다. 절삭 속도(A) 및 이송(B)은 95% 신뢰수준

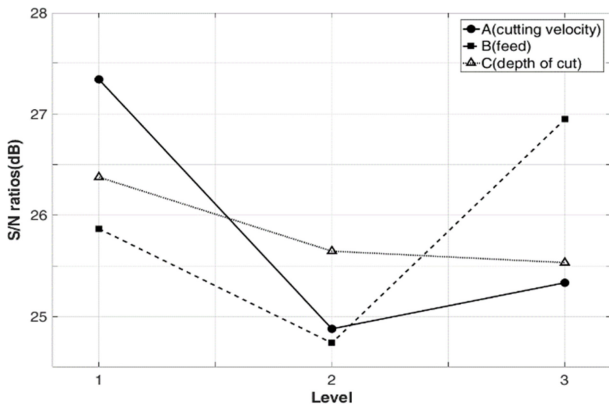


Fig. 2 Main effects plot for S/N ratios (dB)

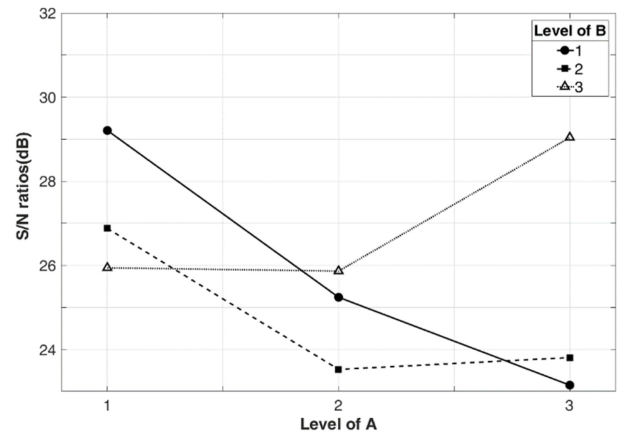
(Significant Level) 내에서 유의한 인자인 반면 절입깊이(C)는 수준 변화에 따른 효과가 미미한 것으로 나타났다. 그리고 절삭 속도와 이송(A × B) 사이에는 교호 효과가 유의한 반면 절삭 속도와 절입깊이(A × C) 사이에는 95% 신뢰수준 내에서는 유의하지 않지만 비교적 약한 교호 효과가 검출되었다. 이는 실험 결과를 설명하는 모델링을 통해 유의성 여부를 종합적으로 추론해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 2에서는 독립변수의 수준 변화에 따른 주 효과를 나타내었으며 절삭 속도(A)는 평균 S/N 비의 최솟값과 최댓값의 차이가 2.46 dB (= 27.34-84.88 dB) 이송(B)은 2.21 dB (= 26.95-24.74 dB), 그리고 절입깊이(C)의 경우 0.84 dB (= 26.37-25.53 dB)으로 절삭 속도가 구멍의 가공 정밀도에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

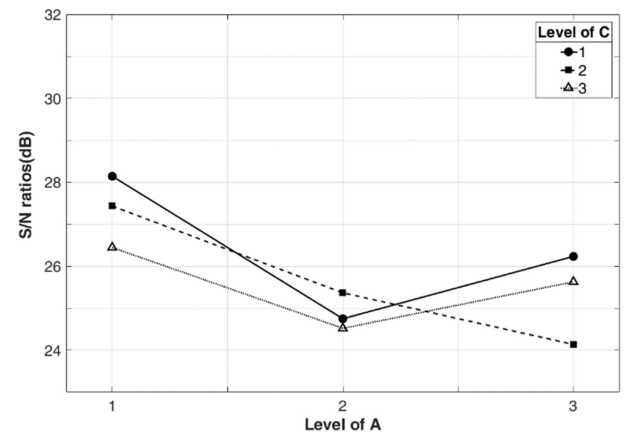
절삭 속도와 이송의 주 효과도에서 수준이 높아짐에 따라 비선형적 거동을 보이는데 이는 인자간 특정 수준에서 교호작용에 의한 결과로 판단된다. 이에 Fig. 3과 같이 교호 효과도 (Interaction Plot)를 통해 인자 간 영향을 분석하였다. 절삭 속도와 이송의 경우 2수준과 3수준 사이에서 교호 효과가 검출되었으며 절삭 속도와 절입깊이 변수 간에도 동일 범위에서 교호작용에 의한 영향력이 관찰되었다. 이는 건식가공에서 절삭 속도가 상승함에 따라 절삭열이 폴리머세탈의 기계적 성질에 영향을 미쳤기 때문이라 판단된다. 더불어 이송과 절입깊이 간에는 뚜렷한 교호 효과가 관찰되지 않았는 점으로 보아 이와 같은 분석을 뒷받침할 수 있다.

3.2 모형분석

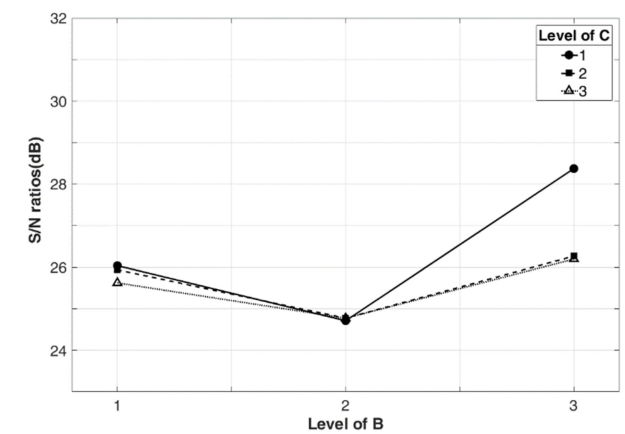
실험변수의 조합이 실험 결과를 설명할 수 있는지 확인하기 위해 3가지 모형을 구성하여 결정계수(R²)와 잔차정규확률도 (Normal Probability Plot of Residuals)를 활용하여 검증하였다. 다중회귀(Multiple Regression)를 적용하여 모형을 구성하였고 각 항(Term)별 계수는 Table 4와 같다. 분산분석 결과(Table 3)를 고려하여 항의 유의도에 따라 3가지로 분류하여 분석하였다. 모든 독립변수항과 교호작용항까지 포함된 모형(Fig. 4(a))에서는 결정계수가 0.882, B × C항을 제거한 모형(Fig. 4(b))은 0.835,



(a) Interaction plot of cutting velocity (A) and feed (B)



(b) Interaction plot of cutting velocity (A) and depth of cut (C)



(c) Interaction plot of feed (B) and depth of cut (C)

Fig. 3 Interaction plots for S/N ratios (dB)

그리고 A × C 및 B × C항을 제거한 모형(Fig. 4(c))은 결정계수가 0.776으로 항을 제거(Pooling)할수록 모형의 결정계수는 감소하였으나 결정계수는 상대적인 척도로 모형의 신뢰성을 판단할 수 없다. 이에 Fig. 4와 같이 잔차정규확률도를 함께 분석하였다.

B × C항을 제거한 모형(Fig. 4(b))의 잔차(Residual)가 정규확률분포에 가장 근접하였고 모든 항을 포함한 모형의 잔차가

Table 4 Estimated model coefficients for S/N ratios

Term	Coefficients	Term	Coefficients
Constant	25.8502	$A^2 \times B^2$	-0.2368
A	1.4909	$A \times C$	0.2784
A^2	-0.9728	$A \times C^2$	0.2973
B	0.0161	$A^2 \times C$	-0.6548
B^2	-1.1127	$A^2 \times C^2$	0.6927
C	0.5248	$B \times C$	-0.3528
C^2	-0.2057	$B \times C^2$	0.2772
$A \times B$	1.8479	$B^2 \times C$	-0.5502
$A \times B^2$	0.6495	$B^2 \times C^2$	0.1955
$A^2 \times B$	0.3478		

Table 5 Estimates for models at optimal cutting condition

Model No.	Pooling terms	Estimates	
		ΔDi [mm]	S/N ratio [dB]
1	-	0.042	27.646
2	$B \times C$	0.047	26.743
3	$A \times C, B \times C$	0.048	26.465

정규확률에서 벗어나는 빈도가 높았다. 비록 $B \times C$ 항을 제거한 모형이 결정계수는 모든 항을 포함한 모형보다 상대적으로 감소하였지만, 종속변수를 예측하는 예측값의 오차가 낮게 분포하였다. 이에 절삭 속도와 이송, 절입깊이($A \times B, A \times C$)간 교호 효과는 유의한 인자이며 이송과 절입깊이($B \times C$)간 교호 효과는 모형에 과적합(Overfitting)을 일으켜 모형의 설명력을 저하시켰다고 볼 수 있다.

3.3 모형검증

Table 5에서는 각 모형의 신뢰성을 검증하기 위해 모형별 최적조건에서의 추정값(Estimates)을 나타내었다. 선정된 최적조건은 절삭 속도(A), 이송(B), 절입깊이(C) 변수에서 가장 높은 S/N비의 조합으로 A1B3C1 이다. 최적조건에서의 구멍 오차는 0.045 mm, S/N비는 26.936 dB로 측정되었다. 검증결과 모형 2번(Pooling $B \times C$ Term)이 추정값과 추정값의 S/N비 차이가 0.193 dB로 가장 작았으며, 모형 1번은 0.71 dB로 가장 높았다. 검증을 통해 절삭 속도와 이송 및 절입깊이 사이에는 교호 효과가 설명되며 이송과 절입깊이 간의 교호항은 예측모델의 설명력을 저하시키는 인자임을 검증할 수 있었다.

4. 결론 및 향후과제

4.1 결론

산업용 플라스틱의 구멍가공 시 정밀한 구멍을 얻기 위해 본 연구에서는 폴리아세탈 수지를 인서트 교환형 드릴을 이용하여 절삭조건별 구멍 오차를 측정하고 이에 영향을 미치는 인자를 조사하였다. 절삭 속도, 이송, 그리고 절입깊이를 실험변수로 선정하였고 각 조건에 따른 측정값을 실험계획법을 통해 정량적으로 분석하고 최적가공조건을 탐색하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 절삭 속도와 이송은 구멍 오차에 영향을 미치는 유의한 인자이다. 반면 절입깊이는 구멍 오차에 미치는 영향력이 미미하였다.
- 2) 구멍 오차에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 절삭 속도며 절삭 속도가 증가함에 따라 구멍 오차는 증가하는 경향을 보인다. 반면 이송은 증가함에 따라 구멍 오차가 감소하는 경향을 보인다.
- 3) 절삭 속도가 상승(200 m/min 이상)하는 구간에서 이송과 절입깊이 변수의 효과에 영향을 미치는 점을 교호 효과 분석으로 파악하였다. 이는 절삭 속도가 증가함에 따라 발생하는 절삭열이

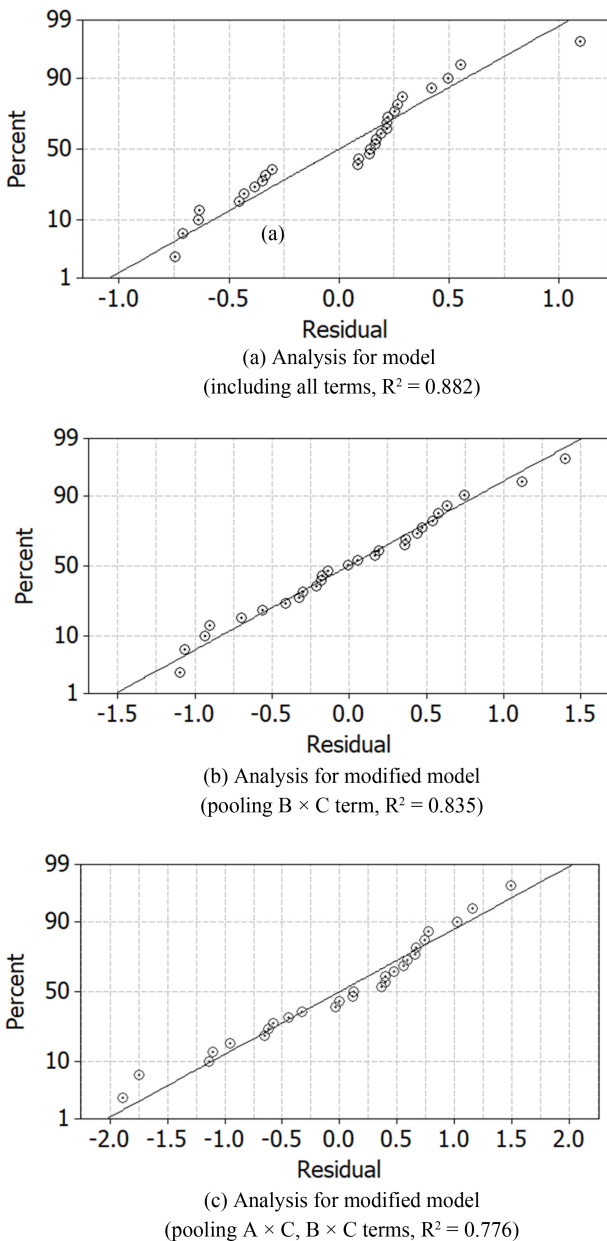


Fig. 4 Normal probability plot of residuals for S/N ratios

폴리아세탈 수지의 기계적성질에 영향을 미쳤기 때문이라 분석된다.

4) 본 연구에서 제시한 절삭범위에서 폴리아세탈 수지의 건식 드릴가공 시 구멍 오차를 최소화할 수 있는 최적 가공조건은 절삭 속도 100 m/min, 이송 0.15 mm/rev, 절입깊이 2 mm이다.

4.2 향후과제

본 연구에서는 직경 1 mm 이하 드릴가공 중심의 선행연구를 확장하여 직경 18 mm 인서트 교환형 인덱서블 드릴을 이용한 연구를 수행하였다. 인서트 교환형 드릴은 일체형(Solid Type) 드릴과는 제작방식, 재질, 구조, 기계적 특성 등이 다르므로 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구를 통해 폴리아세탈의 드릴가공 시 절삭 속도 200 m/min 이상의 조건에서는 가공오차 발생 경향이 변화(Fig. 3)되었음을 알 수 있는데 절삭열에 의해 절삭기구가 변화되었다고 추정된다. 이에 냉각방식, 공구의 열전도율 변화(코팅, 재종) 등 다양한 변수를 추가하여 가공오차 제어에 관한 연구가 후속된다면 엔지니어링 플라스틱 가공에 관한 지식 확장에 기여할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Alauddin, M., Choudhury, I., El Baradie, M., Hashmi, M., (1995), Plastics and their machining: a review, *Journal of Materials Processing Technology*, 54(1-4), 40-46.
- Zhang, H., Chen, W., Chen, D., Zhang, L., (2001), Assessment of the exit defects in carbon fibre-reinforced plastic plates caused by drilling, *Key Engineering Materials*, 196, 43-52.
- Xiao, K., Zhang, L., (2002), The role of viscous deformation in the machining of polymers, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(11), 2317-2336.
- Davim, J., Reis, P., (2004), Machinability study on composite (polyetheretherketone reinforced with 30% glass fibre-PEEK GF 30) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K20) tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23, 412-418.
- Endo, H., Marui, E., (2006), Small-hole drilling in engineering plastics sheet and its accuracy estimation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(6), 575-579.
- Fetecau, C., Stan, F., Munteanu, A., Popa, V., (2008), Machining and surface integrity of polymeric materials, *International Journal of Material Forming*, 1, 515-518.
- Gaitonde, V., Karnik, S., Mata, F., Davim, J., (2008), Taguchi approach for achieving better machinability in unreinforced and reinforced polyamides, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(9), 909-924.
- Feyzullahoglu, E., Saffak, Z., (2008), The tribological behavior of different engineering plastics under dry friction conditions, *Materials & Design*, 29(1), 205-211.
- Palanikumar, K., (2011), Experimental investigation and optimization in drilling of GFRP composites, *Measurement*, 44(10), 2138-2148.
- Ramesh, B., Sharan, S. J. C., Kavalagan, R., (2013), Experimental investigation and optimization in drilling GFRP polymeric composites using Taguchi and ANOVA, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2(1), 52-60.
- Altan, M., Altan, E., (2014), Investigation of burr formation and surface roughness in drilling engineering plastics, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36, 347-354.
- Uysal, A., Altan, M., (2018), Accuracy estimation in drilling small holes on engineering plastics by a mathematical approach, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 232(21), 3807-3813.
- Susac, F., Tabacaru, V., Teodor, V., Baroiu, N., (2019), Effect of cutting parameters on the hole quality in dry drilling of some thermoplastic polymers, *Materiale Plastice*, 56(1), 245-251.
- Baroiu, N., Costin, G.-A., Teodor, V. G., Nedelcu, D., Tabacaru, V., (2020), Prediction of surface roughness in drilling of polymers using a geometrical model and artificial neural networks, *Materiale Plastice*, 57(3), 160-173.



Seho Chun

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Keimyung College University. His research interest is precision machining.
E-mail: chunsh@kmcu.ac.kr

자율주행 차량의 고속 주행 안정성 향상을 위한 곡률 기반 경로 추종 제어 알고리즘 개발 및 검증

Development and Verification of Curvature-based Path Tracking Control Algorithm to Enhance High Speed Driving Stability in Autonomous Vehicles

김형규^{1,2}, 이명규², 김종탁², 김원균^{2,#}

Hyung Gyu Kim^{1,2}, Myeong Gyu Lee², Jong Tak Kim², and Won Gun Kim^{2,#}

¹ 전북대학교 대학원 전자정보공학부 (School of Electronic Information Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University)

² 한국생산기술연구원 특수목적로봇그룹 (Korea Institute of Industrial Technology Specialized Machinery and Robotics Group)

Corresponding Author / E-mail: wgk@kitech.re.kr, TEL: +82-2-123-4567

ORCID: 0000-0003-2607-2128

KEYWORDS: Autonomous vehicle (자율주행 차량), Path tracking (경로 추종), CARLA simulator (CARLA 시뮬레이터), Lateral distance error (횡방향 거리 오차), Heading angle error (방향 오차)

This study proposes a path-tracking algorithm based on feed-forward (preview distance control) and feedback (LQR, linear quadratic regulator) controllers to reduce heading angle errors and lateral distance errors between a predefined path and an autonomous vehicle. The main objective of path-tracking is to generate control commands to follow a predefined path. The feed-forward control is applied to solve heading angle errors and lateral distance errors in the trajectory caused by curvatures of the road by controlling the steering angle of the vehicle. An LQR was applied to decrease the errors caused by environmental and external disturbances. The proposed algorithm was verified by simulating the driving environment of an autonomous vehicle using a CARLA simulator. Safety and comfort were demonstrated using the test vehicle. The study also demonstrated that the tracking performance of the proposed algorithm exceeded that of other path-tracking algorithms, such as Pure Pursuit and the Stanley Method.

Manuscript received: January 31, 2024 / Revised: April 26, 2024 / Accepted: April 29, 2024
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2023

NOMENCLATURE

C_f	=	Cornering Stiffness of Front Wheel
C_r	=	Cornering Stiffness of Rear Wheel
L_f	=	Distance between Mass Center and Front Wheel Center
L_r	=	Distance between Mass Center and Rear Wheel Center
I_z	=	Vehicle Moment of Inertia
V_x	=	Target Speed
m	=	Vehicle Mass

1. Introduction

자율주행 기술과 시장이 확대됨에 따라 정확하고 안전하며, 편안한 주행 성능을 갖춘 자율주행 기술에 대한 필요성이 대두되고 있다. 자율주행 차량은 위치 파악 및 맵핑, 인지, 경로 생성 및 제어와 같은 많은 기술들을 포함하고 있다[1]. 그중 경로 추종의 목표는 생성된 경로를 따라 자율주행 차량을 안내하는 적절한 조향을 입력하여 차량이 미리 정의된 경로를 따라 움직일 수 있도록 차량에 제어 명령을 입력하는 것이다[2]. 경로 추종과 같은 제어 기술은 차량 모델링에 크게 의존하기 때문에 제어

설계 부분과 차량의 모델링이 일치하지 않으면 문제가 발생한다[3]. 이와 같은 문제로 인해 방향 오차와 횡방향 거리 오차의 수치가 증가하고 차선이탈, 차량 진동의 발생 및 다른 차량과 구조물 간 충돌 등 차량의 주행 불안정성을 증가시킨다. 자율주행 제어 알고리즘은 차량이 직진 구간에서 급격한 커브로 변경되는 도로 구간에서 주행 안정성이 급격하게 감소하며, 그 결과 충돌 등의 사고로 이어진다[4]. 동일한 구간에서 실제 운전자들의 경우 경로를 유지하며 전방 도로 상황을 확인하면서 적절한 조향 및 속력을 차량에 입력하며 안전하게 주행한다. 따라서 급격한 커브 구간이 존재하는 도로에서 자율주행은 실제 운전자들의 운전 성향이 고려된 주행 알고리즘으로 개발되어야 한다.

이처럼 자율주행 시스템에서 경로 추종을 위해 많은 알고리즘이 개발되었다. 그중 PID 제어는 오차를 기반으로 제어 신호를 생성하여 시스템을 원하는 상태로 만든다[5]. 자율주행에서 PID 제어는 주로 속도와 간단한 경로의 추종에 사용된다. 하지만, PID 제어는 급격한 방향 전환과 같은 복잡한 경로가 존재하는 경우에는 추종 성능이 떨어지게 된다[6]. 이러한 한계를 극복하기 위해 개발된 알고리즘 중 하나가 Pure Pursuit 알고리즘이다. 이 알고리즘은 차량이 추종해야 할 목표점을 설정하고, 이 목표점을 향해 차량을 이동시키는 방식으로 경로를 추종한다[7,8]. Pure Pursuit 알고리즘은 곡률이 존재하는 경로에서 부드럽게 추적이 가능하다는 장점이 있지만, 차량의 속도가 높아질수록 오차가 커지는 단점이 있다. 고속 경로 추종에서의 성능 문제로 인해 Stanley 알고리즘이 개발되었다. 이 알고리즘은 차량의 조향 각도를 직접 조절하여 오차를 최소화시키며[9,10], 고속 주행과 복잡한 경로 조건에서도 안정적인 성능을 보였다. 하지만, Stanley 알고리즘은 경로와 차량의 위치만을 기반으로 하기 때문에 외부 환경 변화나 차량의 동적 특성을 완벽하게 반영하기 어렵다는 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위해 LQR 알고리즘이 개발되었다. LQR 알고리즘은 시스템의 상태를 선형으로 모델링하고, 제어 입력을 통해 상태의 차이를 최소화하여 보다 정밀한 제어가 가능하다[11]. LQR은 동적 특성과 외부 환경 변화를 모두 고려할 수 있기 때문에 다양한 시나리오에서 우수한 성능을 보인다. 이러한 경로 추종 알고리즘의 효율성과 성능을 검증하기 위해 ROS 환경에서의 CARLA Simulator를 사용하는 연구들이 증가하고 있다[12-14].

본 논문에서는 자율주행 차량의 주행 안정성 향상을 위한 경로 추종 알고리즘을 제안하였다. 차량이 직진 구간을 지나 급격한 커브 구간을 통과할 때, 커브 구간의 곡률 정보와 실제 운전자들의 운전 성향과 같이 일정한 거리의 앞부분을 주시하며 주행하기 위한 Preview Distance를 적용해 Curvature-based Feed-forward Control을 구성했다. Curvature-based Feed-forward Control을 통해 급격한 커브 구간을 빠른 속도로 통과할 때, 전방의 도로 상황을 파악하고 차량에 조향을 미리 입력 및 제어할 수 있었다. 주행 안정성 향상을 위해 Feedback Control 중 선형 제어 이론을 기반으로 하는 LQR (Linear Quadratic Regulator)을 사용하였으며, Curvature-based Feed-forward Control과 Feedback (LQR) Control 출력 조향을 합산하여 자율주행 차량의

조향을 입력하였다. 제안한 경로 추종 알고리즘 검증을 위해 CARLA Simulator를 활용하였다. CARLA Simulator는 자율주행 연구를 위한 오픈소스 시뮬레이터이며, 다양한 도로환경과 교통 상황을 제공한다[15]. 사용자는 다양한 차량과 날씨를 선택하여 반복적으로 시뮬레이션을 진행할 수 있다. 이러한 기능은 자율주행 시스템의 성능과 동작을 평가하고 검증하는 데 유용하기 때문에 자동차 업계뿐만 아니라 다양한 회사와 학교 및 연구소에서 많이 사용되고 있다. 주행 경로는 CARLA Simulator에서 제공하는 맵을 사용하였으며, 완만한 커브 구간 및 급격한 커브 구간 주행을 위해 맵의 Waypoint를 사용하여 참조 경로를 생성하였다. 해당 참조 경로를 계수화하여 실제 경로로 사용하였다. CARLA Simulator의 차량 모델과 제어 알고리즘의 동역학 모델에 대한 검증을 위해 동일한 조향을 입력하였으며, 두 모델의 Side Slip Angle (β)과 Yaw-rate ($\dot{\gamma}$)를 비교하는 과정을 진행하였다. 경로 추종 실험은 다양한 속력 및 곡률의 크기에 대한 방향 오차 및 횡방향 거리 오차의 수치가 최솟값으로 출력되는 최적의 가중치 행렬 Q와 상수 R 및 Preview Distance 값을 도출하기 위해 해당 값들을 조정하며 실험을 진행하였다. 오차의 최솟값 확인을 위해 RMS (Root Mean Square)를 사용하여 최적의 가중치 행렬 Q와 상수 R 및 Preview Distance에 대한 평균 오차를 구하였다. 해당 값을 적용하여 실험을 진행하였으며, 그 결과 알고리즘의 성능 및 차량의 주행 안정성을 확인할 수 있었다. 또한 Pure Pursuit과 Stanley Method를 동일한 환경에서 실험을 진행하였으며, 본 논문에서 제안하는 알고리즘과 타 추종 알고리즘을 비교하였을 때, 안정성 및 추적 성능이 높다는 것을 확인하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 경로 추종을 위한 차량 동역학 모델에 대해 설명한다. 3장에서는 횡방향 제어 알고리즘에 대해 설명하고, 4장에서는 시뮬레이션 실험 결과를 보여준다. 그런 다음 제안된 알고리즘의 요약 및 향후 연구를 설명하는 결론을 5장에서 다룬다.

2. State Space Model of Vehicle and Validation

2.1 Vehicle Dynamics based Error Model

Fig. 1은 차량의 측면 동역학 모델을 나타낸다. 차량의 측면 동역학 모델은 차량의 중앙 경로와 함께 Bicycle Model과 오류 동역학 방정식을 결합하여 설계되었다[16]. Bicycle Model의 측면 동역학 모델은 Newton-euler 운동 방정식으로 무게 중심에서의 힘과 모멘트를 합산하여 아래와 같은 식(1)과 식(2)으로 표현된다.

$$m a_y = F_{yf} + F_{yr} \quad (1)$$

$$I_z \dot{\gamma} = L_f F_{yf} - L_r F_{yr} \quad (2)$$

여기서 a_y 는 차체 고정 좌표로 분해된 관성 기준 프레임에 대한 차량의 횡가속도이며, $\dot{\gamma}$ 은 차량의 요각의 시간에 대한 미분이다. a_y 는 아래와 같은 식(3)으로 표현된다.

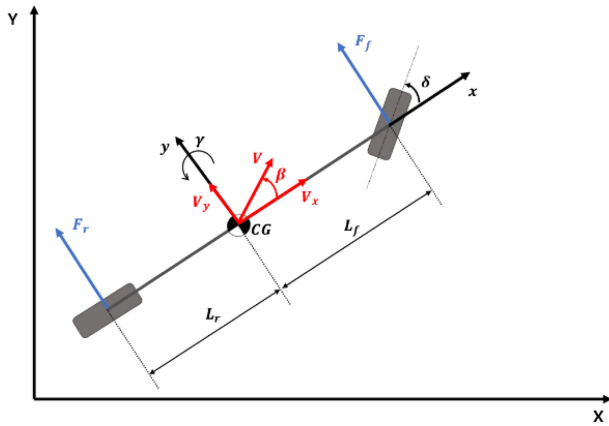


Fig. 1 Lateral bicycle model of the vehicle for lateral dynamics

$$a_y = \dot{V}_y + \dot{V}_x \gamma = V_x (\dot{\beta} + \gamma) \quad (3)$$

여기서, V_x 와 V_y 는 각각 차량의 중심점에서 차량의 종방향 및 횡방향 속력을 의미하며, \dot{V}_x 와 \dot{V}_y 는 차량의 종방향 및 횡방향 가속도를 의미한다. $\dot{\beta}$ 는 차량의 측면 슬립각의 변화율, F_{yf} 및 F_{yr} 은 전방 후방 타이어의 횡방향 힘을 의미한다. 전방 및 후방 타이어의 횡방향 타이어 힘은 아래 식(4)와 식(5)로 표현된다.

$$F_{yf} = 2C_f(\delta - \theta_{vf}) \quad (4)$$

$$F_{yr} = 2C_r(-\theta_{vr}) \quad (5)$$

여기서 θ_{vf} 및 θ_{vr} 은 전방 및 후방 타이어의 차체 측면 Slip Angle이며, δ 는 차량의 입력 조향이다. θ_{vf} 및 θ_{vr} 은 다음 식(6)과 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{vf} = \frac{\beta + L_f \gamma}{V_x} \quad (6)$$

$$\theta_{vr} = \frac{\beta - L_r \gamma}{V_x} \quad (7)$$

식(4)부터 식(7)을 식(1)과 식(2)에 대입하면 횡방향 모델의 경로 추종에 대한 상태 공간 모델을 생성할 수 있다. 자율주행 차량이 실시간으로 경로 추종을 진행할 때, 참조 경로와 차량의 위치에 대한 방향 오차 및 횡방향 거리 오차가 발생하게 된다[17]. 본 논문에서 제안하는 경로 추종 알고리즘에서는 위 두 가지에 대한 오차를 최소화하여 차량이 참조 경로를 실시간으로 안전하게 주행할 수 있도록 한다. 방향 오차 및 횡방향 거리 오차는 차량의 무게 중심과 참조 경로 사이의 거리 및 방향 오차로 정의한다. 아래 Fig. 2는 경로 추종의 Error Model을 나타내며, 식(8)과 식(9)를 통해 방향 오차 및 횡방향 거리 오차를 나타냈다[18].

$$e_0 = \sqrt{(x - x_{near})^2 + (y - y_{near})^2} \quad (8)$$

$$e_2 = (\theta - \theta_{ref}) \quad (9)$$

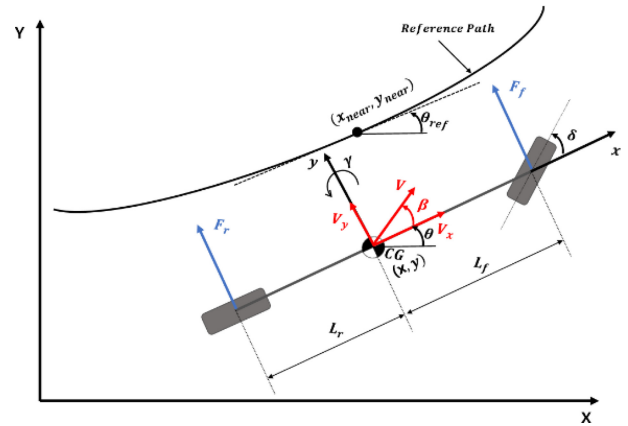


Fig. 2 Path tracking error model

식(8)과 식(9)를 토대로 Error State에 대한 상태벡터를 식(10)을 통해 나타냈다.

$$e = (e_0, e_1, e_2, e_3) \quad (10)$$

여기서 e_0 는 참조 경로와 차량 무게 중심 사이의 거리이며, e_1 는 측면 거리 오차의 변화량, e_2 는 차량의 방향과 참조 경로의 탄젠트 기울기 오차이며, e_3 는 방향 오차의 변화량이다. 또한, θ_{ref} 는 차량과 가장 가까운 참조 경로의 탄젠트 기울기를 의미하며, (x_{near}, y_{near}) 는 차량과 가장 가까운 Waypoint 좌표를 나타낸다. 방향 오차 및 횡방향 거리 오차에 대한 차량의 측면 상태 공간 모델은 식(11)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2C_f + 2C_r}{mV_x} & \frac{2C_f + 2C_r}{m} & \frac{-2CL_f + 2CL_r}{mV_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2CL_f - 2CL_r}{I_z V_x} & \frac{2CL_f - 2CL_r}{I_z} & \frac{-2CL_f^2 + 2CL_r^2}{I_z V_x} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{2C_f}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_f L_f}{I_z} \end{pmatrix} \delta + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{-2CL_f - 2CL_r}{mV_x} - V_x \\ 0 \\ \frac{2CL_f^2 + 2CL_r^2}{I_z V_x} \end{pmatrix} \dot{\gamma}_{def} \quad (11)$$

식(11)의 $\dot{\gamma}_{def}$ 는 곡률 반경에 따라 결정되는 Yaw-rate이다.

2.2 Model Validation

본 논문에서 제안하는 알고리즘 검증을 진행 전에 CARLA

Table 1 Main vehicle parameters

Definition symbol	Value [unit]
m	1,800 [kg]
I_z	2,800 [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
C_f, C_r	55,000 [$\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$]
L_f	1.15 [m]
L_r	1.55 [m]

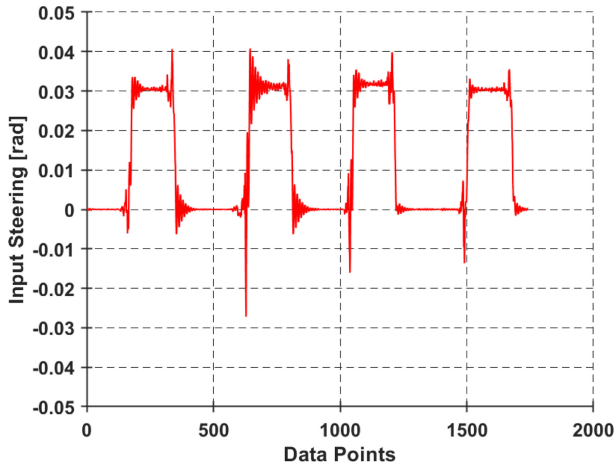


Fig. 3 Input steering angle

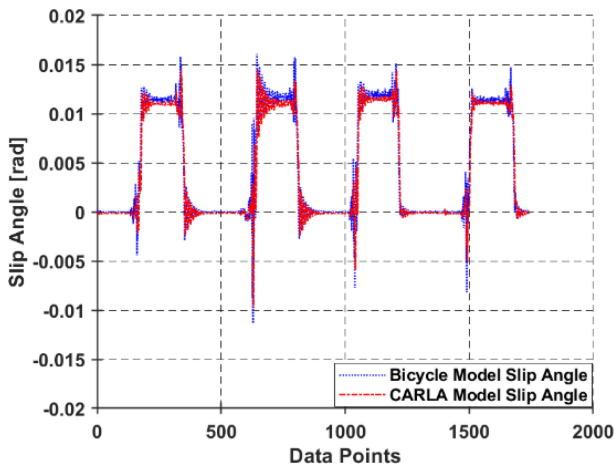


Fig. 4 Compare side slip angle for validation

Simulator의 차량 모델과 제어 알고리즘의 동역학 모델에 대한 검증은 진행하였다. 검증 방법으로 상태 공간 모델을 만들어 동일한 조향을 입력하여 두 모델의 β 과 γ 를 비교하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2C_f+2C_r}{mV_x} & -1 + \frac{-2C_fL_f+2C_rL_r}{mV_x} \\ \frac{-2C_fL_f+2C_rL_r}{I_z} & \frac{2C_fL_f^2+2C_rL_r^2}{I_zV_x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{2C_f}{mV_x} \\ \frac{2C_fL_f}{I_z} \end{pmatrix} \delta \quad (12)$$

CARLA Simulator의 차량 모델의 경우, β 과 γ 은 차량에 장착된 GPS와 IMU 센서를 통해 측정하였으며, 아래 Figs. 3-5를 통해 나타

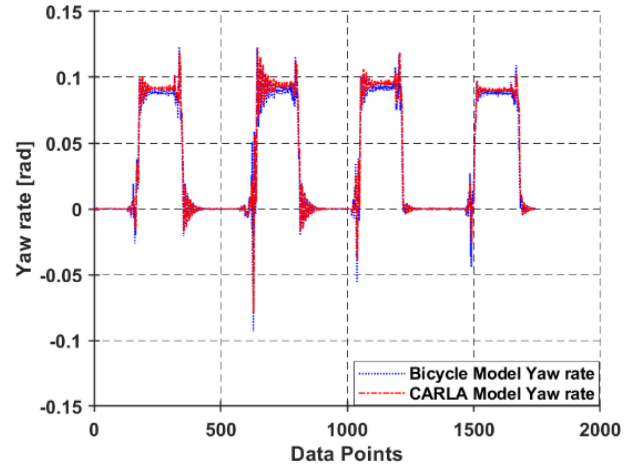


Fig. 5 Compare yaw rate for validation

냈다. Table 1은 CARLA Simulator 차량의 파라미터를 나타냈다.

Figs. 3-5는 각각 CARLA Simulator의 차량 모델과 제어 알고리즘의 동역학 모델을 비교하기 위한 차량의 입력 조향 δ 및 β 과 γ 을 나타낸다. Figs. 4, 5와 같이 CARLA Simulator 차량 모델과 제어 알고리즘의 동역학 모델을 비교하였을 때, 동일한 조향에 대해 β 과 γ 이 근사한 값이 출력이 되는 것을 확인할 수 있다.

3. Lateral Control System

3.1 Feedback (LQR) Control

본 연구에서는 Feedback Control 중 선형 제어 입력을 기반으로 하는 LQR Control을 사용하였다. 자율주행 차량이 급격한 커브 구간을 주행할 때, 정상 상태 추적 오차를 해결할 수 있으며 정상 상태 오차가 0으로 수렴하는 경우가 존재하기 때문에 경로 추종의 성능을 크게 향상시킬 수 있다[19]. 식(11)과 같이 연속 선형 시스템은 아래와 같은 식(13)으로 표현된다.

$$\dot{e} = Ae + Bu + Cp \quad (13)$$

여기서 e 는 상태 벡터, u 는 입력 벡터, p 는 도로의 곡률을 의미하며, A 는 상태 변환 행렬, B 는 입력 변환 행렬, C 는 환경 외란을 의미한다. 최적화의 목표 함수는 다음과 같이 가중치의 합으로 표현될 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (14)$$

여기서 Q 는 4×4 상태 가중치 행렬, R 는 상수이며, 각각 Q 와 R 은 아래와 같이 일반적으로 대각 행렬로 표현된다[20].

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$R = r \tag{16}$$

Error State의 변수들을 고려하여 q_{11} 과 q_{33} 에 대한 제어를 적용하였다. 이는 q_{22} 와 q_{44} 의 값이 제어 성능 향상에 크게 영향을 주지 않기 때문이다. 비용함수는 식(14)에 정의되어 있으며, 식(17)를 통해 최소 비용함수를 나타냈다.

$$u = -Ke \tag{17}$$

여기서 u 는 Feedback (LQR) Control 조향 δ_{fb} 이다. 또한, 피드백 게인 K 는 식(18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = R^{-1}B^TP \tag{18}$$

행렬 P 는 Riccati 함수 방정식을 통해 계산되며, Riccati 공식은 아래 식(19)와 같이 표현할 수 있다.

$$A^TP + PA - PBR^{-1}B^TS + Q = 0 \tag{19}$$

여기서 행렬 A 와 B 는 식(11)과 식(13)를 통해 확인할 수 있다. Feedback (LQR) Control은 식(18)과 식(19)에 따라 Feedback Gain K 의 값을 구하도록 적절한 가중치 행렬 Q 와 상수 R 를 선택하여 경로 추종 성능을 향상시킬 수 있다.

3.2 Curvature-based Feed-forward Control

3.2.1 Preview Distance

지울주행 차량이 직진 구간을 지나 급격한 커브 구간을 진입하기 전에 전방 도로 상황을 알고 커브 구간의 곡률에 대한 적절한 조향을 차량에 인가하는 것이 중요하다. 차량 속력이 저속일 때 Preview Distance를 고려하지 않고 주행을 해도 크게 문제가 되지 않지만, 고속에서 Preview Distance를 전혀 고려하지 않고 선회할 경우, 급격한 오차의 증가로 순간적으로 큰 조향이 차량에 인가되기 때문에 위험한 상황이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 실제 운전자의 차량 제어의 원리를 적용하기 위해 차량 속력에 대한 Preview Distance를 사용하였다. Fig. 6은 식(20)의 결과 그래프이다. 즉, 차량의 속력 V_x 에 대해 Preview Distance의 값을 알 수 있다. 이는 주행 실험을 통해 방향 오차 및 횡방향 거리 오차가 최소값으로 출력되는 Preview Distance의 값을 도출하여 차량 속력에 대한 2차 방정식으로 유도하였다.

$$\text{Preview Distance} \approx 0.0015V_x^2 - 0.081V_x + 1.67 \tag{20}$$

본 논문에서 사용되는 Preview Distance의 개념이 Pure Pursuit 알고리즘의 Look-ahead Distance와 같이 일정거리의 전방을 주시하는 개념은 동일하지만 세부적으로는 다른 내용이 존재한다. Pure Pursuit의 Look-ahead Distance 개념의 경우 오로지 목표점을 추적하는 데 사용되지만, 본 논문에서 언급하는 Preview Distance의 경우에는 차량의 현재 위치와 미래의 도로 정보를 먼저 파악하여 경로의 변화에 과도하게 반응하지 않고 미리 대응할 수 있도록 Curvature-based Feed-forward 방식을 설계하였다. 이에 대한 내용은 아래의 Fig. 7에 나타났다.

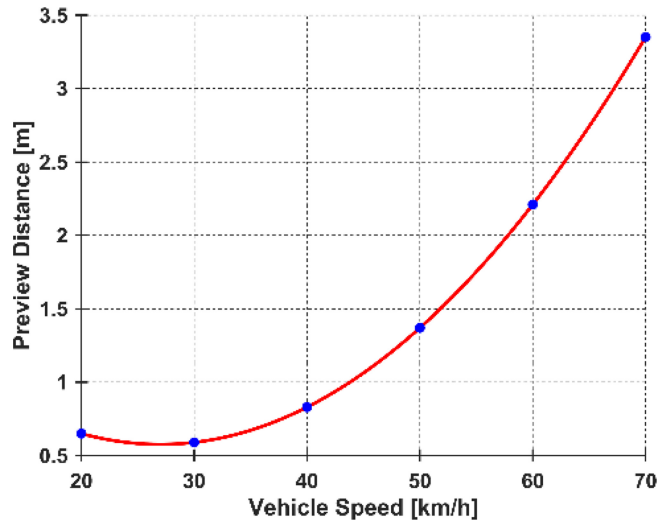


Fig. 6 Preview distance for vehicle speed

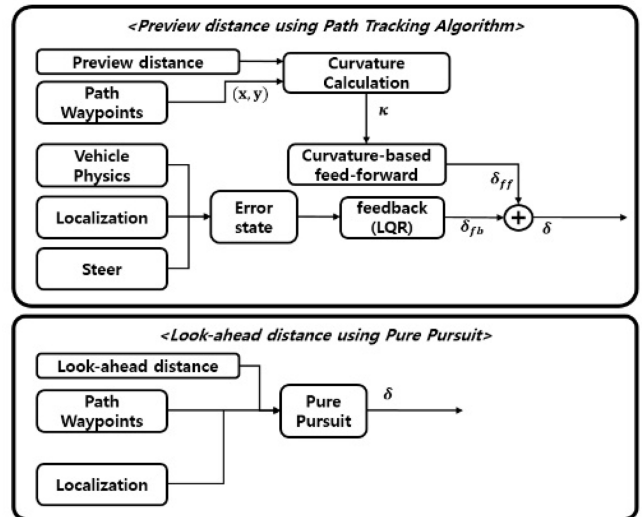


Fig. 7 Comparison of preview distance and look-ahead distance

3.2.2 Curvature Calculation

곡률은 직선 혹은 곡면이 휘어진 정도를 의미한다. 본 논문에서는 곡률을 구하기 위해 차량과 가장 가까운 Waypoint와 Preview Distance의 길이에 존재하는 Waypoint를 사용하여 곡률 κ 를 구하였다. Fig. 8는 경로상의 곡률을 나타낸다.

여기서 곡률 κ 는 아래 식(21)과 같이 구할 수 있다.

$$\kappa = f((x_{pre})', (y_{pre})') = \frac{|(y_{pre})''(x_{pre})' - (x_{pre})''(y_{pre})'|}{\{(x_{pre})'^2 + (y_{pre})'^2\}^{1.5}} \tag{21}$$

곡률 κ 가 0에 가까운 값을 나타내는 경우는 휘어진 정도가 거의 없는, 즉 직선 구간임을 의미한다. 또한 x_{pre}' 와 y_{pre}' , x_{pre}'' 와 y_{pre}'' 는 참조 경로의 Waypoint (x, y) 를 최소 제곱법을 이용하여 아래 식(22)와 같이 4차 다항식의 형태로 나타낼 수 있다.

