기술과 교육

TECHNOLOGY AND EDUCATION

제12권 제1호, 2024년 3월 | VOL.12, NO.1, March 2024

대한기계학회 논문집 TRANSACTIONS OF THE KSME C

C

TECHNOLOGY AND EDUCATION

대한기계학회 KSME www.ksme.or.kr

기술과 교육

(대한기계학회논문집)

C

제12권 제1호, 통권 제26호 ISSN 2288-3991(Online) 2024년 3월

차 례

〈 응용기술논문 〉

농업용 방제 드론의 살포 영역에 기반한 방제 영역 맵핑 시스템 제안
…… 이수민 · 최세윤 · 조규형 · 주다훈 · 임덕신 · 김지호…1

소형 프로펠러 성능측정장치 개발
…… 최인서 · 신윤수 · 김지수 · 한철희…11

플립 러닝과 블렌디드 러닝을 적용한 기계요소설계 교육 사례 연구
…… 정 태 은…21

캠 설계를 위한 소프트웨어 활용 교육 사례 연구
…… 정 태 은…31

PPBL 모델을 적용한 협업과 창의성 강화를 위한 교육 방법론 적용 사례
…… 윤 재 현 · 박 찬 수…39

TDI 저감 연질 폴리우레탄 폼의 배합비에 따른 기계적 특성 분석
…… 전유영 · 전의식 · 김영신 · 이호준…47

TECHNOLOGY AND EDUCATION

Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers

C

Vol. 12, No. 1 ISSN 2288-3991(Online) March, 2024

C O N T E N T S

< Application Technical Papers >

Drone Mapping System and Functions for Agricultural Spraying Drones Based on Spray Area
····· Soomin Lee, Se Yoon Choi, Kyu Hyung Cho, Dahoon Joo, Dokshin Lim and Jiho Kim ··· 1

Development of a Small Propeller Performance Measuring Device
····· Inseo Choi, Yoonsoo Shin, Jisu Kim and Cheolhuei Han··· 11

Case Study of Mechanical Element Design Education Using Flipped Learning and Blended Learning
····· Tae Eun Chung··· 21

Case Study of Software Utilization Education for Cam Design
····· Tae Eun Chung··· 31

Application of PPBL Model for Enhancing Collaboration and Creativity: A Case Study of Educational Methodology
····· Jaehyun Yoon and Chan-Soo Park··· 39

Analysis of Mechanical Properties of TDI Reduced Flexible Polyurethane Foam According to a Function of Formulation Ratio
····· Yu-Yeong Jeon, Euy-Sik Jeon, Young-Shin and Ho-Jun Lee··· 47

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2024.12.1.001 ISSN 2288-3991(Online)

농업용 방제 드론의 살포 영역에 기반한 방제 영역 맵핑 시스템 제안

이수민* · 최세윤* · 조규형* · 주다훈* · 임덕신*† · 김지호*†
* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Drone Mapping System and Functions for Agricultural Spraying Drones Based on Spray Area

Soomin Lee*, Se Yoon Choi*, Kyu Hyung Cho*, Dahoon Joo*, Dokshin Lim*† and Jiho Kim*†
* Dept. of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

(Received December 30, 2022 ; Revised July 10, 2023 ; Accepted July 21, 2023)

Key Words: Agricultural Drone(농업용 드론), CFD(전산유체역학), Nozzle Spray(노즐 스프레이), Drone Simulation(드론 시뮬레이션)

초록: 드론을 이용한 방제 작업 시 비산을 고려한 방제 안전수칙의 준수 여부 및 방제 결과를 확인하는 데 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 방제 영역의 균일도와 최대 비산 거리를 분석하고 방제 맵을 생성함을 통하여 방제 작업의 안전수칙 준수 여부 및 균일도를 검증하는 방제 시스템을 제안한다. 전산유체 해석을 통해 기류에 따른 방제 영역을 산출하는 과정을 서술하였고, 방제 영역 데이터를 토대로 방제 품질을 향상할 수 있는 기능을 제안한다. 또한, 산림청에서 제공하는 방제사업 메뉴얼의 안전수칙을 준수하는 방제 경로를 설정하도록 MATLAB 시뮬레이션을 구현하여, 최종적으로 방제 작업을 가시화한 방제 맵을 제시한다. 본 연구는 향후 자율 방제 및 스마트 농업 분야에서 비산 저감 및 방제 품질 향상을 위하여 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

Abstract: There is difficulty in confirming whether safety rules considering scatter of spraying drones are met during operation, and the results of operation. Scattering is a key problem to be solved to improve the quality of the work, for which the uniformity and maximum deposition distance are analyzed to propose a drone system that can verify such problems. This study starts from the background research of the safety issues and work process of agricultural drones and conducts spray area analysis to propose an autonomous drone system. The process of simulating and verifying the spray area according to the airflow through computational fluid analysis is described in this work. The autonomous flight path is set according to the safety rules, and a precise flight path adjustment algorithm is implemented through MATLAB simulation, which creates a spray area map as a result. The proposed drone system will be able to be applied not only to agricultural drones, but to other diverse uses of spraying drones.

1. 서 론

1.1 연구 배경

드론(drone)은 무인항공기(unmanned aerial vehicle)를 통칭하는 용어로 사용되며, 여가, 농업, 에너지, 사회 지원, 정보, 안전 및 보안 등 다양한 분야에서 높은 효용성을 가지고 있다. 국내 드론 시장의 규모는 2020년 6월을 기준으로 4,595억 원이며, 26년까지 연평균 29%의 급성장이 예상된다. 특히, 농업·임업은 국내 민수용 드론 시장에서 56%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 파종, 병해충 감시, 방제 등 다양한 분야에 활발하게 적용되고 있다.(1) 농업용 드론은 국내에서 고령화 및 농가 인구의 부족 문제에 대응하여 생산량 증가를 위한 대안으로 국내의 스마트 농업 시장에서 빠른 성장세를 보이고 있다. 하지만 드론을 이용한 방제 작업으로 인한 농약의 비산 피해 사례와 분쟁이 증가하고 있으며, 이로 인해 작년

† Corresponding Author, doslim@hongik.ac.kr; jihokim@hongik.ac.kr
ⓒ 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

농식품부에는 농약 피해 분쟁 조정 위원회가 설치되었다. 본 연구에서는 농업용 드론의 비산 문제에 대응하여 비산 안전수칙을 준수하고 방제 결과의 안전수칙 준수 여부 및 균일도를 검증할 수 있는 방제 시스템을 제안하고자 한다. 먼저, 안전 수칙과 작업 과정에 대한 조사를 바탕으로 비산의 주요 원인을 파악하고 기류에 따른 방제 영역을 산출하였으며, 방제 영역의 균일도와 안전성을 분석하며 이를 반영한 방제 작업 시뮬레이션을 통하여 가시화된 방제 영역 맵핑 시스템을 제안한다. 1.2절에서는 드론 작업 과정 및 안전 수칙에 대하여 서술하며 비산의 원인을 분석하였고, 2.1절에서 방제 영역 데이터 산출 방식, 2.2절에서 방제 영역 데이터의 균일도와 최대 비산 거리 분석하였다. 마지막으로, 2.3절에서는 방제 영역 데이터에 따른 경로 조정을 통한 균일도 향상 기능과 이를 구현한 시뮬레이션 결과를 서술하였다.

1.2 방제 드론의 비산 문제 조사

1.2.1 방제 드론 작업 현장 조사

농업용 드론을 이용한 방제 현장에서 농약의 비산을 최소화할 수 있는 기회 요소를 발굴하고자 드론 방제사 인터뷰를 실시하였고, 국내 드론 방제 작업 현장 특성 등을 파악하였다. 방제 작업 준비 단계에서 작물의 종류와 방제 대상 농지 면적에 따라 방제 작업 지도를 작성하며, 방제 준비 단계에서 약품량과 기체를 준비한다. 작물의 특성과 시기에 따라 요구되는 안전 기준이 달라지기 때문에 농약사와 계약하고 주로 농협 주관 공동 관제 방식을 통해 방제 작업이 이루어진다. 방제 작업을 위해 현장을 직접 점검하며 기후상황 및 주변 상태를 육안으로 확인한 후 기체와 약품을 준비한다. 이때, 작업 도중에는 방제 안전 수칙을 준수하여 바람과 주변 상황을 관찰하며 작업을 진행하고 작업 후에 농민에게 작업 진행도를 보고한다. 작업 보고 단계에서 방제 안전수칙의 준수 여부와 방제 결과를 육안으로 확인하기 어려우며, 비산을 고려한 방제 작업의 효율성은 조종자의 숙련도에 의존함을 알 수 있었다.

1.2.2 방제 드론 안전사용 매뉴얼

국내의 드론 방제작업에 대하여 농림축산식품부, 농촌진흥청, 산림청에서 발간한 무인항공살포기 안전 사용 매뉴얼[(2)]을 참고하여 조사하였다. 해당 매뉴얼은 농약의 비산원인과 대책을 기술하며 항공 방제 작업의 준비단계와 실시단계, 실시 후 단계에서 방제사의 주의사항과 안전 점검 체크리스트를 제공한다. 방제사는 실시 단계의 주의사항에서 항공 살포 비행의 기본 조건과 주의가 요구되는 지역에서의 비행 조건을 참고하여 방제 드론의 항로를 결정할 수 있다. 매뉴얼상 비산을 최소화하기 위한 실시단계의 기준 조건을 Table 1에 제시하며, 이후 바람에 대한 주의사항을 요약하였다.

Table 1 Standard operation condition for unmanned aerial spraying vehicles

Vehicle type	Wind speed during spray	Flight altitude	Flight speed
Unmanned helicopter	Under 3 m/s	3 ~ 4 m	10 ~ 20 km/hr
Unmanned multicopter	Under 3 m/s	2 ~ 3 m	Under 15 km/hr

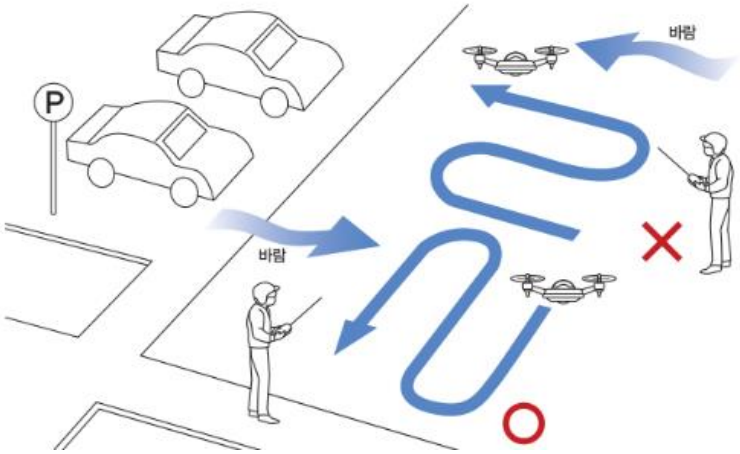


Fig. 1 Directions of spraying drones

본 논문에서는 비산 안전 수칙 준수 및 방제 결과 검증의 연구 목표에 따라 풍속이 1 ~ 3 m/s의 범위 안에서 변하며 풍향이 안정된 상황을 가정하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 방제 시스템은 해당 매뉴얼의 속도 기준표, 제종별 매분당 분출량 기준표에 따라 드론의 비행 조건과 약품 살포 조건을 설정하였다. Fig. 1은 매뉴얼에서 제공된 인근 시설을 고려한 작업 모습을 나타내고 있으며, 주의 구역에서의 비행 조건은 다음과 같이 제시된다.

1) 기류가 안정된 시간대에 살포비행을 실시하는 것으로 하고, 지상 1.5 m의 위치에서 풍속이 3 m/s를 초과할 경우 살포비행을 중지할 것
2) 풍향은 풍속 이상으로 문제 발생에 크게 관여하여 바람의 방향에 비산을 원치 않는 대상물이 있는 경우에는 주의가 필요
3) 주변의 시설물, 풍향 등 방제 작업 고려사항을 파악하여 방제 시작 위치를 선정한다.
4) 30 m 이내에 주변 재배지나 시설물 등으로 완충구역이 존재할 시 비산주의지역에 평행으로 방제 경로를 생성한다.
5) 바람에 수직하게 방제 경로를 생성한다.

2. 방제 영역 분석 및 시뮬레이션

2.1 CFD를 통한 방제 영역 산출

2.1.1 CFD 모델

방제 드론의 살포 영역 분포는 프로펠러 속도, 피치 각도, 드론 고도, 바람 속도, 주변 온도, 습도, 노즐 유량, 액적 지름, 노즐 위치 등 9가지 변수에 의해 영향을 받는다.[3] 그 중 바람의 속도와 액적의 지름이 가장 큰 영향을 주며, 해당 변수에 대한 유동장을 분석하고자 CFD 시뮬레이션을 진행하였다.[4] 다음 수식의 3차원 비압축성 Navier-Stokes 지배 방정식과 k-w turbulent model 난류 모델을 사용한다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} + \rho \bar{F} \tag{2}$$

노즐의 종류와 펌프의 힘에 따라 액적의 크기가 달라지고 이는 비산에 큰 영향을 미친다. 액적의 크기가 작을수록 비산이 일어나기 쉬우며, 바람과 평행한 방향을 따라 최대 30 m에서 50 m까지 비산이 발생하기도 한다.[5] 비산을 줄이기 위하여 개발된 AI 노즐은 상공에서는 상대적으로 큰 액적의 크기를 갖는 입자를 분사하며 바닥면과 인접하여 액적의 크기가 분산된다. 가장 보편적으로 사용하는 노즐의 종류는 110° 각도이지만, AI 노즐은 80° 각도로 이루어져 있어 AI 노즐이 분사되는 각에 맞게 모델을 설정하였다.[6] 노즐의 분사각 80°를 맞추기 위해 분무 반각(spray half angle)을 40°, 분무 확산각(atomizer dispersion angle)을 6°로 사용했다.

2.1.2 유동장 모델링

방제 매뉴얼을 준수하여 방제를 실시할 때, 전산유체해석을 통한 방제 영역 데이터를 얻기 위해 Ansys Fluent를 이용하였다. 매뉴얼에 따라 드론 속도 조절이 필요한 경우 약액 분사 중단 후에 속도를 조정하며, Table 1에 제시된 무인 멀티콥터의 기준 비행속도(15 km/hr 이하)에서 속도를 늦추어 비산을 줄일 수 있으므로 드론의 속도는 3 m/s로 일정하다고 가정하였다. 본 연구에서는 DJI사의 Hexacopter-Da-BAT10L 모델을 드론 모델링에 참고하였다. 유동장을 간소화하여 액적에 가장 큰 영향을 주는 노즐 위쪽에 위치한 두 개의 원판 형상의 로터를 모델링 하였다.[5] Fig. 2에 나타난 두 로터 사이의 거리는 1,320 mm이고 로터의 지름은 760 mm이다. 로터의 풍속은 드론의 스펙과 드론의 무게를 통해 11.6 m/s로 설정하였으며, 화살표는 로터에서 바람이 나오는 방향을 나타낸다. 노즐은 로터와 동심의 위치에 450 mm 아래에 각각 위치한다.

드론이 3 m/s로 -z방향으로 진행하고 측풍이 부는 상황에서 드론의 중심에서 -z방향으로 5 m의 여유를

두고 적절한 유동장의 위치와 크기를 선정하였고, 최종적으로 20 m x 20 m의 유동장을 설정하였다. 요소의 크기는 드론 로터 0.2 m, 위 아래면 0.2 m, 측면 0.3 m로 하여 유동장 격자를 구성하였다. 그 결과 Fig. 3의 95,417개의 절점(node), 498,546개의 요소로 이루어진 격자를 구성하였다. 노즐 분사 모델링을 위하여 80 deg의 플랫팬노즐을 바탕으로 인젝션 모델을 설정하였다. 플랫팬노즐은 방제 드론에서 주로 사용되며, 노즐 각도는 80°로 농업용 방제 드론에서 주변으로의 비산을 줄이기 위한 저비산 노즐에서 흔히 사용된다. 액적 크기 스펙 시트에 따르면 농업용 방제 드론의 플랫팬노즐의 경우 대부분의 노즐에서 분무되는 액적의 직경 중간값은 약 300 ~ 400 μm이다.[6] 따라서 분무 확산각의 값을 2, 4, 5, 6 각도의 4가지의 경우를 시뮬레이션 해보았다. 그 결과 300 ~ 400 μm의 분포를 보인 5° 각도를 분무 확산각으로 사용하였다. 모델 치수와 관련 설정 값을 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Model specifications

	Value	Unit
Flow field	20 x 20 x 4	m
Rotor diameter	760	mm
Rotor speed	11.6	m/s
Nozzle-rotor distance	450	mm
Nozzle distance	1,320	mm
Droplet diameter	300 - 400	μm

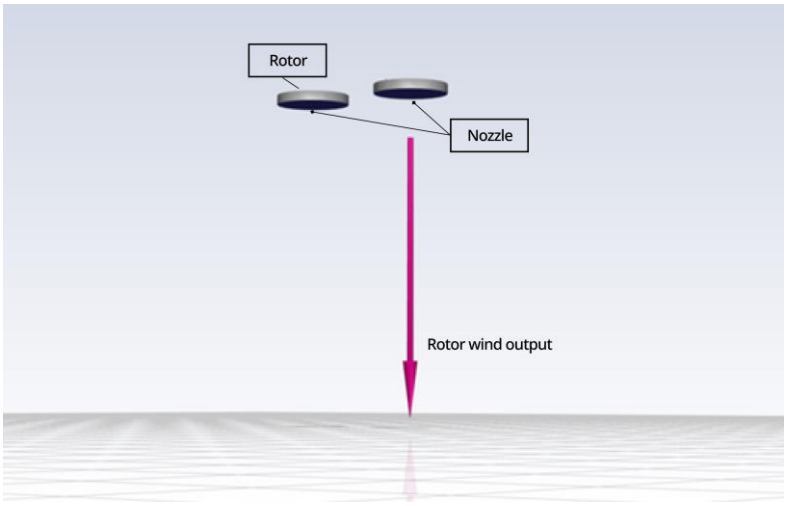


Fig. 2 Drone nozzle output

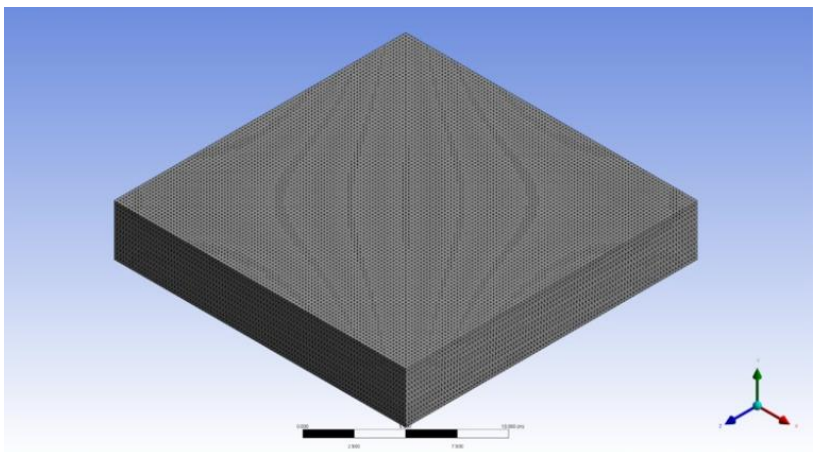


Fig. 3 Mesh of flow field

Table 3 Boundary condition

	Value	Unit
Nozzle inlet	Bulk mass flow rate : 0.00933	kg/s
Rotor inlet	Normal speed : 11.626	m/s
Outlet boundary	Average static pressure : 0	m/s
Upper boundary	Opening condition : 0	Pa
Side boundary		Pa
Bottom boundary	Escape	

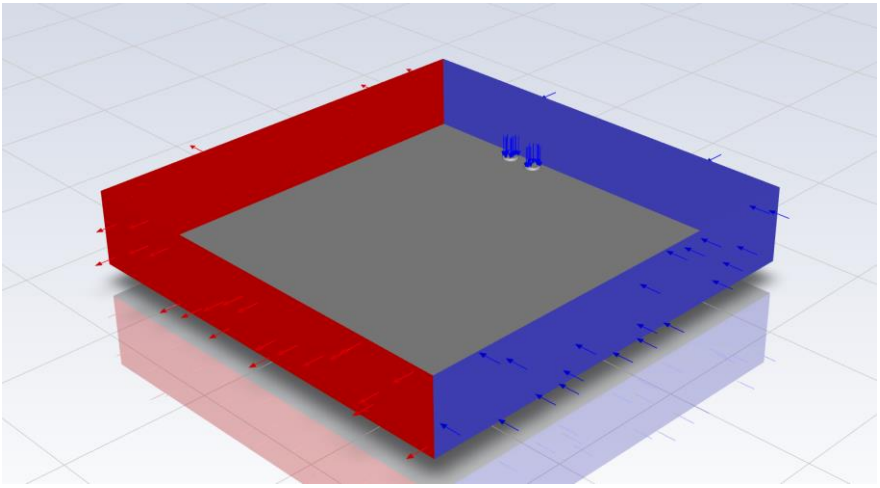


Fig. 4 Boundary conditions of flow field

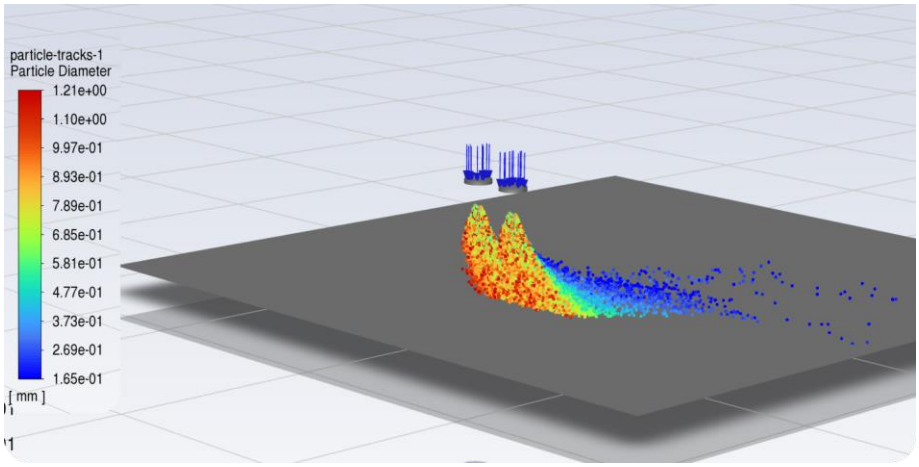


Fig. 5 Final result of steady state

전면과 측면을 velocity inlet으로 설정하여 풍향 및 풍속을 조절하였으며, 나머지 면은 대기압의 압력 출구로 구성하였다.[7] 또한, 로터의 아랫면을 속도 입구로 설정하여 로터의 바람을 구현하였으며, discrete phase 경계조건은 모두 escape로 설정하여 액적의 분포에 영향을 주지 않도록 하였다. 액적이 작물에 닿는 경우 그대로 흡수되거나 작물을 통과하기 때문에, 바닥면을 대기압 압력 출구로 설정하였고 DPM 경계조건 유형은 escape로 설정하여 액적의 분포를 확인하였다. 유동장의 모습은 Fig. 4와 같으며, 로터와 노즐의 경계조건을 Table 3에 정리하였다.

Method의 요소는 단순한 계산식에서 고도화된 계산식으로 점진적으로 정밀화 시켰다. 최종적으로 압력-속도 커플링은 coupled로, 공간 이산화는 3rd order로 정밀하게 계산하였다. 시간 간격의 크기는 0.1 ~ 0.01 범위에서 측면 3 m/s의 경우에 입자의 분포가 균일한 값으로 0.02 s로 설정하였다. 시간의 transient

계산을 통해 250시간 스텝 후에 정상상태에 이름을 확인하였고, 총 5 s 후의 값을 결과를 산출하였고, 이는 Fig. 5와 같이 나타났다.