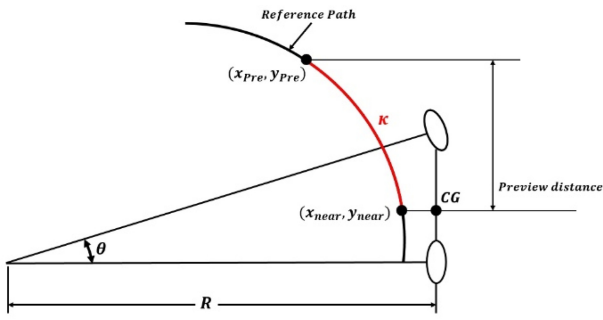


Fig. 8 Curvature on reference path

$$x_{pre} = ax\sigma^4 + bx\sigma^3 + cx\sigma^2 + dx\sigma + ex$$

$$y_{pre} = ay\sigma^4 + by\sigma^3 + cy\sigma^2 + dy\sigma + ey$$

$$x_{pre}' = 4ax\sigma^3 + 3bx\sigma^2 + 2cx\sigma + dx$$

$$y_{pre}' = 4ay\sigma^3 + 3by\sigma^2 + 2cy\sigma + dy$$

$$x_{pre}'' = 12ax\sigma^2 + 6bx\sigma + 2cx$$

$$y_{pre}'' = 12ay\sigma^2 + 6by\sigma + 2cy$$

여기서 ax, bx, cx, dx, ex 와 ay, by, cy, dy, ey 는 Waypoint (x, y) 에 대한 다항식의 계수를 의미하며, σ 는 0에서 1까지의 값을 가질 수 있는 매개변수의 형태로 본 논문에서는 차량의 실시간 위치와 참조 경로에 대한 Preview Distance를 사용하여 구하였다. 식(21)의 계산은 식(22)을 미분하여 구할 수 있다. 이러한 과정은 매개변수 σ 의 값에 의해 Waypoint (x, y) 가 계산되며, 이는 참조 경로를 반복적으로 계산하여 연속적이고 부드러운 경로를 형성할 수 있다.

3.2.3 Ackermann Steering

Bicycle Model에서는 왼쪽 및 오른쪽 바퀴를 하나의 바퀴로 가정한다[21]. 이는 실제로 왼쪽 및 오른쪽 바퀴의 조향이 같다는 가정이지만, 정확하게 일치하지 않는다. 이는 왼쪽 및 오른쪽 바퀴가 이동하는 경로의 반경이 다르기 때문이다[22]. 또한 차량의 속력이 저속일 경우에는 타이어 횡력을 발생시킬 필요가 없으며, 아래 Fig. 9과 같이 선회해야 한다. Fig. 11은 전륜 차량의 이상적인 선회를 나타낸 차량의 기하학적 구조를 나타낸다.

Fig. 9에서 δ_o 와 δ_i 는 각각 바깥쪽 및 안쪽 바퀴 조향, l_w 는 차량의 너비, L 은 차량의 Wheelbase를 나타내며, R 은 무게 중심점과 선회 중심점의 거리, 즉 곡률 반경을 의미한다. 여기서 곡률 반경 R 은 곡률 κ 의 역수이다. 또한 Wheelbase L 은 곡률 반경 R 보다 작아야 한다. 위와 같은 조건을 만족하는 기하학적 차량의 각 바퀴에 대한 서로 다른 조향은 아래와 같이 표현할 수 있다.

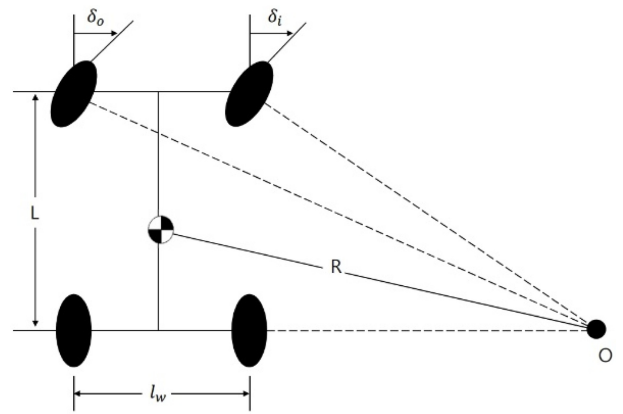


Fig. 9 Geometry of a turning vehicle

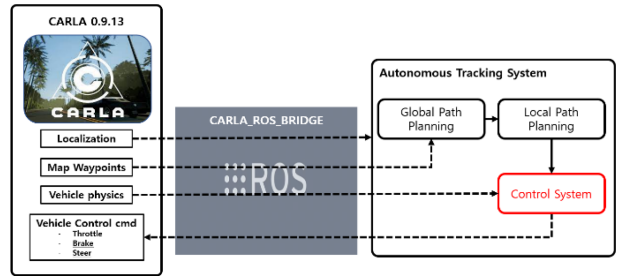


Fig. 10 Overall system architecture

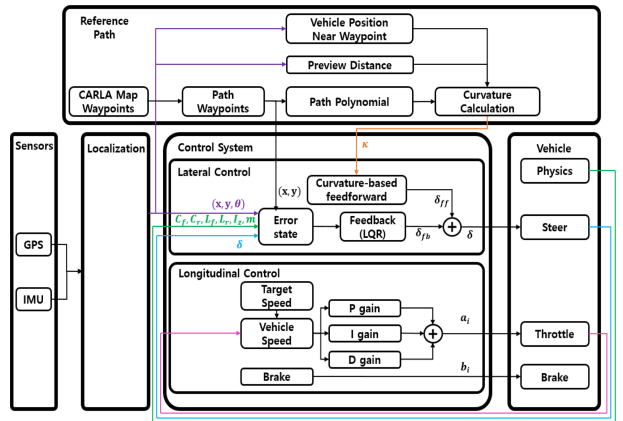


Fig. 11 Control system architecture of the proposed algorithm

$$\delta_o = \frac{L}{\left(R + \frac{l_w}{2}\right)} \tag{23}$$

$$\delta_i = \frac{L}{\left(R - \frac{l_w}{2}\right)} \tag{24}$$

무게 중심점의 조향을 δ_{ff} 라고 표현하고, δ_{ff} 이 바깥쪽 및 안쪽 조향의 평균이라 하면, δ_{ff} 는 식(25)와 같이 나타낼 수 있다[23].

$$\delta_{ff} = \frac{\delta_o + \delta_i}{2} = \frac{LR}{R^2 - \frac{l_w^2}{4}} \cong \frac{L}{R} \tag{25}$$

결론적으로 자율주행 차량의 입력 조향 δ 는 식(26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta = \delta_{ff} + \delta_{fb} \tag{26}$$

4. Simulation

4.1 CARLA Simulator

ROS 환경의 Ubuntu 20.04 OS에서 CARLA Simulator 및 CARLA ROS Bridge 0.9.13 버전을 사용하여 논문에서 제안하는 경로 추종 알고리즘 개발 및 검증을 진행하였다. CARLA ROS Bridge를 사용하여 CARLA Simulator와 ROS 간의 양방향 통신을 가능하게 하였다.

Fig. 10은 연구의 전체 시스템의 개략도를 나타낸다. CARLA ROS Bridge를 통해 CARLA Simulator에서 제공하는 차량의 파라미터, 맵 Waypoint 및 각종 센서 데이터를 경로 추종 알고리즘에 전송하며, 전송된 데이터를 바탕으로 차량을 제어하게 된다.

4.2 Control System Architecture

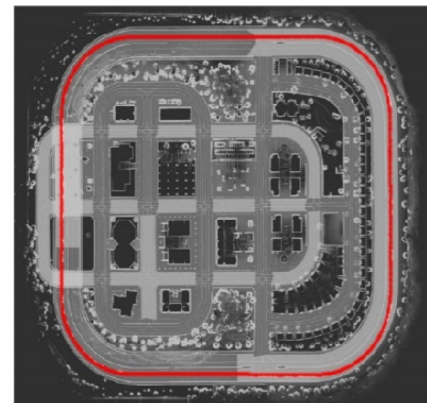
Fig. 11은 논문에서 제안하는 경로 추종 알고리즘의 개략도를 나타낸다. CARLA Simulator 맵의 Waypoint와 차량의 위치 정보를 이용하여 참조 경로에서의 곡률의 크기를 구할 수 있다. 또한, 가중치 행렬 Q와 상수 R 및 Preview Distance의 값을 도출한 뒤 Feedback (LQR) Control과 Curvature-based Feed-forward Control의 합산 조향을 차량에 입력하였다.

4.3 Simulation Method

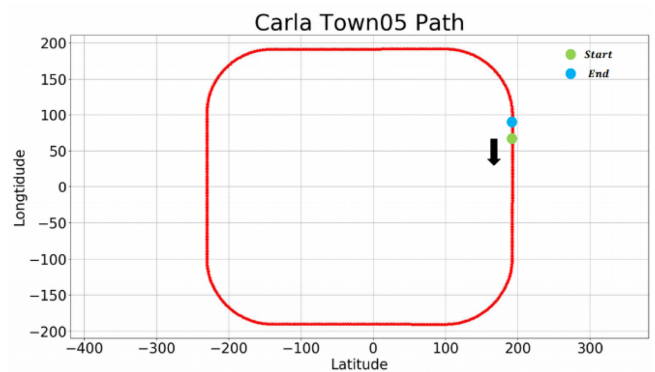
본 논문에서 제안하는 경로 추종 알고리즘의 검증을 위해, CARLA Simulator를 사용하여 Town04와 Town05 맵에서 실험을 진행하였다. 실험에서는 맵의 외각 및 내부 Waypoint를 추출하여 참조 경로를 생성했다. 차량의 다양한 속력과 도로 곡률에 따라 방향 오차 및 횡방향 거리 오차의 RMS 값을 최소화하는 최적의 가중치 행렬Q, 상수R, 그리고 Preview Distance 값을 도출하기 위해 이러한 값들을 조정하면서 실험을 반복적으로 수행했다. 이 과정은 직진 구간에서 방향 오차 및 횡방향 거리 오차가 0으로 수렴한다는 가정하에 이루어졌으며, 오차의 수치는 RMS로 측정되었고, 이는 식(27)과 같다.

$$rms = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2/n} \tag{27}$$

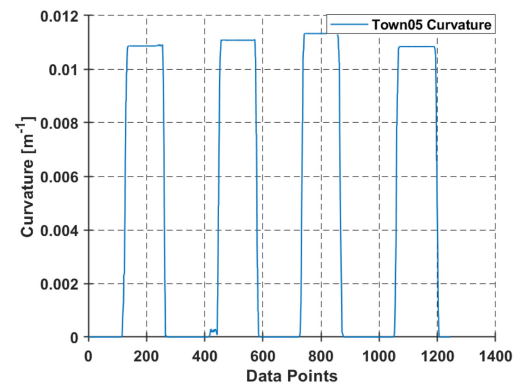
또한, 본 논문에서 제안하는 경로 추종 알고리즘의 추가 검증을 위해 다른 추종 알고리즘인 Pure Pursuit (PP)과 Stanley Method, LQR과 비교 실험을 진행하였다. PP, Stanley, LQR, LQR+feed-forward (FF) Control을 비교하여 다른 알고리즘들에 비해 안정성과 추종 성능이 향상됨을 확인하였다.



(a) Original CARLA Town05 map



(b) Global path at CARLA Town05



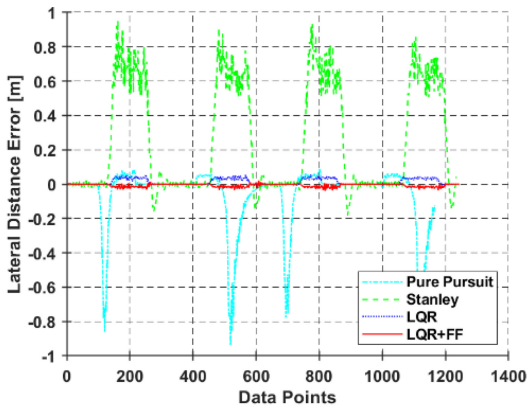
(c) Town05 curvature

Fig. 12 Creation of a driving path using waypoints in CARLA Town05

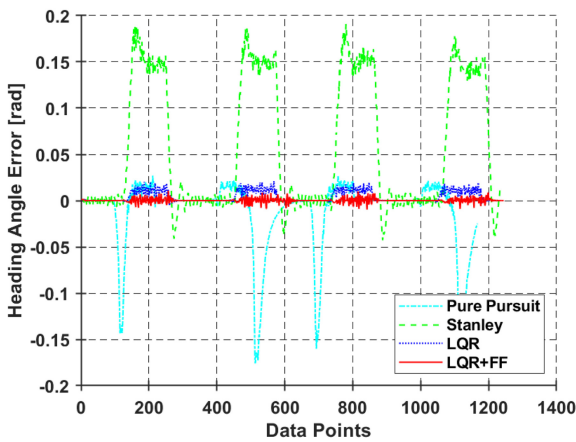
4.4 첫 번째 시뮬레이션

첫 번째 시뮬레이션에서는 Town05 맵의 외각을 따라 주행하는 실험을 진행하였으며, Fig. 12는 첫 번째 시뮬레이션에서 사용된 참조 경로를 보여준다. 이 참조 경로는 외각 지역을 제외한 모든 Waypoint를 필터링하여 제거한 결과이다. 해당 참조 경로에서의 실험 결과는 Figs. 13과 14 및 Tables 2와 3에서 확인할 수 있다.

Fig. 13은 Town05 맵에서 차량 속도 30 kph에 대한 방향 오차 및 횡방향 거리 오차를 보여준다. Figs. 13(a)와 13(b)를



(a) Lateral distance error for path tracking algorithm at 30 kph



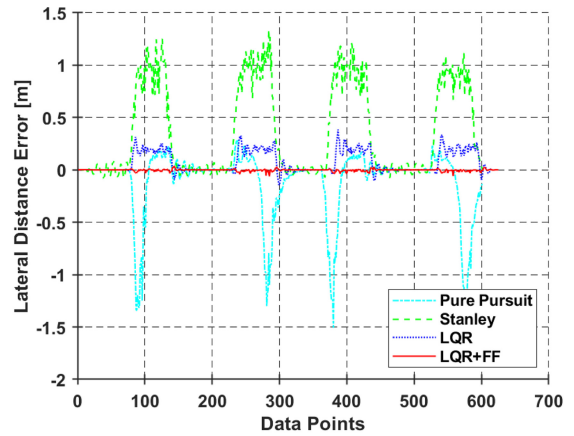
(b) Heading angle error for path tracking algorithm at 30 kph

Fig. 13 Heading & lateral distance error with steering at a vehicle speed of 30 kph in Town05

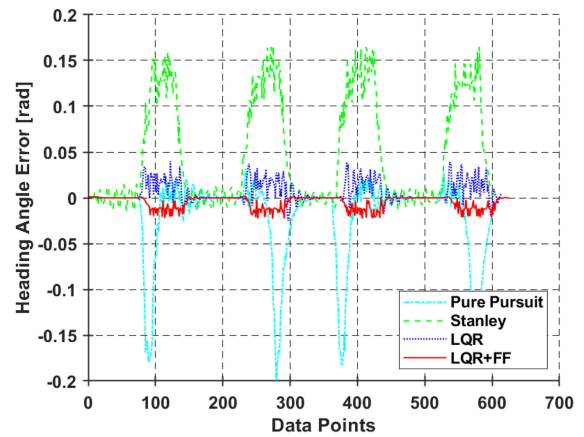
Table 2 Heading & lateral distance error RMS at vehicle speed of 30 kph in Town05

	Lateral distance	Heading angle
30 kph (PP)	0.197 [m]	0.042 [rad] 2.406 [deg]
30 kph (Stanley)	0.412 [m]	0.091 [rad] 5.213 [deg]
30 kph (δ_{fb})	0.021 [m]	0.007 [rad] 0.401 [deg]
30 kph ($\delta_{fb} + \delta_{ff}$)	0.011 [m]	0.002 [rad] 0.114[deg]

통해 다른 추종 알고리즘에 비해 논문에서 제안하는 알고리즘의 추종 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 이는 차량이 참조 경로를 추종하는 데 있어 Feedback Control과 Feed-forward Control의 결합이 경로 추종에 더욱 효과적이라 할 수 있다. Fig. 13의 y축은 참조 경로를 기준으로 한 차량의 좌측 및 우측 거리와 방향오차를 나타내며, 차량이 선회하는 동안 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 13의 내용에서 PP와 Stanley Method는 선회 구간에서 LQR 및 LQR+FF에 비해 추종 성능이



(a) Lateral distance error for path tracking algorithm at 60 kph



(b) Heading angle error for path tracking algorithm at 60 kph

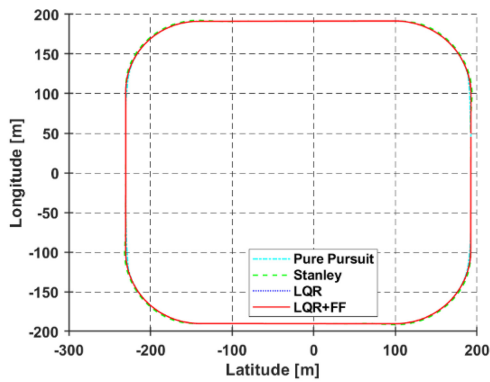
Fig. 14 Heading & lateral distance error with steering at a vehicle speed of 60 kph in Town05

Table 3 Heading & lateral distance error RMS at vehicle speed of 60 kph in Town05

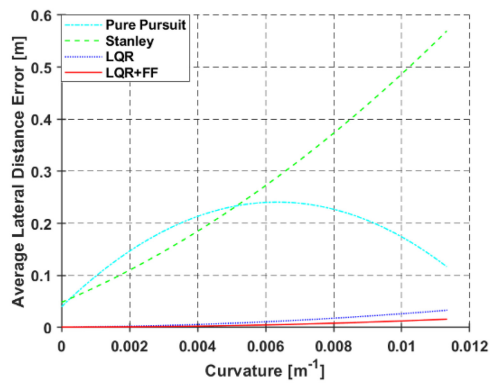
	Lateral distance	Heading angle
60 kph (PP)	0.351 [m]	0.051 [rad] 2.922 [deg]
60 kph (Stanley)	0.576 [m]	0.076 [rad] 4.354 [deg]
60 kph (δ_{fb})	0.128 [m]	0.012 [rad] 0.687 [deg]
60 kph ($\delta_{fb} + \delta_{ff}$)	0.01 [m]	0.008 [rad] 0.458 [deg]

많이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. Figs. 13(a)과 13(b)에 대한 RMS는 Table 2를 통해 나타냈다.

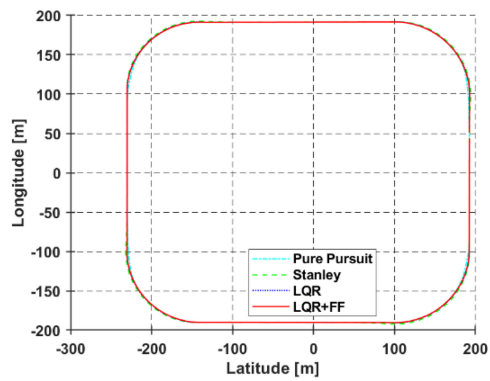
Fig. 14는 Town05 맵에서 차량이 60 kph의 속력으로 주행할 때의 방향 오차 및 횡방향 거리 오차를 보여준다. Fig. 13과 마찬가지로, 논문에서 제안하는 경로 추종 알고리즘이 가장 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. Table 3을 통해 횡방향 거리 오차가 Table 2에 비해 크게 상승한 그 이유는 선회 구간에서 차량의 속력을 줄이지 않고 정속 주행을 진행한 결과이며, 선회



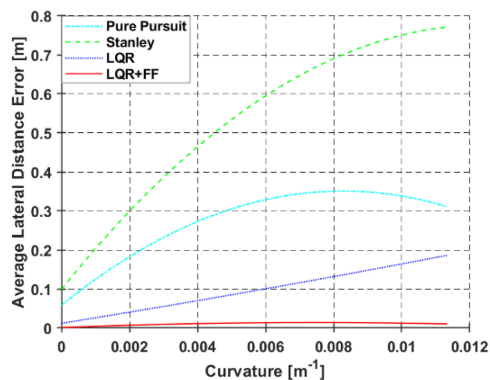
(a) Odometry of the path tracking algorithm at 30 kph



(b) Lateral distance error at 30 kph over road curvature in Town05



(c) Odometry of the path tracking algorithm at 60 kph



(d) Lateral distance error at 60 kph over road curvature in Town05

Fig. 15 Odometry of the path tracking algorithm and heading & lateral distance error at 30 & 60 kph over curvature in Town05

구간 진입 전 차량의 속력을 줄일 경우 오차가 크게 감소할 것으로 예상된다.

Figs. 15(a)와 15(c)는 Town05 맵 에서 30 kph와 60 kph의 경로 추정의 Odometry값을 보여준다. 직선 구간에서는 크게 차이가 없지만, 선회 구간에서 조금씩 차이가 발생한다. Figs. 15(b)와 15(d)는 각 차량 속력에서 Town05 맵 곡률 크기에 따른 횡방향 거리 오차를 나타낸다. 30 kph 속력에서 PP방식을 사용한 차량은 선회 초기에 참조 경로에서 벗어났지만, 점차 오차가 줄어들었다. 반면 Stanley 방식을 사용할 때는 차량이 선회하는 동안 참조 경로를 크게 이탈하는 것을 확인할 수 있었다. LQR과 LQR+FF의 경우에는 30 kph에서는 두 알고리즘 모두 크게 차이가 없지만, 60 kph에서는 차량이 선회하는 동안 LQR 알고리즘의 오차가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 논문에서 제안된 추종 알고리즘이 Town05 맵의 해당 곡률에서 가장 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

4.5 두 번째 시뮬레이션

CARLA Town05 맵에서 경로 추종 알고리즘에 대한 추가 검증 을 위해 CARLA Town04 맵에서 두 번째 시뮬레이션을 진행 하였다. Fig. 16은 추가 검증 실험을 진행하기 위해 Fig. 12과 같이 해당 맵의 참조 경로를 생성한 결과이다. 차량의 속력에 대한 가중치 행렬 Q와 R 및 Preview Distance는 CARLA Town05 맵에서의 실험과 동일하게 적용하였으며, 동일하게 타 추종 알고리즘인 PP와 Stanley Method, LQR을 사용한 실험도 추가하였다. 결과는 아래 Figs. 17과 18 및 Tables 4와 5에서 확인할 수 있다.

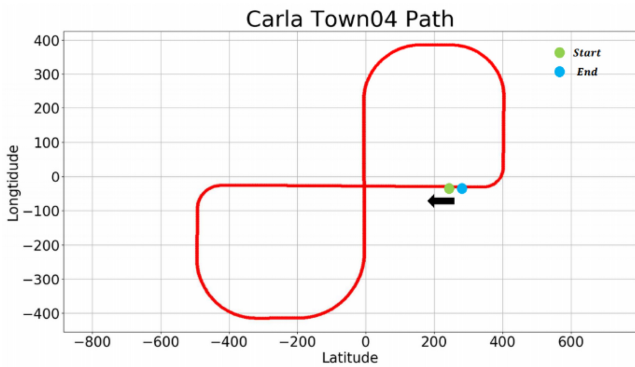
Fig. 17는 CARLA Town04 맵에서 차량의 속력이 30 kph일 때, 방향 오차 및 횡방향 거리 오차를 나타낸다. Town04 맵은 Town05 맵과 다르게 도로 곡률의 크기가 다양하며, 좌회전과 우회전이 모두 포함되어 있다. 이 맵에서는 총 6개의 곡률이 존재하며, 전방 3개는 좌회전, 후방 3개는 우회전 경로이다. 실험 결과, Town05에서와 마찬가지로 본 논문에서 제안하는 경로 추종 알고리즘의 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. Fig. 17에 대한 RMS는 Table 4를 통해 나타났다.

Figs. 18은 17과 같이 CARLA Town04 맵에서 차량의 속력 60 kph일 때, 방향 오차 및 횡방향 거리 오차를 나타낸다. Fig. 14와 같이 차량이 고속 주행 중 선회 구간에서 차량의 속력을 줄이지 않고 주행을 한다면 횡방향 거리 오차가 크게 증가한다. 방향 오차의 경우에는 선회 구간을 진입하기 전과 후에 방향이 크게 틀어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 18에 대한 RMS는 Table 5를 통해 나타났다.

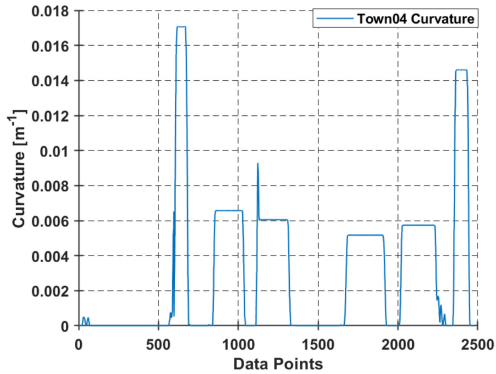
Figs. 19(a)와 19(c)는 Town04 맵 에서 30와 60 kph의 경로 추정의 Odometry 값을 나타낸다. Fig. 15와 같이 직선 구간에서는 크게 차이가 없지만, 선회 구간에서 조금씩 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Figs. 19(b)와 19(d)는 Town04 맵의 곡률의 크기에 따른 횡방향 거리 오차를 나타낸다. Town05와 마찬가지로 Town04에서도 추종 알고리즘의 성능이 비슷한 결과를 나타낸다.



(a) Original CARLA Town04 map



(b) Global path at CARLA Town04



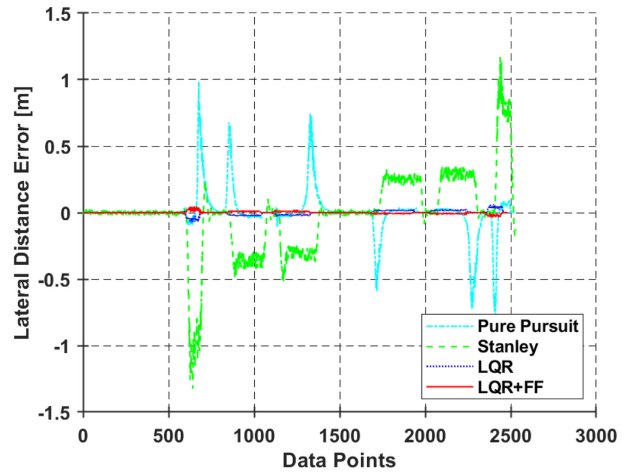
(c) Town04 Curvature

Fig. 16 Creation of a driving path using waypoints in CARLA Town04

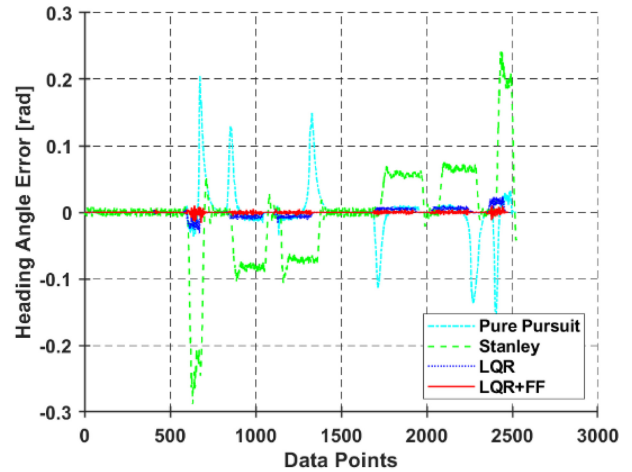
4.6 세 번째 시뮬레이션

Fig. 20은 다양한 곡률의 크기에 따른 차량 속도의 제한을 걸어 경로 추종 검증을 진행하였다. 4.4장과 4.5장에서는 동일한 속력, 크게 다르지 않은 곡률의 크기에서 경로 추종을 검증하는 과정을 진행하였으나, 실제 도로에서는 곡률의 크기가 다양하게 분포되어 있기 때문에 세 번째 시뮬레이션으로 CARLA Town05 맵의 내부 공간을 주행할 수 있는 참조 경로를 생성하였다. Fig. 20에 대한 곡률의 크기와 그에 따른 차량의 속력 변화 및 차량의 입력 조항은 아래 Fig. 21을 통해 나타났다.

Figs. 21(a)와 21(b)의 내용을 통해 아래 Table 6을 작성하였다.



(a) Lateral distance error for path tracking algorithm at 30 kph



(b) Heading angle error for path tracking algorithm at 30 kph

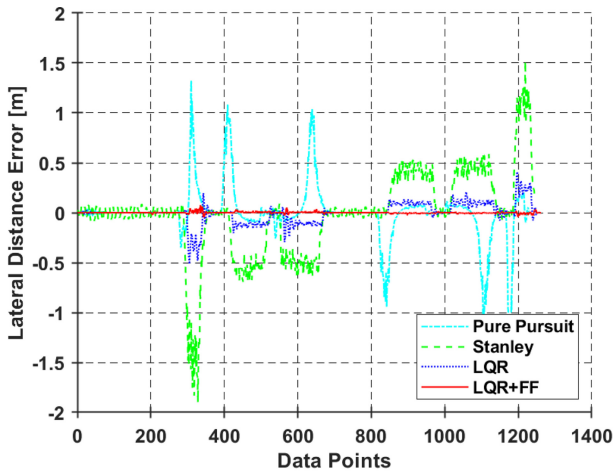
Fig. 17 Heading & lateral distance error with steering at a vehicle speed of 30 kph in Town04

Table 4 Lateral distance error and heading angle error RMS at vehicle speed of 30 kph in Town04

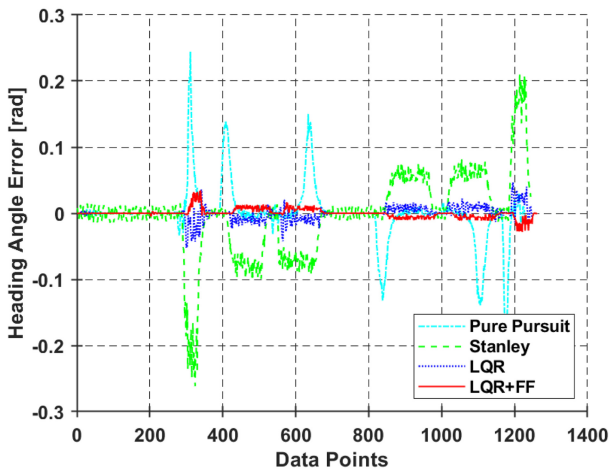
	Lateral distance	Heading angle
30 kph (PP)	0.161 [m]	0.034 [rad] 1.948 [deg]
30 kph (Stanley)	0.295 [m]	0.068 [rad] 3.896 [deg]
30 kph (δ_{fb})	0.016 [m]	0.005 [rad] 0.286 [deg]
30 kph ($\delta_{fb} + \delta_{fr}$)	0.008 [m]	0.001 [rad] 0.057 [deg]

Table 6은 곡률의 크기에 따라 차량의 속력을 부여하는 것을 의미하며, 세 번째 시뮬레이션의 실험 결과는 아래 Fig. 22를 통해 나타났다.

Figs. 22는 20의 참조 경로에서 경로 추종 실험을 진행하였을 때, 방향 오차 및 횡방향 거리 오차에 대한 결과를 나타낸다. 차량이 해당 참조 경로를 주행하는 동안 Preview Distance를 사용하여



(a) Lateral distance error for path tracking algorithm at 60 kph



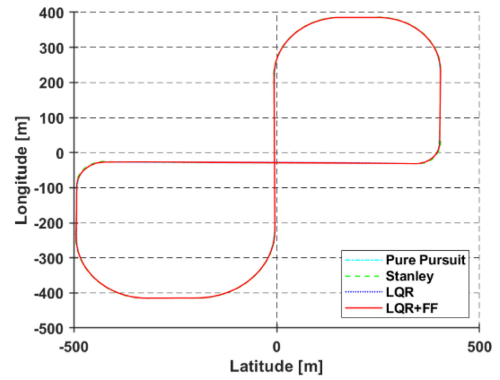
(b) Heading angle error for path tracking algorithm at 60 kph

Fig. 18 Heading & lateral distance error with steering at a vehicle speed of 60 kph in Town04

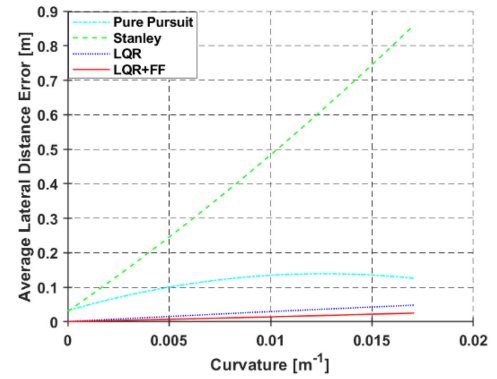
Table 5 Lateral distance error and heading angle error RMS at vehicle speed of 60 kph in Town04

	Lateral distance	Heading angle
60 kph (PP)	0.276 [m]	0.042 [rad] 2.406 [deg]
60 kph (Stanley)	0.433 [m]	0.061 [rad] 3.495 [deg]
60 kph (δ_{rb})	0.103 [m]	0.01 [rad] 0.572 [deg]
60 kph ($\delta_{rb} + \delta_{rf}$)	0.009 [m]	0.006 [rad] 0.343 [deg]

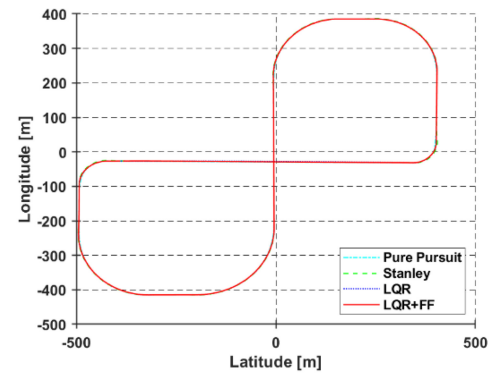
경로의 곡률을 감지하였을 때 해당 곡률의 최댓값을 기반으로 차량의 속력을 제한하였다. 또한 첫 번째와 두 번째 시뮬레이션과 동일하게 논문에서 제안하는 경로 추종 알고리즘의 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. Fig. 22를 통해 곡률이 가장 큰 부분을 주행할 때 방향 오차 및 횡방향 거리 오차의 값이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 초기 직선과 가까운 크기를 가진



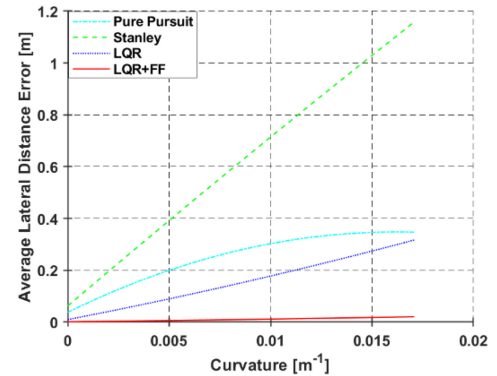
(a) Odometry of the path tracking algorithm at 30 kph



(b) Lateral distance error at 30 kph over road curvature in Town04

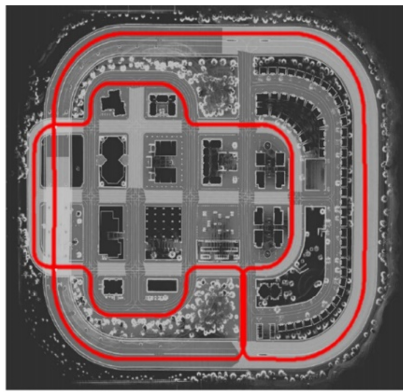


(c) Odometry of the path tracking algorithm at 60 kph

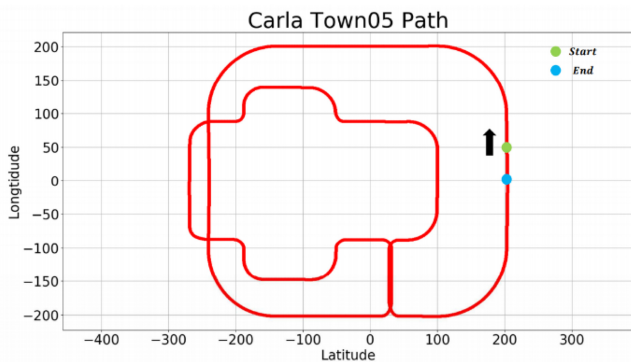


(d) Lateral distance error at 60 kph over road curvature in Town04

Fig. 19 Odometry of the path tracking algorithm and heading & lateral distance error at 30 & 60 kph over Curvature in Town04



(a) Original CARLA Town05 map



(b) Global path at CARLA Town05 inner

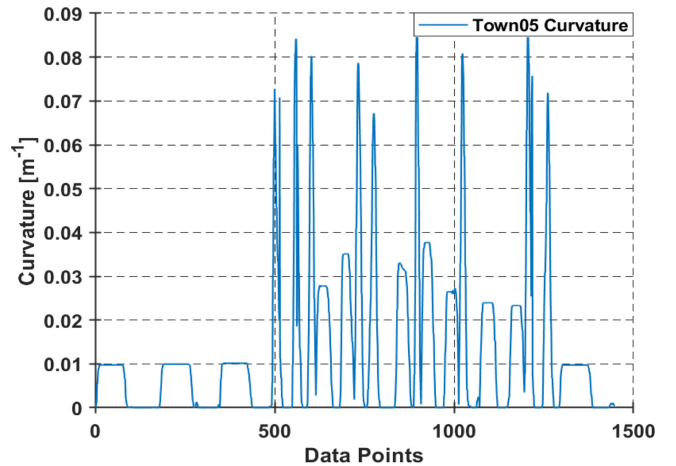
Fig. 20 Creation of a driving path using waypoints in CARLA Town05-inner map

곡률에서는 Table 6과 같이 60 kph의 속력으로 주행을 하다가 곡률의 크기가 바뀌면서 속도 제한으로 인해 차량의 속력이 변하게 된다. 이로 인해 가중치 행렬 Q와 상수 R 및 Preview Distance의 값들도 해당 속도의 최적값으로 변하게 되면서 경로 추종에 영향을 미치는 것이라 판단된다. Fig. 22에 대한 RMS는 Table 7을 통해 나타냈다.

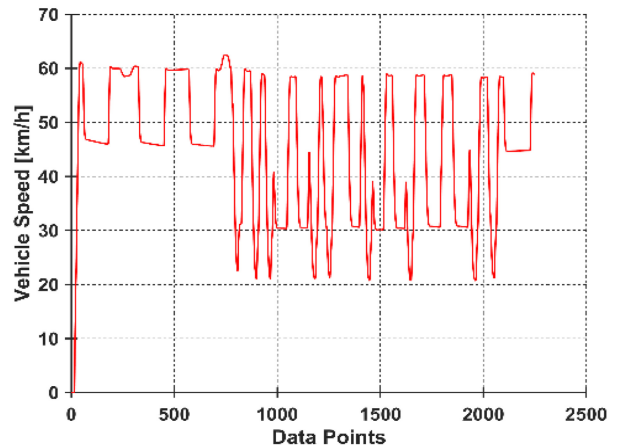
Fig. 23(a)는 Town05 맵의 내부 경로에서의 경로 추정의 Odometry 값을 나타낸다. 첫 번째와 두 번째 시뮬레이션과 같이 직선 구간에서는 크게 차이가 없지만, 선회 구간에서 조금씩 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 23(b)는 곡률 크기에 대한 횡방향 거리 오차를 나타낸다.

5. Conclusion

본 논문에서는 CARLA Simulator를 활용하여 자율주행 차량의 운전 환경을 모사하고, 운행 안정성 향상을 위한 경로 추종 알고리즘을 개발 및 검증하였다. 차량의 입력 조향으로는 Pure Pursuit (PP), Stanley Method, Feedback (LQR) Control 및 Feedback (LQR) Control+Curvature-based Feed-forward (FF)를 사용하였다. 이러한 추종 알고리즘의 성능은 세 가지 시뮬레이션을



(a) CARLA Town05 inner map curvature



(b) CARLA Town05 inner map vehicle speed

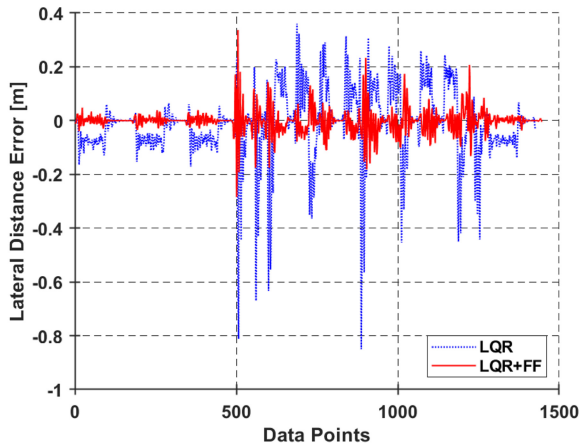
Fig. 21 CARLA Town05-inner map curvature and vehicle speed

Table 6 Vehicle speed according to value of curvature

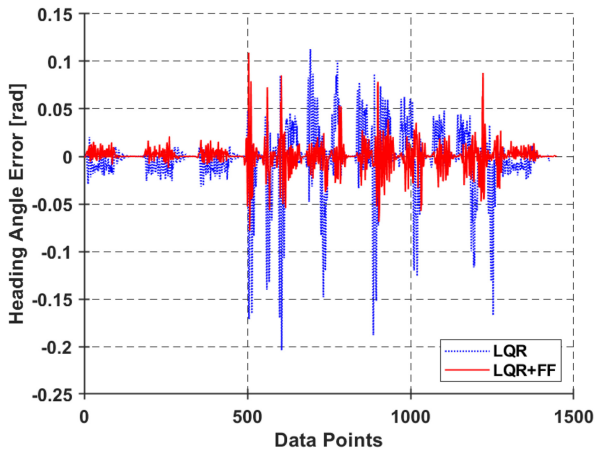
Curvature	Vehicle speed
0.05-0.086 [rad]	20 [km/h]
0.016-0.05 [rad]	30 [km/h]
0.005-0.016 [rad]	45 [km/h]
0-0.005 [rad]	60 [km/h]

통해 비교되었으며, 그 결과 각 알고리즘의 성능 차이를 아래와 같이 확인할 수 있었다.

첫 번째 시뮬레이션에서는 곡률의 크기가 비슷한 도심 환경에서 30와 60 kph 속력으로 비교 실험을 진행하였다. 논문에서 제안하는 추종 알고리즘의 경우 30 kph에서 PP보다 방향 오차는 97.06%, Stanley보다 98.53%의 성능 향상을 보였으며, Feedback (LQR)보다 80%의 상대적 성능 향상을 보였다. 횡방향 거리 오차 역시 각각 95, 97.29, 50%가 향상된 것을 확인하였다. 비슷하게 60 kph에서 방향 오차와 횡방향 거리 오차에서 각각 90.2, 93.83, 50% 및 84.62, 89.47, 33%의 향상을 확인하였다.



(a) Lateral distance error for path tracking algorithm in CARLA Town05 inner map



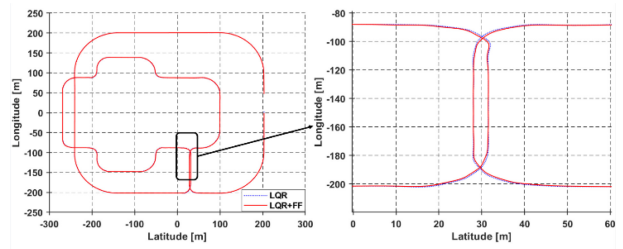
(b) Heading angle error for path tracking algorithm in CARLA Town05 inner map

Fig. 22 Heading & lateral distance error of $\delta_{fb} + \delta_{ff}$ in CARLA Town05 inner map for curvature and speed of vehicle

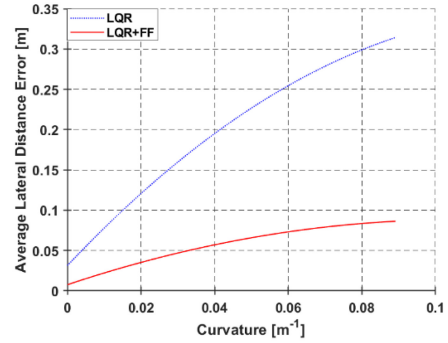
Table 7 Lateral distance error and heading angle error RMS at vehicle speed of 20-60 kph in Town05

	Lateral distance	Heading angle
20-60 kph (δ_{fb})	0.131 [m]	0.033 [rad] 1.89 [deg]
20-60 kph ($\delta_{fb} + \delta_{ff}$)	0.041 [m]	0.013 [rad] 0.744 [deg]

두 번째 시뮬레이션에서는 첫 번째 시뮬레이션과 다르게 곡률의 크기가 다른 도심 환경에서 진행되었으며, 30 kph와 60 kph의 속도에서 비교 실험을 진행하였다. 30 kph에서는 PP보다 88.24%, Stanley보다 94.2%, LQR 보다는 20%의 성능 향상을 보였으며, 횡방향 거리 오차 역시 각각 91.33, 95.79, 18.75%의 향상을 보였다. 60 kph에서의 방향 오차 및 횡방향 거리 오차는 각각 85.71, 90.16, 40% 및 96.7, 97.92, 91.26%의 향상을 확인하였다.