2.2 방제 영역 데이터 산출

방제 작업이 대기압, 상온에서 이루어지므로 약 액의 질량과 부피는 비례한다고 가정할 수 있다. 본 연구에서는 바닥면에서의 부피분율(volume fraction)을 분석하였으며, 이는 바닥면에서 액적의 부피를 전체 유동장의 부피로 나눈 것으로 0에서 1사이의 값을 갖는다. 또한, 액적의 크기를 분석하여 방제 영역의 균일도 및 최대 비산 거리를 구하였다. 진행 방향에 수직한 축에 대하여 0.5 m 간격의 구간을 나누었고, 각 구간에서 합한 부피분율 값을 전체 부피분율 값의 합으로 나누어 각 구간의 방제율을 계산하였다. Fig. 6과 같이 바람이 풍속 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s로 불고 5개 풍향을 갖는 경우에 방제 영역을 분석하였다. 부피분율 데이터의 등고선 형태를 표시하며, 오른쪽에 방제율 데이터를 나타내었다. 또한, 진행방향에 대한 바람의 상대 풍향을 산출하여, 각각 전면 0°(F), 45°(FS), 측면 90°(S), 135°(RS), 후면 180°(R)로 나타내었다. 각 케이스에 대한 최고 방제율 지점을 Table 4에 정리하였으며, 이를 통해 최고 방제율 지점의 치우침 정도는 측풍이 불 때 가장 심하지만 최고 방제율 값은 동일 풍속의 45°, 135° 풍향의 경우에 비해 낮아지는 모습을 보인다. 또한, 최대 액적 분포를 나타낸 Fig. 7에서 측풍이 부는 경우 직경 150 μm 이상의 액적이 가장 넓은 영역에서 균일하게 분포함을 파악할 수 있어 1.2.2절에 제시된 '바람에 수직하게 방제 경로를 생성'하는 경우 방제 영역 균일도와 최대 비산 거리를 검증하였다.

Table 4 Maximum deposition rate

	1 m/s		2 m/s		3 m/s	
Wind direction	Position	Deposition rate	Position	Deposition rate	Position	Deposition rate
F	10	0.231	10	0.160	10	0.157
FS	8	0.204	9	0.178	8	0.175
S	9	0.184	9	0.160	8	0.174
RS	9	0.247	12	0.209	9	0.303
R	10	0.357	10	0.315	10	0.328

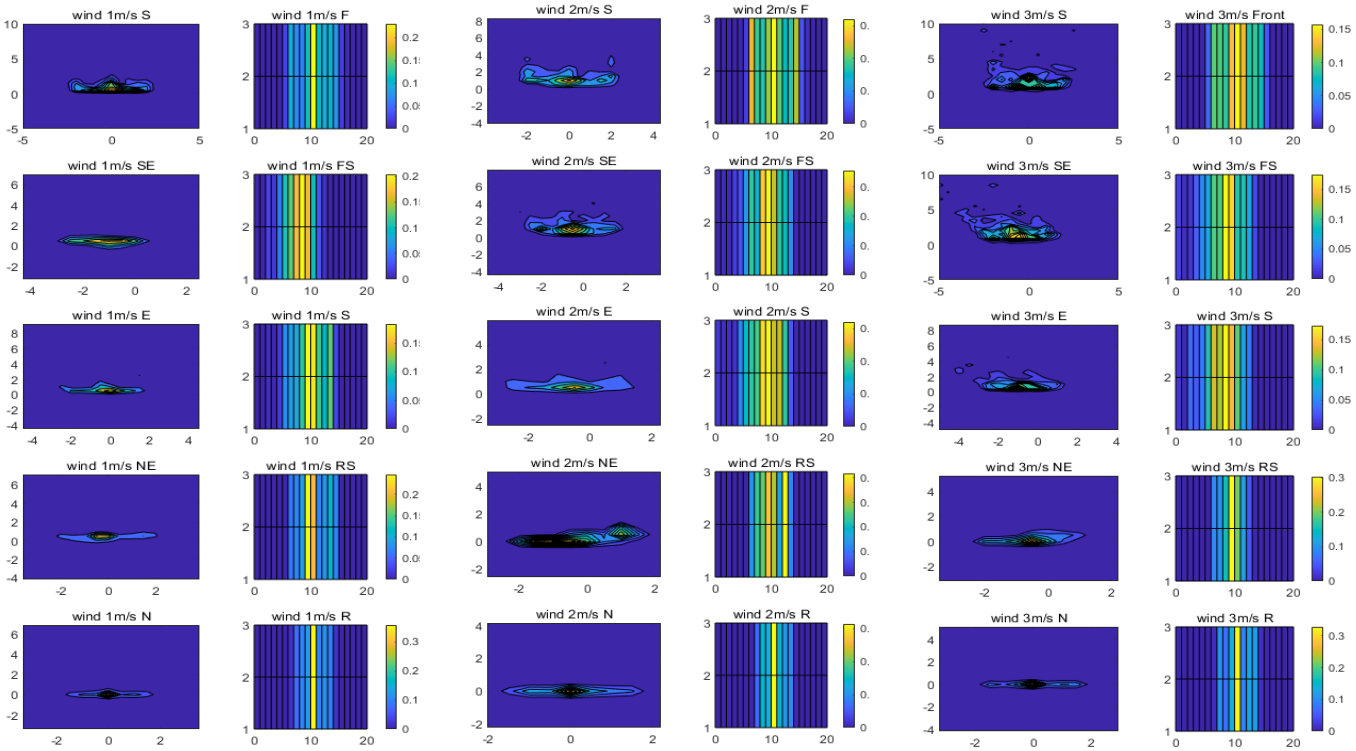


Fig. 6 Spray area result analysis

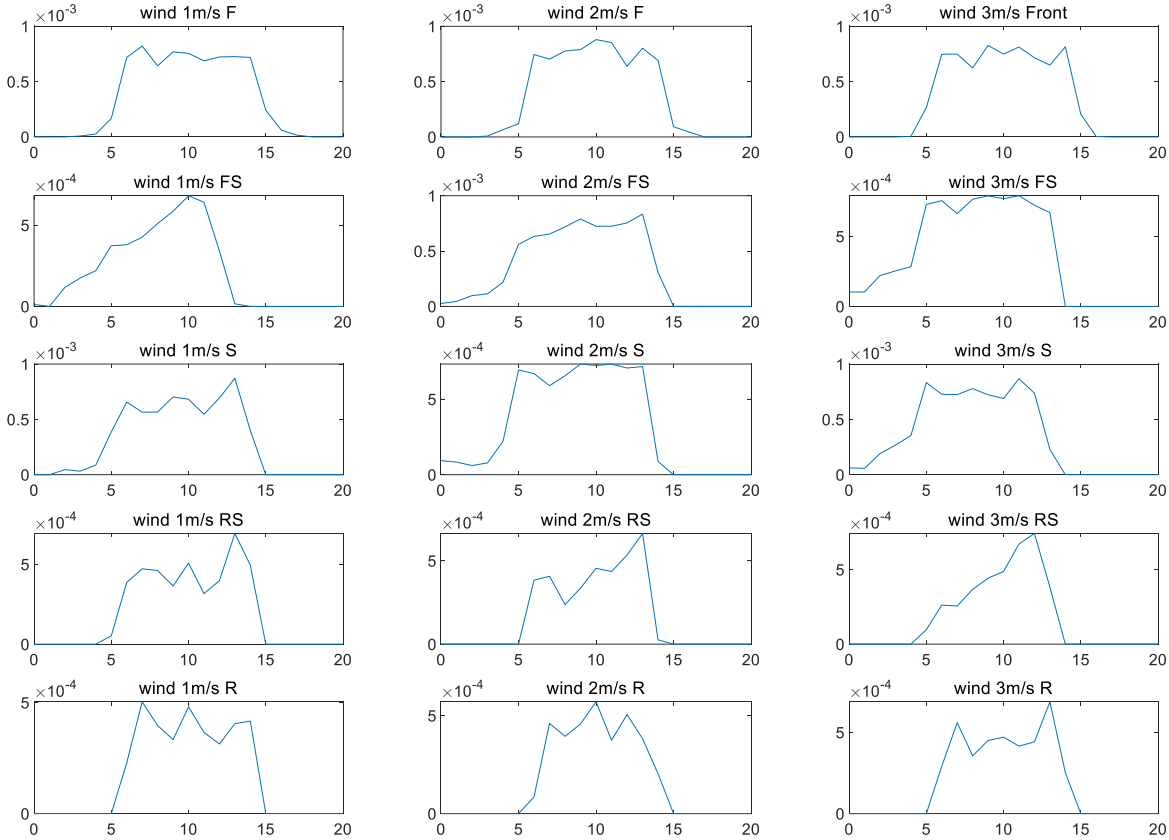


Fig. 7 Distribution of maximum value of droplet diameter

Fig. 8 Wind sensors used for simulation

2.3 방제 경로 정밀 조정 기능 및 시뮬레이션

방제 경로 설정 규칙 및 방제 영역 데이터를 기반한 정밀 조정 기능을 제안하며 이를 MATLAB 시뮬레이션으로 구현하였다. 먼저, 선행된 연구의 실험결과를 바탕으로 액적의 크기를 조정하여 30 m 이내의 범위로 비산되는 상황을 가정하였고, 매뉴얼에서 제안된 안전 수칙에 따라 인접한 비산 주의 구역에 대하여 비산 완충구역을 설정하였으며, 수평하게 초기 방제 경로를 생성하였다. 방제 영역과 기상 정보를 입력 받아 비산 완충구역을 제외하고 바람에 수직한 방향으로 경로가 생성된다. 1.2절의 사전 조사 내용을 참고하여 Fig. 8의 풍속 센서, 풍향 센서를 시뮬레이션과 연동하였다. 드론 조종 장치와 연동한 스마트 센서를 가정하여 주행 시 실시간 풍향 및 풍속 정보에 따른 방제 영역이 산출되도록 하였다. 시뮬레이션은 실내 환경에서 임의로 바람을 생성하여 데이터가 생성되도록 하였으며 5초 간격으로 기상 정보가 업데이트 된다.

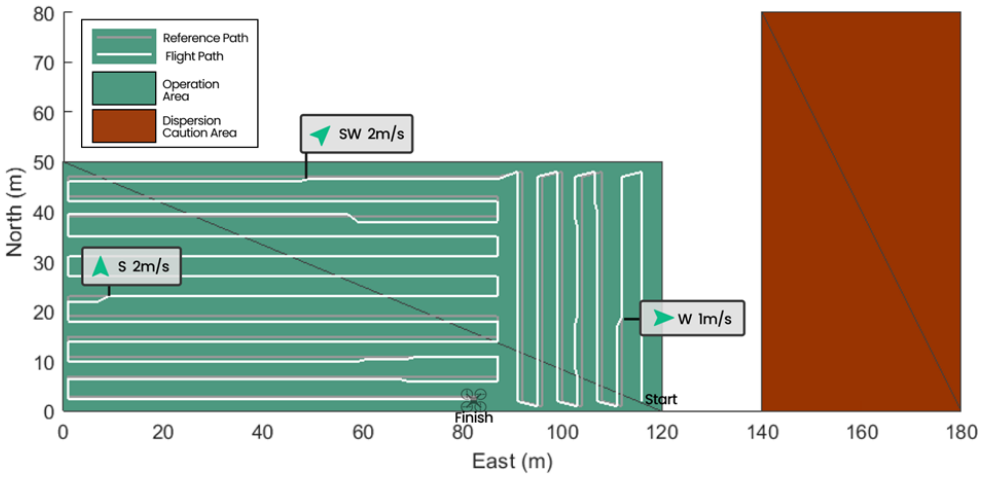


Fig. 9 Flight path adjusted according to wind compared to initial path

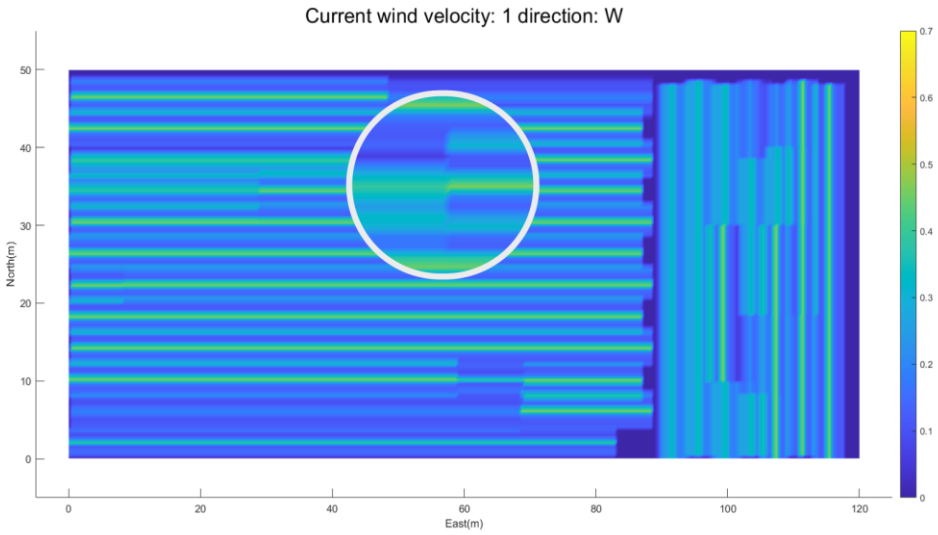


Fig. 10 Spray area map result

본 논문에서는 최고 방제율 지점에 따른 정밀 방제 경로 조정 기능을 구현하였으며, 이는 매뉴얼의 규칙에 따라 생성된 설정 경로 상에 최고 방제율 지점이 위치하도록 한다. Fig. 9에 설정 경로를 회색 선으로 표시하였고, 방제 영역 데이터에 따라 실시간 조정된 실제 경로를 흰색 선의 주행 경로로 나타내었다. 남서풍이 풍속 2 m/s로 부는 경우 상대적인 풍향은 주행 방향에 따라 45°(FS) 혹은 135°(RS)이며, 남풍이 2 m/s로 부는 경우는 측면 90°(S)로, Table 4에 따라 최고 방제율 지점이 편향된 거리만큼 실제 주행 경로가 조정되었다. 시뮬레이션 결과로 Fig. 10의 방제 영역 맵이 생성되며, 최고 방제율 지점이 설정 경로의 일직선 상에 위치함을 나타내었다. 해당 기능을 통하여 방제 작업 시 균일도를 향상시킬 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 바람의 영향에 따른 방제 영역을 분석하였으며, 최고 방제율 갖는 지점을 산출하여 방제 품질 향상을 위하여 방제 위치를 조정하는 기능을 제안하였으며, 이를 시뮬레이션으로 구현하여 비산 안전 수칙의 준수 및 방제 결과를 확인할 수 있도록 하는 방제 영역 맵을 제시하였다. 본 연구는 '무

인항공살포기 안전사용 매뉴얼’에 제시된 안전수칙을 따르며, 농약에 대한 규제와 안전 문제로 민감한 방제 작업 시 문제점에 대응하는 방제 시스템을 제시하였다는 것에 의의가 있다. 한편, 방제 영역에 영향을 주는 추가적인 요인(온도, 습도 등)을 해석 모델과 시뮬레이션 환경에 적용하여 방제 영역 생성 및 맵핑 기능을 고도화 할 수 있다. 방제 영역을 분석하고 비산을 파악하기 위하여 다양한 연구와 시도가 이루어지고 있으며, 머신러닝을 접목한 CFD 분석 과정 및 데이터 처리에 대한 연구도 진행되고 있다. 본 연구 결과는 자율 방제 드론 시스템의 개발과 농업용 드론을 포함한 다양한 분야의 살포 작업에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2022 년 홍익대학교 대학혁신지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

또한, 기술적인 도움을 주신 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 김도균 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌
(References)

(1) Korea Institute of Aviation Safety Technology, 2021, *2021 Domestic and Foreign Drone Industry Trends Analysis Report*, KIAST, Incheon, Republic of Korea, pp. 1~228.

(2) National Institute of Agricultural Sciences, 2020, *Manual of Unmanned Aerial Vehicle for Spraying Pesticide*, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonbuk, Republic of Korea, pp. 1~179.

(3) Ni, M., Wang, H., Liu, X., Liao, Y., Fu, L., Wu, Q., Mu, J., Chen,,X. and Li, J., 2021, “Design of Variable Spray System for Plant Protection UAV Based on CFD Simulation and Regression Analysis,” *Sensors*, Vol. 21, No. 2, Article 638.

(4) Wang, L., Chen, D., Zhang, M., Wang, Y., Yao, Z. and Wang, S., 2018, “CFD Simulation of Low-attitude Droplets Deposition Characteristics for UAV based on Multi-feature Fusion,” *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 17, pp. 648~653.

(5) Wang, G., Han, Y., Li, X., Andaloro, J., Chen, P., Hoffmanna, W. C., Han, X., Chen, S. and Lan, Y., 2020, “Field Evaluation of Spray Drift and Environmental Impact Using an Agricultural Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Sprayer,” *Science of The Total Environment*, Vol. 737, No. 1, Article 139793.

(6) Dafsari, R. A., Khaleghi, M., Yu, S. H., Choi, Y. and Lee, J. K., 2021, “Design and Performance Evaluation of Air Induction (AI) Nozzles to Reduce Drift Potential for Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs),” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 46, No. 4, pp. 462~473.

(7) Kang, K. J., Chang, S. M., Ra, I. H., Kim, S. W. and Kim, H. T., 2019, “Nozzle Flow Characteristics and Simulation of Pesticide Spraying Drone.” *Smart Media Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 38~45.

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2024.12.1.011 ISSN 2288-3991(Online)

소형 프로펠러 성능측정장치 개발

최인서* · 신윤수* · 김지수* · 한철희*†
* 한국교통대학교 항공·기계설계학과

Development of a Small Propeller Performance Measuring Device

Inseo Choi*, Yoonsoo Shin*, Jisu Kim* and Cheolhuei Han*†
* Department of Aeronautical Mechanical Design and Engineering, Korea National University

(Received May 26, 2023 ; Revised October 5, 2023 ; Accepted October 10, 2023)

Key Words: Propeller Performance Measuring Device(프로펠러 성능측정장치), Static Thrust(정지 추력), Drone(드론), Low Reynolds Number Flow(저 레이놀즈 수 유동)

초록: 본 연구에서는 센서들과 모터를 조합하여 소형 프로펠러 성능 측정 장치를 개발하였다. 정지 추력을 측정하기 위해 1축 로드셀과 증폭기를 사용하였으며, 인가 전압 변화에 따른 프로펠러의 회전수 변화는 타코미터를 사용해 측정하였다. 성능 측정 장치에 장착한 상용 프로펠러의 정지 추력을 선행 연구 결과자료와 비교하여 프로펠러의 지름에 따라 오차가 증가하는 것을 발견하였다. 이는 로드셀이나 진동의 영향이 아니라 타코메터가 오차의 원인임을 파악하였다. 향후 풍동 실험을 통해 전진비 변화에 따른 프로펠러의 성능을 측정할 계획이다.

Abstract: In the present study, a small propeller performance measurement device is developed using commercial sensors and motors. One-axis loadcell and indicator were used to measure the static thrust of commercial propellers, and propeller's rpm change due to voltage variation was measured using a tachometer. The static thrust of commercial propellers was compared with the previous published data. It was found that the error increases as the propeller's radius stepping up. We also found that the error was due to the error in the tachometer instead of the load cell or any vibration of the blades. In the future, the performance of propellers due to the change in the advanced ratio will be measured using the wind tunnel test facility.

1. 서 론

최근 전기 추진 방식의 수직 이착륙이 가능한 드론을 활용한 다양한 산업이 발전하고 있다.(1) 드론의 성능은 사용되는 프로펠러의 형상과 개수, 장착되는 배터리, 프로펠러, FC, ESC 그리고 모터에 의해 결정된다. 중요 장착부품 중 하나인 프로펠러는 추력을 발생시켜 기체가 공중에 체공 또는 비행을 할 수 있게 한다. 프로펠러의 성능지수(FM: figure of merit)의 계산은 다수의 프로펠러로 구성된 드론의 성능을 결정하는 중요한 과정이며, 체공 및 비행하는 기체의 운용시간을 결정할 수 있다.(2,3) 성능지수를 계산하는 과정에서 요구되는 추력계수와 동력계수를 파악하기 위해 프로펠러의 추력 및 토크를 측정하기 위해 장치를 개발할 필요가 있다.

Cho 등(4)은 고고도 자기체공 임무를 수행하는 항공기에 장착되는 직경 1,200 mm와 1,400 mm의 프로펠러의 성능을 측정하는 시험장치를 제작하였다. 풍속조건 4 m/s에서 9 m/s로 낮은 풍속에서 프로펠러의 성능을 시험하여 풍속이 프로펠러 성능시험결과에 미치는 영향을 고려하였다. 반복성시험 분석 및 불확도 분석을 통해 풍속과 상대습도 등 성능에 영향을 미치는 인자들을 고찰하였다.

Kim 등(5)은 드론의 프로펠러와 동체 간 간섭을 고려하여 드론 공력성능 측정을 위한 실험 장치를 구축하였다. 프로펠러 자체의 성능을 측정하는 것이 아닌 드론을 실험 장치에 결합하여 운용형태에 따른 드론

† Corresponding Author, chhan@ut.at.kr
Ⓒ 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

공력성능을 측정하였다. Song 등[6]은 제자리 비행을 하는 동축반전 프로펠러의 성능을 측정하기위해 시험장치를 구축하였다. 동축반전 프로펠러에서 upper와 lower 프로펠러 간의 거리(H/D ratio)에 따른 프로펠러 성능지수를 계산하였다. Upper 프로펠러는 H/D ratio가 증가할수록 성능지수가 증가하는 추세를 보였고 lower 프로펠러 성능지수는 upper 프로펠러의 후류로 인해 거리 비례하여 감소하는 추세를 볼 수 있었다. Hwang 등[7]은 ㈜성우의 농약살포용 무인기를 개조하여 8개의 프로펠러를 방사형으로 설치하여 프로펠러 간의 간섭을 고려한 멀티콥터 풍동 시험을 수행하였으며, 단일 프로펠러 대비 최대 15% 정도의 성능 저하를 확인하였다. Song 등[8]은 선행 실험 연구를 기반으로 동축반전 프로펠러의 upper 프로펠러 직경과 lower 프로펠러 지름 크기를 다르게 변화주어 전체적인 성능을 측정하였다. 기존 동축반전 프로펠러 지름을 상부 프로펠러의 직경이 하부 프로펠러의 직경보다 작게 설치하였을 때, 지름 변화가 없는 기존의 성능보다 전체적인 프로펠러 성능이 증가하는 것을 확인하였다.

Brandt[9]는 2000년대 초소형 프로펠러의 성능측정 및 자료공유의 필요성을 파악하여 79가지의 다양한 상업용 프로펠러의 성능을 저속 풍동 실험을 통해 측정을 하였다. 이들이 제공한 프로펠러 성능 자료는 프로펠러의 정지추력 뿐만 아니라 전진비에 따른 추력계수, 동력계수, 그리고 효율을 포함시킨 자료로 소형 프로펠러 연구개발에 크게 기여하였다.

Cho 등[10]은 폐쇄형 시험부에서 tilting하는 프로펠러의 추력 성능을 측정하였으며 직경 1.1 m의 프로펠러를 6축 로드셀 이용하여 tilting angle에 대한 6분력을 측정하였다. Shim 등[11]은 상용 프로펠러의 공력 데이터베이스를 구축하기 위해 성능시험 장치를 고안하였다. 측정 대상 프로펠러 사이즈는 20인치에서 30인치의 지름을 갖는 쿼드콥터 전용 프로펠러이다. 6축 로드셀을 사용하여 제자리 비행 조건에서의 성능을 측정하고 제작사에서 제공하는 사양과 비교하는 연구를 수행했다.

최근까지 고안된 프로펠러 성능장치에 대한 선행연구 결과는 1 m 이상의 대형 프로펠러 또는 20 ~ 30인치 규격의 중형 프로펠러를 대상으로 제작되었으며, 고가의 주문제작 형태이다. 따라서 일반인들이 드론에 적용가능한 소형 프로펠러 측정장치 제작 및 성능측정에 대한 연구는 부족한 상황이다.