(a) Odometry of the path tracking algorithm in Town05 inner



(b) Lateral distance error over road curvature in Town05 inner

Fig. 23 Odometry of the path tracking algorithm and heading & lateral distance error over curvature in Town05 inner

세 번째 시뮬레이션에서는 다양한 곡률 크기와 차량 속력을 조절하며 진행되었다. 세 번째 시뮬레이션에서는 PP와 Stanley를 제외한 LQR과 비교 실험을 진행하였다. 이 실험에서도 논문에서 제안하는 추종 알고리즘이 방향 오차는 60.61%, 횡방향 거리 오차의 경우 68.7%의 성능 향상을 확인하였다.

세 가지 시뮬레이션을 통해, 본 논문에서 제안하는 추종 알고리즘이 저속과 고속 모두에서 다른 알고리즘보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 향후에는 자율주행 차량의 센서나 액추에이터 등 핵심 부품의 문제가 발생할 경우에도 안정적으로 고속 주행이 가능한 강건한 제어 알고리즘 개발에 대한 연구를 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원(노지분야 스마트 농업기술 단기 고도화 사업)의 지원을 받아 연구되었음(No. 322030-3).

REFERENCES

1. Andersen, H., Chong, Z. J., Eng, Y. H., Pendleton, S., Ang, M. H., (2016), Geometric path tracking algorithm for autonomous driving in pedestrian environment, 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 1669-1674.

2. Hossain, T., Habibullah, H., Islam, R., (2022), Steering and speed control system design for autonomous vehicles by developing an optimal hybrid controller to track reference trajectory, *Machines*, 10(6), 420.
3. Raffo, G. V., Gomes, G. K., Normey-Rico, J. E., Kelber, C. R., Becker, L. B., (2009), A predictive controller for autonomous vehicle path tracking, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 10(1), 92-102.
4. Gámez Serna, C., Ruichek, Y., (2017), Dynamic speed adaptation for path tracking based on curvature information and speed limits, *Sensor*, 17(6), 1383.
5. Ang, K. H., Chong, G., Li, Y., (2005), PID control system analysis, design, and technology, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576.
6. Farag, W., (2020), Complex trajectory tracking using PID control for autonomous driving, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 18(2), 356-366.
7. Cibooglu, M., Karapinar, U., Soylemez, M. T., (2017), Hybrid controller approach for an autonomous ground vehicle path tracking problem, 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 583-588.
8. Samuel, M., Hussein, M., Mohamad, M. B., (2016), A review of some pure-pursuit based path tracking techniques for control of autonomous vehicle, *International Journal of Computer Applications*, 135(1), 35-38.
9. Campbell, S. F., (2007), Steering control of an autonomous ground vehicle with application to the DARPA urban challenge, M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
10. Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., Fong, P., Gale, J., Halpenny, M., Hoffmann, G., Lau, K., Oakley, C., Palatucci, M., Pratt, V., Stang, P., Strohband, S., Dupont, C., Jendrossek, L.-E., Koelen, C., Markey, C., Rummel, C., Niekirk, J. V., Jensen, E., Alessandrini, P., Bradski, G., Davies, B., Ettinger, S., Kaehler, A., Nefian, A., Mahoney, P., (2006), Stanley: The robot that won the DARPA grand challenge, *Journal of Field Robotics*, 23(9), 611-692.
11. Wu, J., Fu, Q., Liu, Y., Sun, B., (2021), Trajectory following control for autonomous vehicles using the feedforward controller and the improve trajectory following model, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 17(6), 2019-2032.
12. Zhou, Z., Rother, C., Chen, J., (2023), Event-triggered model predictive control for autonomous vehicle path tracking: validation using CARLA simulator, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 3547-3555.
13. Stevan, S., Momčilob, K., Markoa, D., Nives, K., (2020), Development of ADAS perception applications in ROS and "Software-In-the-Loop" validation with CARLA simulator, *Telfor Journal*, 12(1), 40-45.
14. Gutierrez, R., Lopez-Guillen, E., Bergasa, L. M., Barea, R., Perez, O., Gomez-Huelamo, C., Arango R., Egidio, J. D., Lopez-Fernandez, J., (2020), A waypoint tracking controller for autonomous road vehicles using ROS framework, *Sensors*, 20(14), 4062.
15. CARLA, CARLA Open-source simulator for autonomous driving research. <https://Carla.org>
16. Jo, A., (2022), Robust hierarchical motion planning and control for automated bus, Ph.D. Thesis, Seoul National University.
17. Yang, T., Bai, Z., Li, Z., Feng, N., Chen, L., (2021), Intelligent vehicle lateral control method based on feedforward + predictive lqr algorithm, *Actuators*, 10(9), 228.
18. Vivek, A., Sheta, M. A., Gumtapure, V., (2019), A comparative study of Stanley, LQR and MPC controllers for path tracking application (ADAS/AD), 2019 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Green Technology (ICISGT).
19. Chen, Y., Zheng, Y., (2022), A review of autonomous vehicle path tracking algorithm research, *Authorea Preprints*.
20. Li, H., Li, P., Yang, L., Zou, J., Li, Q., (2022), Safety research on stabilization of autonomous vehicle based on improved-LQR control, *AIP Advances*, 12(1), 1-13.
21. Snider, J. M., (2009), Automatic steering method for autonomous automobile path tracking, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, CMU-RITR-09-08.
22. Rajesh, R., (2005), Vehicle dynamics and control, Springer Science & Business Media.
23. Thomas, D. G., (1992), Fundamentals of vehicle dynamic, Society of Automotive Engineers.

**Hyung Gyu Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Electronic Information Engineering, Jeonbuk National University, and working as a student researcher at Korea Institute of Industrial Technologies (KITECH). His research interest is autonomous vehicle control.

E-mail: khg@kitech.re.kr

**Myeong Gyu Lee**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, KOREA University of Technology and Education, and working as a student researcher at Korea Institute of Industrial Technologies (KITECH). His research interest is autonomous driving engineering.

E-mail: cobby6010@kitech.re.kr

**Jong Tak Kim**

Dr. Kim is a senior researcher at Korea Institute of Industrial Technologies (KITECH). Ph.D. degrees in graduate school of automotive engineering from Hanyang University, Korea in 2019. His research interests are vision detection and AI application in vehicle.

E-mail: jtkim@kitech.re.kr

**Won Gun Kim**

Dr. Kim is a principal researcher at Korea Institute of Industrial Technologies (KITECH). Ph.D. degrees in graduate school of automotive engineering from Seoul National University, Korea in 2012. His research interests are electric and autonomous vehicle, integrated driving.

E-mail: wgk@kitech.re.kr

자동변속기 스러스트 베어링 동력 손실에 대한 유성기어 세트 설계의 헬릭스 방향과 헬릭스 각의 영향에 관한 연구

Influences of Helix Directions and Helix Angles of Planetary Gear Set Designs on Thrust Bearing Power Losses in an Automotive Gear Train

권현식^{1,#}
Hyun Sik Kwon^{1,#}

¹ 동의대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Dong-Eui University)
Corresponding Author / E-mail: hskwon@deu.ac.kr, TEL: +82-51-890-2303
ORCID: 0000-0002-1843-4769

KEYWORDS: Automatic transmission (자동변속기), Thrust bearing (스러스트 베어링), Planetary gear (유성기어), Helix angle (헬릭스각), Power loss (동력 손실)

Automatic transmissions, which have the advantages of compact structure and smooth shifting, are installed in various vehicles with engines and hybrid power sources. Research and development are continuously being conducted to improve power and fuel efficiency. In this study, the influence of helix direction and helix angle of the planetary gear set on thrust-bearing power loss in an automatic transmission was analyzed. A sample automatic transmission model was constructed to analyze the axial load and bearing relative rotation speed, which are the main factors in thrust-bearing power loss. The relative rotation speed of the bearing was analyzed using the sample model, and the thrust-bearing load in the axial direction was analyzed according to the helix direction of the planetary gear set constituting the model and the helix angle of the planetary gear set. The power loss occurring in thrust-bearing was derived using the analysis results of relative rotational speed and load, and the influence of the helix direction and helix angle of the planetary gear set was analyzed.

Manuscript received: February 6, 2024 / Revised: March 18, 2024 / Accepted: March 27, 2024

1. 서론

컴팩트한 구조와 부드러운 변속의 장점이 있는 자동변속기는 엔진과 하이브리드 동력원을 갖는 다양한 차량에 적용되고 있으며, 동력과 연비 향상을 위하여 많은 연구개발이 지속적으로 추진되고 있다. 성능 개발을 위하여 전기 모터와 제어를 활용하는 전동화 기술이 대거 적용되고 있으나, 자동변속기는 많은 부품이 조립되어 유기적으로 작동하는 만큼 성능 개선을 위하여 연구개발 할 수 있는 요소들이 여전히 존재한다.

자동변속기와 관련하여 구조, 역학, 설계, 시스템 측면 다양한 연구들이 수행되었다. 첫 번째 연구 그룹은 자동변속기에 대한 구조 고안과 분석에 관한 연구를 수행하였다. 자동변속기를 구성하는 유성기어 세트의 주요 회전 요소인 선 기어, 링 기어,

캐리어와 연결 관계를 선과 점으로 구성되는 그래프로 변환하고, 새로운 구조의 고안과 중복 구조, 연결성 분석 등 컨셉 구조에 관한 연구가 수행되었다[1-3]. 유성기어 세트로 구성되는 동력 전달계의 기본적인 성능 분석을 위하여 회전 속도비와 토크비 해석을 위한 레버(Lever) 분석법과 일반화된 행렬 분석법에 관한 연구가 제시되었다[4,5].

역학 관련하여 더블 헬리컬 유성기어 세트에 대한 동적 모델 개발과 기어 전달 오차 가진 응답에 관한 연구[6]가 제시되었으며, 유성기어 세트 적용 동력계에 대한 모드 분석에 관한 연구[7]가 수행되었다. 기어 물림에 의한 기어 치의 변형 관련하여 유한요소법을 활용한 모델링과 경계 조건에 따른 기어 전달 오차 해석 연구 결과가 제시되었다[8].

유성기어 세트로 구성되는 동력 시스템에 관한 설계 연구로는

강도식 기반의 응력 해석을 활용한 유성기어 세트에 대한 설계 연구가 수행되었다[9,10]. 유성기어 시스템의 선 기어, 링 기어, 피니언 기어의 물림 위상과 조립 조건을 고려하고, 기어 물림 단계에서 전달 하중에 의한 응력과 전달 오차 성능을 고려하는 유성기어 세트 설계법에 관한 연구가 제시되었다[11].

시스템 단위의 연구로서 차축에 대한 동력 손실 모델 개발과 검증에 관한 연구[12]와 유성기어 세트로 구성되는 시스템에 대한 동력 효율에 관한 연구[13]가 제시되었다. 본 연구와 관련하여 자동변속기의 스러스트(Thrust) 베어링에 작용하는 축 방향의 하중 해석과 베어링 동력 손실에 관한 연구 결과가 제시되었다[14,15].

자동변속기 혹은 유성기어 세트 적용의 동력계에 관한 다양한 분야의 연구가 수행되었으나 기어의 헬릭스 방향과 헬릭스 각의 기어 설계와 동력 손실의 베어링 성능에 관하여 수행된 연구는 찾기 어렵다. 본 연구는 자동변속기를 구성하는 유성기어 세트의 여러 설계 인자 중에서 기어의 헬릭스 방향과 헬릭스 각의 변화에 따른 스러스트 베어링의 동력 손실을 분석하였다. 본 연구는 연구에 적용되는 스러스트 베어링 동력 손실 모델에 관하여 설명하고, 자동변속기 모델링, 베어링에 작용하는 축 방향 하중 해석, 베어링 동력 손실 해석의 순서로 수행하였다.

2. 스러스트 베어링 동력 손실

유성기어 세트와 유성기어 세트의 주요 회전 요소를 연결하는 샤프트가 단위 부피 당 밀도 높게 배치되는 자동변속기에서 다른 속도로 회전하는 인접 부품의 상대 회전을 가능하게 하고 하중을 지지하는 베어링의 역할은 매우 중요하다. 베어링은 내/외측 레이스와 볼 혹은 니들 형태의 구름체로 구성되며, 레이스와 구름체의 형상과 크기, 재질에 따라 베어링의 성능이 결정된다.

베어링이 회전하는 과정에서 레이스와 구름체 사이의 접촉부에 구름과 미끄러짐의 현상이 발생하며, 이러한 구름과 미끄러짐의 과정에서 발생하는 마찰에 의하여 기계적 동력 손실이 발생한다. 유체역학 측면, 윤활유의 점성과 베어링 구성 요소의 상대 회전 속도에 의한 유체 저항에 따른 유체적 동력 손실도 발생한다. 기계적 및 유체적 동력 손실로 구성되는 베어링의 동력 손실은 작용 하중, 표면 거칠기, 점성, 회전 속도, 온도 등 다양한 인자가 영향을 미치는 복합적인 물리적 현상으로서 시험에 기반한 다양한 연구[16-18]가 수행되었다. 본 연구에서는 실링 등의 상세 조건을 포함하지 않으며 베어링 동력 손실에 대하여 작용 하중과 회전 속도의 주요 인자를 명시적 함수로 고려하는 Harris 모델[18]을 활용하였다.

Harris의 베어링 동력 손실 모델은 하중에 의한 동력 손실(P_l)과 상대 회전에 의한 동력 손실(P_s)로 구성되는 베어링 동력 손실(P_b)의 예측값을 제시한다. 본 연구에 대한 스러스트 베어링의 동력 손실 모델은 다음 식(1)부터 식(3)과 같다.

$$P_b = P_l + P_s \quad (1)$$

$$P_l = 1.5705 \times 10^{-7} F_a d_p n \quad (2)$$

$$P_s = \begin{cases} 1.047 \times 10^{-11} f_o (v_o n)^{2/3} d_p^3 n, & \text{if } v_o n \geq 2000 \\ 167.52 \times 10^{-11} f_o d_p^3 n, & \text{if } v_o n < 2000 \end{cases} \quad (3)$$

여기서 F_a , d_p , n 은 축 방향 하중, 베어링 피치 경(Pitch Diameter), 회전 속도를 의미한다. 윤활 타입과 동점성 계수는 f_o 와 v_o 로 표현된다.

3. 자동변속기 모델링

본 연구 목적인 자동변속기 내 스러스트 베어링의 동력 손실에 대한 유성기어 세트 헬릭스 각의 방향과 크기 변화의 영향성 연구 수행을 위하여 베어링 동력 손실의 주요 인자인 베어링에 수직으로 작용하는 하중과 베어링 상대 회전 속도에 대한 해석이 필요하다. 상대 회전 속도는 자동변속기 컨셉 구조에 대한 기구학 해석을 통하여 입력 회전 속도에 대한 주요 회전 요소의 속도와 베어링이 지지하는 상대 회전 요소를 고려하여 계산할 수 있다.

스러스트 베어링에 작용하는 축 방향의 하중은 자동변속기를 구성하는 여러 유성기어 세트 기어 헬릭스 각의 방향과 크기에 따라 주요 회전 요소에서 발생하는 하중 해석을 통하여 확인할 수 있다. 개별 스러스트 베어링은 베어링이 지지하는 회전 요소에 의한 하중뿐만 아니라 인접한 베어링에 작용하는 하중에 의한 영향도 받는다. 따라서, 베어링 스러스트 하중은 전체 동력 시스템 모델링을 통하여 해석할 수 있다.

진진 8단과 후진 1단의 변속 성능을 제공하는 유성기어 세트 4개로 구성되는 자동변속기 구조[19]를 본 연구를 위한 샘플 변속기로 선정하였다. 자동변속기를 구성하는 1-3번 유성기어 세트는 Table 1의 제원으로 모델링을 하였으며, 4번 유성기어 세트는 Table 2의 제원 범위를 갖는 5개 유성기어 세트 설계를 적용하여 Fig. 1 과 같이 모델링을 하였다. 각 유성기어 세트의 헬릭스 각 크기 변화가 스러스트 베어링에 작용하는 하중에 영향을 미칠 것이다. 본 연구에서는 출력축과 연결되어 가장 큰 비틀림 토크의 동력을 전달하는 4번 유성기어 세트로 한정하여 모델링과 해석을 수행하였으며, 여러 유성기어 세트 헬릭스 각 변화에 따른 결과는 본 연구를 확장하여 확인할 수 있을 것이다.

동일 혹은 유사한 크기의 4번 유성기어 세트 설계로 한정하여 헬릭스 각 크기 변화에 따른 베어링 동력 손실의 변화를 보기 위하여 기어 잇수(Z), 압력 각(PA), 중심거리(CD)는 동일하나 18-22° 헬릭스 각(HA) 크기로 구성되는 총 5개의 유성기어 세트 설계를 모델링에 적용하였다. 노말(Normal) 모듈(m)의 최대/최소 차이는 0.037 mm이며, 각 기어의 외경(D_o)과 루트경(D_r)의 최대/최소 차이는 0.082 mm 이하, 그리고 노말 방향 치

Table 1 Designs of 1st-3rd planetary gear sets

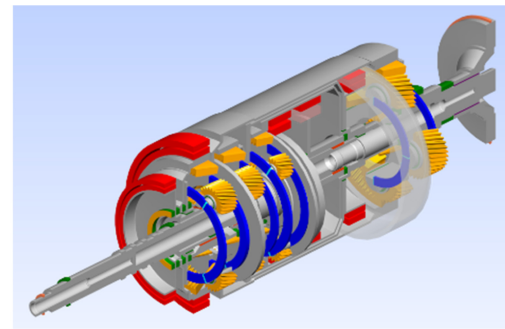
	PG1&2			PG3		
	S	P	R	S	P	R
Z	48	24	96	60	18	96
m [mm]	1.22			1.26		
PA [deg.]	18			20		
HA [deg.]	22			18		
CD [mm]	48.2			52.3		
FW [mm]	22	22	22	17	17	17
D_o [mm]	66.8	34.6	126.2	83.0	26.8	126.3
D_r [mm]	61.3	29.2	131.5	77.4	21.1	131.8
TT [mm]	2.07	2.07	2.07	1.87	2.28	1.87
TTD [mm]	64.3	32.1	128.5	80.5	24.1	128.7

Table 2 Designs of 4th planetary gear sets

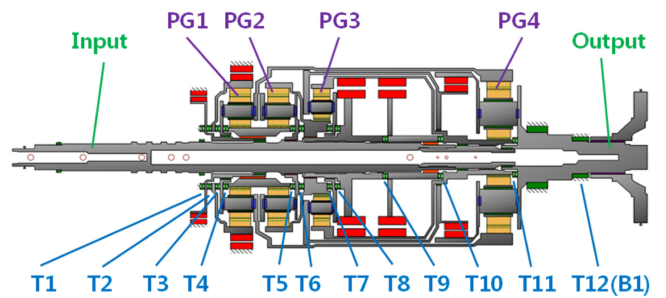
	PG4		
	S	P	R
Z	25	33	91
m [mm]	[1.45, 1.48]		
PA [deg.]	20		
HA [deg.]	[18, 22]		
CD [mm]	45.4		
FW [mm]	24	24	24
D_o [mm]	[42.0, 42.1]	[54.5, 54.6]	[140.0, 140.1]
D_r [mm]	[35.8, 35.9]	[48.3, 48.5]	[145.6, 145.7]
TT [mm]	[2.66, 2.66]	[2.17, 2.18]	[2.66, 2.66]
TTD [mm]	39.1	51.6	142.4

두께(Tooth Thickness, TT)의 최대/최소 차이는 0.001 mm이다. 5개 유성기어 세트는 헬릭스 각을 제외한 나머지 제원이 큰 차이가 없는 거의 동일한 제원이라고 볼 수 있다. 1-4번 유성기어 세트에 포함되는 선 기어, 링 기어, 피니언 기어 치 폭의 크기는 모두 동일하다. TTD (Diameter at Measured Tooth Thickness)는 치 두께가 측정된 위치의 지름을 의미한다.

Fig. 1의 자동변속기 모델에는 축 방향의 하중을 지지하는 스러스트 베어링, 경 방향의 하중을 지지하는 니들 롤러(Needle Roller) 베어링, 축과 경 방향의 하중을 지지하는 볼(Ball) 베어링이 적용된다. 스러스트 베어링에 대하여 축 방향 하중 지지의 컨셉 베어링 모델을 적용하였으며, 니들 롤러 베어링에 대하여



(a)



(b)

Fig. 1 (a) 3D model and (b) cross section of a sample automatic transmission model

경 방향 하중 지지의 컨셉 베어링 모델을 적용하였다. 축과 경 방향 하중 지지의 볼 베어링은 축과 경 방향에 대한 컨셉 베어링 모델을 적용하였다. Fig. 1(b)에는 축 방향 하중을 받는 베어링만 표시하였으며, 스러스트 베어링은 T1-T11로, 볼 베어링은 B1 혹은 T12로 표시하였다.

유성기어 세트 모델링, 컨셉 베어링 모델 적용, 유성기어 세트의 주요 회전 요소를 연결하는 샤프트 모델링 등을 포함하는 전체 자동변속기에 대한 모델은 구동계 전용의 상용 S/W[20]를 활용하여 구성하였으며, 회전 속도, 하중 등의 시스템 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과

자동변속기를 구성하는 유성기어 세트의 기어 헬릭스 각의 방향과 크기 변화에 따른 스러스트 베어링 동력 손실 해석을 위하여, 헬릭스 각의 방향과 크기 변화에 대한 시스템 해석을 수행해야 한다. Fig. 2(a) 평기어의 물림률 증대 목적으로 기어에 적용하는 헬릭스 각은 Figs. 2(b)와 2(c)와 같이 왼 방향 L (Left) 혹은 오른 방향 R (Right)으로 적용한다. 외접 기어 쌍의 한 기어 헬릭스 각 방향이 L이면 맞물리는 기어의 헬릭스 각은 R 방향이고, 내접 기어 쌍의 내접 기어(링기어) 헬릭스 각 방향이 L이면 맞물리는 피니언 기어의 헬릭스 각은 L 방향이다. 유성기어 세트의 선 기어, 링 기어, 피니언 기어는 동시에 맞물려 회전하므로, 한 기어의 헬릭스 방향이 정의되면,

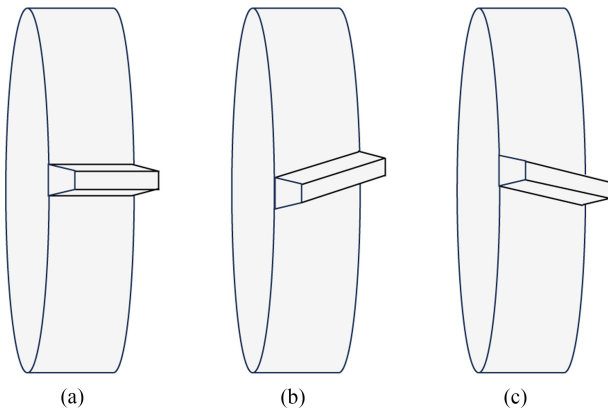


Fig. 2 (a) Spur gear, (b) left, and (c) right hand helical gears

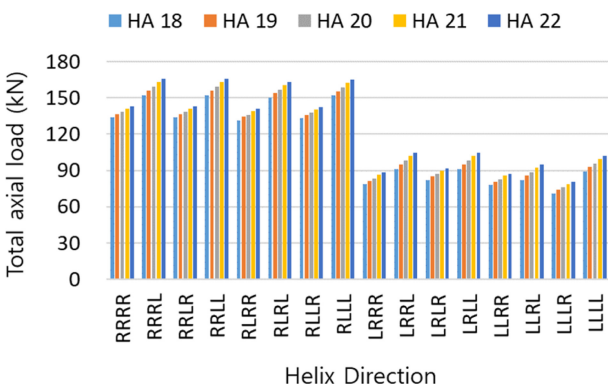


Fig. 3 Total amount of maximum axial loads of all thrust bearings

나머지 두 개 기어의 방향은 결정된다. 예를 들어, 선 기어 헬릭스 각 방향이 L이면, 피니언 기어와 링 기어의 방향은 R과 R 방향이 된다. 본 연구에서 유성기어 세트의 헬릭스 방향은 선 기어 기준으로 설명할 것이며, 자동변속기 내 각 유성기어 세트의 헬릭스 방향은 Fig. 1(b)의 유성기어 배치 기준으로 가장 왼쪽부터 오른쪽 순서로 표현한다. 예를 들어, PG1과 PG4의 HA 방향이 R이고 PG2와 PG3의 HA 방향이 L인 배치는 RLLR로 표현한다.

자동변속기 모델의 개별 스러스트 베어링에 가해지는 축 방향의 하중과 베어링 상대 회전 속도 해석을 위하여 입력축에 입력 토크 550 Nm와 회전 속도 2,000 RPM의 동력을 적용하였다. 유성기어 세트 4개 헬릭스 각 방향에 대한 총 16 (=2⁴) 가지 조합과 4번 유성기어 세트 제원 5개를 고려하여 총 80회 시스템 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 기어 헬릭스 각 변화에 따른 전진단에서 개별 스러스트 베어링에 작용하는 최대 수직 하중의 총 합을 보여준다. 구동계 효율에 기여도가 적은 후진단의 결과는 제외하였다. 모든 유성기어 헬릭스 방향 조합에 대하여 헬릭스 각 크기가 증가함에 따라 최대 하중 총합의 크기는 증가한다. PG1이 R 방향으로 시작하는 조합 결과의 평균은 148 kN이며, PG1이 L 방향인 조합 결과의 평균은 89 kN이다. 각 베어링에 작용하는 최대

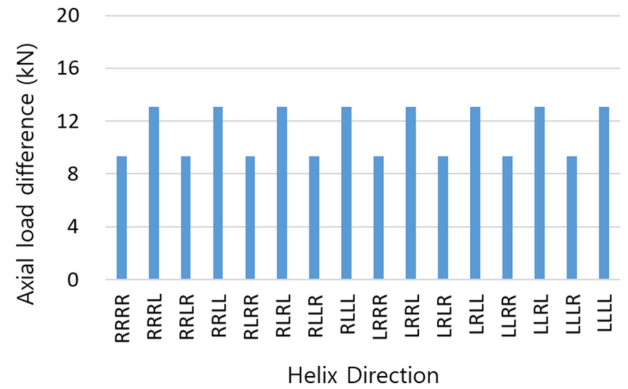


Fig. 4 Differences of axial loads on thrust bearings for 18 and 22 degree of helix angle

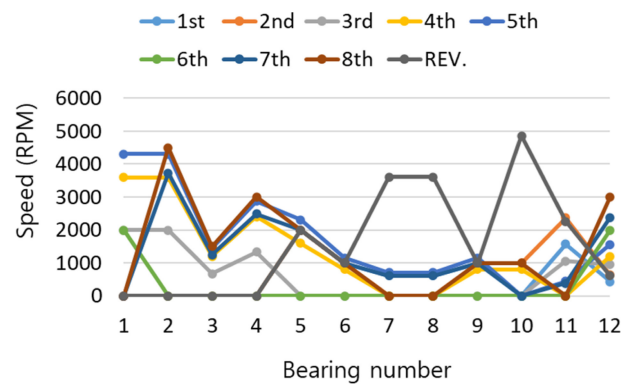


Fig. 5 Rotational speeds of thrust bearings

Table 3 Pitch diameters of thrust bearings

Bearing number	Diameter [mm]
T1-T8	65.0
T9-T11	40.0
T12	45.0

하중의 총합은 PG1이 R 방향인 조합의 결과가 PG1이 L 방향 조합의 결과보다 큼을 확인할 수 있다. Fig. 4는 HA 18°와 22°에서 발생하는 최대 수직 하중 총합의 차이를 보여준다. 스러스트 베어링 하중 변화에 대하여 본 연구에서 고려하는 PG4의 헬릭스 각 크기의 변화가 PG4의 헬릭스 방향이 R인 경우보다 L일 때 영향성이 더 크게 작용함을 확인할 수 있다. 이는 베어링이 지지하는 회전요소에서 발생하는 수직 하중이 기어 헬릭스 각의 방향에 따라 베어링 혹은 인접 베어링에 작용하는 수직 하중을 증대 혹은 상쇄함에 따른 결과이다. 각 속도단에 대한 베어링 작용하중은 다양한 결과를 보일 것이나, 베어링에 작용하는 최대 수직 하중의 총합 기준으로 본 연구의 샘플 변속기 구조에서는 PG1과 PG4의 헬릭스 각 방향이 베어링 수직 하중에 주요한 영향을 갖는다고 볼 수 있다.

유성기어 세트의 헬릭스 방향과 헬릭스 각 크기 변화에 따른 스러스트 베어링 하중 결과와 Harris의 베어링 동력 손실 모델을 활용하여 해석을 수행하였다. 베어링 지지 부품의 회전에

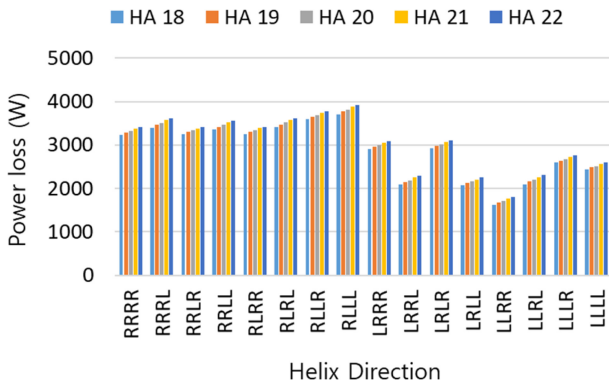


Fig. 6 Total amount of power losses of all thrust bearings

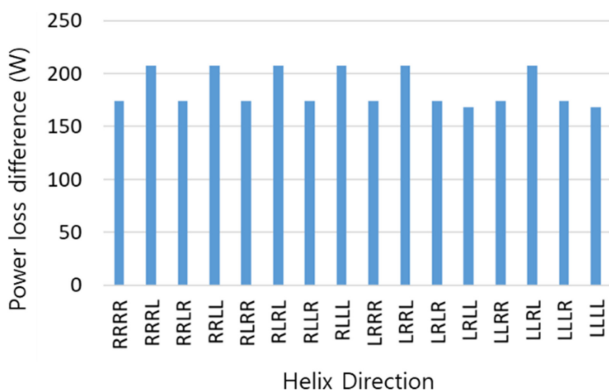


Fig. 7 Differences of power losses of thrust bearings for 18 and 22 degree of helix angle

대한 베어링 상대 회전 속도는 Fig. 5와 같으며, 각 스러스트 베어링의 피치 경 치수는 Table 3과 같다. 베어링 윤활 타입은 윤활유 잠김으로 설정하였으며, 동점성 계수(ν_0)는 7.1을 적용하였다.

Fig. 6은 헬릭스 각 크기 변화와 헬릭스 방향 조합에 따른 전진단에서 발생하는 스러스트 베어링 동력 손실의 총합 결과를 보여준다. 축 방향 하중 결과의 경향과 두 가지 측면에서 동일한 결과를 확인할 수 있다. 첫 번째는 PG4의 헬릭스 각이 증가함에 따라 스러스트 베어링에서 발생하는 총 동력 손실량의 증가 경향이다. 두 번째는 PG1의 헬릭스가 R 방향인 그룹과 L 방향인 그룹의 결과이다. 스러스트 베어링 총 동력 손실 측면 R 방향 그룹의 결과가 L 방향 그룹의 결과보다 큼을 확인할 수 있다. Fig. 7은 HA 18°와 22°에서 발생하는 동력 손실 총합의 차이를 확인할 수 있다. LRLR과 LLLL 조합을 제외하고, PG4의 헬릭스 방향이 L인 조합의 결과가 R인 조합의 결과 대비 큰 차이를 보여준다. Fig. 6의 다양한 동력 손실 결과는 유성기어 세트의 헬릭스 방향 조합에 따른 각 전진 변속단 별다르게 작용하는 하중과 상대 회전 속도를 고려한 결과이다. 이 결과로부터 스러스트 베어링에 대한 수직 하중이 크게 발생하는 헬릭스 방향 조합에서 동력 손실이 크게 발생하는 경향을 찾을 수 있으며, 스러스트 베어링 동력 손실에 대하여 베어링 수직

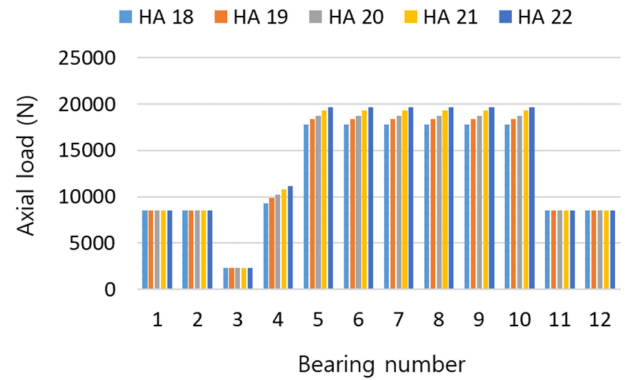


Fig. 8 Max. axial loads acting on thrust bearings of RRLR helix angle directions for 18-22 degree of helix angles of PG4

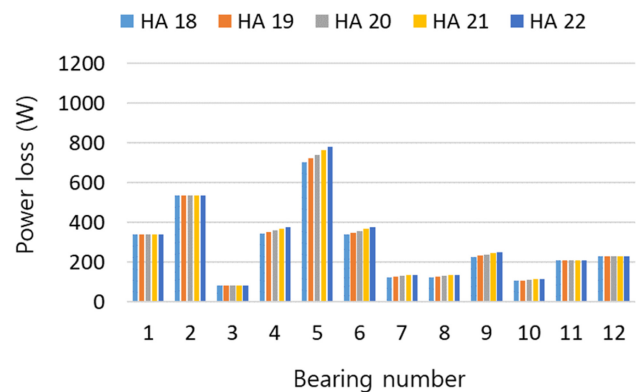


Fig. 9 Power losses of thrust bearings of RRLR case

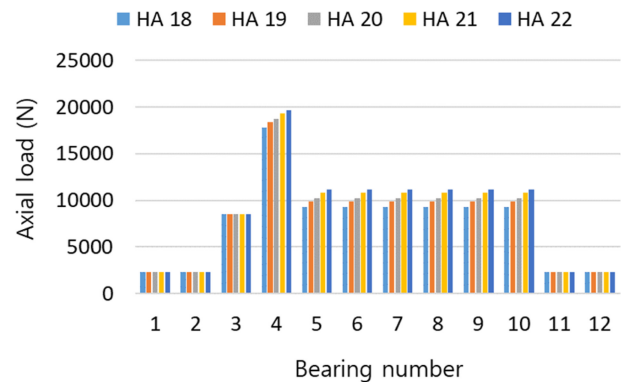


Fig. 10 Max. axial loads acting on thrust bearings of LRLR helix angle directions for 18-22 degree of helix angles of PG4

하중을 증대 혹은 상쇄하는 기어 헬릭스 방향을 고려해야 함을 확인할 수 있다.

16개의 유성기어 세트 헬릭스 방향 조합 중 LRLR과 LLLL 조합을 제외한 나머지 조합의 결과는 RRLR 조합의 결과(Figs. 8과 9)처럼 PG4 헬릭스 각이 증가함에 따라 영향을 받는 스러스트 베어링 최대 하중은 증가하며 동력 손실량도 증가함을 확인할 수 있다. 헬릭스 각의 크기가 증가할수록 헬리컬 기어의 물리과정에서 발생하는 축 방향의 하중은 증가하고, 이에 따라

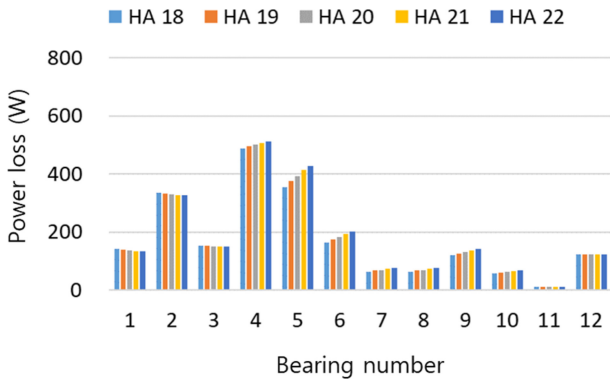


Fig. 11 Power losses of thrust bearings of LRLI case

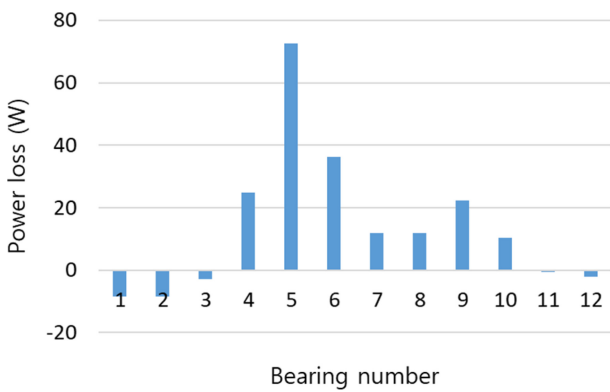


Fig. 12 Differences of thrust bearing power losses at 18 and 22 degree of helix angle for forward speed ratios

베어링에 작용하는 스러스트 하중의 증가와 함께 동력 손실도 증가한다.

LRLI 조합에 대한 각 속도단 별 베어링 하중과 동력 손실 결과는 Fig. 10과 11과 같다. PG4의 헬릭스 각 증가에 따라 4-10번 베어링의 하중과 동력 손실은 증가하나, 베어링 1-3번의 동력 손실은 감소함을 확인할 수 있다. 베어링 11-12번도 동력 손실량이 감소하나 그 크기는 베어링 1-3번 감소량 대비 절반 이하 수준이다. Fig. 12는 유성기어 헬릭스 방향 조합 LRLI의 HA 22°에서 발생하는 베어링별 전진단 동력 손실 합에서 HA 18°의 동력 손실 합을 뺀 결과를 보여준다. 이러한 결과는 동력 손실의 주요 인자인 각 변속단별 베어링에 작용하는 하중 결과(Fig. 13)를 통하여 분석할 수 있다. Fig. 13의 축 방향 하중 결과를 보면 전진 5단을 제외한 모든 단에서 헬릭스 각이 증가할수록 축 하중도 증가하나, 5단에서는 감소한다. 이러한 경향은 5단의 결과인 Fig. 14에서 베어링 1/2/3/11/12번에 작용하는 하중이 감소함을 확인할 수 있다. 이는 PG4의 헬릭스 각 크기 증가에 따라 증가하는 스러스트 하중이 베어링 인접 부품에서 발생하는 하중을 상쇄하여 나타나는 결과이다. 스러스트 하중 감소의 크기가 비슷한 베어링 1-3번과 11-12번의 동력 손실 차이(Fig. 12)는 베어링 피치 경의 차이에 기인한다.

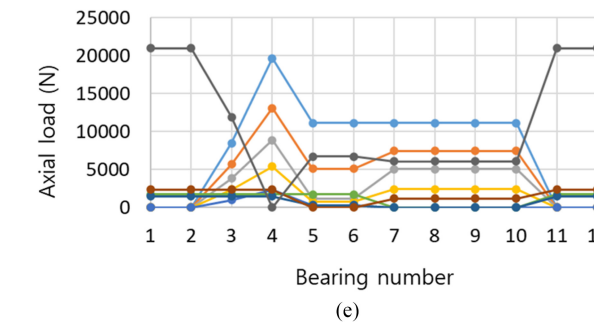
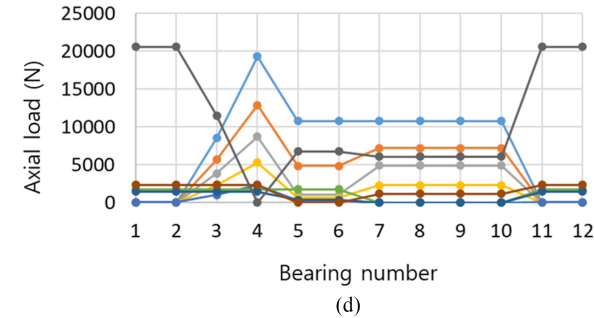
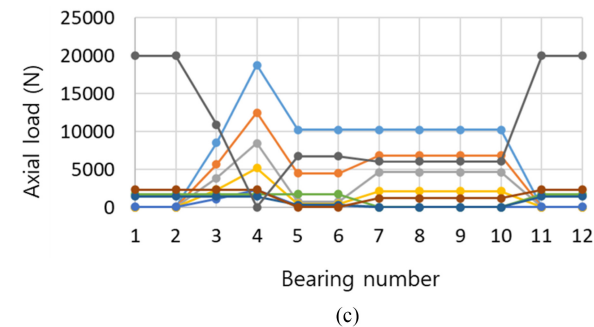
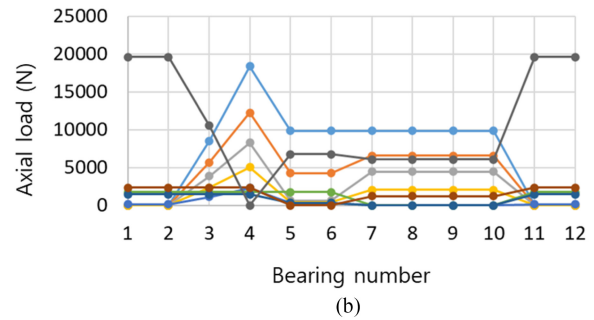
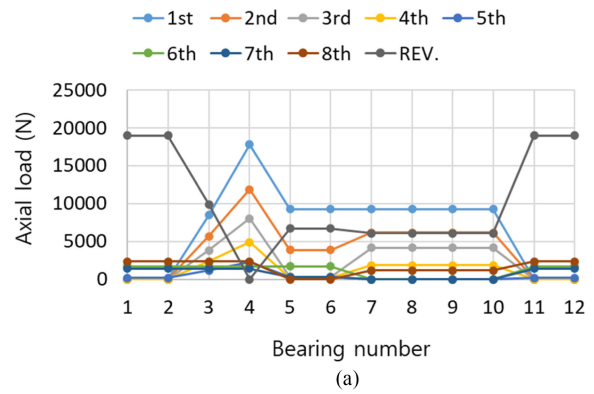


Fig. 13 Thrust loads of LRLI helix directions for (a) 18, (b) 19, (c) 20, (d) 21, and (e) 22 degree of helix angles of PG4

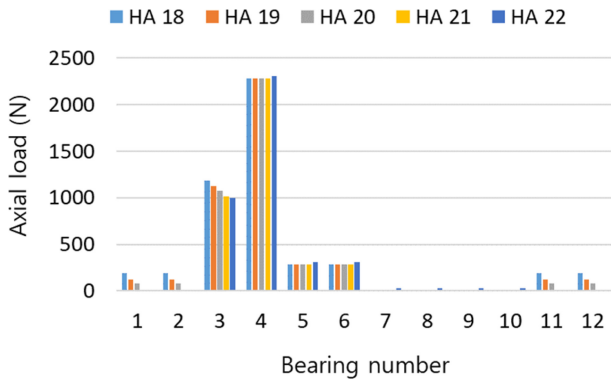


Fig. 14 Thrust loads for 18-22 degree of helix angles of PG4 at 5th speed ratio

5. 결론

본 연구에서는 자동변속기 스러스트 베어링 동력 손실에 대한 유성기어 세트의 헬릭스 방향과 헬릭스 각의 영향성을 분석하였다. 스러스트 베어링 동력 손실의 주요 인자인 축 방향 하중과 베어링 상대 회전 속도 해석을 위하여 샘플 자동변속기 모델링을 구성하였다. 샘플 모델을 활용하여 베어링 상대 회전 속도를 해석하고, 모델을 구성하는 유성기어 세트의 헬릭스 방향과 4번 유성기어 세트의 헬릭스 각 변화에 따른 축 방향의 스러스트 베어링 하중을 해석하였다. 상대 회전 속도와 하중에 대한 해석 결과를 활용하여 스러스트 베어링에서 발생하는 동력 손실 결과를 도출하고 유성기어 세트의 헬릭스 방향과 헬릭스 각의 영향성을 분석하였다.

자동변속기를 구성하는 유성기어 세트의 헬릭스 방향 조합에 따라 주요 회전 요소에서 발생하는 축 방향 하중의 방향은 변화하며, 스러스트 베어링 지지부와 인접하는 부품의 하중 방향의 변화에 따라 베어링에 수직으로 작용하는 하중의 크기는 증가 혹은 상쇄된다. 헬릭스 방향 조합에 따라 변화하는 베어링 수직 하중에 의하여 베어링 동력 손실량도 변화한다. 유성기어 세트의 헬릭스 방향 조합에 대하여 한 유성기어 세트의 헬릭스 각 크기가 증가할수록 베어링 동력 손실의 크기도 증가함을 확인하였다. 일부의 경우에서 헬릭스 각 증가에 따라 스러스트 하중이 상쇄되어 동력 손실이 감소하는 베어링이 발견되었다.

다음의 결과는 본 연구에서 활용한 샘플 자동변속기 구조에 관한 결과로 한정할 수 있으나, 연구의 내용과 결과를 다른 자동변속기 혹은 유성기어 적용 구조의 베어링 동력 손실 분석에 활용할 수 있을 것이다.

1) 모든 유성기어 헬릭스 방향 조합에 대하여 헬릭스 각 크기가 증가함에 따라 스러스트 베어링에 작용하는 최대 하중 총합의 크기는 증가한다.

2) 각 베어링에 작용하는 최대 하중의 총합은 PG1이 R 방향인 조합의 결과가 PG1이 L 방향 조합의 결과보다 크며, PG4의 헬릭스 각 크기의 변화가 PG4의 헬릭스 방향이 R인 경우보다 L일 때 영향성이 더 크게 작용한다.

3) PG4의 헬릭스 각이 증가함에 따라 스러스트 베어링에서 발생하는 동력 손실량은 증가하며, PG1의 헬릭스 방향이 R 방향인 그룹의 결과가 L 방향 그룹의 결과보다 크다.

4) LRLL과 LLLL 조합을 제외하고, PG4의 헬릭스 방향이 L인 조합의 결과가 R인 조합의 결과 대비 큰 차이를 보여준다.

5) LRLL과 LLLL 조합을 제외한 나머지 조합의 결과는 RRLL 조합의 결과처럼 PG4 헬릭스 각이 증가함에 따라 영향을 받는 스러스트 베어링 최대 하중은 증가하며 동력 손실량도 증가한다.

6) LRLL 조합에 대한 각 속도단 별 베어링 하중과 동력 손실 결과는 PG4의 헬릭스 각 증가에 따라 4-10번 베어링의 하중과 동력 손실은 증가하나, 베어링 1-3번의 동력 손실은 감소한다.

REFERENCES

- Hsu, C. H., Wu, Y. C., (1997), Automatic detection of embedded structure in planetary gear trains, *Journal of Mechanical Design*, 119(2), 315-318.
- Hsu, C.-H., Lam, K.-T., (1993), Automatic analysis of kinematic structure of planetary gear trains, *Journal of Mechanical Design*, 115(3), 631-638.
- Kwon, H. S., Kahraman, A., (2016), An assemblability check methodology for the kinematic configurations of automatic transmission planetary gear trains, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, 5605-5616.
- Raghavan, M., (2010), The analysis of planetary gear trains, *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2(2), 021005.
- Kahraman, A., Ligata, H., Kienzle, K., Zini, D. M., (2005), A kinematics and power flow analysis methodology for automatic transmission planetary gear trains, *Journal of Mechanical Design*, 126(6), 1071-1081.
- Sondkar, P., Kahraman, A., (2013), A dynamic model of a double-helical planetary gear set, *Mechanism and Machine Theory*, 70, 157-174.
- Kahraman, A., (1994), Natural modes of planetary gear trains, *Journal of Sound and Vibration*, 173(1), 125-130.
- Kim, J., Sohn, J., Kim, M.-G., Lee, G., Kim, S., (2023), Analysis of the transmission error of spur gears depending on the finite element analysis condition, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 36(2), 121-130.
- Kim, J. G., Park, Y. J., Lee, G. H., Nam, Y. Y., Yang, W. Y., (2014), Optimum design of pitch reducer for wind turbine using genetic algorithm, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 38(2), 185-192.
- Nam, S. J., Bae, M. H., Cho, Y. S., (2022), Strength evaluation of complex planetary gear train of traveling reducer for 1.7-ton grade small excavator, *Tribology and Lubricants*, 38(1), 22-26.

11. Kwon, H. S., Kahraman, A., Lee, H. K., Suh, H. S., (2014), An automated design search for single and double-planet planetary gear sets, *Journal of Mechanical Design*, 136(6), 061004.
12. Talbot, D., Kahraman, A., Li, S., Singh, A., Xu, H., (2016), Development and validation of an automotive axle power loss model, *Tribology Transactions*, 59(4), 707-719.
13. Del Castillo, J. M., (2002), The analytical expression of the efficiency of planetary gear trains, *Mechanism and Machine Theory*, 37(2), 197-214.
14. Kwon, H. S., (2021), A study of effects of the helical angle directions of planetary gear sets on the axial forces on thrust bearings in an automatic transmission, *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 20(3), 92-99.
15. Kwon, H. S., (2021), Investigation of the influences of thrust loads resulted by helix angle directions of planetary gear sets on bearing power losses in automotive planetary gear trains, *Applied Science*, 11(19), 8827.
16. ISO 14179-1, (2001), Gear thermal capacity - part 1: rating gears drives with thermal equilibrium at 95°C sump temperature.
17. SKF GROUP, Bearing friction, power loss and starting torque. <https://www.skf.com/africa/en/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/operating-temperature-and-speed/bearing-friction-power-loss-and-starting-torque>
18. Harris, T. A., Kotzalas, M. N., (2007), *Rolling bearing analysis: essential concepts of bearing technology*, Taylor and Francis Group.
19. Dick, A., Greiner, J., Locher, A., Jauch, F., (2013), Optimization potential for a state of the art 8-speed AT, *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 6(2), 899-907.
20. MASTA 12, MASTA13. <https://www.smartmt.com/software/masta>

**Hyun Sik Kwon**

Assistant professor in the Department of Automotive Engineering, Dong-eui University. His research interest includes gear mechanics/dynamics, transmission modeling/analysis.

E-mail: hskwon@deu.ac.kr

절삭력 물리 모델 기반 가공용 로봇 생산 시스템 디지털 트윈 플랫폼

Digital Twin Platform for Machining Robotic Production System based on Cutting Force Physics Models

하주형¹, 김동민^{1,#}
Ju-Hyung Ha¹ and Dong-Min Kim^{1,#}

¹ 한국생산기술연구원 에너지시스템그룹 (Energy System Group, Korea Institute of Industrial Technology)
Corresponding Author / E-mail: dkim0707@kitech.re.kr, TEL: +82-10-9407-5039
ORCID: 0000-0001-9303-7731

KEYWORDS: Cutting force (절삭력), Digital twin (디지털 트윈), Robotic production system (로봇생산시스템), Drilling (드릴링)

Digital twin technology offers the advantage of monitoring the status of equipment, systems, and more in a virtual environment, allowing validation through simulation. This technology has found numerous applications in the industrial robotics field, driven by recent advancements in the manufacturing industry. Consequently, predicting machining quality using digital twin technology is imperative for ensuring high-quality processed goods. In this study, we developed a digital twin program based on a cutting-force physical model and created a performance enhancement module that allows the visualization of material removal for user convenience. The predicted cutting forces from both conventional CNC and the physical model demonstrate a high accuracy of within 2%. Within the digital twin environment, the error rate for the robotic drilling process is 13.5%. Building upon this, we developed and validated a module for material removal visualization, aiming to increase convenience for on-site operators.

Manuscript received: February 16, 2024 / Revised: March 17, 2024 / Accepted: April 4, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

NOMENCLATURE

A = Initial Yield Strength [MPa]
B = Hardening Modulus [MPa]
C = Strain Rate Sensitivity Coefficient
n = Hardening Coefficient
m = Thermal Softening Coefficient
 ϵ = Plastic Strain
 $\dot{\epsilon}_0$ = Reference Plastic Strain Rate [s^{-1}]
 T_{int} = Temperature of the Material
 T_{melt} = Melting Point of the Material
 T_0 = Material Initial Temperature
 l_{AB} = Shear Length

w = Cutting Lip Length of Drill Bit
 θ = The Angle between the Shear Area and the Resulting Force
 λ = Friction Angle
 E^* = Equivalent Young's Modulus of the Workpiece Material
 ν_p = Poisson's Ratio of the Workpiece Material
 $f(t)$ = Instantaneous Feed Rate at the Chisel Edge
 P_{cut} = Plough Effective Cutting Force [N]
 P_{thrust} = Plough Effective Thrust Force [N]
 F_{chi} = Indentation Force from the Chisel Edge [N]
 l_{chi} = Length of the Chisel Edge
 k_{chi} = Coefficient of the Chisel Edge

1. 서론

최근 정보통신기술(ICT)의 발전은 제조업의 발전을 크게 촉진했으며, CAD, CAE, CAM, FEQ 등 컴퓨터 지원 기술이 빠르게 발전하고 있어 산업에서 중요한 역할을 수행하고 있다[1]. 따라서 다양한 산업 및 영역에 대한 수명주기 관리 및 예측분석에 초점을 맞춘 사례 연구가 급증함에 따라 디지털 트윈(Digital Twin)기술이 각광받고 있는 추세이다[2].

디지털 트윈은 양방향 상호작용을 통해 상호 소통하고 촉진하며 공동 진화(Co-evolve)하는 물리적 자산(또는 물리적 개체)과 디지털화된 표면의 유기적 전체를 의미하며[3], 디지털 트윈 기술은 비용 절감(Reducing Costs)[4] 및 신뢰성(Reliability)[5]과 같은 이점을 바탕으로 4차 산업혁명의 핵심기술로 자리잡고 있다. 특히, 생산 제조업 분야의 디지털 트윈 적용은 가상 시뮬레이션 모델을 기반으로 견고한 모델을 구축하며, 정확한 생산제어를 달성하기 위해 적용되어[6], 지능형 제조 분야에서 좋은 결과를 얻었다[7,8]. 또한 제조의 자동화(Automation)와 지능화(Intelligentization)는 산업용 로봇의 응용과 뗄 수 없는 관계인만큼 제조업의 발전에 따른 산업용 로봇의 기능이 다양해지고 있다[6].

또한 최근 항공산업 등 고부가 가치 산업의 발전에 따라 가공물의 높은 품질을 요구하는 추세이다. 대형 항공기의 경우 항공기 부품 조립 공정에 130만 개 이상의 드릴링 작업이 요구되지만[9], 작업자는 일반적으로 핸드드릴(Hand Drill)을 사용하여 드릴링한다. 하지만 수동 드릴링의 경우 유연성은 매우 높지만 품질과 반복성 및 작업 속도 측면에서 어려움을 겪는다[10]. CNC 기계를 통한 드릴링 작업의 경우 높은 가공 품질과 우수한 정확성을 나타내지만, 일반적으로 가격이 비싸고 유연성이 부족하며 넓은 설치 공간을 필요로 한다[11]. 이와 같은 이유로 산업용 로봇은 높은 유연성과 저비용의 장점을 기반으로 드릴링 작업을 위한 효과적인 플랫폼으로 채택되었다. 미국의 대표적인 항공기 제작회사인 Boeing사의 자회사인 Hawker De Havilland는 로봇 셀을 사용하여 Boeing 737 에일러론(Aileron)의 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 패널 구조를 드릴링 하였으며[12], 항공우주 자동화 설계 및 제조분야 기업인 Electroimpact는 자동화 비용을 감소시키고 빌드 효율성을 극대화하기 위해 로봇을 이용해 제품을 한번에 조립하는 “ONE-UP” 방식을 적용하였다[14].

이처럼 지능형 로봇은 항공우주 구조물에 정밀한 구멍을 뚫을 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 입증해 항공우주산업에서 성공적으로 활용되고 있다[12,13]. 하지만 로봇 드릴링(Robot Drilling)의 경우, 기존 CNC 기계의 강성(50 N/μm)에 비해 로봇의 팔과 관절에서 현저히 낮은 강성(1 N/μm)을 가져 더 높은 수준의 진동을 발생시키기 때문에 두 기계 간의 강성 차이가 산업계에서 로봇 채택을 방해하는 주요 문제로 인식되고 있다[15]. 또한 로봇 드릴링 공정에서는 공작물의 CAD 모델이 로봇 프로그램 생성의 기초로 사용되지만, 공작물 및 지그(Jig)의 모양, 위치 및 방향과 관련하여 실제 현장과 정확히 일치하지 않으므로 로봇 드릴링 시스템에 의해 생성된 구멍의 위치

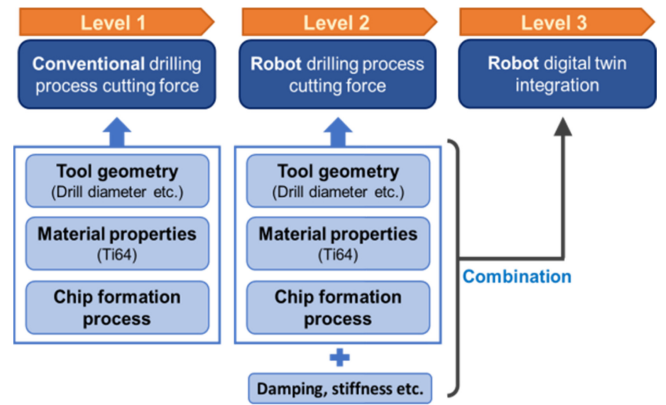


Fig. 1 Digital twin configuration diagram

오류가 발생한다[16]. 특히, 구멍의 위치 정확도에 대한 높은 기준을 가지는 항공우주 산업에서는 구멍의 위치 오류 개선이 필수적이다 [17]. 이처럼 로봇 드릴링은 높은 유연성을 제공하지만 가공 중 다양한 오류로 인해 홀의 품질과 드릴링 성능이 저하될 수 있다[18].

따라서 본 논문에서는 로봇 생산시스템의 기구학적 물리 모델 및 드릴 공정에서의 물리 모델을 한 플랫폼으로 결합함으로써 공정별 절삭력 및 드릴 홀의 품질 예측이 가능한 디지털 트윈 플랫폼을 제안한다. 디지털 트윈의 예측 모델은 기본단계(Base Level)에서부터 물리 기반 모델로 재정립하였으며 산업용 로봇을 이용한 드릴링 공정 실험을 통해 로봇의 각 축 인자(Factor) 도출을 위한 가상 모델을 제작한다. 그로부터 로봇의 인자 및 드릴 공정에 대한 물리 모델이 결합된 디지털 트윈의 예측 모델은 물리 기반 모델 중심으로 최종 디지털 트윈 프로그램을 제작하며 추가적으로 가상 모델에서 드릴 공정에 의한 재료 제거(Material Removal)의 가시화가 가능하도록 성능향상 모듈(Module)을 개발한다.

2. 모델링 및 설계

2.1 절삭력 모델링

디지털 트윈의 예측 모델을 위한 드릴 절삭력 모델링은 먼저 일반 시스템(Level 1)에서 CNC 기반 드릴 공정을 통해 얻은 실험적 데이터를 기반으로 수행되었다. 먼저 공구 형상 모델에 따른 절삭력 계산을 위해서 드릴 절삭력이 발생하는 구간을 Fig. 2와 같이 칩 생성영역인 Lip Region과 Chisel Region 영역으로 정의하였으며, Lip Region은 두께가 있는(Cutting Width) 2차원 직교 절삭모델(Orthogonal Cutting Model)로 가정하며, Chisel Region 영역은 Indentation에 의한 절삭력 모델로 가정한다.

2차원 직교절삭모델은 Oxley 이론 수식을 기반으로 방향에 따라 절삭력으로 변환되었다. Oxley 이론 모델은 Johnson-cook 재료 소성모델을 이용하여, Flow Stress를 계산하였다. Johnson-

Table 1 Values of each parameter in the Johnson-cook material plasticity model

A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	T_{melt}	T_0
856.41	840.26	0.111	0.8	0.663	1632	25

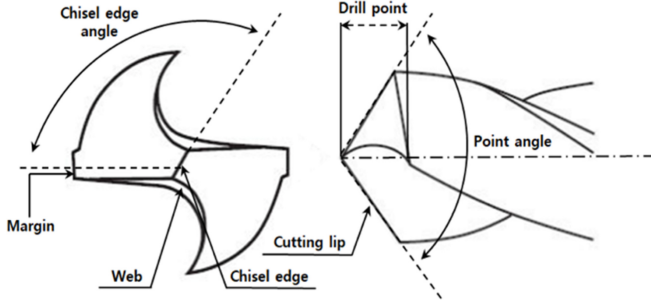


Fig. 2 Geometry of a twist drill bit

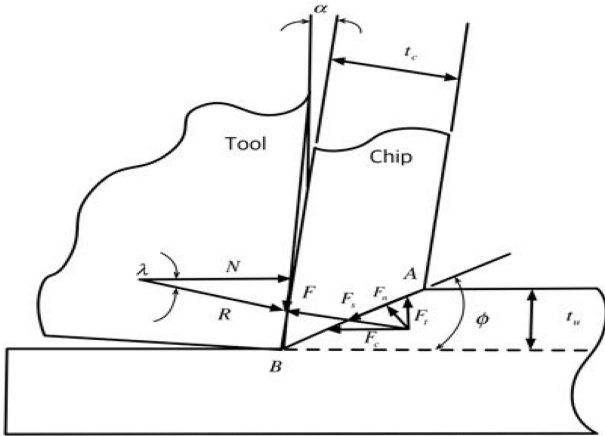


Fig. 3 Cutting forces in shear plane model

cook 재료 소성모델은 다음 식(1)을 통해 계산된다.

$$\sigma_{AB} = (A + B\epsilon_{ini}^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \left(1 - \left(\frac{T_{ini} - T_0}{T_{melt} - T_0}\right)^m\right) \quad (1)$$

상세한 Oxley 이론수식은 참조자료[19]에 상세히 나타나 있다. Fig. 3에서 2차원 직교 절삭모델에 해당하는 것으로 가정하였으므로, 식(2)부터 식(4)와 같이 F_c , F_t 로 계산한다.

$$F_s = \frac{\sigma_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot l_{AB} \cdot w \quad (2)$$

$$F_c = \frac{F_s}{\cos \theta} \cos(\lambda - \gamma) \quad (3)$$

$$F_t = \frac{F_s}{\cos \theta} \sin(\lambda + \gamma) \quad (4)$$

절삭공정 중 드릴날에 의해 끝단에서 Ploughing Effect가 발생하므로, Waldorf 모델을 이용해서, Cutting Region에 발생한 최종 절삭력은 아래와 같다. 상세한 Waldorf 모델에 대한 설명은 참조자료[19]에 나타나 있다.

Table 2 Ti-6Al-4V mechanical properties

Length [mm]	103 × 103 × 30
Tensile strength yield [MPa]	1100
Elongation at break [%]	10
Modulus of elasticity [GPa]	114
Shear strength [MPa]	760
Melting point [°C]	1604-1660

$$F_{sc} = F_c + P_{cut}, F_{st} = F_t + P_{thrust} \quad (5)$$

Chisel Region 영역의 Indentation Force는 공작물(Workpiece)과 치즐 엿지 사이의 접촉이론(Contact Theory)[20]에 따라 모델링 될 수 있다[21].

$$F_{chi} = E^* \delta l_{chi} \quad (6)$$

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu_p^2} \quad (7)$$

$$\delta = k_{chi} f(t) \quad (8)$$

Chisel Region 영역에 의해 발생하는 절삭력은 추력에만 해당된다. 따라서, 드릴날과 티타늄 재료간에 발생하는 추력은 다음과 같이 계산하였다.

$$F_{total-thrust} = F_{st} + F_{chi} + 2 \cdot F_{st} \cdot \cos(\phi_{point}) \quad (9)$$

전체 추력은 전체 Torque에 비해 약 6, 7배 정도 차이가 발생한다. 로봇에 영향을 미치는 것은 추력 방향 절삭력이므로, 본 연구에서는 추력만 계산하며 디지털 트윈에 반영하였다.

해당 절삭력 이론을 바탕으로 일반 CNC (DIXI 1200 Jig Boring Machine)를 통해 드릴링 실험을 진행하였다.

작업물은 높은 중량 대비 강도와 경량성 특징을 가지며, 항공 산업분야에서 많이 사용되는 Ti-6AL-4V가 사용되었다. 공구는 항공우주 산업에서 일반적으로 사용되는 직경인 6 mm로 설정되었으며, TiAlN 코팅된 WC Drill (YG-1, DREAM DRILL INOX DH452060)이 가공에 사용되었다. 스핀들(Spindle)의 회전속도는 2,122 RPM, 이송량(Feed Rate)은 169.77 mm/min로 총 10 mm 두께의 시편을 드릴링 하였다.

본 드릴링 실험의 가공 조건들은 이전에 수행된 Ti-6AL-4V 드릴링 실험을 기반으로 본 실험에서 동일하게 적용되었으며 [22], 작업물의 기계적 성질과 사용된 공구의 세부정보는 Tables 2와 3, CNC에서 측정된 절삭력은 Fig. 4에 도시되었다.

이후 일반 CNC 드릴링을 통해 얻은 절삭력 데이터를 바탕으로 Lip Region+Chisel Region에 의한 절삭력 및 재료 제거량 당 절삭력(F_{mmr} , N/mm³) 모델링을 계산한다.

2.2 로봇드릴공정에 대한 물리 모델 설계

로봇 장비를 활용한 드릴 공정시험(Level 2)에서는 Level 1 CNC 드릴링과 동일한 Ti-6AL-4V 시편이 사용되었으며, 사용된

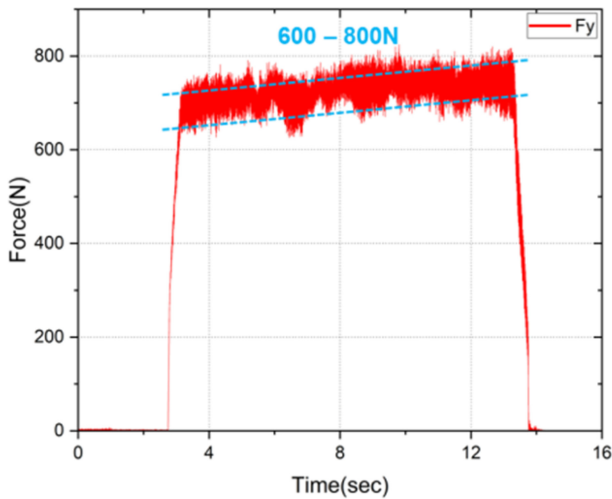


Fig. 4 Cutting forces measured on CNC

Table 3 Drill technical details

Diameter [mm]	6
Coolant supply	Internal coolant supply
Coating	TIALN-T63
Tool-sense of rotation	Right hand
Point angle [°]	140
Cutting material	Carbide

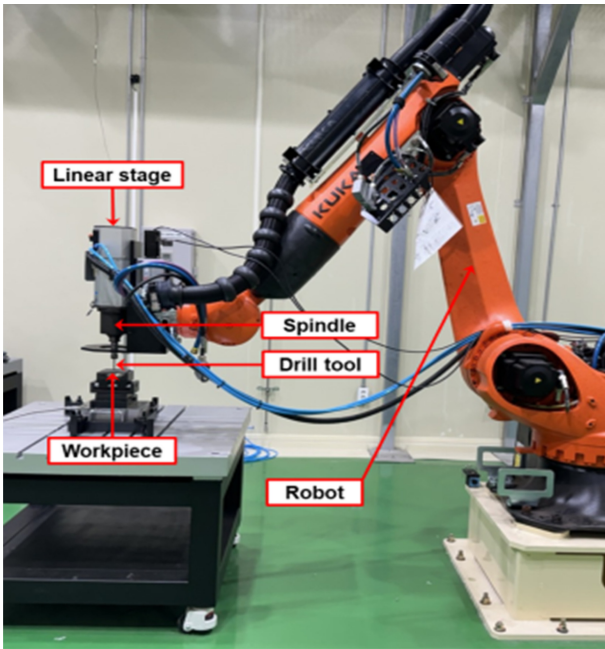


Fig. 5 Robot drilling process schematic

공구 또한 동일하다.

실험에 사용된 로봇은 KUKA KR 300 R2700 모델로 최대 3,150 mm의 작동범위를 가지며, 최대 300 kg까지 탑재 가능한 산업용 로봇이다. 또한 드릴링 공정을 위해 로봇 팔 끝 부위에

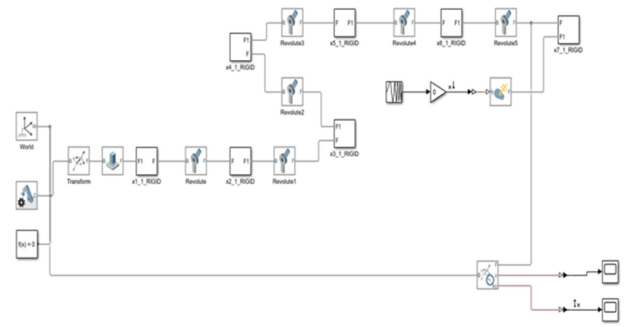


Fig. 6 SIMSCAPE modeling

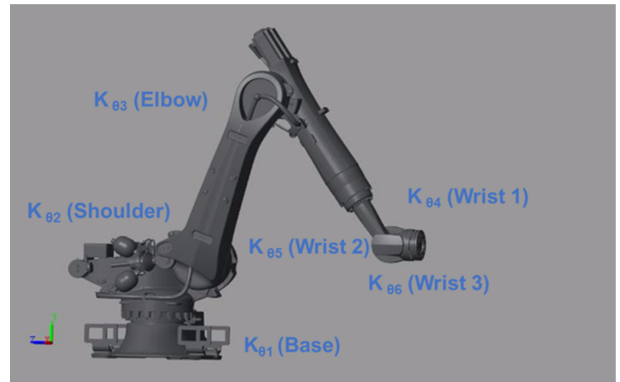


Fig. 7 Revolute joint of the robot

HSD사의 ES 929 선형 스테이지(Linear Stage)를 부착하여 스피들 장착이 가능하게 하였다.

로봇 드릴 공정은 CNC 가공과 다르게 비교적 낮은 강성으로 인해 드릴날의 불안전성으로 인한 진동(Oscillation)이 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 추가적으로 감쇠(Damping), 강성(Stiffness) 등을 고려하여야 한다. 감쇠 및 강성을 측정하기 위해선 로봇의 각 축 인자를 도출해야 하며, 인자도출을 위한 모달 테스트(Modal Test)를 수행하였다. 이후 로봇 인자를 알기 위해 모달 테스트한 결과를 기반으로 몸체(Body)와 회전 조인트(Revolute Joint)로 연결된 SIMSCAPE 예측 모델링을 생성하였다.

이후 각 회전 조인트에 감쇠 및 강성 값을 임의로 입력하였으며, Simulink x7 위치에서의 Input (N) 값과 Acceleration (m/s²)을 이용하여 선형(Linear) 분석을 수행하였다.

선형분석을 통한 주파수 응답(Frequency Response) 결과의 사인파(Sine Wave)를 Hz 증가를 통한 고유 주파수(Natural Frequency)를 분석했으며, 이후 조인트의 초기 강성(Initial Stiffness)을 Dumas[23]등의 연구에서 사용된 데이터를 입력한 후 변경하였다.

최종적으로 강성 값은 Table 4에 도시되었으며, Fig. 8을 통해 최종 예측 모달 결과를 확인할 수 있다.

3. 예측 결과

디지털 트윈 내에서 절삭력 연산이 요구되는 부분을 체적 메

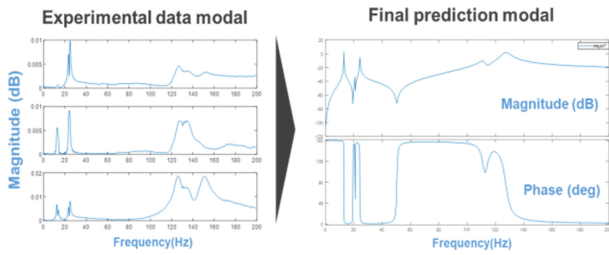


Fig. 8 Final predicted modal result

Table 4 Revolute joint stiffness values

[Nm/rad]	K01	K02	K03
Arbitrary stiffness	1.4098e6	0.400760e6	0.935280e6
Final stiffness	1.4098e6	0.06055e6	0.043e6
[Nm/rad]	K04	K05	K06
Arbitrary stiffness	0.36e6	0.37e6	0.38e6
Final stiffness	0.006e6	0.006e6	0.006e6

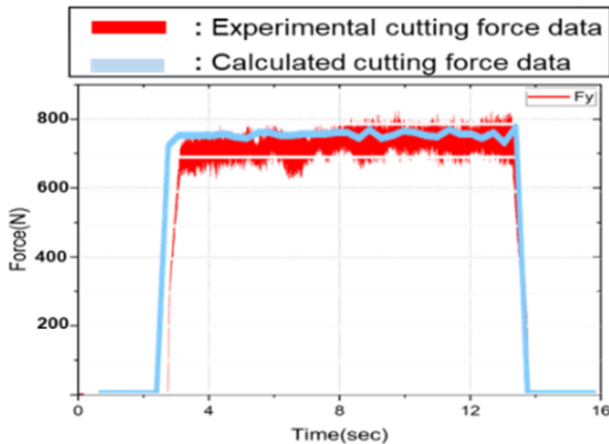


Fig. 9 Comparison of cutting forces calculated through physical model

시(Volumetric Mesh)로 가정하고, 절삭력 연산이 요구되지 않는 부분을 표면 메시(Surface Mesh)로 가정하였다. 두 가지 이상 부분이 접촉되는 부분은 부울 연산(Boolean Operation)을 통해 재료 제거량(Volume, mm³)을 계산해냈다.

실험을 통해 재료 제거량 당 절삭력은 307.5 N/mm³/min으로 측정되었으며, 해당 값을 디지털 트윈 플랫폼 내에 입력하여 절삭력 예측을 수행하였다. 그 결과 Fig. 9에서와 같이 일반 장비에서 측정된 절삭력과 물리 모델을 통해 계산된 절삭력을 비교했을 때, 절삭력의 차이는 2% 이내로 높은 정확성을 보였다. 이는 로봇이 아닌 고강성이 확보된 CNC 장비에서 실험하였으므로, 공정 측정된 결과가 다른 영향 없이 측정되는 것으로 사료된다. 반면 로봇 장비를 활용한 드릴 공정 실험은 1,000 RPM의 스핀들 회전속도, 0.001 m/s의 이송속도로 드릴링 하였다.

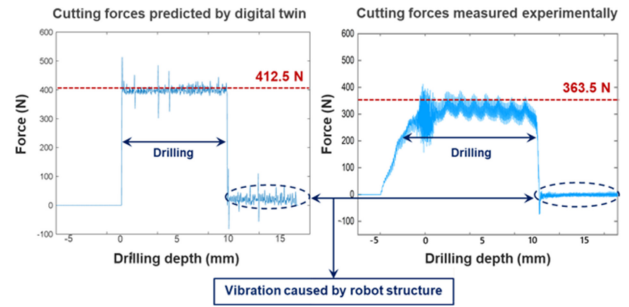


Fig. 10 Digital twin combination program for robot drilling process

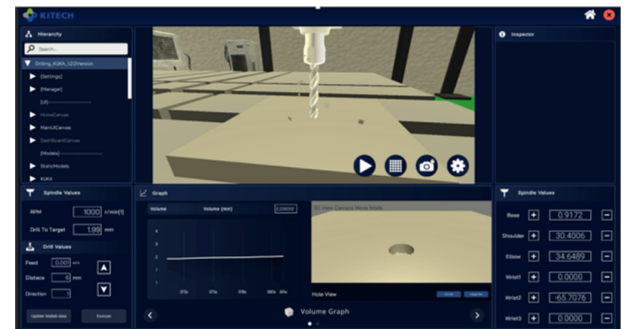


Fig. 11 Robotic drilling process cutting force compared by experiment and digital twin

Thrust Force의 최대 포락선(Envelope) 평균값을 산출한 실험 및 예측 데이터 결과는 Fig. 11에 도시되었으며 실험 데이터의 경우 평균 363.5 N의 절삭력이 발생하였고 예측 데이터의 경우 412.5 N으로 13.5%의 에러율(Error Rate)을 가진다.

4. 가시화 성능 향상 모듈 개발

디지털 트윈 내의 로봇 드릴 공정을 통해 물리 모델 기반 절삭력 예측 성능을 검증하였다. 이를 기반으로 가상 모델에서 드릴 공정에 의해 재료가 제거되는 양과 이를 가시화하기 위한 성능향상 모듈을 개발하였다. 공구와 재료 접촉에 의해 발생하는 물리적 현상을 가상에서는 부울 연산을 통해 재료의 제거량을 계산하며, 로봇의 강성 및 감쇠에 의해 발생하는 진동을 가시화할 수 있도록 하였다.

드릴 홀의 볼륨(Volume) 값을 구하기 위해서 Mesh의 각 삼각형을 구성하는 정점의 인덱스를 통해 삼각형의 부호를 포함하여 부피를 계산했다. 또한 볼륨 연산 시 시작단으로부터 최상단에 수렴하는 부분까지 기하급수적으로(Exponential) 절삭력이 증가하므로 이를 반영하기 위해서 원뿔형 Simple 모델을 개발하여 적용했다(Fig. 12). 드릴 Tip 부분은 서서히 증가하는 형태이므로 이를 원뿔형 모델로 대체할 수 있도록 내부 코드를 작성하였으며, 전체 드릴 홀이 생성 시 원기둥모델로 계산이 가능하도록 Fig. 13과 같이 재료 제거 볼륨 계산 알고리즘을 개발해 가시화 모델을 구성하였다.

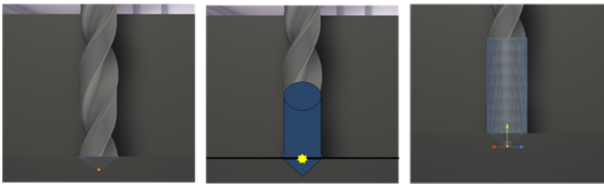


Fig. 12 Conical simple model

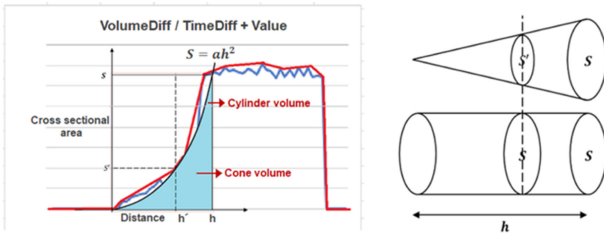


Fig. 13 Material removal volume calculation algorithm using drill shape and simple shape

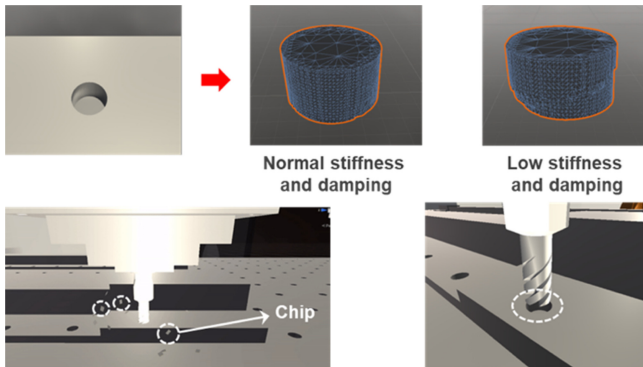


Fig. 14 Visualization module development

5. 결론

로봇을 이용한 드릴 공정 시 절삭력 및 제품의 품질을 예측하기 위한 디지털 트윈 모델을 구성했다. 품질 예측을 위해서 절삭력 및 로봇 구조에 대한 물리 모델을 기반으로 디지털 트윈을 구성했으며, 디지털 트윈에서 연산을 위한 알고리즘(Algorithm)을 적용함으로써 실제 로봇 구조로 인한 드릴 절삭력의 예측값을 매우 유사하게 예측했다.

일반 장비에서 측정된 절삭력과 물리 모델을 통해 계산된 절삭력을 비교했을 때, 절삭력의 차이는 2% 이내로 높은 정확성을 확보했으며, 로봇 드릴 공정의 경우 로봇의 낮은 강성 대비 13.5%의 예측 정밀도를 달성하였다.

또한 가시화 모듈 개발을 통해 사용자가 재료제거 및 발생하는 칩(Chip)에 대해 인식할 수 있다(Fig. 14). 하지만 로봇의 낮은 강성으로 인해 절삭력에 대한 저항이 낮아짐에 따라 드릴 홀에 편차가 생성될 수 있기 때문에 디지털 트윈 내에서 절삭력 예측을 했을 때 거시적인 확인이 필요하며, 공구의 진동에 대해 정량화가 가능하도록 계산 기능이 추가될 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2024년 한국생산기술연구원의 청정생산시스템핵심기술연구사업의 지원을 받아 수행하고 있는 ‘미래 산업환경 대응 홀로닉 생산시스템 기술 개발(EO240002)’ 과제에서 수행된 연구임.

REFERENCES

- Liu, M., Fang, S., Dong, H., Xu, C., (2021), Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications, *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361.
- Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A.-S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., Lozoya-Santos, J. D. J., (2022), Digital twin technology challenges and applications: a comprehensive review, *Remote Sensing*, 14(6), 1335.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F., (2018), Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563-3576.
- Hu, L., Nguyen, N.-T., Tao, W., Leu, M. C., Liu, X. F., Shahriar, M. R., Al Sunny, S. N., (2018), Modeling of cloud-based digital twins for smart manufacturing with MT connect, *Procedia Manufacturing*, 26, 1193-1203.
- Glaessgen, E., Stargel, D., (2012), The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles, *Proceedings of the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin*, 1-14.
- He, B., Bai, K. J., (2021), Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review, *Advances in Manufacturing*, 9(1), 1-21.
- Gbededo, M. A., Liyanage, K., Garza-Reyes, J. A., (2018), Towards a life cycle sustainability analysis: a systematic review of approaches to sustainable manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 184, 1002-1015.
- Koren, Y., Gu, X., Badurdeen, F., Jawahir, I. S., (2018), Sustainable living factories for next generation manufacturing, *Procedia Manufacturing*, 21, 26-36.
- Bu, Y., Liao, W., Tian, W., Zhang, J., Zhang, L., (2017), Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application, *Precision Engineering*, 49, 388-400.
- Frommknecht, A., Kuehnle, J., Effenberger, I., Pidan, S., (2017), Multi-sensor measurement system for robotic drilling, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 47, 4-10.
- Miyake, Y., Kondo, Y., (2022), A study on new machining method applied to a collaborative robot for drilling, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 78, 102409.
- Atkinson, J., Hartmann, J., Jones, S., Gleeson, P., (2007), *Robotic drilling system for 737 aileron* (Report No. 2007-01-

3821), SAE Technical Paper, <https://doi.org/10.4271/2007-01-3821>.

13. Zhu, W., Qu, W., Cao, L., Yang, D., Ke, Y., (2013), An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 2535-2545.
14. DeVlieg, R., Feikert, E., (2008), One-up assembly with robots (Report No. 2008-01-2297), SAE Technical Paper, <https://doi.org/10.4271/2008-01-2297>.
15. Zhang, H., Wang, J., Zhang, G., Gan, Z., Pan, Z., Cui, H., Zhu, Z., (2005), Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance, *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1127-1132.
16. Zhu, W., Mei, B., Yan, G., Ke, Y., (2014), Measurement error analysis and accuracy enhancement of 2D vision system for robotic drilling, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 30(2), 160-171.
17. Olsson, T., Haage, M., Kihlman, H., Johansson, R., Nilsson, K., Robertsson, A., Björkman, M., Isaksson, R., Ossbahr, G., Brogårdh, T., (2010), Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 26(1), 24-38.
18. Schneider, U., Drust, M., Ansaloni, M., Lehmann, C., Pellicciari, M., Leali, F., Gunnink, J. W., Verl, A., (2016), Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 3-15.
19. Kim, D. M., (2017), Enhancement of tool-life of hard turning process via cryogenic coolant and micropatterned insert, Ph.D. Thesis, UNIST.
20. Fischer-Cripps, A. C., (1999), The Hertzian contact surface, *Journal of Materials Science*, 34(1), 129-137.
21. Yang, H., Ding, W., Chen, Y., Laporte, S., Xu, J., Fu, Y., (2019), Drilling force model for forced low frequency vibration assisted drilling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 146, 103438.
22. Choe, J.-H., Ha, J. J., Kim, J., Kim, D. M., (2023), Surface characteristics and residual stress variation in semi-deep hole machining of Ti-6Al-4V ELI with low-frequency vibration-assisted drilling, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(6), 209.
23. Dumas, C., Caro, S., Garnier, S., Furet, B., (2011), Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 27(4), 881-888.



Ju-Hyung Ha

M.Sc. candidate in the Department of Energy System, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is precision engineering.
E-mail: hajh@kitech.re.kr



Dong-Min Kim

Ph.D. in the Department of Energy System, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is precision engineering.
E-mail: dkm0707@kitech.re.kr

TGV 인터포저의 디싱 제어를 위한 2-step CMP 전략

2-step CMP Strategy for Dishing Control of TGV Interposers

정승훈¹, 신영일¹, 정종민¹, 정선호¹, 정해도¹,#
Seunghun Jeong¹, Yeongil Shin¹, Jongmin Jeong¹, Seonho Jeong¹, and Haedo Jeong¹,#

¹ 부산대학교 대학원 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Graduate School, Pusan National University)
Corresponding Author / E-mail: hajeong@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-3210
ORCID: 0000-0003-1838-659X

KEYWORDS: Chemical mechanical planrization (화학적 기계적 평탄화), Interposer (인터포저), Through-glass via (유리 관통 전극), Dishing (디싱)

Chemical mechanical planarization (CMP) is an essential polishing process in semiconductor manufacturing. Advances in memory technology, including increased capacity and performance, have increased the importance of electronic packaging. In heterogeneous integration, the interposer acts as an important intermediary between the logic die and the substrate, solving numerous I/O bump problems in high-bandwidth memory (HBM) and logic chips. Traditionally, board-to-memory connections were made through wire bonding, which required additional space for wire connections and introduced latency due to extended signal transmission paths. A through-type approach has emerged as a solution that can significantly reduce waiting time and installation space by improving space efficiency and enabling vertical connections without extending wiring. Due to these new approaches, the importance of CMP is reemerging. Implementation of this important process requires precise control of the CMP dishing/protrusion of bonding surfaces. Improper selection of Cu pad dishing/protrusion can cause problems such as increased RC delay time and signal short circuit in the wiring. In this paper, we proposed a strategy to control dishing using CMP, especially for Through-glass-via (TGV).

Manuscript received: February 27, 2024 / Revised: April 29, 2024 / Accepted: May 14, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

1. 서론

반도체의 고밀도화에 대해 반세기 이상 지속되고 있던 무어의 법칙(Moore's Law)이 한계에 직면했다. 반도체 집적 회로의 성능이 18개월마다 2배로 증가하는 무어의 법칙을 트랜지스터나 리드선 등 소자의 미세화를 통해 실현해왔다. 이러한 기술적 진보로 집적회로는 고밀도화 되었고 결과적으로 고성능화, 고속화, 저가격화로 이어졌다. 하지만, 정밀도가 올라가면서 물질을 무한히 분할하는 것은 원자의 크기라는 벽에 부딪힐 수밖에 없다.

이러한 무어의 법칙의 한계를 극복하기 위해 미세화와는 다른 방법으로 가치 높은 집적 시스템 칩을 개발하는 모어 덴 무어(More than Moore)가 고안되었다[1,2].

최근 여러 개의 메모리칩을 수직으로 적층하여 메모리 용량을

늘리고, 정보 전달 거리를 줄여 데이터 전송 속도를 향상시킨 HBM (High-bandwidth Memory)이 개발되어 HBM과 로직 칩 (Logic Chip)을 나란히 붙인 2.5D 패키지가 개발되고 있다. 일반적으로 HBM 1개당 마이크로 범프(Micro Bump)의 수는 5천개 정도로 이를 기판에 직접 연결하려면 그 정도 수준의 PCB 패드를 만들어야 하고 이는 일반적 제조 공정에서는 쉽지 않은 일이다. 이처럼 진화하는 반도체 제조 환경에서 유리 인터포저(Glass Interposer)는 뛰어난 전기적 특성과 비용 효율성으로 인해 2.5D 및 3D 집적회로(IC)의 중요한 구성요소로 등장하였다[3,4].

인터포저는 제조 시 발생하는 과도한 구리층에 대한 제거가 필수적이다. 하지만 잔여 구리층을 제거할 때 발생하는 이종 재료 면에서의 연마는 Via의 디싱(Dishing)을 발생시킨다. 표면에서의 결함의 일종인 디싱은 인터커넥트 두께의 가변성을

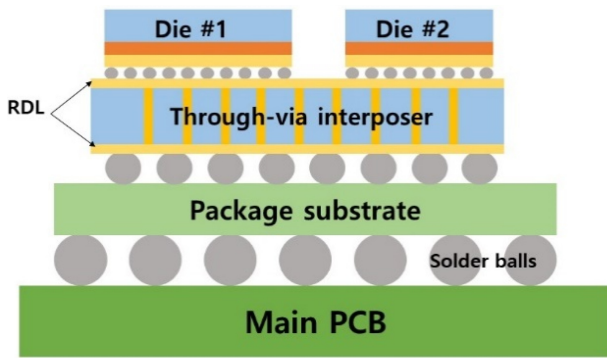


Fig. 1 Schematic diagram of 2.5D integration

유발하고 잠재적으로 전기적인 성능을 저하시킴으로써 반도체 장치의 무결성과 기능을 크게 훼손한다.