본 연구에서는 시중에서 구매할 수 있는 센서들과 모터 그리고 파워 서플라이 등을 사용하여 프로펠러 성능 측정 장치를 개발하였다. 멀티콥터에 장착되는 상용 프로펠러 APC 사의 다양한 프로들의 추력을 측정하여 UIUC propeller data site[12]에서 제공하는 선행연구결과와 비교 검증하였다. 측정장치의 가동 RPM 범위는 동안정성과 정안정성 그리고 실험자의 안전을 고려하여 3,000 RPM까지의 범위에서 측정하도록 설계되었다. 프로펠러가 장착되는 성능 측정장치 상부에 에어포일 형상(NACA0030)의 하우징을 설치하여 프로펠러에서 발생하는 후류와 토크셀과 로드셀이 설치되어 있는 센서부와의 공력상호작용을 최소화하였다.

2. 본 론

2.1 성능 측정 대상 프로펠러

성능 측정 대상 프로펠러는 멀티콥터에 사용되는 APC의 APCE 9X6, APCSF 10X4.7 그리고 APCE 11x5.5 제품이다. 제조사의 상호명과 수반되는 용어(E, SF)의 의미는 제조사에서 사용자에게 권고하는 프로펠러 사용 용도이다. APCE의 ‘E’는 electric으로 전반적인 전기배터리 기반 멀티콥터에 사용되는 프로펠러를 의미한다. APCSF의 ‘SF’는 slow flyer라는 의미로, 저속 비행용 멀티콥터에 사용되는 프로펠러를 의미한다.

Fig. 1 Photographs of APC propellers: 9X6E; 10X4.7SF; 11X5.5E [13]

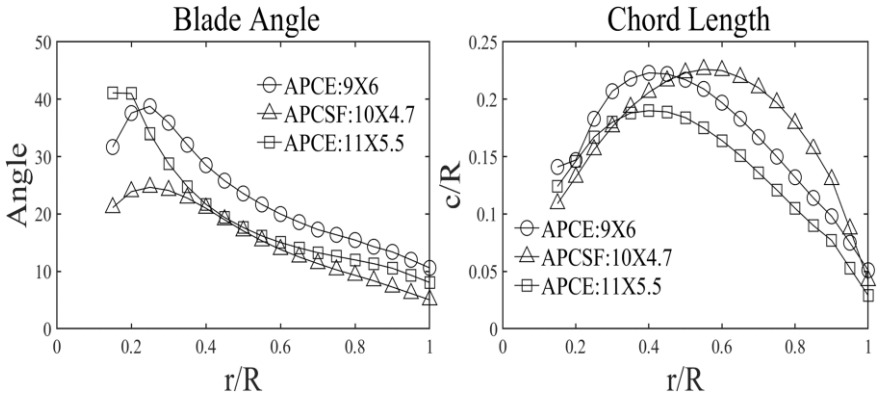


Fig. 2 Geometric characteristics of a APC 9X6E propeller

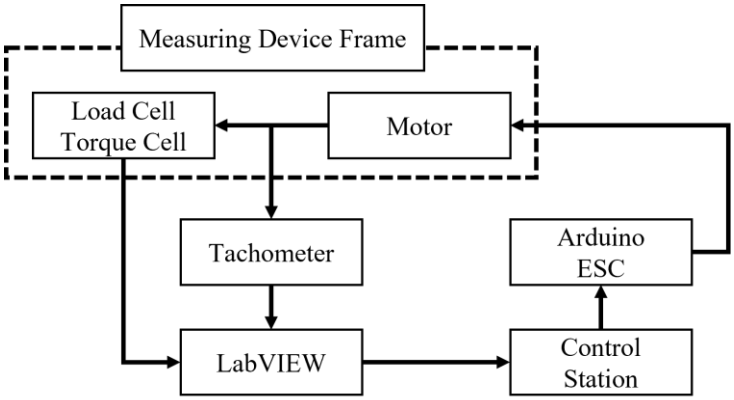


Fig. 3 Schematic diagram for measurement process of thrust rpm and torque

Fig. 1과 2에 APC의 프로펠러 제품 형상과 기하학적 특성을 나타냈다. Fig. 2는 프로펠러의 단일 블레이드 형상에 대한 깃 각과 시위길이를 나타낸다. Blade angle은 프로펠러의 블레이드 시위선과의 사이 각이며, 반경 길이에 대한 blade angle 분포로 나타냈다. Chord length는 프로펠러의 시위길이를 프로펠러의 반경으로 나눈 무차원수이며, 반경 길이에 대한 시위길이 분포로 나타냈다. 프로펠러에 대한 기하학적 제원은 UIUC propeller data site를 참고하였다.

APC 9X6E는 직경 9인치 그리고 피치 6인치 규격의 프로펠러이다. 프로펠러의 피치는 기하학적 프로펠러의 전진길이를 의미하고 깃 각 분포의 크기와 비례하며, 피치가 높을수록 1회전 당 전진하는 거리가 증가한다. 프로펠러 반경길이에 대한 깃 각 분포는 프로펠러 hub 부분에서 tip쪽으로 갈수록 크기가 감소하는 경향을 보인다. 깃 요소 이론(BET: blade element theory)에 의하면, hub 부분의 각속도는 tip쪽에 비해 상대적으로 높은 유효 받음각(effective AOA)을 가져야한다. Tip쪽 각속도는 r/R이 1인 부근으로, 반경 길이에 비례하는 각속도가 최대인 부분이다. 따라서 높은 각속도로 인해 낮은 유효 받음각에서 충분한 양력을 얻을 수 있다. 프로펠러의 시위길이 분포는, 반경 길이에 대한 r/R이 0.3 ~ 0.65 범위에서 긴 시위길이를 확인할 수 있다. APC 10X4.7SF모델은 직경 10인치 그리고 피치 4.7인치의 규격의 프로펠러이다. 9X6E 모델에 비해 낮은 피치 규격이며, 상대적으로 낮은 깃 각 분포를 확인할 수 있다. 시위 길이 분포는 hub 부분에서 0.5 ~ 0.6 부근까지 상승한 다음, 블레이드 tip까지 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. Tip 근처 시위 길이의 증가는 반경 방향 각속도 분포에 따른 양력 대비 항력 증가율이 큰 이유로 작게 설계하였음을 알 수 있다.

2.2 프로펠러 성능 측정장치 구성

Fig. 3에 프로펠러 성능 측정장치의 구성도를 나타내었다. 성능 측정장치는 프로펠러의 추력과 토크를 측정하는 로드셀과 토크센서, 프로펠러의 회전수를 측정하는 타코미터와 인디케이터 그리고 증폭기로 구성된다. 프로펠러의 단일 축방향의 추력을 측정하기위해 1축 로드셀은 CASKOREA 사의 BCL-5L 로드셀(Fig. 4(a))을 사용하였다. 로드셀 내부의 스트레인게이지에 변형이 발생하면 변형량에 따른 저항이 변하는

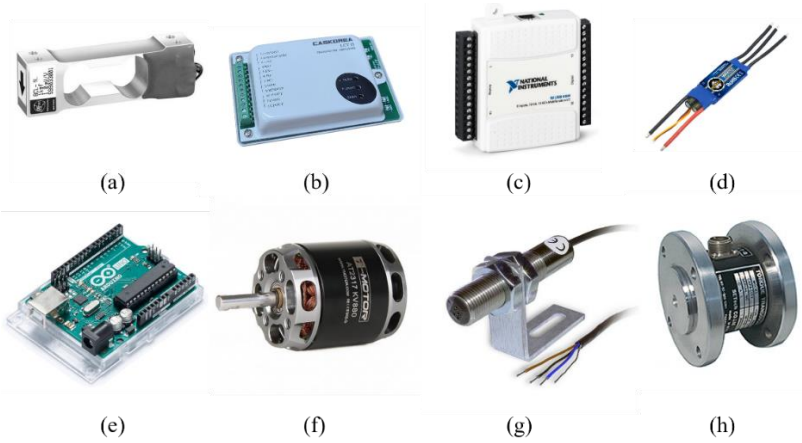


Fig. 4 Sensors and auxiliary components used in the present study

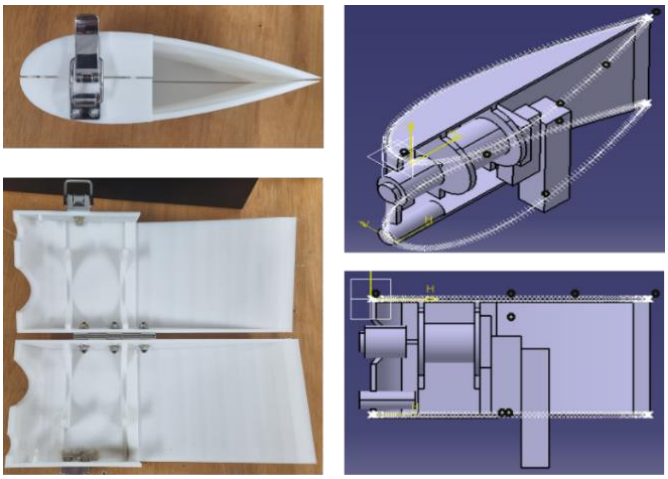
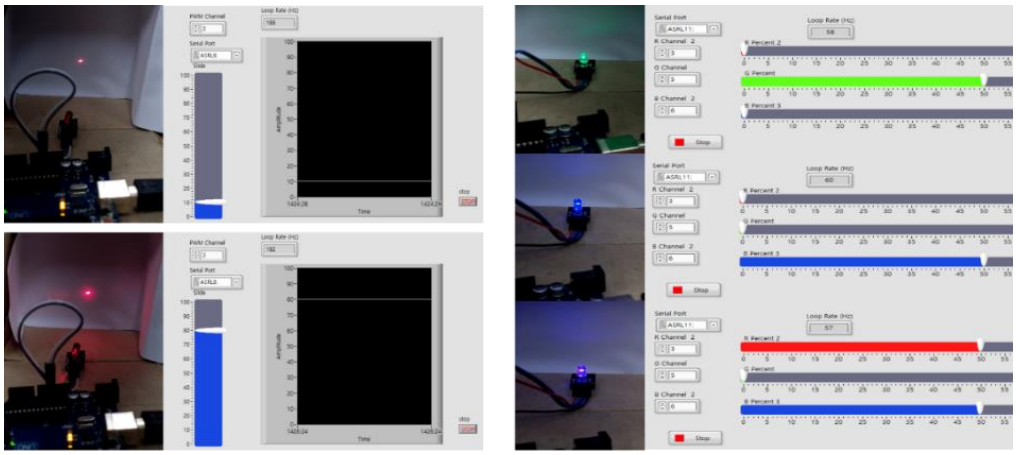


Fig. 5 NACA0030 airfoil shape case used for fixing sensors

원리를 사용하여 출력전압을 발생시킨다. 로드셀로부터 발생한 출력전압의 크기를 CAS -KOREA사의 LCT-II(Fig. 4(b))증폭기를 사용하여 0 ~ 10 V 범위 내로 스케일링하였다. 출력전압 신호는 National Instruments의 DAQ board USB-6009(Fig. 3(c))에 전송되어 LabVIEW 엔지니어링 프로그램으로 확인할 수 있다.