이 연구는 유리 인터포저 기반 반도체 장치의 신뢰성과 성능을 향상시키기 위하여 디싱 현상을 이해하고 제어하는 전략을 제시하고자 한다. 디싱의 근본 원인을 조사하고 향후 유리 인터포저 CMP 공정을 최적화하는 솔루션을 제공함으로써 반도체 제조 분야에 기여하고자 한다.

1.1 인터포저

1.1.1 인터포저

반도체 칩의 초미세화와 다양한 기능을 가진 시스템에 대한 요구가 증가함에 따라, 고집적도 및 높은 대역폭의 상호 연결에 대한 요구 또한 증가하고 있다[5]. 이러한 상황에서, 로직 칩과 메모리 칩 간의 효과적인 연결을 위한 2.5D 및 3D 패키징 기술의 핵심 요소로 인터포저가 대두되고 있다[6]. Fig. 1에서 제시된 바와 같이, 인터포저는 메모리와 칩을 서브스트레이트 사이의 중간자 역할을 하며, 특히 HBM과 로직 칩의 방대한 I/O 범프 수를 효율적으로 연결하기 위해 필수적이다. 때문에, 웨이퍼 공정을 통해 이에 대응할 수 있는 패드와 금속 배선을 만들어 HBM과 로직칩을 연결해주는 것이 인터포저이다[7].

1.1.2 와이어 본딩과 Through-via

칩들을 각 기능에 맞게 사용하기 위해서는 전자가 흐르도록 외부 도선과 연결을 해야 한다. 기존에는 Fig. 2(a)에 도시된 와이어 본딩 기술을 활용하여 내부 칩과 외부를 연결하였다. 이 와이어 본딩 기술은 비용 효율적이며 유연하기 때문에 널리 활용되었다[8]. 하지만, 늘어난 칩과 메모리의 양에 따라 와이어가 차지하는 공간과 전달 가능한 핀의 개수가 32개로 제한된다는 한계점이 있다. 이러한 문제점을 해결한 것이 바로 Fig. 2(b)에 도시된 Through-via 방법이다. Through-via 방법은 와이어를 바깥으로 인출할 필요가 없이 수직으로 연결하기 때문에 기존의 와이어 본딩에 비해 공간적 효율이 높다. 또한, 전기적 신호의 전달 경로가 매우 짧고, 전달할 수 있는 핀의 개수가 매우 많아 대역폭을 크게 상승시키는 장점이 있다[9].

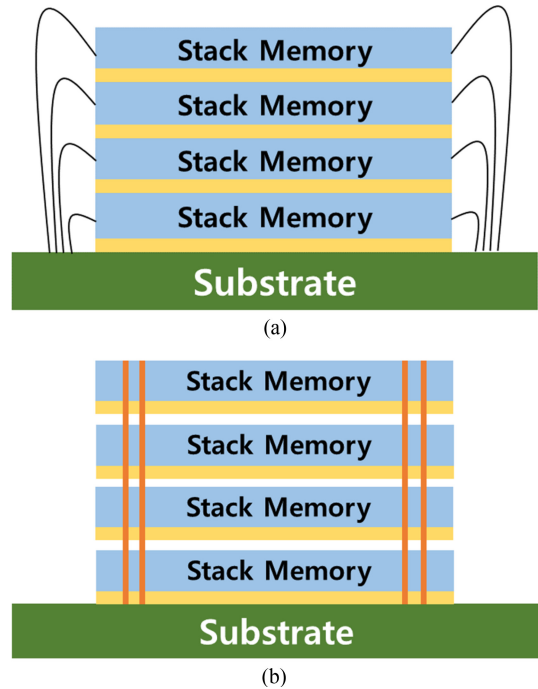


Fig. 2 Schematic of (a) wire bonding and (b) through-via method

1.1.3 유리 인터포저

인터포저 기술은 세라믹, 유기 기판, 실리콘, 유리 등의 다양한 재료가 사용된다. 유기 기판의 경우 치수 안정성이 낮기 때문에 높은 I/O에 적합하지 않고 이에 따라 최근에는 실리콘 인터포저에 대한 연구가 활발히 이루어졌다[10]. 하지만, 최근에는 1) 대량 패널 생산을 통한 비용 절감, 2) 우수한 전기 신호 전송, 3) 조정 가능한 열팽창계수(CTE) 등의 장점으로 인해 유리 인터포저를 사용하는 추세가 증가하고 있다[11].

1.2 CMP 도전과제

1.2.1 구리 도금 잔여물의 발생

Through-via 방식을 사용한 Interposer는 다마신 기술을 통해 전도성이 높고(저항률이 낮고) 다층 배선에 폭넓게 활용될 수 있는 구리로 채워져 있다[12]. 그러나 깊은 Via에 대한 긴 도금 시간은 웨이퍼 상단에 과도한 구리층(Overburden Layer)을 형성하게 한다. (Fig. 3) 이러한 과도한 구리층은 CMP를 통해 제거될 필요가 있다. 재료 제거율(Material Removal Rate, MRR)은 CMP 공정시간에 직접적인 영향을 주는 요소이기 때문에 수율 확보 면에서 과도한 구리층을 빠르게 제거하는 것이 중요하다. 특히, CMP 공정시간의 증가는 CMP시 사용되는 소모품의 사용량 증가로 이어지게 되는데, 슬러리의 경우 고가이기 때문에, 재료 제거율이 높은 슬러리를 사용해 Bulk CMP 공정시간을 단축시킬 필요가 있다[13].

1.2.2 디싱의 발생

디싱이란 과다 연마 단계에서 발생하는 결함으로서 일정 패턴 영역이 움푹하게 들어간 현상을 말한다. 앞서 소개한 Bulk

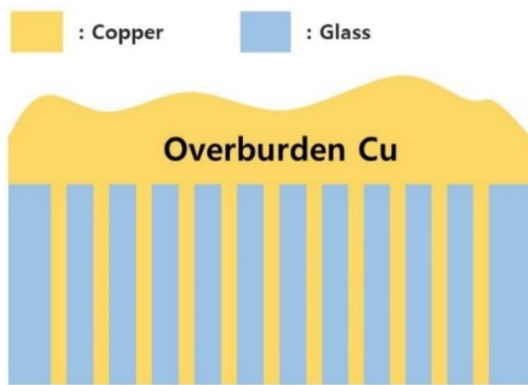


Fig. 3 Cu plating residues (overburden)

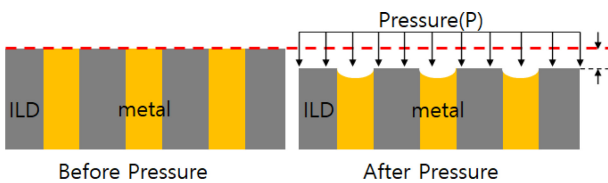


Fig. 4 Mechanical causes of dishing

CMP를 진행할 때, 연마 종점은 유리 표면이 드러날 때이다. 이 지점에 도달하면 서로 물성이 다른 유리와 구리가 동시에 드러나게 된다. 연마 종점 이후의 연마로 인해 디싱이 발생하게 되는데, 그 이유는 다음과 같다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 같은 연마 압력이 작용할 때, 두 물질은 각각의 탄성계수에 비례하는 응력을 받게 되어 재료 제거율의 차이가 발생한다.

Bulk CMP에 사용된 구리의 재료 제거율이 높은 슬러리의 사용으로 인해, 연마 종점에서 구리가 더 많이 연마되어 디싱이 발생한다.

이러한 디싱 현상은 배선의 단락이나 후공정에 영향을 미친다. 특히, 패턴 형상에 직접적인 영향을 미치는 결함으로써 배선 영역에서의 단면적 감소에 따른 RC 지연 시간의 증가와 단위 면적 당 전류 밀도의 증가로 인한 Electro-migration 현상을 유발할 수 있으므로, 디싱은 Via 직경의 1/1,000 사이즈로 관리되어야 한다.

2. 이론적 배경

2.1 CMP 메커니즘

CMP는 고밀도 인터커넥트에 필수적인 표면 평탄성을 달성하게 해주는 공정으로, 표면의 화학적인 반응과 기계적인 힘을 이용하여 웨이퍼 표면의 불필요한 재료를 제거하고 평탄화 하는 과정이다. 특히, 구리를 활용한 인터커넥트 공정에서의 CMP는 더 높은 전기적 성능과 신뢰도 달성을 위해 필수적이다.

2.2 구리의 재료 제거 메커니즘

금속 CMP의 경우 슬러리와 금속의 화학 반응이 주요하다.

Table 1 Experimental condition

Wafer	4 inch TGV wafer	
Pad	Closed-pore polyurethane pad	
Slurry	Colloidal silica	
Pressure [g/cm ²]	Head	140
	Retainer	210
Velocity [rpm]	Head	93
	Platen	87
Slurry flow rate [ml/min]	150	

구리 CMP에서는 기계적인 힘뿐만 아니라, 화학적 요인 또한, 구리의 재료 제거 메커니즘에 지배적으로 작용한다. 표면에서 금속이 전자를 잃고 슬러리 속에 용해되거나 산소와 결합하여 산화막을 형성하고, 이 산화막을 연마 입자를 통해 물리적으로 제거하는 메커니즘을 포함한다[14].

3. 실험

3.1 실험 조건

실험에는 유리 웨이퍼에 100 μm 직경의 Via를 형성하고 도금을 통해 구리를 양면으로 채운 4 inch 유리 웨이퍼를 사용하였다. 연마패드와 연마장비는 각각 KPX사의 KONI 패드와 G&P Technology 사의 POLI-500 장비를 사용하였다. 1차 연마 단계에서는 연마기에 설치된 IR 센서와 Piezometer를 활용하여 실시간으로 온도와 마찰을 측정하였다. 1차 연마의 경우, 도금 과정에서 생긴 잔여 구리층을 빠르게 제거하여 연마 종점에 도달하기 위해 구리에 대한 재료 제거율이 높은 슬러리를 사용하였다. 2차 연마의 경우, 일반적으로 유리 웨이퍼의 연마에서는 유리의 높은 재료 제거를 위해 Ceria 연마재를 사용하지만, 다음 단계 공정에서의 표면 거칠기와 결함에 대한 엄격한 사양에 의해 Colloidal Silica 연마재를 사용한 슬러리를 사용하였다 [15]. 연마 실험에 대한 조건은 Table 1에 기술하였다. 연마 후 구리의 디싱은 Nanoscope 사의 Nanoview 로 측정되었다.

3.2 실험 결과

3.2.1 Bulk Cu CMP Process

Fig. 5(a)에 도시된 것과 같이 도금 시 발생한 구리 잔여물을 빠르게 제거하기 위해 구리에 대해 높은 재료 제거율을 갖는 슬러리를 사용해 1차 CMP를 진행하였다. 상용 슬러리와 DIW, H₂O₂ 1.0 wt%를 혼합하여 실험을 진행하였다. Fig. 6의 그래프에서 보이는 바와 같이 두드러지는 변화가 나타나는 3개의 구간을 나눌 수 있다.

- ① 온도와 마찰이 증가하는 구간
- ② 온도와 마찰이 감소하는 구간
- ③ 온도와 마찰이 일정하게 유지되는 구간

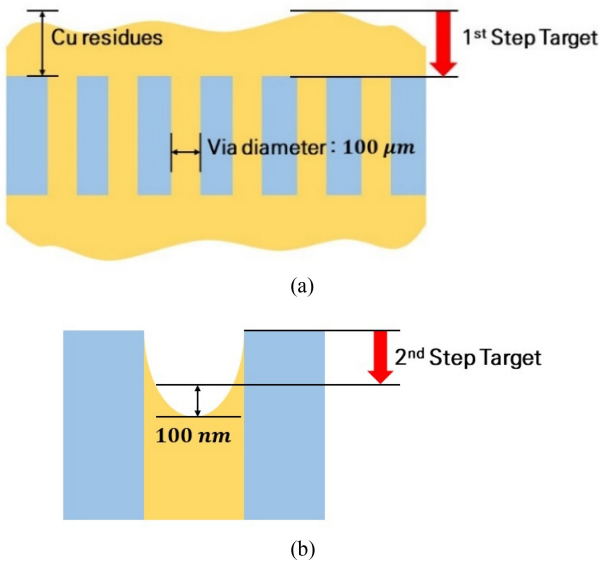


Fig. 5 Target of CMP stage (a) 1st and (b) 2nd

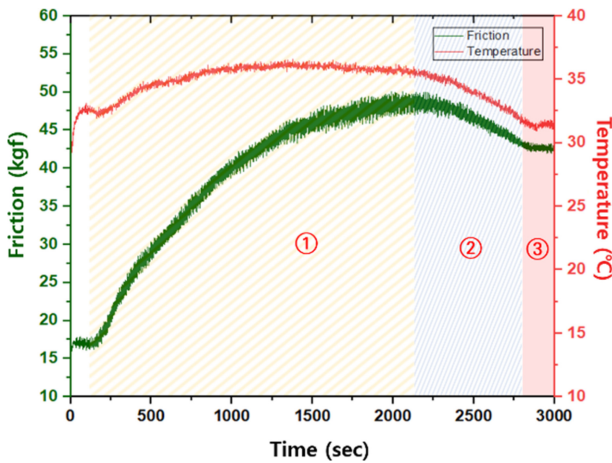


Fig. 6 Real time data of friction and temperature in 1st CMP

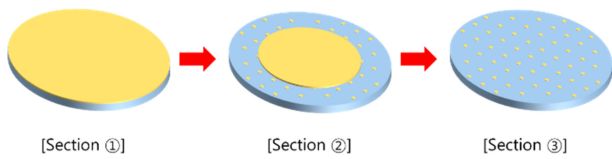


Fig. 7 Appearance of wafers by section

Fig. 7 과 같이 각각의 구간에서의 웨이퍼의 모습을 확인할 수 있다. 연마가 시작되면서 잔여 구리들이 슬러리와 화학적으로 반응하면서 제거가 되는데, ① 이 과정에서 마찰과 열이 증가하게 된다. 그 이후, ② 유리 웨이퍼의 표면이 일부 드러나게 되면서 반응할 수 있는 구리의 면적이 줄어들고, 발생하는 마찰과 열은 감소하게 된다. 마지막으로, ③ 모든 유리 표면이 드러나면 마찰과 열이 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 전체 연마시간의 약 5% 정도의 시간 동안 ③ 구간 연마를 진행하였다. 3D 광학현미경을 통해 구리 부분에 발생한 디싱의 양을

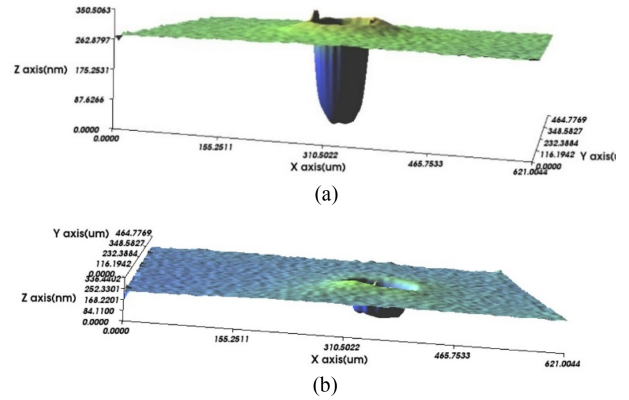


Fig. 8 3D profile of dishing (a) after 1st CMP and (b) after 2nd CMP

Table 2 Dishing amount after 1st CMP

Wafer #	1	2	3	4	5
Dishing [nm]	184	221	190	190	197

Table 3 Coefficient of dishing reduction

Particle concentration 12 wt%	509
Particle concentration 9 wt%	245
Particle concentration 6 wt%	100
Particle concentration 6 wt% + H ₂ O ₂ 1.0 wt%	85
Particle concentration 6 wt% + H ₂ O ₂ 0.2 wt%	46

측정하였다. 측정은 웨이퍼의 중심부를 기준으로 진행하였고, Fig. 8의 3차원 프로파일에서 보이는 것과 같이 구리 부분이 움푹 파인 형상을 나타내며, 5면의 웨이퍼를 측정한 결과는 Table 2에 기술하였다. 각각의 웨이퍼 면에 남아 있는 잔여 구리의 두께가 서로 달랐기 때문에 1차 CMP이 후 발생하는 디싱의 양에는 차이가 있었으며, 그 값이 Via 크기의 1/1,000 수준인 100 nm를 충족하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 2차 연마를 통한 디싱 조절 전략을 수립하였다.

3.2.2 Dishing Control CMP Process

1차 CMP를 통해 발생한 디싱을 줄이기 위해서는 유리의 연마량이 구리보다 많을 필요가 있다. 따라서, 유리에 대해 선택비가 높은 슬러리인 Colloidal Silica 기반의 슬러리를 사용하였고, 이는 같은 시간 동안 많은 양의 유리 제거를 가능하게 한다. 2차 연마의 경우 빠르게 구리 잔여물을 제거하는 1차 연마와는 달리 Fig. 5(b)에 나타난 그림과 같이 원하는 수준의 디싱 양을 정밀하게 조절할 필요가 있다. 2차 연마에서 각각의 슬러리에 의한 효과를 확인하기 위해, 1차 연마 후의 웨이퍼를 약 800 nm 수준으로 과연마를 진행하였다. 2차 CMP에서는 슬러리의 연마 입자 농도와 첨가제로 사용된 과산화수소의 농도를 파라미터로 두고 각 경우에서의 디싱양 감소를 측정하였다.

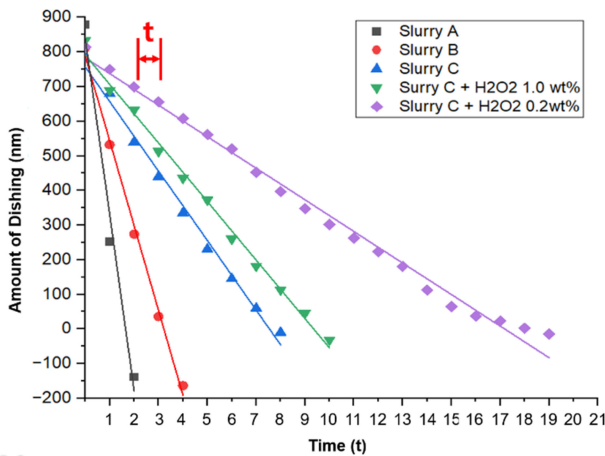


Fig. 9 Decrease in dishing amount at the same time interval for each slurry

Table 3에 기술된 바와 같이 12, 9, 6 wt%의 입자농도를 갖는 슬러리를 사용하였고, 그 후 입자농도 6 wt%인 슬러리에 과산화수소를 0.2, 1.0 wt%를 첨가하여 그 값을 비교하였다. 슬러리의 입자농도가 높을수록 높은 재료제거율을 보였고, 과산화수소의 농도의 증가에 따른 재료제거율은 0.0 wt%에서 0.2 wt%가 추가됨에 따라 증가하다가 1.0 wt%가 추가됨에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 Table 3에 표기한 디싱 감소에 대한 계수를 통해 확인할 수 있는데, 0.2 wt%의 과산화수소가 추가되었을 때, 디싱의 감소량이 큰 폭으로 감소하였고, 1.0 wt%의 과산화수소가 추가되었을 때, 다시 디싱의 감소량이 증가한 것으로 확인할 수 있다.

일정한 시간 간격 t 로 연마 후 측정된 각 슬러리 별 디싱 감소에 대한 계수들을 바탕으로 식(1)과 같은 간단한 일차식을 구성할 수 있다. 여기서 a 는 Table 3에 나타난 디싱 감소에 대한 계수를, h 는 1차 연마 후 측정된 디싱의 양을 의미한다.

$$h = -at + b \tag{1}$$

각각의 슬러리에 따른 디싱의 감소량을 일정한 시간 간격 t 로 연마 후 디싱의 양을 측정하였고, 각 지점의 값들을 선형 회귀하여 Fig. 9 그래프로 나타냈다. Table 3에 표기된 디싱 감소에 대한 계수는 각 슬러리 별 단위시간 t 당 디싱 감소율을 나타내며, Fig. 9에 나타난 그래프의 기울기로 해석할 수 있고, 각각 509, 245, 100, 85, 45 nm 로 도출되었다.

앞선 Dishing Control CMP Process에서의 디싱 감소 계수와 식(1)을 이용하면, Bulk Cu CMP Process 후의 디싱 양인 h 를 측정하여, 적절한 슬러리와 그에 따른 연마시간을 결정할 수 있다. 본 연구에서 사용된 웨이퍼의 Via 직경은 100 μm 이고, 이에 따른 요구 디싱 양은 100 nm이다. 본 실험을 통해 확인한 Dishing Reduction Figs. 8(a)와 8(b)에 나타난 3차원 프로파일에서 확인할 수 있듯이, 1차 연마 후 약 258 nm의 디싱에서 85 nm 수준의 디싱으로 요구되는 디싱의 양을 충족시켰다.

4. 결론

인터포저 제조 시 Via를 채우기 위한 도금 과정에서 웨이퍼 위에 구리 잔여물이 남게 되고, 이는 CMP를 통해 제거될 필요가 있다. 또한, 잔여 구리층의 제거 과정에서 연마가 과도하게 되면 디싱이 발생하여 상호 연결의 전기적 성능에 부정적 영향을 미치게 된다. 따라서, 목표하는 디싱의 양을 달성하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서 진행한 두 단계의 연마는 각각의 목표를 가진다. 1차 연마의 경우 공정 시간과 공정에 드는 소모품의 비용적 부담을 덜기 위해 빠르게 연마하는 것이 필요하며, 과도하게 연마될 경우 디싱의 양이 증가하여 2차 연마의 부담을 가중시키므로, 마찰과 온도 프로파일의 실시간 감지를 통해 적절한 과연마 시간을 설정할 수 있다. 빠른 제거를 위해 구리 재료 제거율이 높은 슬러리를 사용하여, 미세한 디싱 조절에는 어려움이 있고, 이에 따라 2차 연마는 필수적이다.

따라서, 본 논문에서는 디싱 제어를 위해 다음과 같은 전략을 제시한다. 일정한 시간 간격 t 로 연마 후 측정된 각 슬러리 별 디싱 감소에 대한 계수들을 바탕으로 식(1)과 같은 간단한 일차식을 구성할 수 있고, 이 식과 앞선 Dishing Control CMP Process에서의 디싱 감소 계수를 이용하면, 1차 연마 후의 디싱 양인 h 를 측정하여, 적절한 슬러리와 그에 따른 연마 시간을 결정할 수 있다.

Bulk Cu CMP Process 후 발생한 디싱 h 와 목표 디싱양(Via 직경의 1/1,000 수준) 과의 차이가 많지 않다면, 디싱 감소 계수 a 가 작은 값의 슬러리를 선정하여 연마를 진행하고, 목표값과의 차이가 많은 경우 높은 a 값을 갖는 슬러리를 선정하여 2차 연마 시간을 단축시킬 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(MSIP)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20221R1A2C1095017).

REFERENCES

1. Wong, H., (2021), On the CMOS device downsizing, more moore, more than moore, and more-than-moore for more moore, Proceedings of the 2021 IEEE 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL), 9-15.
2. Suzano, J., Abouzeid, F., Natale, G. D., Philippe, A., Roche, P., (2023), On hardware security and trust for chiplet-based 2.5D and 3D ICs: challenges and innovations, IEEE Access, 12, 29778-29794.
3. Jang, J.-G., Suk, K.-L., Lee, S.-H., Park, J.-W., Jeon, G.-J., Park,

- J.-H., Jin, J.-G., Lee, S.-C., Kim, G.-B., Choi, J.-Y., (2020), Advanced RDL interposer PKG technology for heterogeneous integration, Proceedings of the 2020 International Wafer Level Packaging Conference (IWLPC), pp. 1-5.
4. Liu, Z., Fu, H., Hunegnaw, S., Wang, J., Merschky, M., Magaya, T., Mieno, A., Shorey, A., Kuramochi, S., Akazawa, M., Yun, H., (2016), Electroless and electrolytic copper plating of glass interposer combined with metal oxide adhesion layer for manufacturing 3D RF devices, Proceedings of the 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 62-67.
 5. He, H., Xue, H., Sun, Y., Liu, F., Cao, L., (2022), Design and realization of multi-channel and high-bandwidth 2.5D transmitter integrated with silicon photonic MZM, Journal of Lightwave Technology, 40(15), 5201-5215.
 6. Zhang, X., Lin, J. K., Wickramanayaka, S., Zhang, S., Weerasekera, R., Dutta, R., Chang, K. F., Chui, K.-J., Li, H. Y., Wee, D. H. S., Ding, L., Katti, G., Bhattacharya, S., Kwong, D.-L., (2015), Heterogeneous 2.5D integration on through silicon interposer, Applied Physics Reviews, 2(2), 021308.
 7. Usman, A., Shah, E., Satishprasad, N. B., Chen, J., Bohlemann, S. A., Shami, S. H., Eftekhar, A. A., Adibi, A., (2017), Interposer technologies for high-performance applications, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 7(6), 819-828.
 8. Wu, L., Wang, Y.-P., Kee, S. C., Wallace, B., Hsiao, C. S., Yeh, C. K., Her, T. D., Lo, R., (2000), The advent of 3-D package age, Proceedings of the 26th IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 102-107.
 9. Gambino, J. P., Adderly, S. A., Knickerbocker, J. U., (2015), An overview of through-silicon-via technology and manufacturing challenges, Microelectronic Engineering, 135(5), 73-106.
 10. Sukumaran, V., Chen, Q., Liu, F., Kumbhat, N., Bandyopadhyay, T., Chan, H., Min, S., Nopper, C., Sundaram, V., Tummala, R., (2010), Through-package-via formation and metallization of glass interposers, Proceedings of the 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 557-563.
 11. Mukhopadhyay, S., Long, Y., Mudassar, B., Nair, C. S., DeProspo, B. H., Torun, H. M., Kathaperumal, M., Smet, V., Kim, D., Yalamanchili, S., Swaminathan, M., (2019), Heterogeneous integration for artificial intelligence: Challenges and opportunities, IBM Journal of Research and Development, 63(6), 8869909.
 12. Wang, S., Lee, S. R., (2011), Fast copper plating process for through silicon via (TSV) filling, Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 855-863.
 13. Lee, D., Lee, H., Jeong, H., (2015), The effects of a spray slurry nozzle on copper CMP for reduction in slurry consumption, Journal of Mechanical Science and Technology, 29, 5057-5062.
 14. Lee, H., Jeong, H., (2011), A wafer-scale material removal rate profile model for copper chemical mechanical planarization, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51(5), 395-403.
 15. Chen, C.-C. A., Young, H.-T., Chiou, C.-H., Xue, M.-Y., Pan, C.-L., (2016), Study on CMP process of glass wafers with SiO₂ based slurry for trench-glass-via interposer, Proceedings of the 2016 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), 1-6.



Seunghun Jeong

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is dishing control in copper CMP.

E-mail : smooth3778@pusan.ac.kr



Yeongil Shin

Ph.D candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is planarization modeling of copper pattern.

E-mail: oil5108@pusan.ac.kr



Jongmin Jeong

Ph.D candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is artificial intelligence CMP system.

E-mail: jmjeong@pusan.ac.kr



Seonho Jeong

Ph.D candidate in the department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is planarization profile modeling of pattern device.

E-mail: shjeong@pusan.ac.kr



Haedo Jeong

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research fields include chemical mechanical polishing (CMP), grinding, polisher and consumable design, and post-CMP cleaning.

E-mail: hdjeong@pusan.ac.kr

다물체동역학기반 실시간 원격주행 시뮬레이터 개발

Development of Real-time Remote Driving Simulator based on Multi-body Dynamics

박수현¹, 손정현^{2,#}, 주향전³
Suhyun Park¹, Jeonghyun Sohn^{2,#}, and Xiangqian Zhu³

¹ 부경대학교 대학원 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Pukyong National University)

² 부경대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pukyong National University)

³ 산둥 대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Shandong University)

Corresponding Author / E-mail: jhsohn@pknu.ac.kr, TEL: +82-51-629-6166

ORCID: 0000-0002-1072-6564

KEYWORDS: Real-time (실시간), Simulator (시뮬레이터), Joystick (조이스틱), Autonomous robot (자율주행로봇), Multi-body dynamics (다물체 동역학), PID control (PID 제어)

Autonomous robots are commonly operated on rough roads. Thus, it is essential to predict their dynamic characteristics. Even though it is possible to use real hardware to acquire a robot's dynamic characteristics, this requires a significant amount of time and cost. Therefore, a real-time remote driving simulator must be developed to reduce these risks. Most real-time simulators employ physics engines, which are calculated using simple functional expressions based on particles. However, in this case, there is a limit to reflecting the dynamic characteristics of actual robots. In this study, a multi-body dynamic model of a robot was established. MATLAB Simulink was used to connect the vehicle model with the joystick and calculate user input signals. The PID control system determines the driving torque of the robot to satisfy the calculated signal. Gain value optimization is performed to enable real-time control. This study can be available to analyze the traversability.

Manuscript received: February 27, 2024 / Revised: March 28, 2024 / Accepted: April 5, 2024

NOMENCLATURE

K_P	=	Proportion Gain
K_I	=	Integral Gain
K_D	=	Derivative Gain
$w_{d,FL}$	=	Desired Wheel Speed of a Front Left Wheel
w_{FL}	=	Current Wheel Speed of a Front Left Wheel
FL	=	Front Left Wheel
FR	=	Front Right Wheel
RL	=	Rear Left Wheel
RR	=	Rear Right Wheel

1. 서론

최근 무인 주행에 대한 기술이 발전함에 따라 다양한 노면에 대한 주행 기술 연구가 증가하고 있다. 무인 로봇은 일반 도로와 같이 규격화되어 있는 도로를 주행하는 경우도 있지만 주로 사람이 임무를 수행하기 어려운 험지와 같은 환경에서 원격주행이나 자율주행으로 운용된다. 이러한 험지와 같이 험난한 지형에서 로봇을 무인으로 주행시키기 위해서는 로봇의 정확한 동특성 분석이 중요하다. 차량의 동특성은 시험을 통해서도 확보가 가능하지만 실제 하드웨어를 주행시킬 경우 많은 비용 및 위험이 수반되며 심할 때는 차량이 손상될 수 있다. 그러므로 무인 주행 중 발생할 수 있는 상황에 대한 다양한 시나리오와 실제 동특성을 반영한 로봇의 동역학 모델을 구성하여 실제

하드웨어를 운용시키지 않고도 동특성을 분석할 수 있는 실시간 시뮬레이터에 대한 개발이 요구된다. 실시간 시뮬레이터에 대한 많은 연구들이 진행됐지만, 대부분의 실시간 차량 시뮬레이터는 다양한 환경에서 안정적으로 실시간 해석을 하기 위해 차량 모델을 질점 동역학으로 모델링하거나 차량의 서스펜션을 간단한 함수형 서스펜션으로 구성하였다.

Yoo는 실시간 해석을 위해 현가장치 모델링을 무질량 링크로 고려하여 운동방정식의 크기를 줄였으며 무질량 링크 모델링에 현가 스프링이 장착되어 있는 연구를 진행하였다[1]. Gu는 실시간 차량 모델의 안정적인 해석 수행을 위해 상미분 방정식으로 표현할 수 있는 함수형 현가장치 모델을 개발하였으며 휠의 변위에 대한 현가장치의 상대변위를 함수식으로 표현하여 가상 시뮬레이터에 적용시켰다[2]. 이 경우 단순한 모델로 구성되어 있어서 해석 시간이 줄어들어 실시간성이 향상된다는 장점이 있지만 회전 거동에 대한 해석의 정확도는 떨어진다는 단점이 있다. Park은 휠로더의 주행 성능을 객관적으로 평가하기 위해 ODE를 통해 휠로더 모델을 구성하고 시뮬레이션을 수행하였다. 하지만 이는 물리 파라미터 간의 연결 유형을 간단하게 정의한 모델로 해석 시간은 빠르지만 정확한 동특성을 예측하기는 어렵다[3]. 정확한 동특성 확보를 위해 다물체 동역학 기반의 실시간 시뮬레이터에 대한 필요성이 증가하였다. 과거에는 다물체 동역학 모델로 실시간 해석을 진행할 경우 모델의 정확도는 향상되지만 계산량이 많아 실시간성이 떨어지는 문제가 있었다. 하지만 컴퓨터의 성능이 발전함에 따라 이전보다 신속한 계산이 가능해졌으며 차량모델을 간소화시킴으로써 실시간 해석이 가능한 수준까지 도달하였다.

본 연구에서는 무인 로봇차량의 정확한 동특성을 반영하기 위해 다물체 동역학 기반 실시간 원격주행 차량 시뮬레이터를 개발하는 것을 목표로 한다. RecurDyn을 통해 다물체 동역학 기반으로 모델링하고 MATLAB/Simulink 환경을 구성하여 실시간 통합 해석 시스템을 구성하였다.

2. 무인 로봇차량의 동역학 모델링

2.1 로봇차량의 동역학 모델링

실험에 사용된 차량은 Fig. 1에 나타난 WEGO 사의 Scout 2.0 모델을 사용하였다. Scout 2.0 모델은 원격 조종 및 무인 주행이 가능한 로봇이며 주로 실내가 아닌 외부에서 임무를 수행하는 로봇이다. 무인 로봇차량은 4개의 독립적인 서스펜션과 4개의 바퀴로 구성되어 있으며 각 바퀴는 인휠 모터(Inwheel Motor)를 통해 독립적으로 구동되도록 구성되어 있다. 각 바퀴의 속력 차이를 통해 조향을 하는 스킵드(Skid) 조향 방식을 사용하고 있다. 본 연구에서는 무인 로봇차량을 모델링하기 위해 상용 다물체 동역학 프로그램인 RecurDyn을 활용하였으며, 무인 로봇차량은 1개의 차체와 4개의 서스펜션, 4개의 타이어로 모델링하였다. 무인 로봇차량의 서스펜션은 4개 모두 더블로커 현가장치(Double



Fig. 1 Unmanned robot (Scout 2.0)

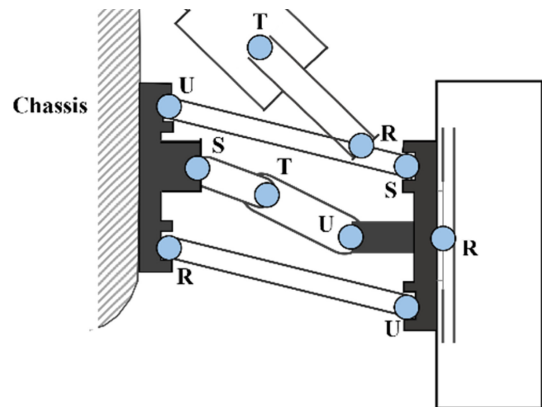


Fig. 2 Joint diagram of suspension

Table 1 Spring property

Parameter	Value
Spring coefficient	66.5 N/mm
Damping coefficient	0.7 N·s/mm

Rocker Suspension)의 구조를 가지고 있다. 서스펜션은 부싱 요소가 사용되지만, 부싱 요소로 모델링 할 경우 실시간으로 해석을 수행하는 것이 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 부싱요소 대신 조인트를 사용하여 무인 로봇차량의 기구학적 모델링하였으며, 각 서스펜션의 조인트 모델링 정보를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 S는 구면 조인트(Spherical Joint), R는 회전조인트(Revolute Joint), U는 유니버설 조인트(Universal Joint), T는 병진 조인트(Translational Joint)를 의미한다. 서스펜션은 2자유도를 가지고 있으며, 이는 바퀴를 구동시킬 수 있는 구동에 대한 자유도와 높이 방향의 구배에 따라 상하로 움직일 수 있도록 해주는 수직 방향의 자유도이다. 무인 로봇차량 모델은 전체 14자유도를 가진다.

본 연구에 사용된 무인 로봇차량의 서스펜션은 지면이 가해주는 충격 및 진동을 줄이기 위해 서스펜션에 스프링 및 댐퍼가 장착되어 있다. 서스펜션에 사용된 코일 스프링을 모델링하기 위하여 스프링의 CAD 정보와 재료 물성치를 활용하여 스프링의 특성을 정의하였다. 코일 스프링은 인장 및 압축 하중을 받게



Fig. 3 Experimental setup for tire characteristics

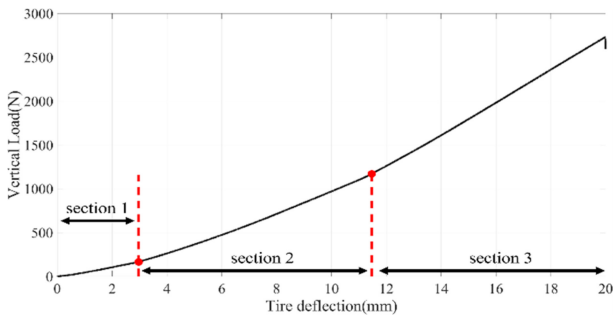


Fig. 4 Vertical force according to tire deflection

될 때 와이어는 비틀림 응력을 받게 된다. 코일 스프링의 특성을 정의하기 위해 와이어가 받는 비틀림 응력을 기반으로 강성계수를 정의하였다[4-6]. 수직을 통해 유추한 스프링 강성계수와 적용된 댐핑 계수는 Table 1에 정리하였다.

2.2 로봇차량의 타이어 모델링

외부 환경에서 주행할 때 로봇차량에 들어오는 외력은 주로 지면으로부터의 가진력이다. 이 외력은 타이어와 로봇차량의 서스펜션에 의해 차체로 전달되기 때문에 정확한 타이어 파라미터를 확보하지 못한다면 실제 동특성을 파악하는 것이 어렵다. 본 연구에 사용된 무인 로봇차량에 적용된 타이어는 일반 승용 타이어가 아닌 Fig. 3과 같은 지름 310 mm와 높이 10 mm의 러그가 표면에 부착되어 있는 러그형(Lug-type) 타이어이다. 크기가 작고 러그를 가지고 있어서 차량동역학에서 주로 사용되고 있는 MF 타이어 모델과 같은 실험 타이어 모델을 쓰는 것은 불가능하여, 본 연구에서는 적은 변수를 사용하는 이론적 타이어 모델인 UA (University of Arizona) Tire[7,8]를 사용하였다. UA Tire 모델에 필요한 파라미터 중 타이어력에 가장 큰 영향을 미치는 수직 강성계수는 MTS의 만능 재료 시험기를 활용하여 측정하였다. 수직 강성계수는 타이어의 공기압에 따라서도 영향이 있으므로 시험 시 타이어의 공기압을 출고 기준인 40 psi로 세팅하여 시험을 진행하였다. Fig. 3에 나타난 것처럼 시험기로 수직하중을 인가하였으며, 그때의 타이어 변형량을 측정하였다.

수직 강성에 대한 시험 결과는 Fig. 4에 나타내었으며 시험 결과를 보면 인가한 수직 하중 구간별로 크게 3가지의 수직 강성계수를 확인할 수 있다. 이는 러그형 타이어의 특성으로써 본 연구에 사용한 무인 로봇차량의 경우, 한 바퀴에 가해지는 수직력은 166.7 N이므로 이 구간에서의 수직 강성계수인 134.1 N/mm 사용하였다. 최종적으로 시험을 통해 정의한 수직 강성계수를 활용하여 UA Tire에 필요한 나머지 파라미터를 추정하였으며 마찰계수의 경우 선행연구[9]를 참고하여 일반적으로 사용하는 아스팔트 노면에 대한 마찰 계수를 사용하였다.

3. 통합 시뮬레이터 구성

본 연구에서는 RecurDyn과 MATLAB/Simulink의 연성 해석 환경을 구성하여 실시간 원격 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 통합 시뮬레이터는 원격주행이 가능하며, 원격주행을 위해 Fig. 5의 Logitech사의 Wheel Joystick G29를 이용하였다. 시뮬레이터는 Fig. 6의 Flowchart 순서로 해석이 진행된다. 원격주행 환경을 위해 사용자는 조이스틱으로 구동 및 조향 입력을 넣게 되며 입력된 신호는 MATLAB/Simulink 환경으로 전달되어 차량이 명령에 맞게 주행할 수 있도록 토크 제어를 한다. 계산된 구동 토크를 RecurDyn 모델로 전달하여 해석이 가능하도록 구성하였으며 사용자는 해석 결과를 실시간으로 확인하여 피드백 입력을 넣어준다.

3.1 MATLAB/Simulink 환경 구성

MATLAB/Simulink 환경은 조이스틱 신호를 정의하는 Joystick Subsystem, 정의된 신호를 차량의 스펙에 맞도록 연산을 하는 Driving System, 목표 속도를 추종하도록 구동 토크를 제어하는 Control Subsystem으로 구성하였다. Joystick Subsystem은 실제 차량과 같게 기어(Gear)에 따라 Driving, Parking, Neutral, Reverse와 같이 4가지 모드를 정의할 수 있으며 동일한 조이스틱 입력을 입력하더라도 기어 입력에 따라 출력되도록 구성하였다. 신호를 계산하게 되면 Driving Subsystem에서는 차량의 스펙에 맞도록 목표 속도를 계산하게 된다. 본 연구의 로봇 모델은 스키드 조향이기 때문에 조향 입력 및 가감속 입력 신호를 모두 고려한 후 각 바퀴의 목표 각속도를 연산한다. 마지막으로 Control Subsystem에서는 각 바퀴의 목표 각속도를 추종하도록 구동 토크를 제어할 수 있도록 구성하였다. 계산된 모터의 토크는 Co-simulation 환경을 구성하여 RecurDyn 모델로 전달이 가능하게 구성하였으며 전달받은 구동 토크 입력에 대하여 RecurDyn에서는 실시간으로 동역학 해석을 수행한다.

3.2 실시간 제어를 위한 PID 제어기 설계

본 연구의 실시간 원격 시뮬레이터는 사용자가 입력해 준 조이스틱 입력에 따라 각 휠의 목표 속도가 결정되며 각 휠의 토크를 제어하는 하위레벨의 PID 제어를 수행한다. PID 제어기는

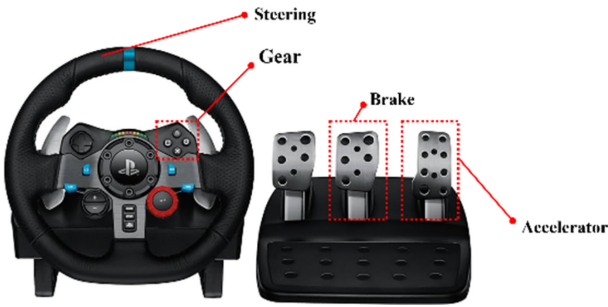


Fig. 5 Wheel joystick (G29)

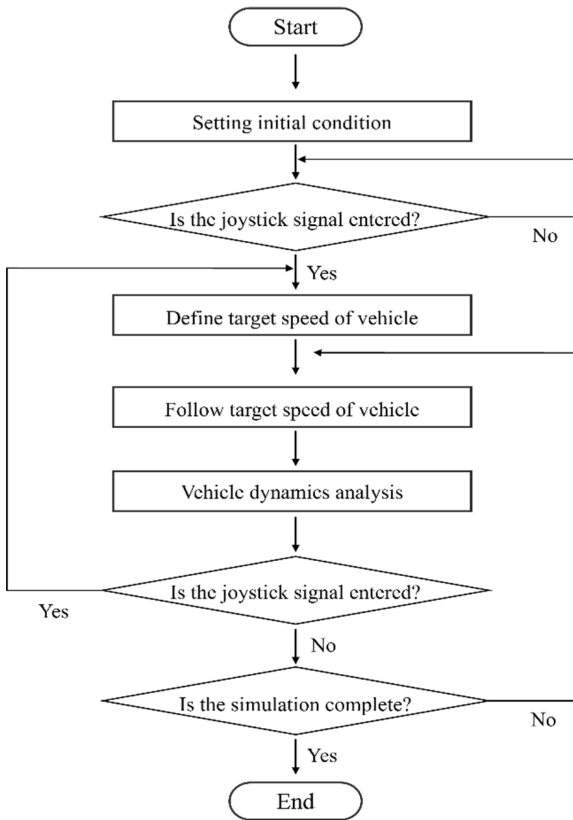
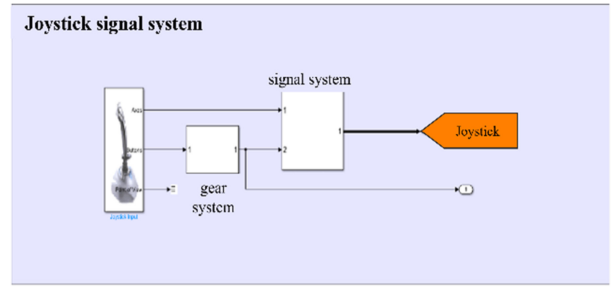


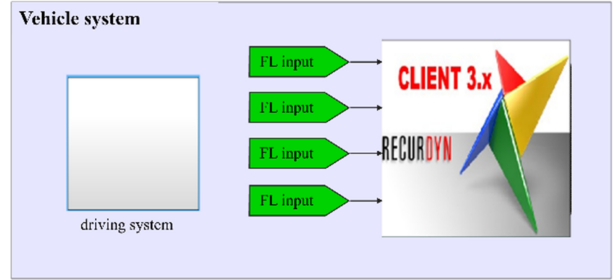
Fig. 6 Flow chart of vehicle simulator

비례 게인 값, 적분 게인 값, 미분 게인 값을 결정하여 정상상태 오차에 따른 피드백을 통해 원하는 값을 출력하는 제어방식이다[10]. 본 연구에서는 토크 제어시스템을 설계하여 실시간으로 4개의 휠의 목표 속도가 계산되면 현재 각 바퀴의 속도와 비교를 통해 모터 토크를 조절하게 된다. 출력 토크 $u(t)$ 는 식(1)과 같이 4개의 각각의 바퀴(FL, FR, RL, RR)에 대하여 계산되어 차량 모델로 들어가게 된다. $w_{d,FL}$ 는 추종하고자 하는 1축 왼쪽 바퀴의 속도이며 w_{FL} 는 현재의 1축 왼쪽의 바퀴 속도를 의미한다.

$$u_{FL}(t) = K_P(w_{d,FL} - w_{FL}) + K_I \int (w_{d,FL} - w_{FL}) dt + K_D \frac{d(w_{d,FL} - w_{FL})}{dt} \quad (1)$$



(a) Input allocation of joystick



(b) RecurDyn input allocation of joystick

Fig. 7 MATLAB/Simulink environment

시뮬레이터에 구성된 PID 제어 시스템은 일정한 입력에 대한 제어를 하는 것이 아닌 실시간으로 변하는 조건을 충족시키는 제어를 수행해야 한다. 실시간 제어가 가능하도록 하기 위해서는 K_P , K_I , K_D 값을 정의하는 것이 중요하다. 제어기의 성능 향상을 위해 Discrete Latin Hypercube Design 방법[11,12]으로 게인 값의 최적화를 진행하였다. 본 연구에서 제어기의 최종 목적은 정의한 목표 속도까지 0.1초 이내에 추종이 가능하여야 하며 과도한 Overshoot이 발생하지 않도록 하는 것이다. 설계 변수는 K_P , K_I , K_D 이며 3가지 설계 변수를 조절하여 제어기의 목적을 충족시킬 수 있는 게인 값을 정의하고자 하였다. 이때 제약조건을 두지 않은 채로 최적화를 시키게 되면 실제 성능에 적합하지 않은 게인 값을 설정하여 실제 모터의 성능을 넘어선 과도한 토크가 들어갈 수 있다. 실제 로봇의 각 바퀴에 장착된 인휠 모터의 최대 토크 성능은 27,625 N·mm이기 때문에 시뮬레이터에서 입력되는 구동 입력 토크의 최댓값이 최대 토크 성능을 넘지 않도록 제약조건을 설정하였다. 최종적으로 제어기의 성능을 평가하기 위한 목적함수는 목표 각속도와 현재 각속도의 RMS 오차와 과도한 오버슈트(Overshoot)가 발생하지 않도록 목표 속도와 현재 속도의 오차의 최댓값이 최소가 되도록 설정하였다. 각 목적함수의 중요도에 따라 가중치 (Weighting)를 설정하여 식(2)부터 식(5)와 같이 목적함수를 정의하였다. x_{ref} 는 각 시뮬레이션 스텝에서 계산된 각 바퀴의 각속도이며, x_{ref} 는 추종해야 할 목표 각속도이다. 정의된 성능평가 지수가 최소가 될 때 제어기의 성능은 최대라고 정의하였다. 가속, 감속, 외부의 충격에도 목표속도를 추종하는 것이 목적이기 때문에 최적화 시뮬레이션을 위한 주행 노면은 단순 장애물이 있는 노면 환경을 구성하였고 가속, 감속의 주행 조건을 설

Table 2 Design variable set

Case	K _p	K _i	K _D	Simulation success
1	4,021	368.4	263.2	O
2	7,158	473.7	131.6	O
3	15,000	26.3	26.3	O
4	7,942	315.8	289.5	O
5	9,510	263.2	0	O
6	5,589	447.3	52.6	O
7	4,805	289.5	394.7	O
8	884	131.6	105.3	O
9	14,216	0	500	X
10	100	184.2	342.1	O
11	10,295	236.8	421.1	O
12	8,726.3	500	236.8	O
13	11,079	421.1	78.9	O
14	13,432	157.9	368.4	O
15	11,863	210.5	210.5	O
16	2,453	342.1	184.2	O
17	3,237	52.6	447.4	O
18	6,374	78.9	157.9	O
19	1,668.4	105.3	473.7	O
20	12,647	394.7	315.8	O
21	1,000	0	0	O

Table 3 Optimal design variable

Design variable	Range	Optimal value
Proportion gain (K _p)	100-15,000	10,295
Integral gain (K _i)	0-500	236.8
Derivative gain (K _D)	0-500	421.1

정하였다. DOE (Design of experiment)의 각 변수의 범위는 Table 3에 나타내었으며 범위내에서의 변수 조합에 따른 시뮬레이션 결과를 확인하였다. 변수 조합은 Table 2에 나타내었다. 각 바퀴의 인휠 모터에 장착된 최대 토크 성능을 초과할 경우 데이터에서 제외시킨 후 결과를 분석하였으며 Fig. 8은 각 변수 조합에 따른 각속도 추종 결과를 대표적으로 나타내었으며, 최적 게인 값을 적용했을 때의 바퀴 속도 추종 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 바퀴 속도 추종 결과를 보면 10초 부근에서 바퀴의 속도가 공통적으로 불안정한 구간이 발생한다. 이는 10초 부근에서 외부의 충격 범프를 통과하면서 충격력을 받았기 때문이며, 충격에 의해 속도가 감소하였으나 다시 목표 속도를 빠르게 추종하는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 가속, 감속, 정지, 외부 충격상황에서도 실시간 제어가 가능함을 확인할 수 있었다. 최종적으로 최적화된 PID 게인 값은 Table 3에 정리하였다. 최적화된 PID 게인 값을 적용시켰을 때 목표 속도에

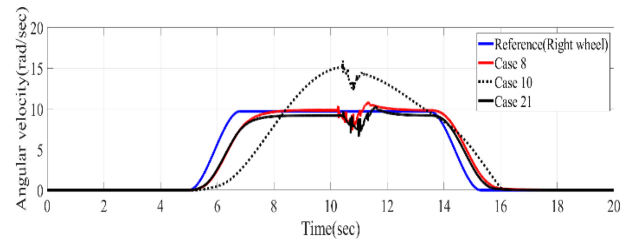
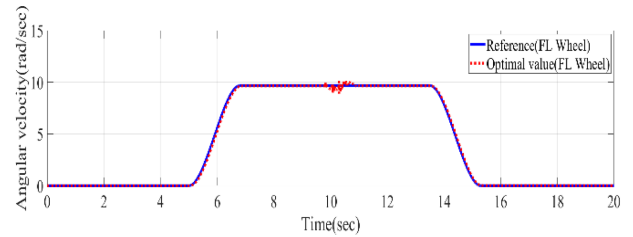
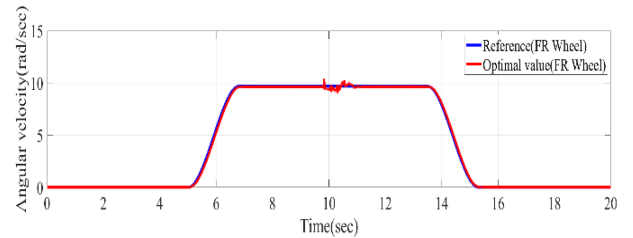


Fig. 8 Result of design of experiment



(a) Result of angular velocity (FL)



(b) Result of angular velocity (FR)

Fig. 9 Simulation result of variable gain (use optimal gain)

비해 최대 0.04 rad/sec의 오차를 가지며 0.05초 이내로 시간 지연 없이 실시간으로 추종이 가능함을 확인하였다.

Find

a = Proportion Gain (K_p)

b = Integral Gain (K_i)

c = Derivative Gain (K_D)

to minimize

$$f_1(a, b, c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2}{n}} \quad (2)$$

$$f_2(a, b, c) = \max(x_i - x_{ref}) \quad (3)$$

$$\min f(a, b, c) = w_1 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2}{n}} + w_2 \cdot \max(x_i - x_{ref}) \quad (4)$$

Subject to

$$Torque \leq 27625N \cdot mm \quad (5)$$

3.3 실시간 시뮬레이터 환경 구성

본 연구에서 실시간 원격 주행 시뮬레이터 알고리즘의 개발 및 검증에 위해 실제 조이스틱을 사용하여 실시간 시뮬레이션을 진행하였다. 실제로 차량에 탑승한 것과 같은 시야각을 구현하기

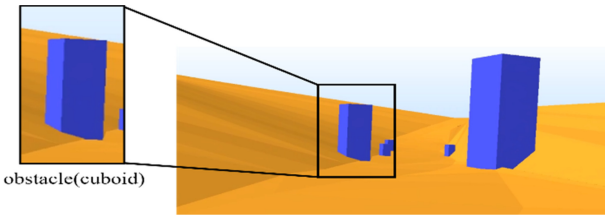


Fig. 10 Driving view of rough road with obstacle

위해 Fig. 10에 나타난 것처럼 차량 내부에서 노면을 바라볼 수 있도록 시야각을 설정하였다. 차량 시뮬레이터의 실제감 향상을 위해 차량의 모션을 반영한 시야의 흔들림을 구현하였다. 또한 실제 노면 환경을 모사하기 위해 사용자가 인식할 수 있는 장애물을 노면에 구성하였다. 장애물을 하나의 물체로 모델링할 경우 해석해야 할 구속 방정식이 늘어나기 때문에 해석 시간이 늘어날 수 있다. 본 연구에서는 실시간성을 확보하기 위해 운동방정식의 개수에 영향을 끼치지 않도록 지면(Ground)에 통합하여 모델링하였다. 실시간 원격주행 시뮬레이터와 실제 시간의 싱크를 맞추기 위해 샘플링시간(Sampling Time)을 조절하였으며 30 초 시뮬레이션 대비 해석 시간의 시간지연이 발생하지 않음을 확인하였다. 주행 시뮬레이션 해석 데이터는 실시간으로 MATLAB/Simulink 환경으로 전달하게 되며 운전자는 실시간으로 차량의 동특성을 확인하면서 주행하는 것이 가능하다.

4. 실시간 주행 시뮬레이션 및 검증

4.1 시험 장비 및 시험 조건

실시간 주행 시뮬레이터를 검증하기 위해 주행 시험과 동일한 매뉴얼을 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다. 주행 시험은 로봇의 동특성을 계측하기 위해 휠엔코더와 IMU 센서를 활용하였다. 휠엔코더를 통해 인휠 모터의 각속도를 확인할 수 있으며 IMU 센서를 통해 로봇의 속도 및 가속도 데이터를 얻을 수 있다. 아스팔트 노면에서 범프 노면 주행 시험을 실시하였으며 범프 주행 시험에 사용된 범프는 일반 도로에서 사용되고 있는 폭 1,000 mm, 높이 75 mm의 범프를 사용하였다. 시험은 아스팔트 노면에서 차량은 최고 속도인 1.5 m/s까지 가속한 후 범프를 통과하였으며 Fig. 11는 범프노면을 지나고 있는 로봇을 나타내었다.

4.2 시험 및 주행 시뮬레이션 결과

무인 로봇 모델의 검증을 위해 범프 노면 주행 시험과 실시간 원격 주행 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Fig. 12는 동일한 조이스틱 입력을 넣었을 때 실험과 시뮬레이션의 차량의 속도를 비교하였다. 개발된 실시간 시뮬레이터는 시간지연 없이 조이스틱 입력에 따른 차량의 속도를 잘 추종하고 있으며 실제 차량의 스펙을 잘 반영하고 있음을 확인하였다. 또한 차량 모델을



Fig. 11 Bump running experiment

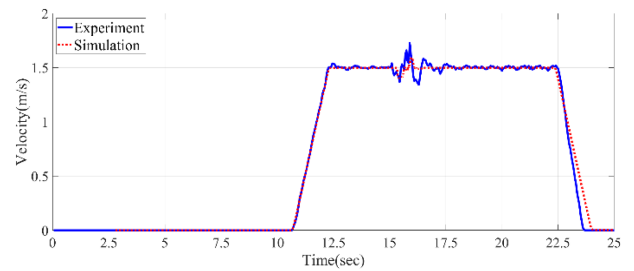


Fig. 12 Comparison of vehicle velocity between experiment and simulation

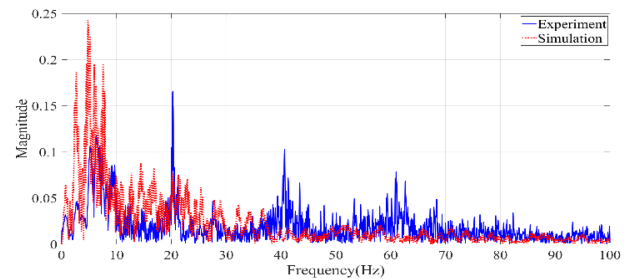


Fig. 13 Comparison of FFT of vertical acceleration between experiment and simulation

검증하기 위해 범프 시험과 실시간 시뮬레이션에서 차체의 동특성을 비교 검증하였다. Fig. 13은 차체의 수직 가속도를 주파수 영역에서 비교한 결과이다. 실험의 1차, 2차 모드는 6.26, 20.36 Hz이며 시뮬레이션의 1차, 2차 모드는 5.12, 20.17 Hz임을 확인하였다. 실제 차량 결과와 비교하면 모드별로 1.14, 0.19 Hz가 차이가 발생하지만 오차의 크기가 작은 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험에서의 수직 가속도는 40 Hz 이상의 고주파 대역이 확인된다. 40 Hz 대역의 주파수는 러그형 타이어에 의한 주파수임을 확인하였다. 시뮬레이션 모델은 러그형 타이어가 아닌 일반 UA 타이어 모델로 모델링하였기 때문에 고주파 대역의 주파수가 존재하지 않는다. 동일한 조건에서의 차량 모델 검증을 위해 실험의 고주파 대역에 대한 주파수를 모두 필터링한 후 크기 값을 비교하였다. Fig. 14에는 시험과 해석모델의 수직 가속도 및 Pitch Rate 결과를 비교하였다. 범프를 넘을 때의 수직 가속도와 Pitch Rate 데이터의 경향성은 일치함을 확인하였다.

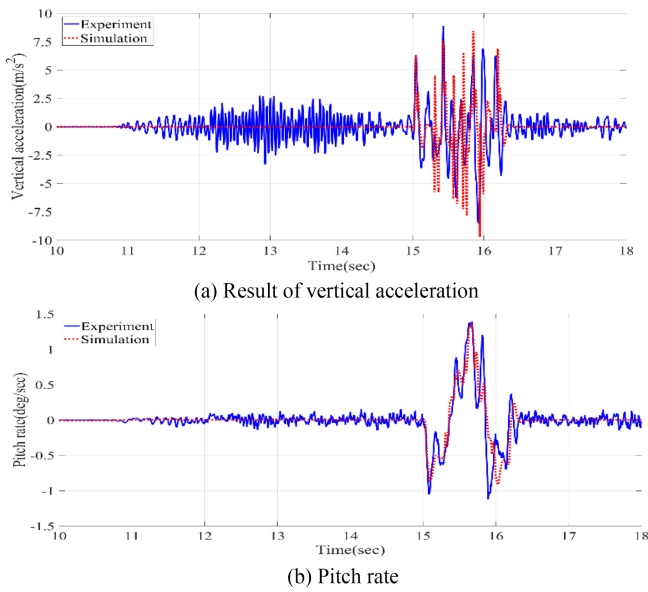


Fig. 14 Comparison of vertical acceleration and pitch rate between experiment and simulation under bump test

5. 결론

본 연구에서는 실시간 원격주행 시뮬레이터를 개발하기 위해 RecurDyn과 MATLAB/Simulink의 연성해석(Co-simulation) 환경을 구축하였다. RecurDyn을 통해 무인 로봇차량의 동역학 모델을 확보하였으며 실제 로봇의 주행 데이터와 시뮬레이션 데이터의 비교를 통해 무인 로봇의 신뢰도를 확보하였다. 신뢰도가 확보된 동역학 모델과 MATLAB/Simulink와의 연성 해석 환경 구축을 통해 원격주행환경을 개발하였다. 개발된 연성해석 알고리즘은 사용자가 조이스틱의 페달을 밟거나 핸들링을 통해 조이스틱 신호를 MATLAB/Simulink 환경으로 전달하면 MATLAB/Simulink 환경에서 차량에 스펙에 맞게 연산 되어 목표 속도를 결정하고 목표 속도를 추종하기 위한 토크 제어 시스템이 실행되도록 하였다. 실시간으로 토크 제어를 하기 위해 최적의 게인 값을 도출하고자 하였으며 실험계획법을 통해 실시간 속도 추종이 가능한 게인 값을 정의하였다. 최종적으로 사용자의 조이스틱 입력에 대하여 실시간 원격주행이 가능한 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터를 이용하여 실제 하드웨어를 사용하지 않고도 다양한 주행 조건에 대한 무인 로봇차량의 동특성을 실시간으로 분석하는 것이 가능하다. 현재 30초 시뮬레이션 시 시간 지연은 발생하지 않음을 확인하였으며, 향후 차량 모델이 변경되더라도 차량의 제원만 확보된다면 충분히 시뮬레이터에 적용시키는 것이 가능할 것으로 사료된다. 개발된 실시간 시뮬레이터를 통해 다양한 조건의 가상환경에서 차량을 주행시킴으로써 무인 로봇차량의 주행특성에 대한 데이터 베이스확보가 가능하여 자율주행 로봇의 제어 로직을 개발하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Yoo, W., Kim, K., Chung, B., Lee, J., (1999), Efficient vehicle modeling for real time simulation-effect of massless links with force element, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 7(4), 330-337.
2. Gu, B., (2018), Functional real-time vehicle dynamics model for virtual reality vehicle simulator, M.Sc. Thesis, Chungnam National University.
3. Park, J. W., Park, S. S., (2018), Evaluate of driving performance of wheel loader in the framework of Fitts' law, Journal of Korean Society for Precision Engineering, 35(5), 499-506.
4. Lee, D.-W., Sohn, J.-H., Yoo, W.-S., (2014), Mass effect analysis is of a coil spring for the performance evaluation of a gas insulated circuit breaker, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 15(12), 2543-2548.
5. Oh, S. H., Choi, B. L., (2014), Analytical and experimental study for development of composite coil spring, Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers A, 38(1), 31-36.
6. Lee, D., (2015), Design optimization of a coil-spring for a high voltage circuit breaker, M.Sc. Thesis, Pukyong National University.
7. Lee, M., (1997), Development of a UA tire model for the automobile dynamics program AUTODYN7, M.Sc. Thesis, Pusan National University.
8. Gim, G., (1988), Vehicle dynamic simulation with a comprehensive model for pneumatic tires, Ph.D. Thesis, The University of Arizona.
9. Lee, B.-G., Oh, S.-M., (2006), Study on friction characteristic for automotive tires, Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, 9(6), 1535-1540.
10. Shin, S.-H., Han, S.-S. Geem, Z. W., (2021), PID speed control of BLDC motor with harmony search algorithm based on ziegler-nichols step response method, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, 31(3), 258-264.
11. McKay, M. D., Beckman, R. J., Conover, W. J., (1979), A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from computer code, Technometrics, 21(2), 239-245.
12. RecurDyn V9R5, (2021), Discrete Latin Hypercube Design, <https://dev.functionbay.com/RecurDynOnlineHelp/V9R5/index.html#!Documents/discretelatinhypercubedesign.htm>

**Suhyun Park**

Graduate Student of Department of Mechanical Design Engineering at Pukyong National University. Her research interests are vehicle dynamics and multibody system
E-mail: suhyun1120@pukyong.ac.kr

**Jeonghyun Sohn**

Professor of Department of Mechanical Engineering at Pukyong National University. His research interests are mechanism design and multibody dynamics
E-mail: jhsohn@pknu.ac.kr

**Xiangqian Zhu**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Shandong University. His research interests are mechanical system design, marine towing system, floating wind turbine and vehicle dynamics
E-mail: xqzhu@sdu.edu.cn

뇌-컴퓨터 인터페이스를 위한 뇌파 기반 보행 인식 분류 CNN-BiLSTM 모델 개발

Development of an EEG-based Gait Recognition Classification CNN-BiLSTM Model for Brain-Computer Interfaces (BCI)

이서현¹, 장윤성¹, 이현주^{2,*}, 태기식^{1,*}
Seohyun Lee¹, Yoonsung Jang¹, Hyunju Lee^{2,*}, and Kisik Tae^{1,*}

¹ 건양대학교 의공학과 (Department of Biomedical Engineering, Konyang University)

² 건양대학교 물리치료학과 (Department of Physical Therapy, Konyang University)

Corresponding Author / E-mail: leehj@konyang.ac.kr, TEL: +82-42-600-8453, ORCID: 0000-0002-6663-1484

E-mail: tae@konyang.ac.kr, TEL: +82-42-600-8518, ORCID: 0000-0003-6252-0485

KEYWORDS: Brain-computer interface (뇌-컴퓨터 인터페이스), Electroencephalography (뇌파), Gait (보행), Dynamic environment (동적 환경), Convolutional neural network (합성곱 신경망), Bidirectional long short-term memory (양방향 장단기 메모리)

Brain-computer interface (BCI) is a technology used in various fields to analyze electroencephalography (EEG) signals to recognize an individual's intention or state and control a computer or machine. However, most of the research on BCI is on motor imagery, and research on active movement is concentrated on upper limb movement. In the case of lower limb movement, most of the research is on the static state or single movements. Therefore, in this research, we developed a deep-learning model for classifying walking behavior(1: walking, 2: upstairs, 3: downstairs) based on EEG signals in a dynamic environment to verify the possibility of classifying EEG signals in a dynamic state. We developed a model that combined a convolutional neural network (CNN) and a bidirectional long short-term memory (BiLSTM). The model obtained an average recognition performance of 82.01%, with an average accuracy of 93.77% for walking, 76.52% for upstairs, and 75.75% for downstairs. It is anticipated that various robotic devices aimed at assisting people with disabilities and the elderly could be designed in the future with multiple features, such as human-robot interaction, object manipulation, and path-planning utilizing BCI for control.

Manuscript received: March 18, 2024 / Revised: April 19, 2024 / Accepted: April 22, 2024

1. 서론

생체신호 측정 및 처리기술의 발전으로 심전도(Electrocardiography, ECG), 근전도(Electromyography, EMG), 뇌파(Electroencephalography, EEG) 등 생체신호(Bio-signal)를 활용한 재활 및 생활보조 기술은 보다 정확하고 개인화된 접근이 가능해졌다[1].

이에 따라 생체신호 처리 인터페이스를 통한 재활 및 생활보조 기기에 대한 연구가 활발히 진행되는 추세이며, 이를 통해 환자들의 재활 효과와 삶의 질을 향상시켜 동작 기반 인간-컴퓨터 인터페이스(Human-computer Interface, HCI)에 대한 필요성이

증가하고 있다[2,3].

생체신호를 취득한 후 운동 중 환자의 상태 변화에 대응하여 환자에게 효율적인 재활 시스템을 제안하여 진단을 넘어서 재활 운동에 대한 정밀하게 제어하는 데 사용될 수 있다[4]. 제어를 하고자 하는 대상으로부터 추출한 신호를 이용하여 재활 및 생활보조 로봇 분야는 환자를 객관적으로 평가하고 모니터링할 수 있는 중요한 솔루션이 되어 장애에 대한 보다 자세한 평가를 제공하고 식별할 수 있다[5].

생체신호 처리에서 많이 사용되는 EMG는 환자마다의 손상 부위에 따른 생체신호가 다양하고 다른 부위의 신호가 증첩

또는 혼합이 되어 출력되기 때문에 정확하게 신호를 잡아 처리하기 힘들다. 또한, 근육 피로 및 경련을 일으킬 수 있어 효율적인 동작 분류에 방해요인이 될 수 있음을 강조하였다[6].

이를 보완하기 위해 뇌파를 사용하여 생체신호를 분리하고, 정확한 처리 방법을 제시하여 환자별로 다른 패턴을 고려한 신뢰성 있는 결과를 도출하는 시도가 많이 이루어지고 있다[7]. Mao 등의 연구에서는 EEG 데이터를 정확히 처리하기 위해 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)을 사용하여 Window의 한계가 주파수에 따라 달라지는 문제에 대해 웨이블릿 계수의 크기를 시각화하여 주파수 성분의 필터링 등 연속적인 스펙트럼을 분석하였다[8]. 또한 Lee 등은 EEG 데이터 특징 추출과 신호의 잡음 제거를 위해 DWT (Discrete Wavelet Transform)를 진행하였다[9].

뇌파 측정 방식에는 뇌의 두개골 내부로 전극을 삽입하는 침습적 방식과 두피에 전극을 부착하는 비침습적 방식이 있다. 그 중에서 침습적 방식은 전극 삽입을 필요로 하여 많은 전문성이 요구되고 위험성이 있다. 이에 따라 최근 의료, 재활 등 여러 분야에서 저비용 고효율의 비침습적 방식을 이용한 뇌파 연구가 주를 이루고 있다[9,10]. 비침습적 방식 중 건식 전극은 습식전극의 단점을 보완하기 위한 방식으로, 전해질을 사용하지 않아 습식전극보다 임피던스가 높지만 부착이 빠르고 간편하며, 측정 장소의 제한이 적다는 장점이 있다. 본 연구에서는 동적인 환경에서의 보행 동작 측정을 위해 건식 전극을 사용하였다.

뇌-컴퓨터 인터페이스(Brain-computer Interface, BCI)는 뇌 신경 신호를 분석하여 개인의 의도나 상태를 인식해 컴퓨터나 기계를 제어하는 기술로 재활, 의료 등과 같은 다양한 분야에 활용 가능하여 많은 연구가 진행되고 있다[11]. 선행 연구 조사에 따르면 앉아있는 정적인 환경에서 하지 움직임 중 발목 굴곡(Dorsiflexion)에 대한 EEG 신호 분류에 대한 연구가 있다. 이는 최대 PA (Prediction Accuracy)가 96.58%를 기록하였다[6]. 또한, 뇌파 동작 분류를 위한 손목 외전(Wrist Supination), 손목 내전(Wrist Pronation), 주먹 쥐기(Hand Close), 손바닥 펴기(Hand Open), 손의 움직임 없음(No Movement)의 동작을 시행하여 손과 손목 동작 제어의 성능을 향상시키기 위한 CNN, LSTM, CNN-LSTM 모델에 대한 연구[12] 등 실제 동작을 분류하려는 시도가 많이 진행되었다. 또한, 하지 재활을 목적으로 한 패달링 동작을 운동 상상(Motor Imagery)을 통해 EEG 패턴의 특징 분류에 대한 연구[13] 등과 같이 BCI는 상상동작에 따른 연구가 대부분이다. 실제 운동(Active Movement) 시의 뇌파 연구는 상지 운동에 집중되어 있다. 또한, 하지운동의 경우에도 앉아서 시행하거나 제자리에서 수행하는 계단운동과 같이 정적 상태나 단일 동작에 관한 연구가 대부분이고, 보행(Gait)과 같은 동적 동작에서의 동작 인식에 대한 연구는 거의 진행되지 않았다[14]. Lee 등의 연구에서는 오른쪽, 양쪽 무릎을 5초 동안 펴거나 구부린 상태를 유지하는 동작으로 운동 상상과 실제 운동의 분류 정확도 차이를 비교한 선행 연구에 따르면 실제 운동의 정확도는 98.91%로 운동 상상의 정확도인 98.37%보다 높은 결과가 도출되었다[9].

따라서 본 연구에서는 동적 환경에서의 뇌 신경 신호 기반 보행 동작(1: 걷기(Walking), 2: 계단 오르기(Upstairs), 3: 계단 내려오기(Downstairs)) 분류 딥러닝 모델 개발 연구를 진행하여 동적 보행 상태에서의 뇌 신경신호 분류 가능성을 검증하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 데이터 획득

본 연구에서는 건강한 20대 오른손잡이 피험자 6명(남자 3명, 여자 3명, 평균 나이: 23.3±2.8세, 신장: 164.2±1.6 cm, 체중: 64±1.7 kg)이 참여하였다. 동일한 조건의 실험 환경에서 최대한 안정적인 EEG 데이터를 추출하기 위해 실험을 진행하기 전날 숙면을 충분히 취한 자, 음주를 하지 않은 자, 오른손잡이인 자들을 선정하였다.

또한, 전극과 두피의 접촉이 잘 이루어지지 않아 임피던스가 다른 피험자보다 비교적 크며, 실험 진행 중 뇌파 측정기기의 흔들림으로 인해 동잡음이 크게 발생한 자들은 제외하였다.

보행 동작(걷기, 계단 오르기, 계단 내려오기)에서 피험자 1명당 걷기 10회, 계단 오르기 10회, 계단 내리기 10회로 총 30회의 데이터를 수집하였다. 연구를 진행하기 위해 19채널(F7, Fp1, Fp2, F8, F3, Fz, C3, Cz, P8, P7, Pz, P4, T3, P3, O1, O2, C4, T4) 헤드셋형 뇌파 기기(Q20r, CGX Ltd., USA)를 사용하였다.

초당 500 Hz 샘플링 주파수로 측정하였으며, 뇌파 신호를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT) 적용 후 Band-pass-filter를 통해 Beta파(14-30 Hz)를 추출하여 전처리하였다.

실험 과정에서 1.5초마다 청각 자극을 주어 1.5초 안에 한 동작이 들어가도록 하였고 초당 500 Hz의 샘플링 주파수로 측정하였다. 걷기는 40초, 계단 오르기과 계단 내려오기는 25초 동안 실험을 진행하였다. Fig. 1은 3가지 동작에 대한 실험 장면을 보여준다.

본 연구에서는 Python 데이터 처리를 위해 Pandas, Numpy 라이브러리를 사용하였다. 또한, Tensorflow.keras 활용하여 신경망 구조를 설계하고 딥러닝 모델을 구현하였고, 전처리를 수행하기 위해 Sklearn을 사용하였다.

연속적인 시계열 데이터 분류를 위해 CNN (Convolutional Neural Network)과 독립적인 LSTM 구조 2개를 같이 사용하는 BiLSTM (Bidirectional Long Short-term Memory)을 결합한 분류 모델을 개발하였다. 데이터는 8:2로 각각 Train, Test, 데이터로 나누고, 모델의 일반화 성능 향상을 위해 Cross Validation 기법을 통해 검증하였다.

수집된 데이터는 원신호인 $f(x)$ 를 이용해 주파수 성분인 w 로 표현하는 FFT 적용 후 처음 측정된 Raw Data의 EEG 데이터에서 특정 주파수 대역을 추출하기 위해 Band Pass Filter를



Fig. 1 Walking, upstairs, and downstairs experiment

통해 운동 피질 활동이 가장 뚜렷하게 나타나는 것으로 확인된 Beta 14-30Hz) 대역을 추출하였다[15]. 뇌파 데이터의 피험자 간 개인차를 보완하기 위해 상대분석을 통해 각 채널마다 평균에서 크게 벗어나지 않는 피험자들을 선별하고, 하나의 데이터에서 9초씩 다수의 데이터를 추출해 사용하였다.

$$F(x) = \int f(x)e^{-i\omega x} dx \tag{1}$$

고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)식은 (1)과 같다.

2.2 데이터 전처리

데이터 정규화를 위해 하나의 기준을 따를 수 있도록 스케일러(Scaler) 법을 사용한다. 이를 통해 데이터 Feature마다 값의 범위 차이가 존재하는 것을 조정할 수 있어 효과적으로 모델을 학습할 수 있다.

Standard Scaler와 Robust Scaler는 데이터의 스케일을 조정하는 데 널리 사용되는 데이터 스케일링 기법이다. Standard Scaler는 데이터의 평균을 0으로, 표준편차를 1로 조정한다. x 는 원래 값을 나타내며 μ 는 평균이고, σ 는 표준편차이다.

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{2}$$

Standard Scaler식은 (2)과 같다.

Robust Scaler는 중간값(Median)과 IQR (Interquartile Range)을 사용하여 전체 데이터 중에서 이상치(Outlier)의 영향을 최소화한 기법이다. Q_1 은 데이터의 25% 지점, Q_3 는 75% 지점, Q_2 는 중간값(Median)이고, $(Q_3 - Q_1)$ 은 사분위수 범위이다.

$$x' = \frac{x_i - Q_2}{Q_3 - Q_1} \tag{3}$$

Robust Scaler식은 (3)과 같다.

Standard Scaler은 평균과 표준편차에 민감하게 반응할 수 있어 이상치에 영향을 받을 수 있다. 하지만 Robust Scaler은 중앙값과 IQR을 사용하기 때문에 이상치에 덜 민감하게 반응할 수 있어 개인의 뇌 활동과 생리적 특성에 따라 매우 다양한 양상을 보이는 뇌파 데이터는 Robust Scaler를 사용하는 것이 더 안정적인 스케일링 방법이다[16].

2.3 Sliding Window 처리

정규화된 데이터의 전처리는 시계열 데이터에서 일정한 크기(Window Size)에 따라 연속된 일부 데이터를 추출하는 방법인 슬라이딩 윈도우(Sliding Window) 기법을 적용하였다.

고정 사이즈의 윈도우가 연속적인 시계열 데이터를 따라 이동하면서 윈도우 내에 있는 데이터를 딥러닝 처리 단위 Segment로 변환한 후 각 Segment에 Label를 할당해 받아들일 수 있어 사람의 행동이나 상태 인식이 가능하다. 생체신호 처리를 수행할 때 자주 쓰이는 전처리 기법이기 때문에 여러 생체신호에 대한 접근 방식으로 많이 사용되고 있다[17,18].

보행 동작 뇌파 데이터를 수집할 때 1.5초 안에 한 동작이 들어가도록 데이터를 수집하였다. 이때 초당 500 Hz 주파수로 측정하였으므로, Window Size를 750으로 설정하였고, 간격(Window Stride)은 75으로 설정하였다. 이를 통해 총 19,773개의 데이터를 획득하여 딥러닝 모델 학습에 사용하였다.

Fig. 2는 걷기, 계단 오르기, 계단 내리기 데이터가 전처리(Fast Fourier Transform, Robust Scaler)된 후 Sliding Window Processing 되는 과정을 시각적으로 보기 위해 출력한 것이다. Window Size를 750으로 설정하였고, 75 간격(Window Stride)으로 처리된다.

2.4 CNN

신경망은 복잡한 패턴을 학습할 수 있는 특징 추출 및 분류를 위한 Architecture이다. Deep, Multi-layered 신경망 네트워크로 이루어져 있고 이미지 분류, 음성처리, 동작 인식과 같은 다양한 Tasks에서 효과적인 결과를 도출하였다. 이러한 컨볼루션 신경망(CNN 또는 ConvNets)은 데이터의 큰 변동성을 효과적으로 처리하기 때문에 뇌파(EEG) 데이터에 적합하다[19].

2.5 LSTM

시간에 따른 주파수 변화를 통해 정보를 표현하는 EEG 데이터는 딥러닝 모델을 구현할 때 시간 영역의 학습에 유리한 모델을 선택하는 것이 중요하다.

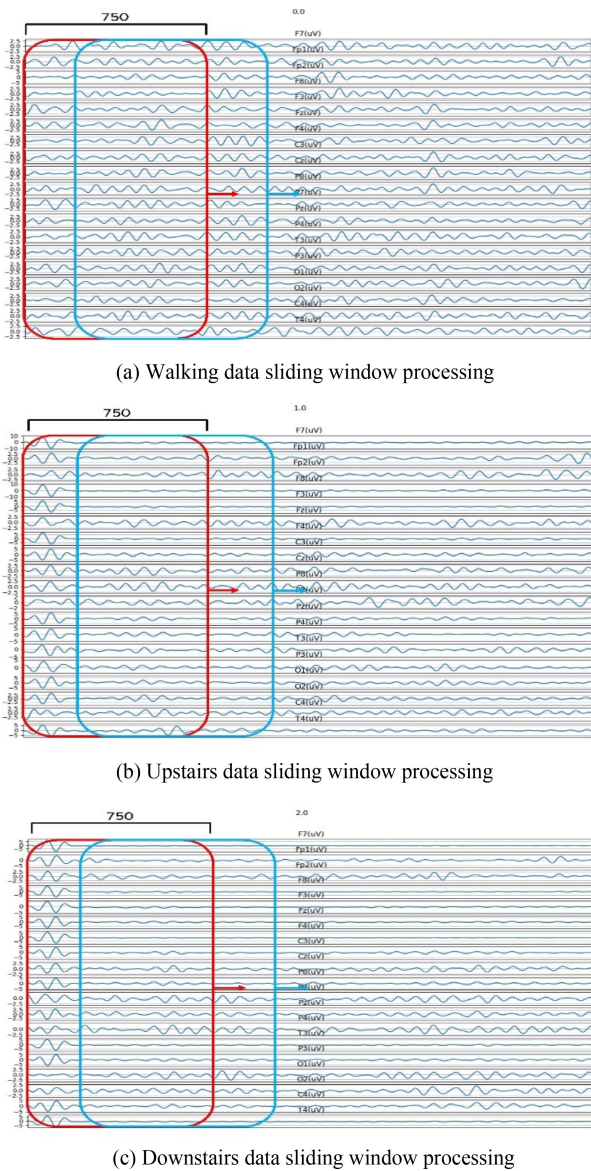


Fig. 2 Output of walking, upstairs, and downstairs data sliding window processing

LSTM은 RNN유형으로 순차적 시계열 데이터인 뇌파 및 심전도 등 여러 생체신호를 이전 시간의 정보를 저장하고 다음 시간의 데이터 예측을 돕는 방식으로 오랜 시간 정보를 기억하여 순차적 처리에 매우 능숙하다[20]. RNN은 임의의 길이의 메모리 정보를 처리할 수 있지만, 비교적으로 짧은 시퀀스만 효과적인 처리를 수행할 수 있다.

따라서 LSTM 네트워크는 RNN의 Gradient Vanish, 불안정성 문제를 해결하기 위해 설계되어 많이 사용되고 있다[21].

2.6 CNN-BiLSTM

본 연구에서 사용한 인공지능 신경망 모델은 이미지 인식 및 분류에 최적화된 합성곱 연산(Convolution)을 이용하는 CNN과 시계열 데이터인 뇌파 신호 분류를 위해 셀 상태(Cell State)를

통해 패턴을 보존하고, 은닉 상태(Hidden State)를 통해 새로운 정보를 생성하여 장기적인 시계열 데이터를 효과적으로 분류하는 LSTM에 정보를 역방향으로 전달하는 히든 레이어를 추가해 정보를 보다 유연하게 처리하는 BiLSTM을 결합한 CNN-BiLSTM모델을 사용하였다.

Convolution Layer Kernel Size는 3으로 설정하고, 입력 데이터에서 가장 강한 특징만 추출하는 MaxPooling2D Layer를 사용하였다. 학습 시간을 줄이기 위해 Convolution Layer 이후에 Pooling Layer를 적용하는 것이 일반적이다[17]. 활성화 함수(Activation Function)는 음수가 포함된 출력 범위를 위해 ‘Tanh’로 하였다. 모델이 학습(Train) 데이터에 과도하게 치우치는 과적합(Overfitting) 현상을 방지하기 위해 Dropout Layer를 추가하였으며, 출력계층은 Softmax 함수를 사용해 Classification하였다. Fig. 3은 최종 CNN-BiLSTM 딥러닝 모델 Architecture이다.

2.7 Cross-validation

딥러닝 기법은 다양한 분야에 맞추어 네트워크 모델을 설계하고 학습한다. 이러한 학습된 모델에 있어서 최근에는 모델의 성능을 개선시키는 것뿐만 아니라 모델을 통해 얻은 결과에 대한 성능의 체계적인 검증이 중요해지고 있다. 딥러닝 모델 검증 방법에서 가장 널리 사용되는 기법으로는 K-cross Validation이 있으며, 모델의 성능을 가정하기 위해서 전체 데이터셋을 학습을 위한 Train Data Set과 Test Data Set로 분할하고 Test Data Set을 활용해 모델의 신뢰성을 검증한다[16].

본 연구에서는 Train 데이터를 K개의 Fold로 나눠 한개의 Fold를 다시 K개로 나눈 뒤 K-1개는 Train 데이터, 그 이외의 것은 Validation 데이터로 사용하여 이를 K번 반복해 모델을 학습하고 검증하였다(K = 5). Train 데이터 셋, Test 데이터 셋은 각 전체 데이터의 8:2로 사용하였다.

3. 연구결과

실험 결과는 각 회마다 100번(Epochs) 반복하여 학습시켰고, 3회 시행하여 평균을 도출하였다. 연구 결과 최종적으로 평균 82.01%의 인식 성능을 도출하였으며, 동작마다 걷기 93.77%, 계단 오르기 76.52%, 계단 내려오기 75.75%의 평균 정확도를 도출하였다(Table 1).

Fig. 5는 3차 시도(C)의 분류 결과를 혼돈 행렬(Confusion Matrix)을 통해 정리한 결과이다. Fig. 4에서 보행(걷기, 계단 오르기, 계단 내려오기) 동작 중 걷기는 93.77%로 가장 높은 분류 정확도를 얻었다. 걷기의 분류 오류는 계단 오르기 1%, 계단 내려오기 5%의 오류를 보였다.

계단 오르기는 76.52%로 가장 낮은 분류 정확도를 도출했다. 계단 오르기의 분류 오류는 걷기 6%, 계단 내려오기 21%의 오류를 보였다. 계단 내려오기는 75.75%의 분류 정확도를 얻었다. 계단 내려오기의 분류 오류는 걷기 9%, 계단 오르기 9%의 오류를 보였다.

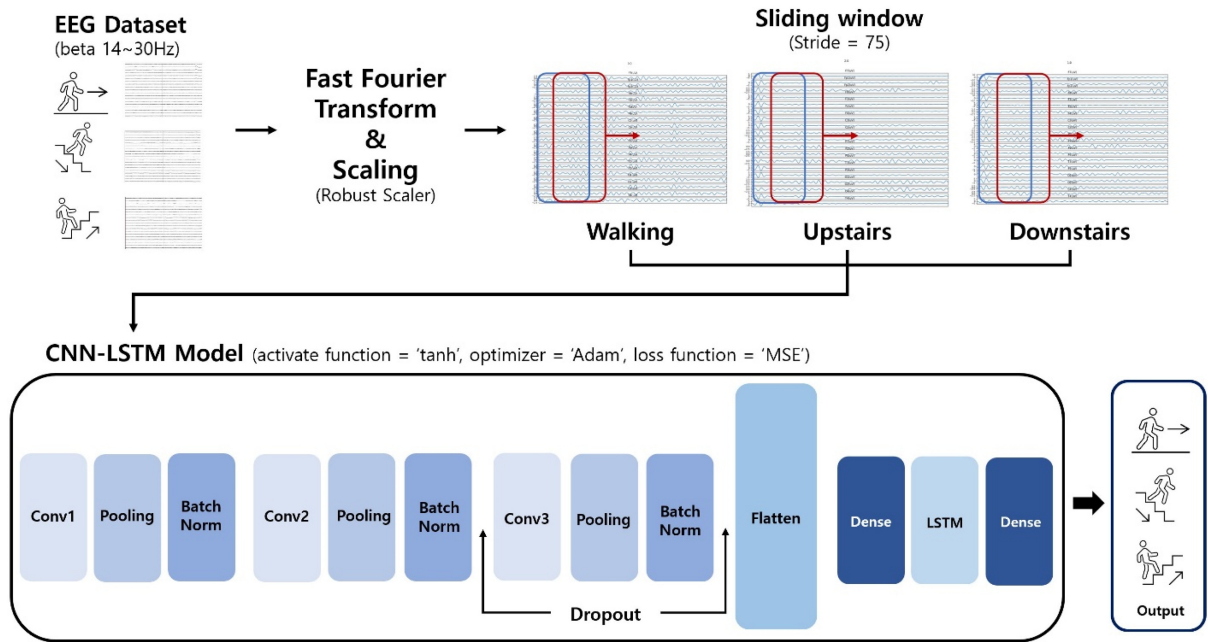


Fig. 3 CNN-BiLSTM architecture

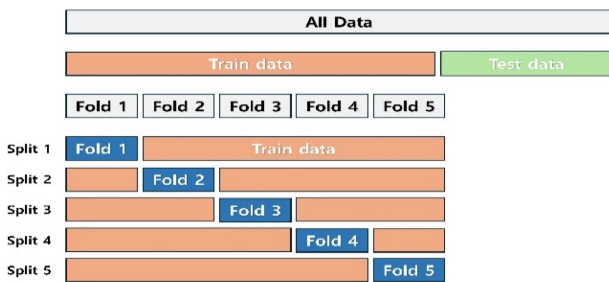


Fig. 4 K-cross validation

Table 1 Experimental results

	Walking	Upstairs	Downstairs	Average accuracy
A	93.38	72.41	80.56	82.11
B	93.63	79.44	71.89	81.65
C	94.31	77.72	74.8	82.27
Total average accuracy	93.77	76.52	75.75	82.01

종합적으로 계단 오르기과 걷기의 동작은 높은 분류 정확도를 보였다. 보행 동작 분류에 있어서 계단 오르기를 계단 내려 오기로 잘못 분류한 경우가 가장 많았다. 그에 반해 걷기와 계단 오르기 간의 분류 오류는 1%로 가장 작은 분류 오류를 보였다.