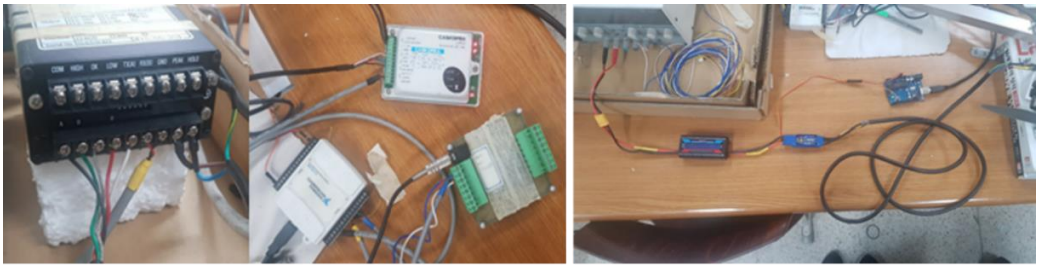
모터는 T-motor사의 AT2317 950 kV(Fig. 4(f)) BLDC 모터를 사용하였으며, 모터의 회전속도를 제어하기 위해 Beatles사의 40A Brushless ESC(Fig. 4(d))와 Arduino UNO(Fig. 4(e))를 사용하였다. UNO board는 5 V 전압에서 운용되고 14개의 핀 중 6개의 핀에서 PWM 신호를 발생시킨다. LabVIEW control panel 내 PWM 신호를 duty ratio로 조절하여 모터의 회전속도를 제어하도록 설계하였다. 센서에 의해 수집되는 데이터들을 LabVIEW control panel로 확인하기 위해 National Instruments의 자료 획득 시스템 DAQ board USB-6009를 사용하였다. 프로펠러의 RPM을 측정하기 위해 비접촉식 적외선 센서가 적용된 Monarch Instrument의 IRS-W/P 타코미터(Fig. 4(g))를 사용하여 모터가 주어진 전압에 따라 의도적이게 회전하였는지 확인하였다. 프로펠러의 토크를 측정하기 위해 $2\,kgf \cdot cm \sim 500\ kgf \cdot m$ 범위에서 사용가능한 SETech 사의 YDN 토크변환기(Fig. 4(h))를 토크 인디케이터와 연결하였다. 센서부의 위치는 프로펠러 후방에 설치되었으며, 회전하는 프로펠러의 후류에 의해 간섭효과를 발생시킨다. 따라서 NACA0030 형상 에어포일 하우징을 3D 프린터로 제작하여 측정장치에 설치하여 후류가 케이스를 따라서 흐를 수 있도록 했다. 케이스의 내부구조는 타코미터와 모터 그리고 로드셀 등 각 센서가 위치할 수 있도록 설계하였고, 센서를 고정하는 역할을 하여 구조적인 안정성을 추구했다(Fig. 5).

케이스 윗면은 경첩을 달고, 아랫면에 매미고리를 설치하여 탈부착에 용이하게 제작하였다. 디지털 신호를 아날로그 신호로 변화해주기 위해 arduino board에 내장된 PWM(pulse with modulation)의 원리를 사용하였다. 전압을 부여하는 시간의 비율(duty ratio)을 조절하여 출력 전압을 제어하는 PWM 원리를 통해 모



(a) Laser pointer test (b) LED control test

Fig. 6 PWM control test using a laser point and a RGB LED with a LabVIEW control panel interface



(a) Digital-to-analog conversion (b) Power surply

Fig. 7 Circuit installation for a motor and sensors

터의 회전속도를 조절할 수 있다. PWM 신호제어를 테스트하기 위해, 레이저 포인터와 RGB LED를 duty cycle의 변화에 따른 결과로 나타냈다(Fig. 6). LabVIEW VI로 설계된 컨트롤 패널로 duty cycle 제어를 통해 레이저 포인터의 밝기를 조절할 수 있었다(Fig. 6(a)). RGB value의 duty cycle에 따라 LED의 색상의 강도를 조절하고 조합할 수 있는 것을 확인했다(Fig. 6(b)).

2.3 회로 조립

회로를 구성하는 구성요소 중 센서부는 로드셀 부분과 토크센서 부분 그리고 타코미터 부분으로 구성된다. 로드셀 증폭기와 DAQ board를 연결하여 로드셀에서 측정하는 출력 전압 데이터를 수집했고, 토크센서 인디케이터를 DAQ board와 연결하여 토크센서에서 수집되는 토크에 대한 출력 전압 데이터를 확인할 수 있도록 하였다. ROS-W 광학센서에서 측정한 디지털 신호를 아날로그 변환시키는 digital -to-analog 컨버터를 제작하여 DAQ board와 연결하였다(Fig. 7(a)). 회로 구성요소 중 구동부는 파워 서플라이, 전류측정기, ESC, arduino board 그리고 BLDC 모터로 구성된다(Fig. 7(b)). 파워 서플라이에서 ESC로 인가되는 전압과 전류를 확인하기 위해 watt meter를 사용하였고, 모터의 회전속도를 제어하기 위해 Arduino Uno board의 PWM 제어를 관리하는 출력핀(~9핀)과 ESC의 신호선을 연결하였다.

2.4 로드셀 캘리브레이션

장치를 구성하기 전, DAQ board에서 수집되는 출력 전압 값을 무게 단위로 변환하기 위해 캘리브레이션 과정을 거쳐야 한다. Fig. 8은 50 g, 100 g, 200 g 그리고 500 g짜리 분동을 로드셀 측정부에 올려놓고, LabVIEW 패널에서 나타낸 하중 값을 확인한 결과이다. 로드셀로부터 출력된 미가공 전압 데이터에서 저주파 영역 대에 해당하는 데이터를 사용하기 위해 low pass filter를 사용하여 신호처리를 하였다. 설계된 LabVIEW프로그램을 통해, 로드셀로부터 출력된 전압 신호를 무게 단위로 변환하는 스케일링 과정이 수행하기 위해 스케일링 factor를 구해야 한다. LabVIEW 인터페이스에서 실시간으로 획득되는 출력 전압 신호를 데이터 파일로 저장 후, Matlab 프로그램을 사용하여 측정 분동 무게에 대한 출력전압의 인과관계를

Table 1 Results of the load cell calibration

Weight (g)	50	100	200	500
Measured load (gf)	50.1432 (0.59%)	100.1996 (0.28%)	199.8044 (0.19%)	500.2170 (0.04%)

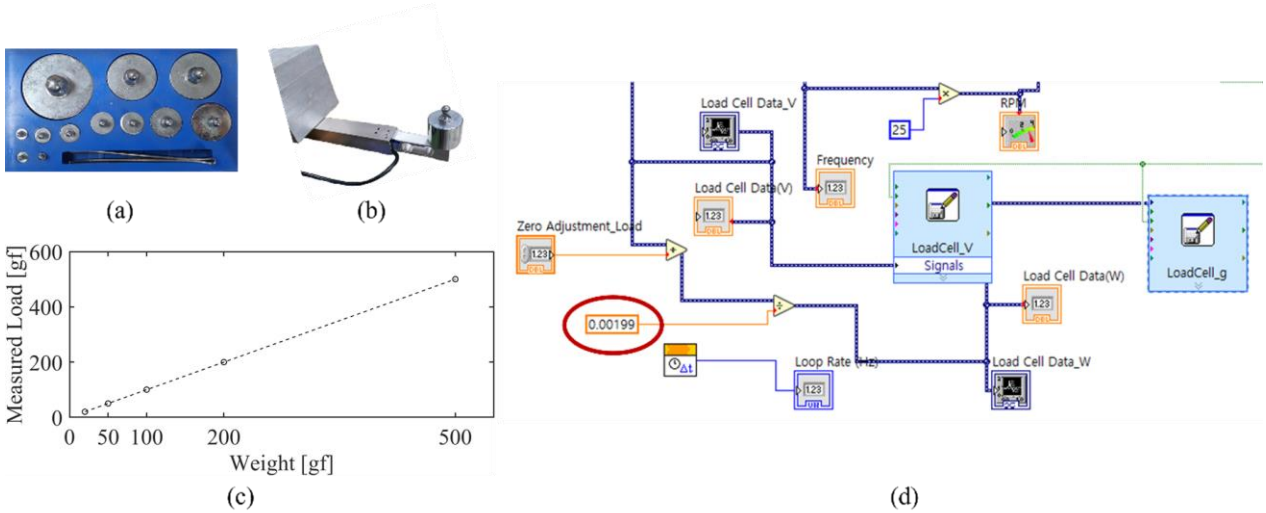


Fig. 8 Process of the loadcell calibration using balancing weights and the LabVIEW VI program

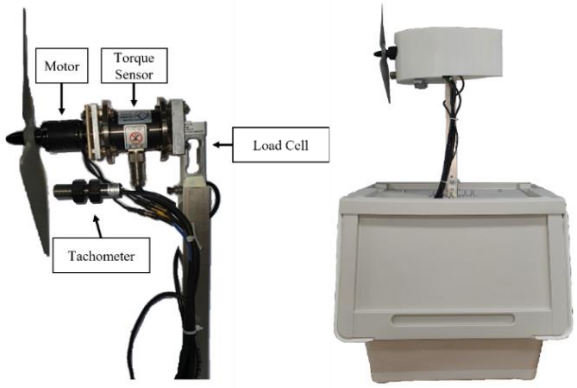


Fig. 9 Installation of measuring device

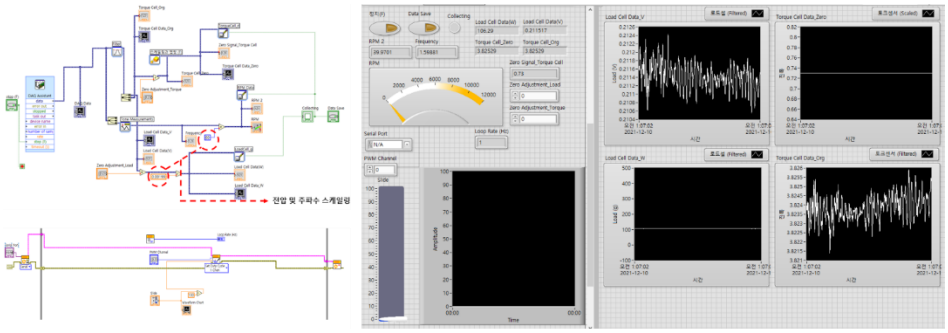
파악했다. 출력 전압 신호를 실제 분동 무게로 나눈 값을 스케일링 factor로 사용하였다. Fig. 8(c)에서 확인할 수 있듯이 스케일링 factor, 0.00199를 사용하였을 때, 실제 분동 무게에 대한 하중을 잘 측정하였다. Table 1은 실제 분동 무게 대비 측정 하중과 상대 오차를 계산하여 나타낸 표이다. 하중 측정 결과, 분동의 무게가 증가할수록 로드셀로부터 측정되는 하중의 상대오차가 감소하는 것으로 분석되었다.

2.5 외관 조립 및 측정장치 설치

구동부와 센서부 회로를 케이스 내부에 보관하고, 케이스 외부 상판에 프로펠러 측정 장치를 설치하였다. 프로펠러 회전에 의한 진동을 억제하기 위해 상판 하부에 나무 합판을 고정하였다. 상판 가운데에 알루미늄 각파이프 사이즈에 맞게 재단하여 프로펠러 측정장치의 주 지지대를 설치하였다. 지지대 옆에 구멍을 내어 케이스 내부의 로드셀, 타코미터, 토크센서 그리고 모터의 회로 전선이 외부 상판의 측정장치와 연결되도록 했다. 지지대 각파이프에는 구멍을 내어 브라켓을 연결하고, 케이스 외부 상판에 고정하였다. 케이스 옆면에는 파워 서플라이의 전압 및 전류 조절과 패널의 시인성을 위해 구멍을 냈고, 반대쪽에는 면에는 파워 서플라이 전선과 DAQ board USB 포트선이 나오도록 제작하였다(Fig. 9). 센서들과 지지대 및 장착부품들을 조립하여 프로펠러 성능측정장치를 구성하였으며 로드셀과 토크센서, 토크센서와 모

Table 2 Propeller test conditions

Height above sea level (m)	Temperature (℃)	Density (kg/m^3)	Latitude	G (m/s^2)
100	27	1.214	127.874°	9.811



(a) LabVIEW block diagram (b) front panel display

Fig. 10 (a) LabVIEW block diagram; (b) front panel

터 사이에 장착되는 추가적인 지지대를 제작하여 설치하였다.

LabVIEW 블록 다이어그램(Fig. 10(a))을 작성하여, 장치에서 수집되는 출력 전압을 스케일링 factor로 추력으로 변환해주도록 설계를 하였고, 추력과 RPM 자료를 활용 가능한 데이터 형식으로 저장하였다. Data는 초 단위에 대한 측정 무게와 RPM 값으로 저장시켰다. LabVIEW 전면 패널에서, ESC에 인가되는 전압의 크기를 조절하기 위해 PWM 신호를 변경할 수 있는 모듈레이터를 추가하였다. 광학센서로부터 측정된 RPM 값을 실시간으로 확인할 수 있도록 시각화 인터페이스를 구성하였다. BCL-5L 로드셀에서 측정된 추력은 0.001초마다 저장되고, IRS-W/P 광학센서로부터 측정된 RPM은 1초 단위로 저장된다. Matlab 프로그램을 사용하여 추력과 RPM 데이터를 후처리 했고, 측정 결과를 UIUC 선행 연구자료와 비교/검증하였다.

2.6 온도 및 밀도 보정

온도 및 밀도 보정은 식 (1) ~ (3)을 사용하여 보정하였다. 해발고도의 경우 실험실 위치를 기준으로 설정하였고, 온도는 실험실에서 측정한 온도를 사용하였다. 식 (1)에서의 $Height$와 T_0는 각각 해발고도와 기준 온도 15℃를 의미하고 P_0는 대기압 101.325 kPa를 나타낸다. 식 (2)의 T는 실험실 내부온도를 의미하고 ρ는 실험조건에 따른 공기밀도를 표현한다. 식 (3)은 실험실 위치의 위도와 높이(해발고도)에 대한 함수로 중력가속도에 대한 식이다.[14]

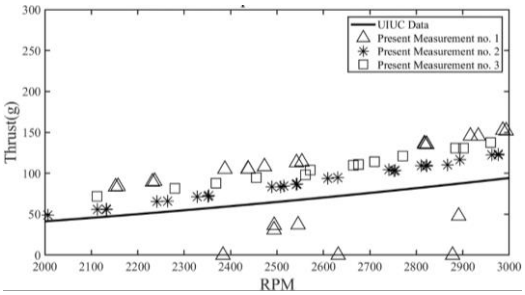
$$P = P_0\left(1 - 0.0065\left(\frac{Height}{T_0 + 273}\right)\right)^{5.261} \quad (1)$$

$$\rho = 1.225\left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{288}{T + 273}\right) \quad (2)$$

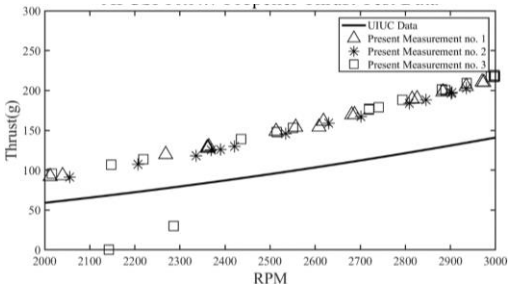
$$G = 9.7803(1 + 0.0053(\sin(Latitude))^2) - 3(10^{-6})Altitude \quad (3)$$

3. 측정장치 검증 및 분석

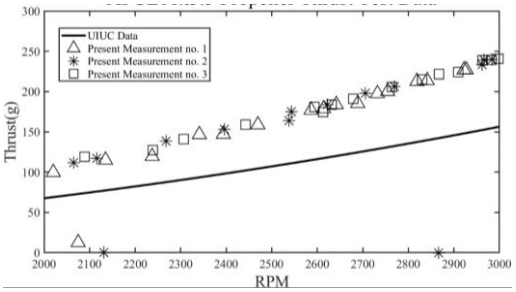
Fig. 11은 프로펠러 성능 측정 장치를 사용하여 APCE 9X6, APCSF 10X4.7 그리고 APCE 11X5.5 프로펠러의 정지 추력을 측정한 결과들을 나타낸 그림이다. PWM 모듈레이터를 사용하여 ESC에 인가되는 전압을 제어하였다. 성능 측정 시험은 RPM을 2,000부터 3,000까지 실시간으로 증가시키며 각 RPM별로 90초간 측정을 3회 이상 수행하였다. 측정결과 동일한 RPM 조건에서 프로펠러의 지름이 클수록 추력 값이 크게 나타났다.



(a) APCE 9X6

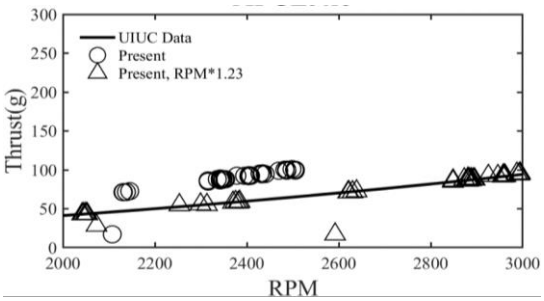


(b) APCSF 10X4.7

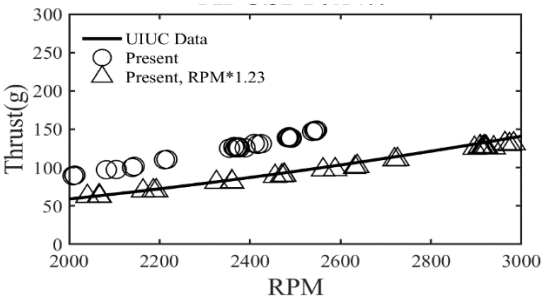


(c) APCE 11X5.5

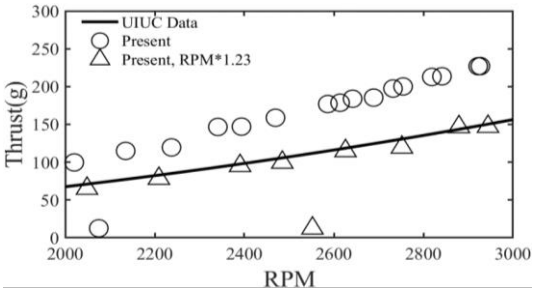
Fig. 11 Uncorrected thrust data



(a) APCE 9X6



(b) APCSF 10X4.7



(c) APCE 11X5.5

Fig. 12 Corrected thrust data

깃 요소 이론(BET)에 의하면 프로펠러 지름이 증가할수록 깃 면적도 함께 증가하며 양력과 함께 추력도 증가한다. 측정한 값을 UIUC 프로펠러 성능 데이터베이스 시험결과[12] 자료와 비교하여 검증하였으며 Fig. 11에 나타난 바와 같이 UIUC 데이터베이스 시험결과와 일정한 비율로 오차가 발생하였다. 특히 큰 RPM 조건에서 9X6E는 최대 오차율이 35.16%, 10X4.7SF는 53.28%, 그리고 11X5.5E는 55%로 프로펠러 지름에 비례하여 오차가 증가하는 것을 확인하였다. 프로펠러 지름이 클수록 블레이드 면적이 증가하고 이로 인하여 항력과 프로펠러 무게가 증가하며 진동이 더 크게 발생하여 측정값이 오차가 발생하는 것으로 파악하였다. 그러나, Fig. 12에 나타낸 바와 같이 Fig. 12에 사용된 RPM 값에 상수, 1.23을 곱한 값을 사용할 경우 Fig. 11에서 나타낸 결과 보다 UIUC data에 상대적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 성능 측정 장치에 장착된 광학센서의 오차로 인하여 RPM에서 오류가 있었으며 이를 보정시켰을 때 참고한 실험결과와 잘 일치하였다.

4. 결 론

프로펠러는 드론의 비행 성능을 결정하는 중요한 부품이다. 본 연구에서는 프로펠러 성능 측정 장치를 개발한 후, 측정결과를 선행 연구결과와 비교하였다.

본 연구에서 개발한 측정 장치를 사용하여 측정한 실험결과의 반복성은 확인하였다. 그러나, 참고문헌의 실험결과와 비교하였을 때 추력 값이 일정한 크기로 오차가 발생하였다. 오차의 크기는 프로펠러의

반지름에 비례하여 나타났다. 따라서, 연구 초기에는 load cell에서 오차가 발생하고 특히 반지름이 클수록 항력 및 진동이 증가하여 오차가 발생한 것으로 파악하였으나, 프로펠러의 RPM 값 측정에서 오차가 발생한 것을 확인하였으며 보정 상수를 사용하여 기존 자료를 보정하였을 때, UIUC data와 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 토크의 경우, 측정부와 구동부가 연결된 지지대와 조립 구조에 굽힘 응력으로 인한 추가적인 하중으로 측정할 수 없었다.

향후, 프로펠러 성능 측정 장치에서 발생하는 부가적인 하중을 제거하여 토크를 측정하고 풍동 시험을 통해 전진비를 고려한 프로펠러 성능을 측정하고자 한다.

후 기

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(기초연구사업, No. 2018 R1D1A3 B070 50384)의 지원을 받아 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌
(References)

(1) Lee, S. W., 2021, “Drone & UAM Industry Trend,” *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 43, No. 7, pp. 38~42.

(2) Choi, W. S., Yi, D. K. and Hwang, H. Y., 2021, “Preliminary Conceptual Design of a Multicopter Type eVTOL Using Reverse Engineering Techniques for Urban Air Mobility,” *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 25, No. 1, pp. 29~39.

(3) Cho, M. and Han, C., 2021, “Estimation of Hovering Flight Time of Battery-Powered Multicopters,” *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 11~20.

(4) Hwang, C. J., 2018, “Status and Challenges of Urban Air Mobility Development,” *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace,* Vol. 16, No. 1, pp. 33~41.

(5) Cho, T. W., Kim, Y. W. and Park, D. H., 2018, “Wind Tunnel Test for the Propeller Performance of the High Altitude UAV,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences,* Vol. 46, No. 3, pp. 189~196.

(6) Kim, J. W., Jeong, J. W., Na, S. Y., Shin, M. J. and Chun, Y. B., 2018, “Development of Testbed for Aerodynamic Performance of a Drone,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers,* Vol. 27, No. 2, pp. 104~107.

(7) Song, Y. H., Song, J. R. and Kim, D. K., 2017, “Development a Test Rig for Studying the Hover Performance of a Coaxial Propeller,” *Proceeding of the 2017 KSPE Spring Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 560~562.

(8) Hwang, S. J. and Kim, D. K., 2018, “Development of Coaxial Propeller Test Facility and Experimental Study on Hover Performance Characteristic for Drone,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences,* Vol. 46, No. 1, pp. 59~67.

(9) Brandt, J. B., 2005, “Small-Scale Propeller Performance at Low Speeds,” *Master Thesis*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, USA, pp. 1~479.

(10) Cho, T. W., Kim, Y. W., Lee, S. H., Park, C. W. and Shin, S. H., “Analysis of Wind Tunnel Test Result of UAV Propeller in the Closed Test Section,” *Proceeding of the 2020 Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, Goseong, Republic of Korea, pp. 591~592.

(11) Shim, H. J., Kim, G. H. and Cheon, H. J., 2021, “An Experimental Study for Construction of Aerodynamic Database of the Commercial Propeller,” *Journal of Aerospace System Engineering,* Vol. 15, No. 5, pp. 60~71.

(12) Brandt, J. B., Deters, R. W., Ananda, G. K., Dantsker, O. D. and Selig, M. S., 2022, *UIUC Propeller Database* (https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html), Department of Aerospace Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, USA.

(13) Landing Products Inc., *APC Propellers* (https://www.apcprop.com/), Landing Products Inc., Woodland, USA.

(14) IEC 60193:2019, 2019, *Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines - Model Acceptance Tests*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, pp. 165~166.

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2024.12.1.021 ISSN 2288-3991(Online)

플립 러닝과 블렌디드 러닝을 적용한 기계요소설계 교육 사례 연구§

정 태 은*†
* 인덕대학교 메카트로닉스공학과

Case Study of Mechanical Element Design Education Using Flipped Learning and Blended Learning

Tae Eun Chung*†
* Dept. of Mechatronics Engineering, Induk University

(Received August 20, 2023; Revised December 16, 2023; Accepted December 31, 2023)

Key Words: Flipped Learning(플립 러닝), Blended Learning(블렌디드 러닝), Power Transmission Element Design(동력전달요소설계), Mechanical Element Design(기계요소설계)

초록: 동력전달요소설계는 국가직무능력표준에 따른 기계요소설계 분야에서 달성해야 하는 중요한 능력 단위 중 하나이다. 기어와 벨트 등의 동력전달요소의 기능을 파악하기 위해서는 실제로 작동하는 모습을 보면서 이해하는 것이 중요하다. 따라서 대면수업과 비대면 수업을 혼합한 블렌디드 러닝 방식과, 사전 학습 후 대면 실습수업을 진행하는 플립 러닝 방식을 적용하고, 기계요소의 작동 동영상 콘텐츠를 제공한 기계요소설계 교과목을 개발하여, 동력전달요소 설계능력 배양이라는 교육 목표를 달성하고자 하였다. 설문 조사를 실시한 결과로부터 학습자의 만족도가 향상한 것을 확인할 수 있었다.