4. 고찰 및 결론

최근 BCI 연구에서 신호처리 과정을 수행할 시 딥러닝 기법

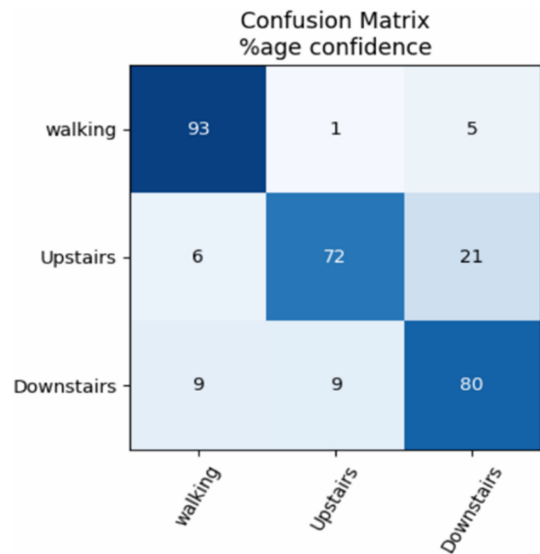


Fig. 5 Confusion matrix of A

을 적용하는 경우가 증가하고 있다. EEG Dataset Classification Using CNN Method 연구에서는 환자의 뇌파를 장시간으로 모니터링을 해야 할 경우가 많기 때문에, 그중에서도 간질 발작을 분류하기 위한 컨볼루션 신경망(CNN)의 개발과 정확도, 손실 값(Loss)을 제안하였다. CNN은 이미지 분류 및 패턴 인식에서 높은 성능을 입증했기에 연속 웨이블릿 변환(CWT)과 CNN을 결합하여 간질 발작을 분류하였다. 이에 따른 결과 정확도는 72.49%, 손실 값은 0.576을 도출하였다[8].

또한, 뇌 데이터를 수집할 시 동작 상상(Motor Imagery, MI)은 데이터 수집 과정에서 유발되는 잡음으로 인해 제어하기 어려운 문제점이 있어 최근 운동 실행(Movement Execution, ME)

에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 하지 중에서도 무릎의 MI, ME 동작을 딥러닝 모델을 통해 분류하고, 정확도를 비교하여 BCI에 활용 가능성을 검증하였다. 결과적으로 무릎 운동 실행(98.91%)과 동작 상상(98.37%)을 진행했을 때 ME에서 정확도가 더 높게 나타났으며, ME 데이터를 BCI에 적용하는 기술이 발전될 것으로 기대한다[9]. 또한, 이를 통해 운동 심상이 아닌 운동 실행(실제 운동)시, 나타나는 뇌파에 대한 연구가 뇌-컴퓨터 인터페이스 분야에 활용되어 뇌파로 제어되는 하지 외골격 로봇과 같이 재활 의료 분야의 새로운 가능성을 제공한다고 사료된다[22,23].

본 연구에서는 뇌파를 활용하여 보행 주기를 분류하는 방법에 대해 다루고 있다. 보행은 인간의 일상생활에서 중요한 활동으로, 보행 패턴의 분류는 다양한 응용 분야에 유용하다. CNN 인공신경망 모델을 활용하여 뇌파 신호를 처리하고 보행 주기를 분류하는 사례에 적용된다. 운동 실행에서도 상상 동작이나 상지 동작이 아닌 하지 동작 중 보행 동작에서 유사성이 있고 일상생활에서 많이 쓰이는 걷기, 계단 오르기, 계단 내리기의 실제 운동 뇌파의 딥러닝 모델을 통한 동작 분류 가능성 확인을 검증하기 위해 연구를 진행하였다.

단일 피험자로부터 보행 동작에 따른 움직임에 대하여 세 가지 운동을 실행하였으며 이때 발생하는 뇌파를 취득하고 Fast Fourier Transform, Robust Scaler, Sliding Window를 통한 전처리 방식과 CNN-BiLSTM 모델에 적용하여 걷기, 계단 오르기, 계단 내리기의 동작을 분류하였다. 뇌파 데이터 수집에서 사용된 주파수 영역은 베타파(14-30 Hz)로 운동 움직임 출력에 뇌파 베타 활동이 증가되며, 동시에 운동 감각을 촉진할 수 있다는 결론을 보고하였다. 이는 베타 영역이 실제 운동 감각 현상이라는 것을 의미한다[10,24].

또한, 베타 영역뿐만 아닌 알파베타(8-30 Hz) 영역을 신경망 모델에 적용해 동적 보행 동작 분류를 실행하여 알파베타 영역과 베타 영역에 대한 비교분석을 검증하고자 하였다. 이를 통해 알파베타 영역을 신경망 모델에 적용하였을 때 보행 동작 분류의 정확도는 66.32%가 도출되었으며, 걷기(91.01%), 계단 오르기(40.24%), 계단 내리기(67.73%)의 결과가 관찰되었다. 이는 안정된 상태에서 주로 나타나는 알파파와 무언가의 집중하거나 몸의 움직임이 실행되었을 때 베타파가 주로 나타나는 특성으로 인해 알파베타 영역보다 베타 영역에서의 보행 동작 분류 정확도가 높다고 사료된다[10].

연구를 진행하기 위해 6명의 피험자(남3, 여3)를 대상으로 1.5초 마다 청각자극을 주어 걷기 40초, 계단 오르기 25초, 계단 내리기 25초씩 10회 반복하여 한 피험자마다 30개의 데이터를 얻었다. 이후 Band Pass Filter를 통해 14-30 Hz (β 파) 대역을 추출하였으며, Sliding Window 전처리 과정을 거쳐 총 19,773개의 Dataset을 형성하였다. 데이터 정규화를 위해 Robust Scaler 기법을 사용하였고 CNN-BiLSTM 신경망 아키텍처를 적용하여 보행 동작 인식에 사용하였다. 총 3회 시행한 실험 결과, 평균 82.01%의 인식 성능을 도출하였으며, 각 동작마다 걷기 93.77%,

계단 오르기 76.52%, 계단 내려오기 75.75%의 평균 정확도를 도출하였다.

계단 오르기와 걷기의 동작은 계단 내려오기의 분류 정확도보다 높은 결과를 보였으며, 계단 오르기 동작을 계단 내려오기로 잘못 분류한 경우가 가장 많았다. 그에 반해 걷기와 계단 오르기 간의 분류 오류는 1%로 가장 낮은 분류 오류를 보였다. 본 연구에서는 피험자 6명인 상태로 진행하였다. 이로 인해 데이터 수가 충분하지 않아 인공지능 모델 Epochs 횟수에 대한 한계가 존재하였다. 또한, 실험 환경에 놓인 계단의 수(16칸)가 적어 동작(걷기, 계단 오르기, 계단 내리기)에 대한 연속적인 데이터를 추출하지 못하여 기존 정확도 보다 향상된 정확도를 도출하는데 제한이 있었다. 차후 다양한 보행의 데이터를 획득하고 데이터 수를 추가한다면 정확도 향상뿐만 아니라 개인 맞춤형 설계가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 상상 동작이 아닌 실제 뇌파 동작 인식에서도 보행 패턴이 분류될 수 있음을 시사하며 이를 통해 보행 보조 및 재활 분야에서의 실제 운동 뇌파의 적용 가능성을 확인할 수 있었으며, 인식된 보행 동작에 맞는 보조 역할을 수행해 환자의 보행 안정성을 높일 수 있을 것이다. 또한 장애인과 노인을 돕기 위한 보조 로봇 시스템의 제어 방식을 BCI를 사용함으로써 인간과 로봇의 상호작용, 물체 조작, 경로 계획 등 다양한 로봇 장치가 다방면으로 설계될 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E.-F., Wang, J., (2019), Wearable biosensors for healthcare monitoring, *Nature Biotechnology*, 37(4), 389-406.
2. Kim, J., Koo, B., Nam, Y., Kim, Y., (2021), sEMG-Based hand posture recognition considering electrode shift, feature vectors, and posture groups, *Sensors*, 21(22), 7681.
3. Palumbo, A., Vizza, P., Calabrese, B., Ielpo, N., (2021), Biopotential signal monitoring systems in rehabilitation: a review, *Sensors*, 21(21), 7172.
4. Huamanchahua, D., Huamán-Lévano, L. A., Asencios-Chávez, J., Caballero-Canchanya, N., (2022), Biological signals for the control of robotic devices in rehabilitation: an innovative review, 2022 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, 1-7.
5. Maceira-Elvira, P., Popa, T., Schmid, A. C., Hummel, F. C., (2019), Wearable technology in stroke rehabilitation: towards improved diagnosis and treatment of upper-limb motor impairment, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 16(1), 142.
6. Hooda, N., Das, R., Kumar, N., (2020), Fusion of EEG and EMG signals for classification of unilateral foot movements, *Biomedical Signal Processing and Control*, 60, 101990.

7. Kim, K.-T., Suk, H.-I., Lee, S.-W., (2018), Commanding a brain-controlled wheelchair using steady-state somatosensory evoked potentials, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(3), 654-665.
8. Mao, W.-L., Fathurrahman, H., Lee, Y., Chang, T., (2020), EEG dataset classification using CNN method, *Journal of Physics: Conference Series*, 1456(1), 012017.
9. Lee, Y., Lee, H. J., Tae, K. S., (2023), Classification of EEG signals related to real and imagery knee movements using deep learning for brain computer interfaces, *Technology and Health Care : Official Journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 31(3), 933-942.
10. Kim, D.-E., Yu, J.-H., Sim, K.-B., (2015), EEG feature classification for precise motion control of artificial hand, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 25(1), 29-34.
11. Jeong, J.-H., Shim, K.-H., Kim, D.-J., Lee, S.-W., (2020), Brain-controlled robotic arm system based on multi-directional CNN-BiLSTM network using EEG signals, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(5), 1226-1238.
12. Aly, H., Youssef, S. M., (2023), Bio-signal based motion control system using deep learning models: a deep learning approach for motion classification using EEG and EMG signal fusion, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(1), 991-1002.
13. Delisle-Rodriguez, D., Cardoso, V., Gurve, D., Loterio, F., Alejandra Romero-Laiseca, M. A., Krishnan, S., Bastos-Filho, T., (2019), System based on subject-specific bands to recognize pedaling motor imagery: towards a BCI for lower-limb rehabilitation, *Journal of Neural Engineering*, 16(5), 056005.
14. Liu, Y.-H., Lin, L.-F., Chou, C.-W., Chang, Y., Hsiao, Y.-T., Hsu, W.-C., (2019), Analysis of electroencephalography event-related desynchronisation and synchronisation induced by lower-limb stepping motor imagery, *Journal of Medical and Biological Engineering*, 39(4), 54-69.
15. Asanza, V., Peláez, E., Loayza, F., Lorente-Leyva, L. L., Peluffo-Ordóñez, D. H., (2022), Identification of lower-limb motor tasks via brain-computer interfaces: a topical overview, *Sensors*, 22(5), 2028.
16. Kim, S. J., Choi, B. J., (2022), LSTM model based prediction of daily confirmed cases of COVID-19 in korea using google mobility data, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 32(4), 292-298.
17. Lee, S. M., Pi, S. H., Han, S. H., Jo, Y. U., Oh, D. C., (2022), Classification of gripping movement in daily life using EMG-based spider chart and deep learning, *Journal of Biomedical Engineering Research*, 43(5), 299-307.
18. Shen, S., Gu, K., Chen, X.-R., Yang, M., Wang, R.-C., (2019), Movements classification of multi-channel sEMG based on CNN and stacking ensemble learning, *IEEE Access*, 7, 137489-137500.
19. Manor, R., Geva, A. B., (2015), Convolutional neural network for multi-category rapid serial visual presentation BCI, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 9, 146.
20. Li, G., Lee, C. H., Jung, J. J., Youn, Y. C., Camacho, D., (2020), Deep learning for EEG data analytics: a survey, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 32(18), e5199.
21. Sheykhivand, S., Mousavi, Z., Rezaei, T. Y., Farzammia, A., (2020), Recognizing emotions evoked by music using CNN-LSTM networks on EEG signals, *IEEE Access*, 8, 139332-139345.
22. Gordleeva, S. Y., Lobov, S. A., Grigorev, N. A., Savosenkov, A. O., Shamshin, M. O., Lukoyanov, M. V., Khoruzhko, M. A., Kazantsev, V. B., (2020), Real-time EEG-EMG human-machine interface-based control system for a lower-limb exoskeleton, *IEEE Access*, 8, 84070-84081.
23. Grigorescu, S. M., Lüth, T., Fragkopoulos, C., Cyriacks, M., Gräser, A., (2012), A BCI-controlled robotic assistant for quadriplegic people in domestic and professional life, *Robotica*, 30(3), 419-431.
24. Kristeva, R., Patino, L., Omlor, W., (2007), Beta-range cortical motor spectral power and corticomuscular coherence as a mechanism for effective corticospinal interaction during steady-state motor output, *NeuroImage*, 36(3), 785-792.

**Seohyun Lee**

B.Sc. in the Department of Biomedical Engineering, Konyang University. Her research interests are brain-computer interface (BCI), and Medical artificial intelligence.

E-mail: lsh0104428@naver.com

**Yoonsung Jang**

B.Sc. in the Department of Biomedical Engineering, Konyang University. Her research interests are brain-computer interface (BCI), and Medical artificial intelligence.

E-mail: wherejm@gmail.com

**Hyunju Lee**

Professor in the Department of Physical Therapy, Konyang University. Her research interests are Rehabilitation assistive technology, and Tele-rehabilitation.

E-mail: leehj@konyang.ac.kr

**Kisik Tae**

Professor in the Department of Biomedical Engineering, Konyang University. His research interests are Orthopedic biomechanics, Human motion analysis, VR/AR and artificial intelligence (AI) application for stroke rehabilitation, Brain-computer Interface (BCI) and rehabilitation robotics.

E-mail: tae@konyang.ac.kr

비접촉식 의료용 초음파미스트 분무를 위한 노즐 팁 성능 개선

Improvement of Nozzle Tip Performance for Noncontact Medical Ultrasonic Mist Spraying

정승혁¹, 전종혁², 원지영², 김성민³, 임흥석^{4,*}
Seung Hyeok Jung¹, Jong Hyeok Jeon², Ji Young Won², Sung Min Kim³, and Hong Seok Lim^{4,*}

¹ 동국대학교 대학원 바이오헬스의료기기규제과학과 (Department of Regulatory Science for Medical Device, Graduate School, Dongguk University)

² (주)바이오유닛 (Biounit Co., Ltd.)

³ 동국대학교 의생명공학과 (Department of Biomedical Engineering, Dongguk University)

⁴ 동국대학교 의료융합기술실용화연구원 (Research Institute for Commercialization of Biomedical Convergence Technology, Dongguk University)

Corresponding Author / E-mail: limit75@naver.com, TEL: +82-10-2984-3728

ORCID: 0000-0003-1331-8635

KEYWORDS: Computational fluid dynamics (전산유체역학), Discrete phase model (이산 상 모델), Ultrasonic mist therapy (초음파미스트 치료법), Nozzle tip (노즐 팁), Noncontact spraying (비접촉 분무)

Chronic wounds necessitate periodic treatment and management due to their potential for serious complications. Recently, ultrasonic mist therapy has been introduced to treat chronic wounds efficiently. This therapy requires a noncontact spraying method to prevent side effects such as bacterial infections and pain. Therefore, research is needed on a spray nozzle tip that can effectively transmit ultrasonic energy to the wound target with misted cleaning solution mobility in a specific direction and at an appropriate speed. The performance of the nozzle tip is greatly affected by the flow characteristics inside it. Computational fluid dynamics (CFD) is a powerful tool to analyze these characteristics in detail. The behavior of the mist was analyzed in a simulation based on discrete phase model methodology in an unsteady state. Valid design parameters enabling noncontact cleaning were determined by setting the design parameters of the nozzle tip's internal flow path and measuring the spraying speed of the mist using CFD analysis. Through the simulation results, information on the sprayed skin surface and spray characteristics are measured. Lastly, we present a nozzle tip design guide optimized for ultrasonic mist therapy.

Manuscript received: March 28, 2024 / Revised: April 23, 2024 / Accepted: April 24, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

NOMENCLATURE

d_p = Diameter of the Particle
 m_p = Mass of the Particle
 \vec{u}_p = Velocity of the Particle
 τ_r = Particle Relaxation Time
 \vec{g} = Gravitational Force
 ρ_p = Density of Particle
T = Surface Tension of a Liquid
 ρ = Density of a Liquid
f = Operating Frequency

1. 서론

만성 창상은 내적 혹은 외적 요인에 의해 치유가 지연되면서 해당 부위의 해부학적 구조가 손상되거나 기능의 수복이 어려워진 치유되지 않는 창상을 말하며, 대표적인 예로 압력에 의해 피부가 괴사하는 질환인 욕창이 있다. 만성 창상 및 욕창은 심각한 합병증으로 이어질 수 있기 때문에 주기적인 치료와 관리가 매우 중요하다. 이와 관련하여 2019년 런던에서 열린 국제 창상 관리 전문가 자문위원 회의에서 치유가 어려운 창상을 관리하는 방법을 안내하는 ‘창상 위생(Wound Hygiene)’이라는 개념을 발표하였다[1]. 이는 창상에서 바이오 필름, 괴사조직,

이물질들을 포함하여 원하지 않는 모든 물질을 지속적으로 제거 및 최소화하여 바이오 필름의 재형성을 끊임없이 방지함으로써 치유 진행을 도모하는 것을 강조한다. 이처럼 괴사조직을 제거하고 세척하기 위해서 전통적으로 거즈 드레싱이나 액체를 활용한 세척(Irrigation) 등 물리적인 방법들을 활용해왔으나[2], 환자에게 물리적인 고통을 유발하고 경제적으로 많은 자원이 소모되는 등 여러 단점이 존재한다. 최근에는 이러한 단점을 극복하기 위해서 저주파(20-40 kHz) 초음파를 이용하여 괴사조직의 제거 및 파괴를 촉진하는 치료법이 활용되고 있다[3].

Non-contact Low-frequency Ultrasound (NCLFU)-assisted Saline Wash Therapy는 초음파를 활용하여 식염수 또는 약액을 마이크로 단위로 미세하게 쪼개어 환자의 상처 분위에 분무하여 괴사조직을 제거하고 세척하는 치료법으로 알려져 있다. 초음파에 의해 생성된 기계적 압력에너지가 상처 가장자리에 전달하여 활력이 없는 괴사조직을 제거하는 원리이며, 미스트를 통한 초음파 음파의 기계적 전달은 괴사조직 제거를 촉진하고 항균 특성을 가지며 연조직 재생을 자극한다[4]. 그러나 실제로 여러 연구에서 초음파에 의한 상처 치유 효과, 염증 감소, 통증 감소 등의 임상적 효과가 확인되었으나[5-7], ‘창상 위생’ 개념에서 강조하는 바이오 필름 및 괴사조직 제거 등 물리적인 세척 효과에 대한 근거가 부족하다. 바이오 필름 및 괴사조직, 미생물 또는 파편들을 창상에서 제거하기 위해서는 강력한 치료적 세척이 필요하나[8], 비접촉 미스트 분무 방식의 특성상 전통적인 치료적 세척 방법들과는 다르게 상처에 가해지는 물리적인 힘의 크기가 약하다고 볼 수 있다. 따라서, 미스트화된 약액들을 특정 방향으로의 운동성과 적절한 속도를 가지고 초음파 에너지를 상처 타겟까지 유효하게 전달시킬 수 있는 분사 노즐 팁에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 노즐 분사 성능 향상을 목표로 노즐 팁 설계 파라미터를 정의하고 유동 해석을 통해 각 파라미터의 영향을 분석했다. 이러한 노즐 팁은 만성 창상 세척 및 치료를 위한 초음파미스트 기기의 초음파 노즐에 적용될 것으로 예상되며, 이를 통해 초음파 에너지를 효과적으로 전달하면서 동시에 바이오 필름 및 괴사조직을 효과적으로 제거할 수 있는 강력하고 적절한 물리적 힘을 전달할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 유동해석을 위한 모델링 개발

2.1 초음파미스트 장치

본 연구에서는 SonoMist™ (BioUnit, Korea) 장치를 활용하였다(Fig. 1). 이 장치는 초음파 에너지(초음파 노즐)를 이용하여 분사되는 마이크로 단위의 작고 균일한 약액을 욕창 및 만성창상 부위에 비접촉으로 분무하여 바이오 필름 제거 및 창상 소독, 피부 자극을 목적으로 하는 창상 치료용 및 세정용 의료기기이다. 이 기기는 Fig. 2와 같이 노즐 팁이 적용되지 않은 초음파 노즐 형태로 미스트를 분사하는 형태이며, 본 연구에서 노즐 팁을 적용하여 미스트 분사 성능을 개선하고자 한다.



Fig. 1 Ultrasonic mist therapy system (SonoMist™)



Fig. 2 Mist spraying at ultrasonic nozzle (SonoMist™)

Table 1 Definition of nozzle tip parameters

d_0	Outlet diameter of the nozzle tip
d_i	Inlet diameter of the nozzle tip
L_t	Total length of the nozzle tip
A_r	Aspect ratio (L_t/d_0)
L_i	The length of the inlet section
L_c	The length of the contraction section
L_o	The length of the outlet section

2.2 초음파미스트 노즐 팁 모델링

설계 파라미터에 따른 노즐 팁의 성능 변화를 비교 연구하기 위하여 노즐 팁 설계 파라미터를 Table 1과 같이 정의하였다. 노즐 팁의 입구 직경($d_i = 10$ cm)과 전체 길이($L_t = 35$ cm)는 본 연구에서 사용한 장비 설계에 맞게 치수를 선택하여 고정했다. 노즐 팁의 성능에 미치는 영향을 정량적으로 이해하고 최적의 설계 파라미터를 도출하기 위한 Parameter Study를 수행하였다. Parameter Study를 위해 기준이 될 Reference Model를 모델링하였으며(Fig. 3), Reference Model로부터 설계 파라미터에

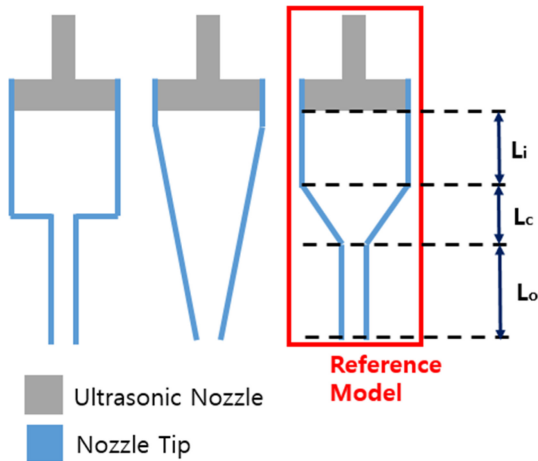


Fig. 3 Design of nozzle tip parameter and reference model

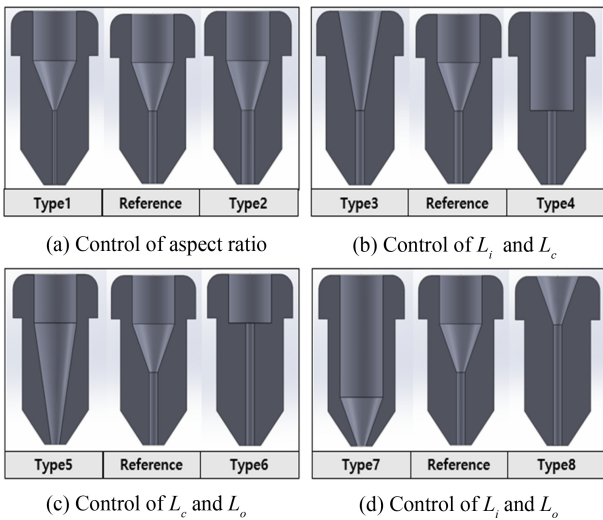


Fig. 4 Geometry of each models compared to the reference model

Table 2 Nozzle tip parameters for each model ($d_i = 10$ and $L_i = 35$ are fixed values for all models, Length unit = [cm])

Type	d_0	A_r	L_i	L_c	L_o
Reference	2	17.5	10	10	15
1	1.5	23.3	10	10	15
2	3	11.7	10	10	15
3	2	35	0	20	15
4	2	35	20	0	15
5	2	35	10	25	0
6	2	35	10	0	25
7	2	35	25	10	0
8	2	35	0	10	25

변화를 준 8가지 형태를 모델링하였다. Types1과 2는 Aspect Ratio, Types3과 4는 L_c 와 L_i , Types5와 6은 L_c 와 L_o , Types7과 8은 L_i 와 L_o 에 각각 변화를 준 모델들이다(Fig. 4). 각 모델들의 파라미터 값은 Table 2에 정리하였다.

Table 3 Calculation of injection pressure of reference model according to pump pressure

Pump pressure [Pa]	Injection velocity [m/s]	Injection pressure [Pa]
10	2.48	3077
50	5.40	14589
100	5.39	14535
200	8.94	39988
300	10.66	56856

2.3 수치해석

본 연구는 노즐 팁 내부와 외부의 유동 특성과 분사되는 미스트 입자 특성을 계산하기 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 활용하였다. CFD 상용코드는 ANSYS Fluent 2022 R2를 활용하여 미스트 입자 거동을 해석하였다.

2.3.1 Discrete Phase Model (DPM) 지배방정식

미스트 입자의 거동을 모사하기 위해 DPM을 활용하였다. DPM은 2개의 서로 다른 상을 고려하여 유동 해석을 하는 모델로 입자의 크기가 매우 작고 입자의 체적분율이 10% 이하일 때 활용이 가능하다. 연속상은 Eulerian Method에 의해 계산되고 분산상은 Lagrangian Method에 의해 계산되어 입자들이 추적되며, 연속상과 분산상은 식(1)에 의해 Coupling 된다. 이는 입자들이 u 라는 속도를 가진 유동장 내에서 거동을 할 때 입자는 크게 양력, 항력, 중력의 힘을 가지면서 거동을 하는 것을 정의한다. 방정식에 사용된 기호에 대한 명명법은 본 논문의 앞부분에 정의하였다.

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (1)$$

2.3.2 입자 크기 계산

액체가 충분히 높은 강도의 초음파 장에 노출되면 액체의 쪼개짐이 발생하여 매우 미세한 질은 안개로 주변 공기로 분출된다[9]. 초음파에 의해 발생하는 입자의 크기 Lang Equation[10]을 사용하여 추정할 수 있다. 초음파에 의해 미립화되는 입자의 크기는 식(2)와 같이 초음파의 구동 주파수, 액체의 표면장력과 밀도에 의해 결정된다.

$$d_p = 0.34 \left(\frac{8\pi T}{\rho f^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

본 연구에서는 구동 주파수 25 kHz를 적용하여 약 50 μm 크기의 입자 크기를 도출하여 활용하였다.

2.3.3 Input Data 정의

‘창상 위생’ 개념[1]과 관련 문헌들을 근거로 창상 세척을 위한 적절한 힘과 세척액의 양 등을 정의하였다. 만성 창상 치료를

위해 강력한 세척이 필요하며 이때 세균을 조직 안으로 밀어 넣지 않으면서 표면에 존재하는 이물질들을 제거할 수 있는 적절한 힘은 27,578-103,420 Pa이다[11]. 세균 제거를 위해서는 약 100,000 Pa 정도의 강한 힘으로, 깨끗한 창상의 경우에는 낮은 힘으로 세척해야한다[12]. 세척액의 양은 대략 창상 1 cm² 당 50-100 mL를 충분히 사용[13]하는 것이 좋기 때문에 실제 임상에서 활용할 수 있는 유량 값을 토대로 SonoMist™의 초음파 노즐부에 적용할 펌프의 압력을 5단계(10, 50, 100, 200, 300 Pa)로 결정하였다.

본 연구에서 사용한 기기는 튜브 연동식 펌프에 의해 초음파 노즐 부에서 미스트가 분사된다. 노즐 팁 Reference Model을 적용했을 때 펌프 압력에 따른 분사 속도와 분사 압력을 측정하여 Table 3에 정리하였다. 창상 세척을 위한 적절한 힘의 값을 근거로 펌프의 압력이 200 Pa 일 때 유의미한 분사 압력 값을 도출하며, 압력이 더 높아질수록 속도는 증가하나 난류 발생 정도가 커지는 것으로 판단하여 Input 조건으로 압력 값 200 Pa을 최종적으로 결정하였다.

2.3.4 CFD 해석

초음파 노즐의 진동에 의해 입자가 미립자 형태로 쪼개져 분무 되는 전체 과정의 구현은 기술적으로 불가하므로 해석의 단순화 과정을 수행하였다. 출구 경계 조건은 대기압 경계조건, 입구에는 2.3.3에서 정의한 200 Pa 압력 조건을 적용하였다. 노즐 내부의 벽 경계 조건은 Non-slip Condition을 적용하였으며, 난류 모델은 SST k- ω Model을 사용하였다. DPM을 활용하여 Injection 조건을 정의하였으며, 입자 직경은 50 μ m, 전체 유속은 0.00045 kg/s를 적용하였다.

Particle Injection이 10초 동안 일어나는 Transient 해석을 진행하였으며, 미스트가 노즐 팁을 통해 분사되면서 Steady-state가 되는 지점인 Time = 6s 지점에서 결괏값을 추출하여 분석하였다. 결괏값으로는 분사 방향에 따른 속도의 변화, 압력의 변화, Turbulent Kinetic Energy (TKE)의 변화를 확인하였다. TKE란 난류의 강도를 나타내는 해석 파라미터로 TKE 값이 클수록 난류의 강도가 더 크다는 것을 의미한다. 본 연구에서 사용한 의료기기는 1-2 cm 거리의 간격을 두고 분사하는 것을 제시하기 때문에 임상적으로 의미가 있는 2 cm 떨어진 거리에서의 분사 형태와 속도를 확인했다.

3. 결과 및 분석

3.1 Reference Model

Fig. 5와 같이 DPM을 고려한 Reference Model의 미스트 입자 거동 해석 결과를 확인하였다. Fig. 5(a)에서 미스트 입자들이 노즐 내부 유로를 따라 분무되는 현상을 Particle Tracks를 통해 확인할 수 있으며, Velocity Contour를 통해 속도 분포를 확인할 수 있다. Fig. 5(b)에서 분무 되는 방향에 따른

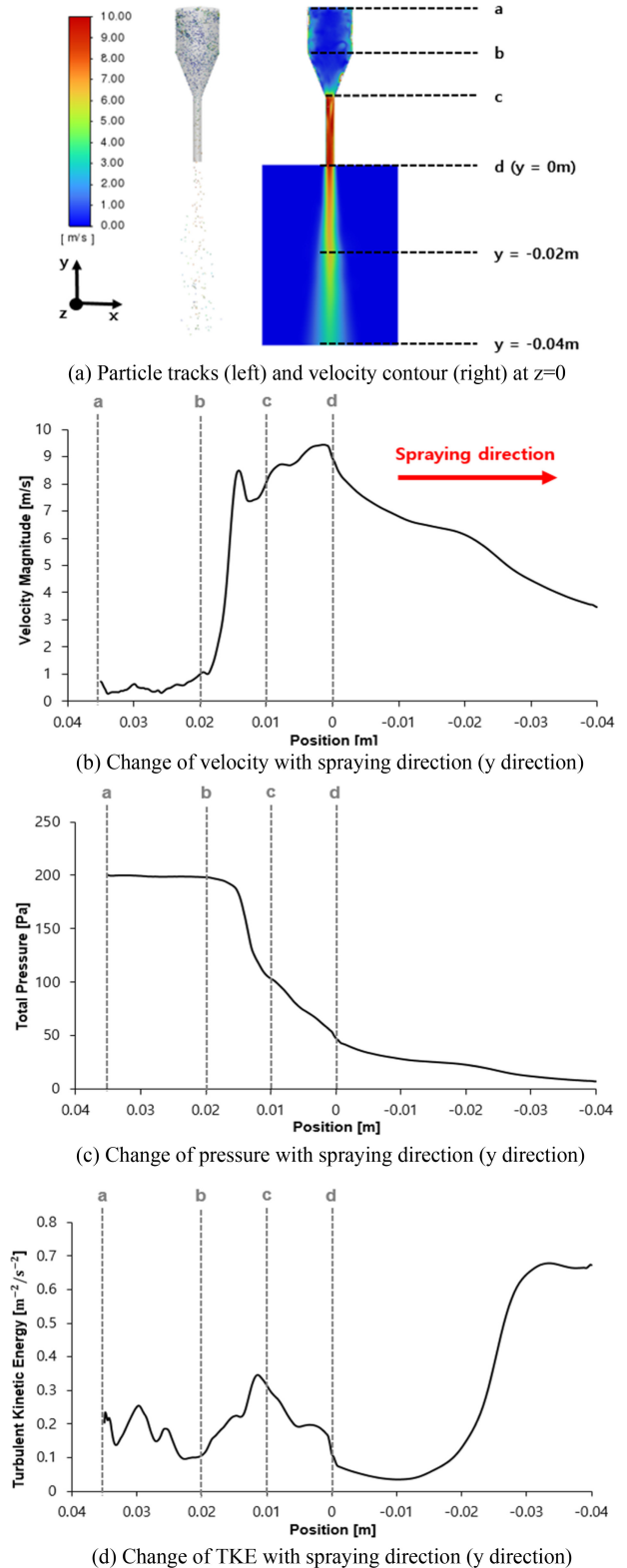


Fig. 5 Simulation results of reference model

속도 변화를 그래프를 통해 나타냈다. Fig. 5(c)는 분무 되는 방향에 따른 압력 변화이며, Fig. 5(d)는 분무 되는 방향에 따른 TKE의 변화를 나타낸다. 여기서 그림에 표기된 a-b 구간은 노즐 팁의 입구부(L_i)를 나타내며, 압력에 의해 미스트 입자들이

Table 4 The maximum velocity and the velocity at $y = 0$, $y = -0.02$ m of each model (Velocity unit = $[m/s^2]$)

Type	V_{max}	$y = 0$	$y = -0.02[m]$
Reference	9.45	8.94	6.12
1	9.89	9.10	5.05
2	7.43	6.92	5.26
3	8.72	7.92	5.37
4	9.03	8.56	4.75
5	13.95	13.43	6.43
6	8.71	8.31	5.67
7	22.91	10.91	4.26
8	7.27	6.35	4.95

유입되고 단면적이 일정하기 때문에 속도의 변화는 미미하다. b-c 구간은 노즐 팁의 수축부(L_c)를 나타내며, 단면적이 감소하면서 미스트의 유동 속도가 크게 증가하는 구간이다. c-d 구간은 노즐 팁의 출구부(L_o)를 나타내며, 수축부를 지나면서 TKE 값이 약간 증가하였지만, 다시 감소시키면서 유동이 안정화되는 구간이다. Reference Model은 c-d 구간(L_o)에서 미스트의 속도가 점점 증가하여 분사 직전 최대 속도 9.45 m/s에 도달했다가 $y = 0$ 지점에서 8.94 m/s의 속도로 미스트가 분사된다(Table 4).

노즐 팁 내부 유로가 수축되면서 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 유동 흐름이 원활하게 진행되며 미스트 입자가 수축부를 지나면서 속도가 점차 증가하다가 출구부에서 공기 중(대기압)으로 분출되면서 속도는 점차 감소된다. $y = -0.02$ m에서의 분사 패턴은 원형으로 임상적으로 보았을 때 원형 패턴이 가장 효율적인 것으로 판단된다. 유동이 안정적으로 발달하고 속도도 적절히 증가시키면서 분사되어 안정적인 분무 패턴을 형성한 것으로 보인다.

3.2 Parameter Study

Parameter Study를 위해 Fig. 4와 같이 특정한 노즐 팁 파라미터에 변화를 준 모델들 별로 Reference Model과의 결과를 비교 분석하였다. Fig. 6은 Aspect Ratio에 변화를 준 Types1과 2에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 7은 L_c 와 L_i 에 변화를 준 Types3과 4에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 8은 L_c 와 L_o 에 변화를 준 Types5와 6에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 9는 L_i 와 L_o 에 변화를 준 Types7과 8에 대한 해석 결과를 나타낸다. Figs. 6부터 9에서 (a)는 분무 방향에 따른 속도 변화를 Reference Model과 비교하여 나타내며, (b)는 분무 방향에 따른 TKE 변화를 보여준다.

Fig. 10은 $y = -0.02$ m 단면적에서의 Velocity Contour를 나타내며, 이를 통해 2 cm 떨어진 거리에서의 분사 패턴 및 면적을 예측할 수 있다. 각 모델들의 최대 속도와 $y = 0$, $y = -0.02$ m에서의 속도는 Table 4에 정리하였다. 각 모델들의 결과를 비교하

여 설계 파라미터가 분사 거동에 미치는 영향을 알아보고 최종적으로 최적화된 노즐 팁 설계를 위한 방안을 제시한다.

3.2.1 Aspect Ratio의 영향

Type1은 큰 Aspect Ratio 값을 가지며 단면적 감소가 크기 때문에 압력 강하에 의한 속도 증가가 더 큰 것으로 예상했으나, Fig. 6(a)와 같이 Reference와 비교하였을 때 분사 후 속도가 더 떨어져 분사 효율이 감소했다. Type2는 작은 Aspect Ratio 값을 가지며, 단면적 감소가 작기 때문에 속도를 크게 높이지는 못했으나 미스트가 공기 중으로 분사된 후 속도의 감소폭이 가장 완만했다. 그러나 Fig. 6(b)와 같이 L_c 구간에서 TKE가 크게 증가하여 불안정한 난류가 발생하였다.

두 모델의 분사 패턴의 경우 Reference와 유사하게 원형 패턴을 형성하였으며, 예상대로 출구부 직경이 커질수록 더 큰 분사 면적을 형성했다(Fig. 10). 너무 크거나 작은 Aspect Ratio는 분사 효율을 감소시키며 적절한 값을 도출하는 것이 필요하다.

3.2.2 L_i , L_c 의 변화에 따른 결과 분석

Type3는 L_i 구간을 없애고 L_c 구간을 늘려 수축부를 길게 만들어 미스트의 속도 증가를 더욱 높이고자 했으나, Fig. 7(a)와 같이 예상과 달리 Reference보다 전체적으로 속도가 낮은 경향성을 보였다. L_c 구간이 없는 Type4의 경우 단면적이 급격하게 변화함으로써 압력 강하에 의해 난류가 발생한 것을 Fig. 7(b)에서 확인할 수 있다. 출구부에서 TKE 값이 안정화되었으나, 노즐 팁 내부 유로에서의 난류에 의한 불안정한 유동 발생은 미스트의 물리적 상태에 이미 영향을 줄 수 있다. 두 모델 모두 원형 패턴의 분사 형태를 형성하며(Fig. 10), Reference보다 낮은 속도로 2 cm 거리의 타겟에 힘이 전달된다.

L_i 는 미스트의 유입을 받아내는 구간으로 속도를 증가시키는 구간은 아니지만, 유동이 안정적으로 발달할 수 있도록 초기 상태를 안정화시키는 역할을 수행한다. 수축부인 L_c 가 없는 경우 난류로 인해 유동이 매우 불안정해지기 때문에 적절한 수축 구간을 설정하는 것이 필요하다.

3.2.3 L_c , L_o 의 변화에 따른 결과 분석

Type3와 동일한 수축부 길이를 가지지만 L_o 구간을 없앤 Type5의 경우 13.42 m/s ($y = 0$)까지 속도를 증가시켰다. 그러나 속도가 증가된 미스트 유동이 안정화되지 못한 채 공기 중으로 분출되면서 난류의 영향으로 속도가 급감하여 $y = -0.02$ m에서는 Reference와 비슷한 속도를 보이는 것을 Figs. 8(a)와 8(b)에서 확인할 수 있다. 미스트가 분사된 이후로 TKE가 증가하면서 불안정해짐에 따라 찌그러진 원형의 분무 패턴을 형성했다(Fig. 10). Type6의 경우 Type4와 유사하게 유동을 안정적으로 발달시킬 수 있는 L_c 구간이 없어 Fig. 8(b)와 같이 난류가 크게 발생했다. 속도의 증폭 정도는 Fig. 8(a)와 같이 Reference보다 조금 낮은 경향성을 보인다.

결과를 통해 L_o 는 미스트가 안정적으로 분사될 수 있도록 하는 역할을 수행하는 것을 알 수 있다. L_o 구간이 없이 분사되

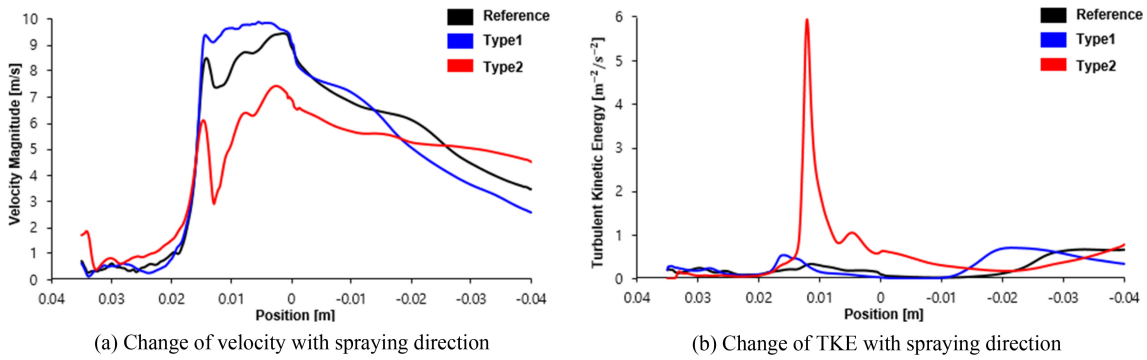


Fig. 6 Comparison of CFD simulation results between Types 1, 2, and reference model (Be careful about the y-axis scale)

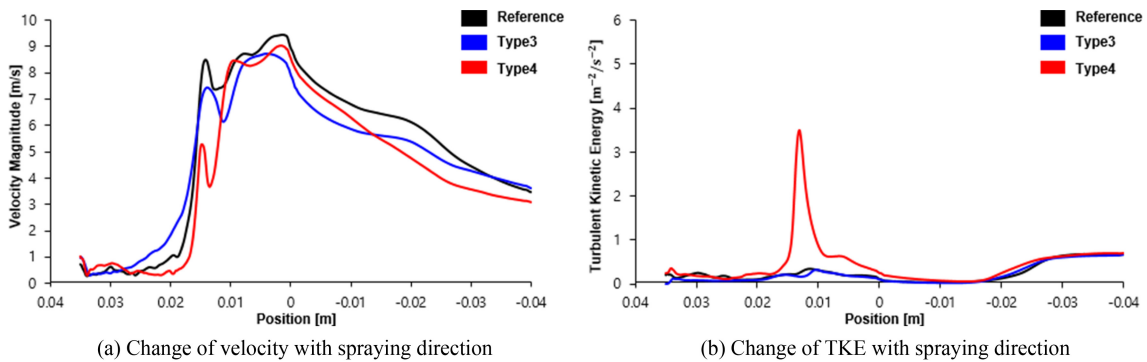


Fig. 7 Comparison of CFD simulation results between Types 3, 4, and reference model (Be careful about the y-axis scale)

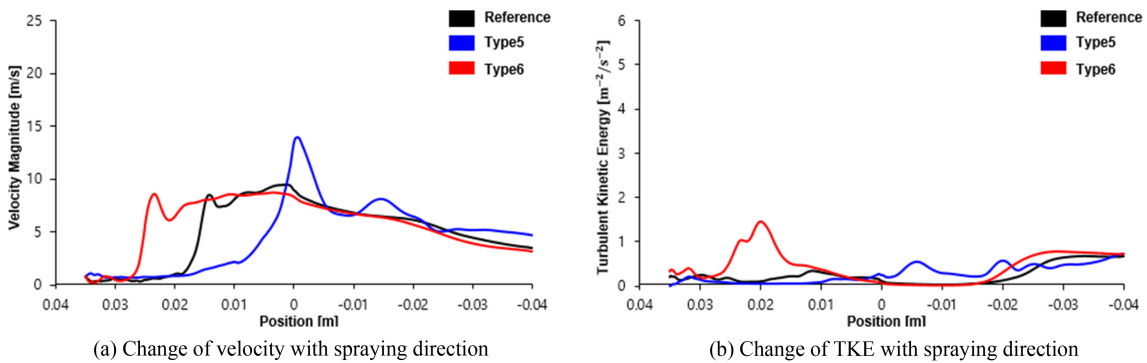


Fig. 8 Comparison of CFD simulation results between Types 5, 6, and reference model (Be careful about the y-axis scale)

는 Type5의 TKE 값은 크게 증가했다. L_o 는 난류의 발생을 최소화하며, L_c 구간을 지나면서 속도가 증가된 미스트가 안정적으로 분사될 수 있도록 한다.

3.2.4 L_i , L_o 의 변화에 따른 결과 분석

Type7은 L_o 구간을 없애고 L_i 구간을 늘린 형태로 Figs. 8(a)와 9(a)를 비교해보았을 때 Type5와 속도 변화의 유사한 경향성을 보였다. Type5보다 더 짧은 L_c 값을 가지며 길이당 단면적 변화율이 더 높기 때문에 속도를 더욱 증폭시킨 것으로 보인다. 그러나 Fig. 8(b)와 9(b)와 같이 난류가 발생한 지점에서 TKE 최댓값이 Type5의 경우 0.73이나 Type7은 13.23으로 훨씬 더 큰 강도의 난류가 발생했다. 분사 이후 난류의 영향때문에 속도가

급감하며 $y = -0.02$ m 지점에서 오히려 속도가 매우 작아지며 큰 분사 면적을 형성했다(Fig. 10). 수축부가 짧을수록 속도 증가 폭이 커지나 난류의 발생 강도도 커지게 되는 결과를 확인할 수 있다. Type8의 경우 Fig. 9(a)와 같이 긴 L_o 구간을 지나면서 속도가 크게 증가하지 못했으며 비효율적인 형태로 판단된다.

Types 5와 7과 같이 L_c 구간을 지나 바로 분사되는 경우 속도를 가장 많이 높일 수 있으나 분사 지점에서 난류가 발생하기 때문에 출구부의 형상을 안정적으로 변화시킬 필요가 있다. 분사 바로 직후의 난류 발생은 미스트의 유동이 한 곳으로 집적되지 않고 공기중으로 산란될 가능성이 크며 원하는 타겟에 적절한 힘을 가할 수 없다. 따라서 안정적인 L_o 구간을 설계하고 타겟에 에너지를 유효하게 가할 수 있는 안정적인 출구부 형상 설계가 필요하다.

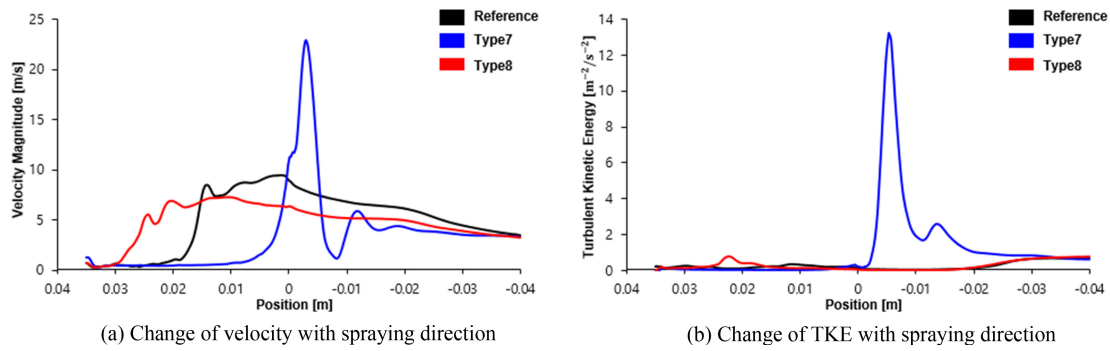


Fig. 9 Comparison of CFD simulation results between Types7, 8, and reference model (Be careful about the y-axis scale)

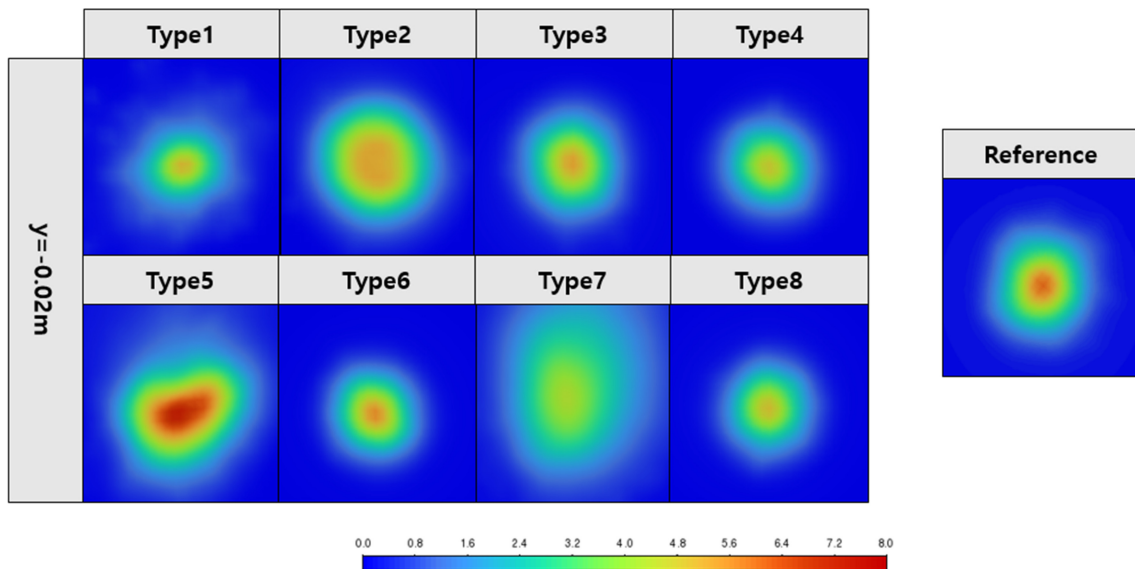


Fig. 10 Prediction of spraying pattern and area with velocity distribution of cross-sectional area at $y = -0.02$ m (1×1 cm area)

4. 결론

초음파에 의해 미립화된 미스트가 각 노즐 팁 모델별로 내부 유로를 지나면서 변화하는 유동의 상태를 확인하였으며, 결과를 통해 노즐 팁 설계 파라미터의 영향을 분석할 수 있었다. CFD를 통해 안정적인 유동의 발달 여부, 속도 증가의 정도, 난류 발생의 정도, 분사 형태 및 분사 속도 등을 효과적으로 조사할 수 있었으며 노즐 팁 설계 시 미스트의 유동이 충분히 발달할 수 있는 구간과 안정적으로 분사될 수 있는 형상을 수치해석을 통해 적절하게 설정하는 것이 가장 중요한 것으로 보인다. 또한 ‘창상 위생’의 개념에 따르면 최대 분무 압력은 100,000 Pa 정도로 권장되며, 그 이상의 높은 압력은 환자에게 고통을 유발할 수 있으므로 분무 압력의 제어가 필요하다. 따라서 난류 발생을 최소화하고 환자에게 고통을 유발할 정도의 분무 압력을 가하지 않으면서 속도를 최대한 높일 수 있는 설계안을 찾는 것이 필요하다. 본 연구를 통해 설계 파라미터에 대한 결론은 다음과 같다.

1) Aspect Ratio가 커질수록 분사 효율이 떨어지며, Aspect Ratio가 작아질수록 난류의 강도가 증가하므로 상황에 맞는 적

절한 값을 도출해내는 것이 필요함.

2) 적절한 L_i 는 미스트의 유입을 받아내고 속도를 높이기 전 유동을 안정화시키는 역할을 수행함.

3) L_c 는 미스트의 속도를 높이는 구간으로 유동이 충분히 발달할 수 있는 길이를 설정하는 것이 필요하며, 적절한 L_c 대 L_o 길이 비를 도출하면 분사 성능을 크게 개선할 수 있음.

4) L_o 는 수축부(L_c) 구간을 지나 속도가 높아진 미스트가 분사되기 전에 불안정한 유동을 안정화시키는 역할을 수행함.

5) L_o 구간이 없는 경우 분사구에서 큰 난류가 발생했으며 유효한 타겟 크기 내에 에너지를 집적시킬 수 있는 분사구 형상 도출이 필요함.

본 연구는 대략적인 노즐 팁 형상에 대한 결과 분석을 위해 모델 간 설계 파라미터의 수치를 다소 극단적으로 설정했다. 이후에 본 연구의 결과를 통해 분사 성능을 높일 수 있는 설계 파라미터 간의 비율을 다양하게 설정하여 CFD를 통해 상세히 분석할 필요가 있다. 또한 실제 실험결과를 통해 해석 결과에 대한 파라미터 튜닝 과정을 추가로 수행하는 것이 필요하며 점성을 고려하지 않고 생리식염수만을 가정하였기 때문에 실제로

바이오 필름을 제거하기 위해 사용되는 세척액의 계면활성제나 항바이오 필름 기술이 포함된 창상 및 피부 관리용 향균 용액을 고려한 점성을 해석 조건에 추가하여 연구할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2023년도 식품의약품안전처 연구개발비(No. 22183MFDS367)와 2021년도 중소벤처기업부의 기술개발사업(No. S3142549)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Murphy, C., Atkin, L., Swanson, T., Tachi, M., Tan, Y. K., de Ceniga, M. V., Weir, D., Wolcott, R., Āernohorská, J., Ciprandi, G., Dissemond, J., James, G. A., Hurlow, J., Martínez, J. L. L., Mrozikiewicz-Rakowska, B., Wilson, P., (2020), Defying hard-to-heal wounds with an early antibiofilm intervention strategy: wound hygiene, *Journal of Wound Care*, 29(Sup3b), S1-S26.
- Swanson, T., Angel, D., Sussman, G., Cooper, R., Haesler, E., Ousey, K., Carville, K., Fletcher, J., Kalan, L., Keast, D., Leaper, D. J., Schultz, G., Black, J., Call, E., (2016), Wound infection in clinical practice: principles of best practice, *Wounds International*.
- Murphy, C. A., Houghton, P., Brandys, T., Rose, G., Bryant, D., (2018), The effect of 22.5 kHz low-frequency contact ultrasound debridement (LFCUD) on lower extremity wound healing for a vascular surgery population: a randomised controlled trial, *International Wound Journal*, 15(3), 460-472.
- Kotronis, G., Vas, P. R., (2020), Ultrasound devices to treat chronic wounds: the current level of evidence, *The International Journal of Lower Extremity Wounds*, 19(4), 341-349.
- Ennis, W. J., Formann, P., Mozen, N., Massey, J., Conner-Kerr, T., Meneses, P., (2005), Ultrasound therapy for recalcitrant diabetic foot ulcers: results of a randomized, double-blind, controlled, multicenter study, *Ostomy Wound Management*, 51(8), 24-39.
- Escandon, J., Vivas, A. C., Perez, R., Kirsner, R., Davis, S., (2012), A prospective pilot study of ultrasound therapy effectiveness in refractory venous leg ulcers, *International Wound Journal*, 9(5), 570-578.
- Wiegand, C., Bittenger, K., Galiano, R. D., Driver, V. R., Gibbons, G. W., (2017), Does noncontact low-frequency ultrasound therapy contribute to wound healing at the molecular level?, *Wound Repair and Regeneration*, 25(5), 871-882.
- Medscape, Wound irrigation. <https://emedicine.medscape.com/article/1895071-overview?form=fpf>
- Rajan, R., Pandit, A. B., (2001), Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomization, *Ultrasonics*, 39(4), 235-255.
- Lang, R. J., (1962), Ultrasonic atomization of liquids, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(1), 6-8.
- Weir, D., Swanson, T., (2019), Ten top tips: wound cleansing, *Wounds International*, 10(4), 8-11.
- Rodeheaver, G. T., Ratliff, C. R., (1997), Wound cleansing, wound irrigation, wound disinfection, in *Chronic Wound Care: The Essentials*, 5 Rodeheaver and Ratliff, Krasner, D. L., (Ed.), HMP Communications.
- Lammers, R. L., Hudson, D. L., Seaman, M. E., (2003), Prediction of traumatic wound infection with a neural network-derived decision model, *The American Journal of Emergency Medicine*, 21(1), 1-7.



Seung Hyeok Jung

M.S. candidate in the Department of Regulatory Science for Medical Device, Graduate School, Dongguk University. His research interest is medical device and computer modeling & simulation
E-mail: gun2730@naver.com



Jong Hyeok Jeon

Senior researcher in the Biounit Co., Ltd. His research interest in medical device.
E-mail: jhjeon3459@biounit.co.kr



Ji Yeong Won

Chief researcher in the Biounit Co., Ltd. Her research interest in medical device.
E-mail: wonjyungk@gmail.com



Sung Min Kim

Professor in the Department of Biomedical Engineering, Dongguk University. His research interest is medical device development and medical device regulatory science.
E-mail: smkim@dongguk.edu



Hong Seok Lim

Research professor in Research Institute for Commercialization of Biomedical Convergence Technology, Dongguk University. His research interest is development of surgical instruments and surgical robots.
E-mail: limit75@naver.com

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

제14조 (피조사자 권리 보호)

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

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

제16조 (조사결과의 보고)

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

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

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

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

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

회원(사) 구성

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

관련정부기관과의 관계

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

주요활동현황

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

발간자료

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

발행규정

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

부문위원회 활동

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

특별회원사 가입

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

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

생산기술상, 정밀기술상

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

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

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

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

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

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

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

KSPE Young Researcher Award

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

특별상

가헌학술상

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

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 25 · Number 6 · June 2024

REGULAR PAPERS

Research on Roundness Detection and Evaluation of Aluminum Hose Tail Based on Machine Vision

G. Yan · J. Zhang · J. Zhou · Y. Han · F. Zhong · H. Zhou 1127

Sustainable Processing of Insulating Yttria Stabilized Zirconia Ceramic Using Wire Electrical Discharge Machining in Distilled Water

B.D. Shinde · R.S. Pawade 1139

Research on the Wear of Groove Structured Grinding Wheel Based on the Simulation and Experiment of Single Abrasive Particle Scratching

J. Yi · Z. Wang · T. Yi · H. Deng · W. Zhou 1153

Observation of Abrasives Under Morphable Polishing Tools with a High-Speed Camera

Q. Nie 1167

Influence of Friction Stir Weld Seam Distribution on Spun Formed Workpieces

S. Sun · J. Wang · B. Gao · G. Cao · S. Zhang 1183

Experimental Study of Micro-hole Pecking Drilling in High Volume Fraction SiCp/Al7075 Composites with Variable Step Size

P. Sun · A. Jiao · L. Li · Y. Zhang · J. Yuan 1195

Porosity Evaluation and Analysis for 316L Stainless Steel by Selective Laser Melting Using Laser Ultrasonic Technology

Y. Lin · D. Zou · G. Ye · X. Ji · Y. Zhang · X. Jiang · Y. Zhang 1209

Diagnosis of High-Speed Ball-Bearing Spindles by Data Mining of Dynamic Responses from Various Rotating Elements

J. Kang · C. Lim · H. Maeng · K. Park 1219

A Study on the Driving Performance Analysis for Autonomous Vehicles Through the Real-Road Field Operational Test Platform

D.-W. Lee · T.-L. Kim · S.-J. Kwon 1231

A Hash Approach to Refine CNC Computation of Arc Length and Parameter of NURBS with High Efficiency and Precision

X. Han · K. Zhu · X. Wang 1243

Study on Heat Treatment Deformation of Magnesium Alloy Cabin and Deformation Restraint with Internal Support Tooling

H. Gong · L. Zhang · T. Zhang · B. Yi · X. Zhang 1257

Piezoelectric Stretchable Sensor with a Vertical Wavy Structure Fabricated by Combining Dip Coating and Micro-corrugation Process

M. Yamamoto · N. Tomita · S. Takamatsu · T. Itoh 1271

Porous Polymer Microneedles with Superhydrophilic Surface for Rapid Fluid Transport

S. Yun · Y. Choi · S. Choi · T. An · W. Choi 1279

Deep Convolution Neural Network to Improve Hand Motion Classification Performance Against Varying Orientation Using Electromyography Signal

T. Triwiyanto · V. Abdullayev · A.A. Ahmed 1289

Printing Characteristics of TPU/MWCNT Conductive Composite Using FFF

H. Kim · J. Jeon · S. Lee · J. Cho · I. Lee 1303

REVIEW

Geometric Error Measurement of Rotary Axes on Five-Axis Machine Tools: A Review

Y.-T. Chen · C.-S. Liu · W.-C. Shiau · H.-F. Xie · C.-L. Chiu · Q.-H. Yan · B.-K. Lee · T.-H. Chen · Y.-Y. Huang 1311

CORRECTION

Correction: A Study on the Driving Performance Analysis for Autonomous Vehicles Through the Real-Road Field Operational Test Platform

D.-W. Lee · T.-L. Kim · S.-J. Kwon 1333

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 11 · Number 3 · May 2024

PREFACE

Preface for Advanced Manufacturing for ESG

B. Kim · S.-T. Hong · H.E. Jeong 707

REGULAR PAPERS

A Computer Simulation and Experimental Study of Weight Reduced Carbonated Soft Drink PET Bottle Manufacturing

A. Saini · D.-H. Choi · M.-Y. Lyu 709

A Comprehensive Investigation of Process Parameters and Material Properties Effects on Printed Line Quality of Aerosol Jet Printing Based on Coupled Three-dimensional Numerical Models

Z. Liu · Y. Liu · L. He · L. Cui · N. Liang · J.P. Choi · H. Zhang 727

Application of Reinforcement Learning to Dyeing Processes for Residual Dye Reduction

W. Lee · S.M.M. Sajadieh · H.K. Choi · J. Park · S.D. Noh 743

Industrial Energy Optimisation: A Laser Cutting Case Study

N. Goffin · L.C.R. Jones · J.R. Tyrer · J. Ouyang · P. Mativenga · L. Li · E. Woolley 765

Impacts of Environmentally Friendly Milling of Inconel-800 Superalloy on Machinability Parameters and Energy Consumption

E. Şap · Ü.A. Usca · S. Şap 781

Modeling and Assessment of Carbon Emissions in Additive-Subtractive Integrated Hybrid Manufacturing Based on Energy and Material Analysis

Z. Liu · Y. Zhao · Q. Wang · H. Xing · J. Sun 799

Exploring the Feasibility of Advanced Manufacturing for Mass Customization of Insoles in the Context of ESG

J. Cheng · J.-C. Wang 815

Enhanced Wear Properties of an Inspired Fish-Scale Film Structure in Terms of Microstructured Self-Lubrication Induced Effects by High-Speed Laser Surface Remelting Processing

W. Dai · C. Fang · X. Wu · Z. Zheng · J. Li 833

A Knowledge Graph Based Disassembly Sequence Planning For End-of-Life Power Battery

H. Wu · Z. Jiang · S. Zhu · H. Zhang 849

Battery State of Health Estimation from Discharge Voltage Segments Using an Artificial Neural Network

M.U. Javaid · J. Seo · Y.-K. Suh · S.Y. Kim 863

Comparative Study of Electrically Assisted Pressure Joining of Aluminum 6061-T6 Alloys and Copper C11000 Alloys

T.-A. Bui-Thi · T.T. Do · S. Zhang · Y. Kim · H.N. Han · S.-T. Hong 877

The Optimization of Energy Consumption and CO₂ Emission in the Product Hazardous Substances Report Making

C.-C. Hsu · C.-C. Lin 889

Towards Sustainable Manufacturing: A Maturity Assessment for Urban Smart Factory

S.M.M. Sajadieh · S.D. Noh 909

Digital Twin and Deep Reinforcement Learning-Driven Robotic Automation System for Confined Workspaces: A Nozzle Dam Replacement Case Study in Nuclear Power Plants

S.-Y. Park · C. Lee · S. Jeong · J. Lee · D. Kim · Y. Jang · W. Seol · H. Kim · S.-H. Ahn 939

REVIEWS

AI-Empowered Methods for Smart Energy Consumption: A Review of Load Forecasting, Anomaly Detection and Demand Response

X. Wang · H. Wang · B. Bhandari · L. Cheng 963

**Review of the Application of Acoustic Emission
Technology in Green Manufacturing**

J. Liu · C. Jiang · X. Yang · S. Sun **995**

**A Systematic Review on Extended Reality Applications
for Sustainable Manufacturing Across the Product Lifecycle**

C.-H. Chu · J.-K. Pan **1017**

**Green Manufacturing of Electrically-Tunable Smart
Light-Weight Planar Optics: A Review**

D. Yang · Y. Lee · H. Kang · Q.H. Vu · G. Kang · S.E. Lee ·
H. Han · S. Kim · H.K. Nam · S. Kwon · H.-G. Rhee ·
J. Lee · H. Yoo · H. Yoon · Y.-J. Kim **1029**

*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 2 · Number 1 · January 2024

REGULAR PAPERS

The Current Design for Additive Manufacturing Research Frontier

D. W. Rosen 1

Bayesian Hyper-parameter Optimization in One-dimensional Convolutional Autoencoder for Monitoring Bearing Health Status

S. Chae · S. J. Bae 15

Designable Data Augmentation-based Domain-adaptive Design of Electric Vehicle Considering Dynamic Responses

Y. Yoo · J. Lee 23

Directed Graph-based Refinement of Three-dimensional Human Motion Data Using Spatial-temporal Information

C. Choi · J. Lee · H.-J. Chung · J. Park · B. Park ·

S. Sohn · S. Lee 33

A Finite Element Model of an Electric Motor with an Unbalanced Rotor for Vibration Data Generation

H. Lee · S. Son · D. Jeong · K. H. Sun ·

B. C. Jeon · K.-Y. Oh 47

Development of 1D-convolutional Neural Network-based Height Profile Prediction Model in Directed Energy Deposition Process Using Melt-pool Image Data

H. Shin · J. Ahn · S. W. Beak · S. W. Lee 57

REVIEW

Recent Progress in Self-Powered Sensors for Structural and Human Monitoring Systems Using Thermoelectric Energy Harvesters

I.-S. Jo · S.-K. Chung · K. Choi 67

2024년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

민병권(연세대학교)

수석부회장

안성훈(서울대학교)

부회장

이상원(성균관대학교)

오정석(한국기계연구원)

류상문(DN솔루션즈)

김정(KAIST)

이인환(충북대학교)

박상후(부산대학교)

최영재(한국생산기술연구원)

감사

송창규(한국기계연구원)

이경창(부경대학교)

총무이사

김동성(POSTECH)

김보현(숭실대학교)

신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원)

송용남(고려대학교)

정영훈(경북대학교)

편집이사

강봉철(국민대학교)

강현욱(UNIST)

고승환(서울대학교)

곽문규(경북대학교)

김규만(경북대학교)

김남근(서강대학교)

김동립(한양대학교)

김산하(KAIST)

김석민(중앙대학교)

김양진(부산대학교)

김영진(KAIST)

김종백(연세대학교)

김효영(한국공학대학교)

문두환(고려대학교)

박근(서울과학기술대학교)

박영빈(UNIST)

손정우(금오공과대학교)

안지환(POSTECH)

안형준(숭실대학교)

윤준영(연세대학교)

이광일(경일대학교)

이동원(전남대학교)

이동훈(숭실대학교)

이창우(건국대학교)

이호원(서울대학교)

장진아(POSTECH)

정구현(울산대학교)

정훈의(UNIST)

주백석(금오공과대학교)

진종한(한국표준과학연구원)

천두만(울산대학교)

추원식(경상국립대학교)

황지홍(서울과학기술대학교)

사업이사

강태준(인하대학교)

권지연(동국대학교)

김무림(한국로봇융합연구원)

김승종(고려대학교)

김진호(영남대학교)

김충수(한국생산기술연구원)

김태곤(한국생산기술연구원)

김현준(경북대학교)

박석희(부산대학교)

박용재(강원대학교)

서진호(부경대학교)

안상훈(한국기계연구원)

오기용(한양대학교)

윤주성(경남대학교)

이문규(아주대학교)

이봉기(전남대학교)

이원균(충남대학교)

이지혜(한국기계연구원)

이현섭(동아대학교)

임지석(영남대학교)

조영삼(원광대학교)

주기남(조선대학교)

최정욱(중앙대학교)

현승민(한국기계연구원)

기획홍보이사

노유정(부산대학교)

류시형(전북대학교)

이주연(서울과학기술대학교)

허세곤(한국기계연구원)

국제이사

남정수(한국생산기술연구원)

이동진(건국대학교)

전용호(아주대학교)

조영태(창원대학교)

차석원(서울대학교)

허윤정(경희대학교)

홍성태(울산대학교)

대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원)

김경동(한국공작기계산업협회)

김종혁(썬대위아)

장원석(한국기계연구원)

조영환(LIG넥스원(주))

부문회장

김건희(한밭대학교)

이현욱(한국철도기술연구원)

정재일(국민대학교)

이동윤(한국생산기술연구원)

박형욱(UNIST)

이강재(DN솔루션즈)

조정대(한국기계연구원)

엄광문(건국대학교)

김호찬(안동대학교)

김영범(한양대학교)

특별회원사

다이아몬드

DN솔루션즈
(주)케이씨텍
화천기공(주)

LIG넥스원(주)
(주)키슬러코리아

(주)스맥
한국화낙(주)

신도리코(주)
현대위아(주)

(주)이수페타시스
(주)화신정공

골드

(주)마리알로
지엔피테크놀로지(주)

(주)에비던트코리아
(주)프로토텍

(주)어드밴테크코리아
헥사곤

(주)에이스나노켄

(주)엔도로보틱스

실버

(주)웨이퍼펍

한국공작기계산업협회

패밀리

(주)넥스페이스
(주)미터랩
(주)스포스
(주)이엠엘

(주)디엔디이
BIOPAC Systems KOREA
에이비씨무역
(주)캐리마

디케이에스에이치코리아(주)
(주)비솔
(주)에이엠코리아
(주)케이랩스

리파인(주)
삼성SDI
(주)에임즈
하비스탕스(주)

맥스트레이딩
(주)스팀솔루션
위즈유틱스
한국데베소프

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구카톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김무림
한국로봇융합연구원

김양진
부산대학교

문두환
고려대학교

박민수
서울과학기술대학교

박형욱
UNIST

손정우
금오공과대학교

송철기
경상국립대학교

안지환
POSTECH

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

이종길
안동대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

강봉철
국민대학교

강현욱
UNIST

김기주
동명대학교

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

배장호
경성대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이동훈
송실대학교

이봉기
전남대학교

이호원
서울대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

김갑용
Iowa State Univ.

김범준
Univ. of Tokyo

김우균
Univ. of Cincinnati

민상기
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 6/ June 2024

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

월간 • 제41권 제6호 [통권 제399호] • 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2024년 5월 25일

발행일 2024년 6월 1일

발행인 민병권

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

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

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

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

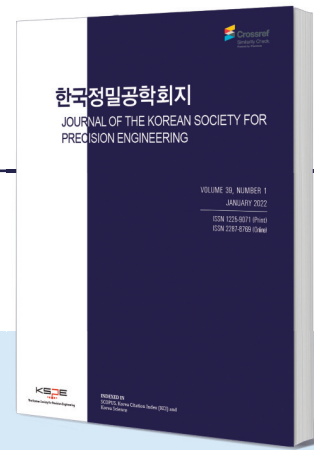
IJPEM(GT) 이성경 / (02)518-0723 / ijpem@kspe.or.kr

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

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

한국정밀공학회지(JKSPE)

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING



Indexed in SCOPUS, KCI

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

INTRODUCTION

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

PUBLICATION FEE

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

* 국내외 학술대회 발표 논문, 후기(사사)가 없을 경우 게재료 면제

ADVERTISEMENT

관련 기업 및 연구기관의 연구성 또는 제품 홍보, 각 공과대학 도서관·연구소·관련 산업체에 배포

학회지 광고 게재 비용		특별광고료(연 6회 이상)		광고 필름	비고사항
뒷표지	750,000원	6회	정가의 30%	A4(210x297 mm) 제작	* 앞쪽은 광고가 불가능합니다. * 특별화원사: 칼라광고 연간 무료제공 (최대 3회)
칼라광고	500,000원	12회	정가의 50%		
흑백광고	250,000원				
홈페이지 배너	월 100,000원				

TOPICAL ISSUE

TOPIC | 2022: 재료성형 공정에서의 고효율 금형 기술
2023: 스마트/디지털 헬스케어 기술

IJPEM-ST

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-SMART TECHNOLOGY

2023 New Journal

2023년 창간, 연간 2회, 1월·7월 1일 발행
ISSN 2951-4614(Print) / 2951-6382(Online)



INTRODUCTION

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

AIMS AND SCOPE

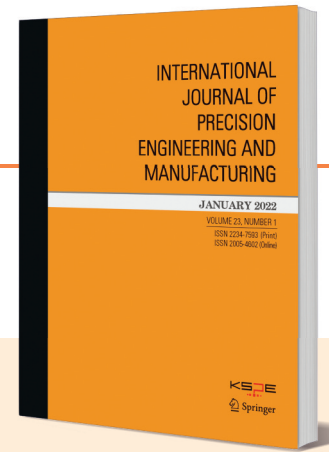
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality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

WEBSITE

www.ijpem-st.org

IJPEM

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



2021 Impact Factor: 2.041

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

INTRODUCTION

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

AIMS AND SCOPE

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

SPECIAL ISSUE

TOPIC | 2023: Robots for Manufacturing Processes and Systems

IJPEM-GT

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY



2021 Impact Factor: 4.660

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
2014년 창간, 연간 6회, 홀수월 1일 발행
ISSN 2288-6206(Print) / 2198-0810(Online)

INTRODUCTION

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

AIMS AND SCOPE

- Energy Saving and Waste Reduction in Manufacturing Processes
- Design and Manufacturing of Green Products
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- Materials for Green Manufacturing
- Management and Policy for Sustainable Manufacturing

SPECIAL ISSUE

TOPIC | 2016: Hybrid Manufacturing
2017: 4D Printing
2018: Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution
2019: Energy Harvesting
2020: Green Smart Manufacturing
2021: Soft and Green Manufacturing and Applications
2022: Green Manufacturing Coping with Climate Change and Pandemics
2023: NetZero, Achievable by Manufacturing?
2024: Advanced Manufacturing for ESG

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

Scopus, KCI 등재지



TOPICAL ISSUE

가공된 기능성 재료 기술 *Engineered Functional Materials*

KEYWORD

Functional materials

Micro/Nano materials

Energy materials

Micro/Nano structures

세부 내용

기능성 재료는 기존의 재료가 가지고 있는 물성치를 개선한 것으로 이를 구현하기 위해 다양한 공학적 기술이 사용된다. 두 물질의 화학적, 물리적 혼합으로 복합 기능성을 부여하거나 미세구조를 형성하여 표면의 특성을 변형시키는 연구는 그간 많이 진행되어 왔고 현재는 실제 응용 분야에 적용하기 위한 노력이 이어지고 있다. 표면에너지와 부착 특성을 조절하여 제작할 수 있는 방오기술, 발수기술, 방빙기술 등이 대표적으로 개발되었고 발전 효율을 향상시키기 위한 미세구조나 약물 전달 효율을 향상시키기 위한 복합재료 등도 발표되고 있다. 지금까지의 연구가 특이한 성질의 재료를 개발하고 그 적용 가능성을 제언하는 형태로 이루어졌다면 최근에는 특정 적용 분야에서 필요한 기능성 재료를 개발하는 형태로 접근방식이 바뀌고 있다.

본 특집호에서는 정밀공학적 관점에서 재료에 특정 기능을 부여하는 기술에 관한 논문을 수록하고 있다. 이 논문들은 실제 응용 분야에 적용하기 위한 미세구조의 형성과 재료의 혼합 및 표면 특성 활용 등을 개발한 구체적인 사례를 포함하고 있다. 기능성 재료의 개발뿐만 아니라 실용화에 무게를 둔 연구 결과로서 해당 분야에 널리 적용될 수 있으리라 예상된다.

제출 기한

출판 날짜

권호수

책임편집인

2024년 4월 30일

2024년 7월 1일

Vol. 41, No. 7

곽문규(경북대학교)



JKSPE 투고시스템
article.kspe.or.kr



JKSPE 홈페이지
jkspe.kspe.or.kr

JKSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

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"> • JKSPÉ Award (상장, 상금) • 백암논문상 (상장, 상금) • 학술상 (상장, 상금) |

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



About IJPEM-CFP

IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 24 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 1.9) and downloaded more than 148,000 times a year around the world.

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

Semiconductor Manufacturing Systems and Process

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

- Lithography systems
- Etching and/or deposition systems
- Probing and test systems
- Inspection and measurement
- Advanced packaging and assembly
- Manufacturing of multi-layer structures
- Chemical-mechanical planarization (CMP)
- Air conditioning and contamination control
- Automation & robot
- Control algorithm and/or AI application
- Key components for equipment and process

Guest editors

Martin Cech

University of West Bohemia Pilsen, Czech Republic

Jun Young Yoon

Yonsei University, Korea

Hakjun Lee

Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date
January 1, 2024

Publication Date
June 1, 2024

Volume, Number
Vol. 25, No. 6

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

SMART TECHNOLOGY



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

Submit an IJPEM-ST
<http://submit.ijpem-st.org>

Aims and Scope

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

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

IJPEM-ST covers various kinds of papers:

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

• Publication Date (Scheduled)

Vol. 2 No. 1 January 1, 2024

Vol. 2 No. 2 July 1, 2024

• 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

2024 **KSPE 2024**
AUTUMN CONFERENCE

한국정밀공학회 추계학술대회

2024. 11. 13. Wed. -15. Fri.

경주 화백컨벤션센터(HICO)
(경북 경주시)

주요일정

200단어초록마감 **2024. 9. 23. Mon**

초록채택통지 **2024. 10. 2. Wed**

사전등록마감 **2024. 10. 7. Mon**

논문모집분야

- 정밀가공 Precision Manufacturing Processes
- 정밀측정 Precision Measurements
- 로봇제어자동화 Robotics, Control and Automation
- 스마트생산시스템 Smart Manufacturing System
- 설계및재료 Design and Materials
- 공작기계 Machine Tools
- 나노마이크로기술 Nano/Micro Technology
- 바이오헬스 Bio Health
- 적층제조시스템 Additive Manufacturing
- 녹색생산기술 Green Manufacturing Technology

PRESM 2024

July 7 Sun – 12 Fri, 2024

Paradise Hotel Busan, Busan, Korea

Important Dates

Deadline for Abstract Submission:
February 22 (Thu), 2024

Date for Acceptance Notification:
(Mail from the PRESM Secretariat)
March 15 (Fri), 2024

Deadline for Early Registration/
Presenter Registration:
May 1 (Wed), 2024

Full Paper Submission (Optional):
May 15 (Wed), 2024

Participating Journals

1 International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing (IJPEM)
***SCIE, SCOPUS**

2 International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing-Green
Technology (IJPEM-GT)
***SCIE, SCOPUS**

3 International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing-Smart
Technology (IJPEM-ST)

4 Journal of the Korean Society for
Precision Engineering (JKSPE)
***SCOPUS**

Awards & Honors

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

Organizer

 Korean Society for
Precision Engineering (KSPE, Korea)

Secretariat

Homepage www.presm.org | Email presm@kspe.or.kr
Tel +82-2-393-0725 | Fax +82-2-518-2937

한국정밀공학회

Korean Society for Precision Engineering

2024년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2024

KSPE 2024
Spring
Conference

춘계학술대회

KSPE 대한민국정밀공학회
Korean Socie for Precision Engineering

2024
5. 8(수) - 10(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
*PR*recision Engineering and *S*ustainable *M*anufacturing

PRESM 2024

2024. 7. 7(일) - 12(금)

Paradise Busan Hotel
Busan, Korea

KSPE 대한민국정밀공학회
Korean Socie for Precision Engineering

한국정밀공학회

2024

KSPE 2024
Autumn
Conference

추계학술대회

KSPE 대한민국정밀공학회
Korean Socie for Precision Engineering

2024. 11. 13(수) - 15(금)

경주화백컨벤션센터(HICO)
(경상북도 경주시)

Affordable High-Speed Cameras for Everyone

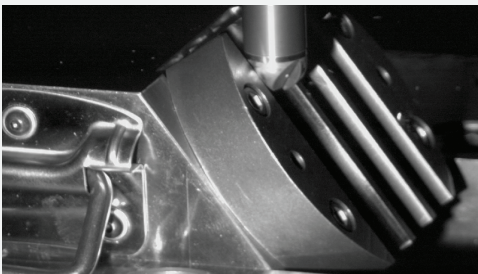


5" Touchscreen
INTUITIVE INTERFACE

1TB NVMe
BUILT-IN SSD

Desktop & Mobile App
REMOTE CONTROL

C/F/EF/MFT/E-Mount
FLEXIBLE LENS MOUNTS



End Mill Cutting



TIG Welding



Ballistics & Combustion





두산공작기계의 새이름

DN SOLUTIONS의

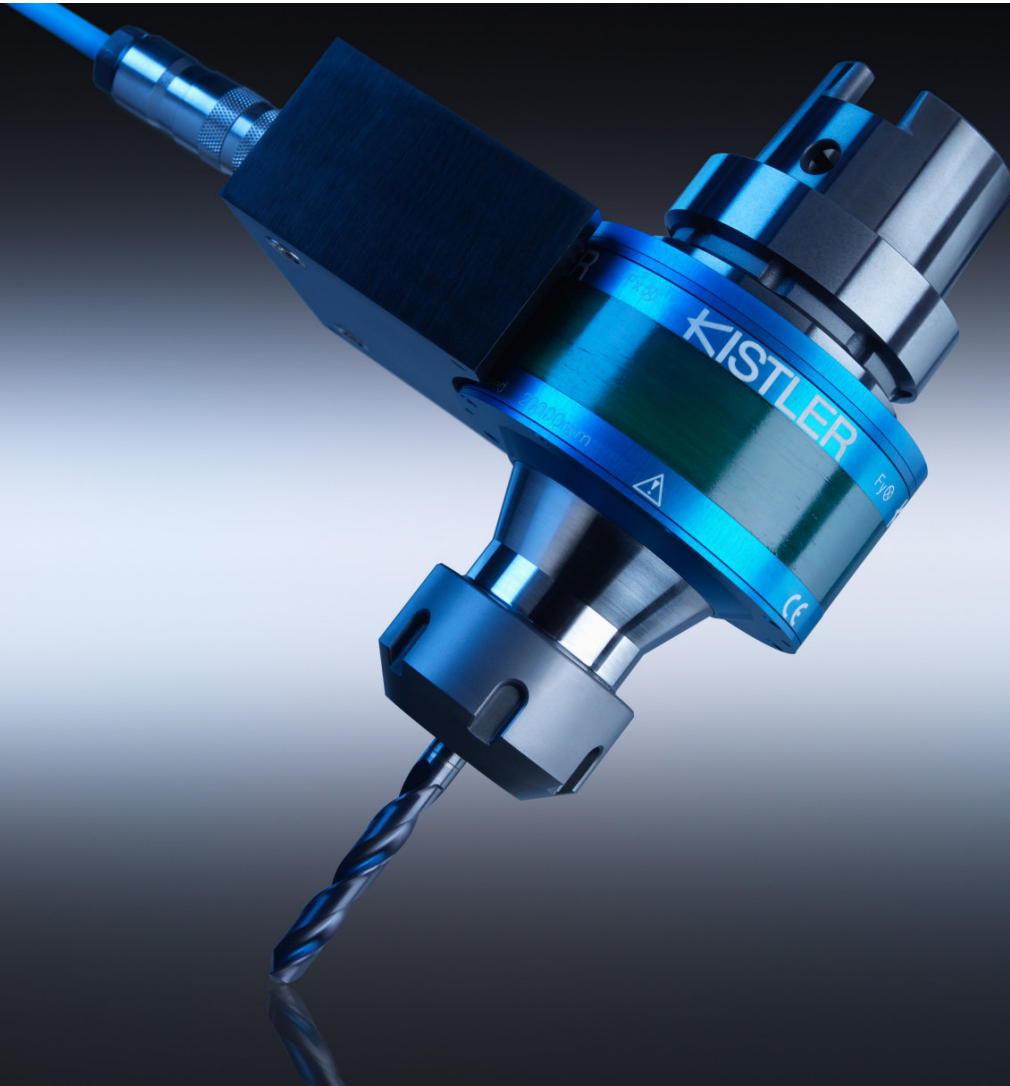
위대한 여정은 계속됩니다.

두산공작기계는 지난 50년 동안 Machine Greatness의 가치를 중심으로
공작기계 업계 글로벌 리더로서의 명성을 쌓아왔습니다.

이제 새로운 시대가 시작됩니다. DN 솔루션즈라는 새로운 이름과 함께
미래 지향적인 자동화, 소프트웨어 및 기술로 차별화된 공작기계의 유산을 이어갈 것입니다.

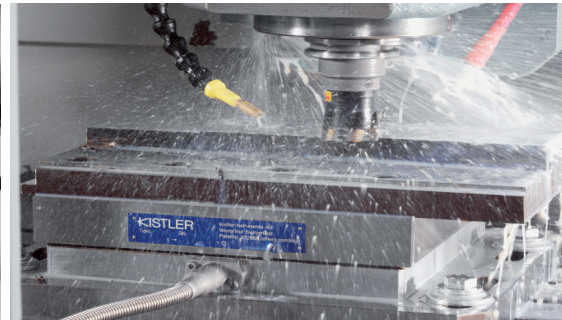
Manufacturing Solutions Leader, DN 솔루션즈

f YouTube Instagram LinkedIn
Learn more at [DN-SOLUTIONS.COM](https://www.dn-solutions.com)



절삭력측정을위한공구동력계

Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement



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

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



글로벌 최고 수준의 정밀함과 생산성으로
소형 정밀/복합 가공에 최적의 솔루션을 찾다.

현대위아 초정밀 소형 5축 머시닝 센터

- > XF2000 (임펠러 가공 전용)
- > XF2000i (소형 정밀 부품 가공용)

XF2000/XF2000i



MM어워드 밀링부분
최우수상 (국내 최초)



FAST & DYNAMICS & ACCURACY

FAST

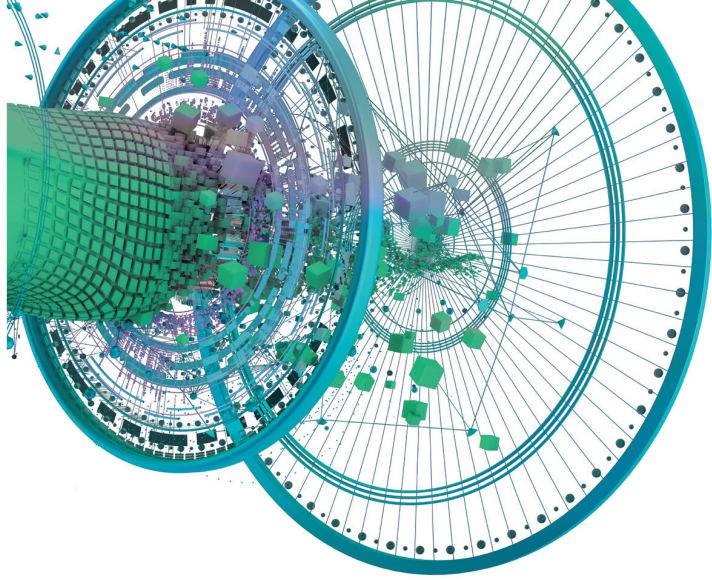
글로벌 최고 수준, 이송축 가감속 2G

DYNAMICS

고속, 고성능 빌트인 주축 적용

ACCURACY

리니어 스케일 & 로터리 엔코더 표준 적용



Reinvent the wheel. And how you make it.



HP Jet Fusion 3D 프린팅 솔루션

HP Jet Fusion 5200 시리즈 3D 프린팅 솔루션



제조 예측 가능성



획기적인 경제성



새로운 응용 분야
및 시장으로 확장

HP Jet Fusion 4200 시리즈 3D 프린팅 솔루션



제조비용 최적화



높은 생산성



고품질 기능성 부품

HP Jet Fusion 500 시리즈 3D 프린팅 솔루션



설계 속도 향상 -
단시간에 제작
및 테스트
반복 수행 가능



복셀 제어를 사용
한 풀 스펙트럼 컬러
부품



정밀한 기능성 부품
을 정확하게 제작

이제 이와 동일한 기술로 시제품을 제작하고 생산할 수 있습니다.
비즈니스의 경쟁력을 높이는 방법을 확인하세요: hp.com/go/3DPrint



스탠다드 헥사포드 3~4개월! ^{납기}



H-811

변 위: $\pm 17 \text{ mm} / \pm 21^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.06 \mu\text{m}$
 속 도: 10 mm/s
 가 반 하 중: 5 kg



H-840

변 위: $\pm 50 \text{ mm} / \pm 30^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.1 \mu\text{m}$
 속 도: 60 mm/s
 가 반 하 중: 40 kg



H-850

변 위: $\pm 50 \text{ mm} / \pm 30^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.2 \mu\text{m}$
 속 도: 8 mm/s
 가 반 하 중: 250 kg

적용분야

마이크로제조, 의료, 항공 우주, 실리콘 포토닉스, 이미지 안정화, 샘플 포지셔닝, 생명과학 등