Abstract: The power transmission element design is one of the important competency units that must be achieved in the field of mechanical element design according to the National Competency Standards. In order to understanding the function of power transmission elements, it is important to understand by looking at how they actually work. Therefore, it was intended to achieve the educational goal of developing power transmission element design skills by applying a blended learning method that combines flipped learning method. From the results of the survey, it was confirmed that learner's satisfaction improved.

1. 서 론

1.1 교과목 개발의 필요성

국가능력표준(national competency standards)에 따른 기계요소설계 분야에서 동력전달요소는 달성해야 하는 중요한 능력 단위 중 하나이다. 국가능력표준에서 동력전달요소설계는 동력전달시스템에서 요구되는 동력전달요소의 구조와 기능을 파악하고 설계하고 검토하는 능력이라고 정의되어 있다.(1) 동력전달요소인 기어와 벨트에 대해 동력을 전달하는 기능을 파악하기 위해서는 실제로 작동하는 모습을 보면서 이해하는 것이 중요하고 학습 효과도 크다. 그러나 기존의 교과목에서는 텍스트와 그림 위주로 학습 자료를 제공하여 이러한 학습 목표를 달성하는데 한계가 있었다.

1.2 교과목 개발의 방향과 목적

학교마다 구축되어 있는 학습관리시스템(learning management system)을 이용하면 기어 등의 동력전달요소의 작동 동영상을 포함한 강의 콘텐츠를 학생들에게 제공할 수 있으며, 학습자료를 제공하면서 퀴즈나 과제 등의 평가시스템을 도입하여 학생들의 자기 주도적 학습을 유도할 수 있다. 따라서 대면 수

§ 이 논문은 대한기계학회 2023년 교육부문 춘계학술대회(2023. 6. 23., 서울대학교) 발표 논문임.
† Corresponding Author, techung@induk.ac.kr
Ⓒ 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

업과 비대면 수업을 혼합한 블렌디드 러닝 방식과, 사전 학습 후 대면 실습수업을 진행하는 플립 러닝 방식을 적용하고 기계요소의 작동 동영상 콘텐츠를 제공한 기계요소설계 교과목을 개발하여, 동력전달 요소설계 능력 배양이라는 교육 목표를 달성하고자 한다. 교수학습법을 적용한 기계요소설계 교과목 개발과 운영 사례를 소개하면서, 대면 수업과 비대면 수업을 혼용한 교육과 학습을 통해 학습수요자의 자기주도 학습 효과를 높이기 위한 방안을 제안하고자 한다.

2. 교과목 개발 내용

2.1 연구 방법

사전 기획 단계에서 학생들을 대상으로 블렌디드 수업 운영 방식에 대한 인식을 조사하였다. 기계요소설계 교과목은 2학년 2학기에 개설되어 있으며, 선수과목인 2학년 1학기 기구동역학실습 교과목 수강생을 대상으로 13주 차에 학습관리시스템의 설문 기능을 이용하여 블렌디드 러닝에 대한 인식을 조사하였다. 수강생 30명 중 결석생 1명을 제외한 29명을 대상으로 하였으며, 27명이 응답하여 응답률 93.1%를 나타내었다. 블렌디드 수업 진행에 대한 의견은 59.3%가 “매우 좋았다”고 답변하였으며, 40.7%가 “어느 정도 좋았다”고 답변하였다. “100% 대면수업과 차이가 없었다”, “별로 안 좋았다”, “매우 안 좋았다”는 답변은 없었다. 따라서 학생들은 100% 대면수업보다는 비대면 수업이 포함된 블렌디드 수업을 선호함을 알 수 있었다. “일반 대면수업과 비교할 때 블렌디드 러닝 수업은 학습 내용을 반복학습하는데 어느 정도 효과가 있다고 생각합니까”라는 설문에 대해 “매우 효과가 있다”는 답변이 48.2%, “효과가 있는 편이다”라는 답변이 37.0%, “보통 정도이다”가 14.8%였으며, “별로 효과가 없는 편이다”와 “거의 효과가 없다”는 0%였다. 블렌디드 러닝 방식의 수업이 반복학습에 효과가 있다고 생각하는 학생이 85.2%를 나타내어, 블렌디드 러닝은 대면 수업 전에 비대면 온라인 공간에서 강의동영상을 반복 학습할 수 있다는 점에 대해 학생들이 긍정적으로 생각하고 있다는 것을 알 수 있었다. 학생들의 인식과 설문 결과를 분석하여 2학년 2학기 기계요소설계 교과목 개발과 운영 방식으로 비대면 온라인 수업과 대면 수업을 혼용한 블렌디드 러닝 방식과 사전 비대면 온라인 학습 후 대면 현장수업으로 진행하는 플립 러닝 방식을 채택하기로 하였다.

블렌디드 러닝 교수학습 모형으로는 자기 주도적 학습(self-directed learning), 학습 흥미(motivated), 수준별 맞춤 학습(adaptive learning), 풍부한 교육 콘텐츠 제공(resource enriched), 정보기술활용(technology enhanced) 단계로 진행하는 SMART 교수학습 모형을 적용하였다.[2] Fig. 1에 SMART 모형의 단계별 학습 내용과 학습 도구를 나타내었다.

자기 주도적 학습을 위해 단원 별로 교육목표, 능력 단위, 수행 목표, 세부 목표, 선수 과제, 학습 경험, 관계 지식, 자율 평가 문제, 풀이와 답, 수행 평가로 이루어진 기계요소설계 학습지침서(learning guide

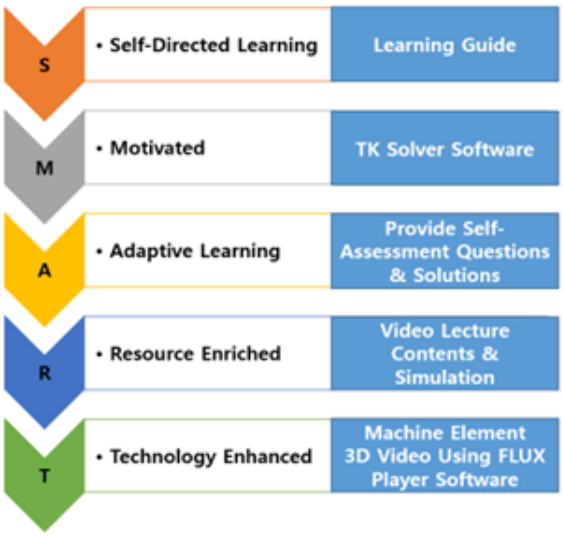


Fig. 1 SMART teaching & learning model for blended learning

book)를 만들어서 학생들에게 제공하였다. 교수 학습법은 2주차에 플립 러닝 방식을 적용하였으며, 오리엔테이션과 시험 주간을 제외한 주에는 블렌디드 러닝 방식을 적용하였다. 주차 별 학습 계획은 Table 1에 나와 있다.

학습 흥미를 유도하기 위해서는 손쉬운 식 풀이 도구를 도입하였다. 기계요소설계에 사용하는 수식과 설계변수 계산을 하는데 UTS 회사에서 개발한 TK Solver 소프트웨어[3]를 이용하였다. 이 소프트웨어는 규칙 기반의 언어를 이용한 수학 모델 및 문제해결 시스템이다. 설계 식을 규칙 시트(rule sheet)에 작성하고 이때 생성된 변수 시트(variable sheet)에 입력값을 주면 구하고자 하는 설계변수를 계산하는 소프트웨어이다.

Table 1 Class plan and teaching methods for each week

Week	Topic	Class activities	Teaching methods
1	Familiarize yourself with the mechanical element design subject	Introduce learning methods such as equations and methods of solving equations required for design	(Orientation)
2	Classification of mechanical elements and industrial specifications	Classifying machine elements according to purpose of use, understanding the definition and design process of engineering design	Flipped learning
3	Gear modeling and design foundation	Practice the gear modeling process & motion simulation	Blended learning
4	Examples and how to use TK Solver, a design equation solving tool	Features and configurations of TK Solver software solving basic engineering problems	Blended learning
5	Basic engineering problems	Find the time, speed, and flight distance of the projectile	Blended learning
6	Geometric analysis of the gear as a power transmission element	Learn the type of gear, the terminology of the gear, and the design parameters required for the gear design	Blended learning
7	Gear train design	Solving the problem for a given gear train	Blended learning
8	Interim examination	Primary diagnostic evaluation (basic engineering problems, designing standard flat gears among power transmission elements, etc.)	(Test)
9	Practice designing gear train	Practice in designing the gear train that produces the velocity ratio of the gear train	Blended learning
10	Gear motion simulation	Gear modeling and motion simulation using RecurDyn's gear toolkit, a multi-body dynamic analysis program	Blended learning
11	Learning the wrapping driving devices	Learning the components and design parameters of the wrapping driving devices	Blended learning
12	Practice in designing wrapping driving devices	Find the contact angle between the belt and pulley, and the length of the belt	Blended learning
13	Interpretation of static forces	Types of forces, such as tensile tests, differences in mass and weight, center of mass, tensile and compressive forces, etc.	Blended learning
14	Interpretation of dynamic forces	Finding the moment of inertia, Newton's law of motion	Blended learning
15	Final examination	Secondary diagnostic assessment (gear row, design wrapping driving devices, interpretation of static and dynamic forces)	(Test)

이러한 식 풀이도구와 학습지침서를 이용하여 학생들이 자기 주도적으로 학습을 할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 기계요소설계 실습을 하기 위한 사전 단계로 기초 공학문제 중에서 초기 속도를 갖고 날아가는 물체의 운동 상태를 구하기 위한 TK Solver 소프트웨어의 실습 사례이다. 규칙 시트(rule sheet)에 문제를 풀기 위한 운동식을 입력하면 여기에 사용한 변수가 변수 시트(variable sheet)에 생성되고, 문제에 정의되어 있거나 미리 아는 값을 입력하면 미지수의 수만큼 식이 주어졌을 때 모르는 값 또는 구하고자 하는 값을 풀어서 구할 수 있다. 이러한 식 풀이 도구를 사용하여 수학에 대한 학생들의 어려움을 줄일 수 있었다. 풍부한 교육 콘텐츠 제공과 정보기술활용 단계에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 기어류의 기계요소의 동작을 3차원 공간에서 구현할 수 있는 Flux Player 소프트웨어[5]를 사용하여 학생들이 여러 기계요소를 직접 보는 것과 같이 실감나게 3차원으로 동작을 구현하고 경험할 수 있도록 하였다.

팀별 협력 학습이 필요한 주차에는 PARTNER 교수학습 모형[4]에 따라 플립 러닝을 실시하였다. Fig. 4에는 플립 러닝을 위한 PARTNER 모형의 진행 순서와 학습 내용이 나와있다. Pre class 단계에서 25분 내외의 이론이나 기초 학습 위주의 비대면 강의 자료를 제공하였고, in class 단계에서 실습 위주의 심화 실습을 진행하였다. Post class 단계에서는 학습 목표의 달성 여부를 평가하기 위한 수행 평가를 진행하였다. 플립 러닝을 적용한 사례로는 Fig. 5가 있으며, 이는 기계요소설계 교과목 제1장 기계요소, 공학설계, 단위 이해하기에서 “공학설계의 정의와 설계 과정을 설명할 수 있다”라는 교육 목표를 달성하기 위하여 실시한 과제이다. 공학설계의 제품 기획과정 연습에서 개인형 이동장치(personal mobility)의 문제점과 향후 개선점에 대한 토론과 보고서를 작성할 때 협력 학습을 실시하였다.

Σ= Rules

Status	Rule	
Satisfied	Vx=V0*cosd(θ)+ax*t	; x component of velocity
Satisfied	Vy=V0*sind(θ)+ay*t	; y component of velocity
Satisfied	x=V0*cosd(θ)*t+0.5*ax*t^2	; x component of displacement
Satisfied	y=V0*sind(θ)*t+0.5*ay*t^2	; y component of displacement

Variables

Status	Input	Name	Output	Unit	Comment
		Vx	17.32050808	m/s	x component of velocity
	20	V0		m/s	initial velocity
	30	θ		deg	lanch angle
	0	ax		m/s^2	x component of acceleration
	2	t		s	time
		Vy	-9.6	m/s	y component of velocity
	-9.8	ay		m/s^2	y component of acceleration
		x	34.64101615	m	x component of displacement
		y	.4	m	y component of displacement

Fig. 2 TK Solver example for solving position and velocity of flying object with initial velocity

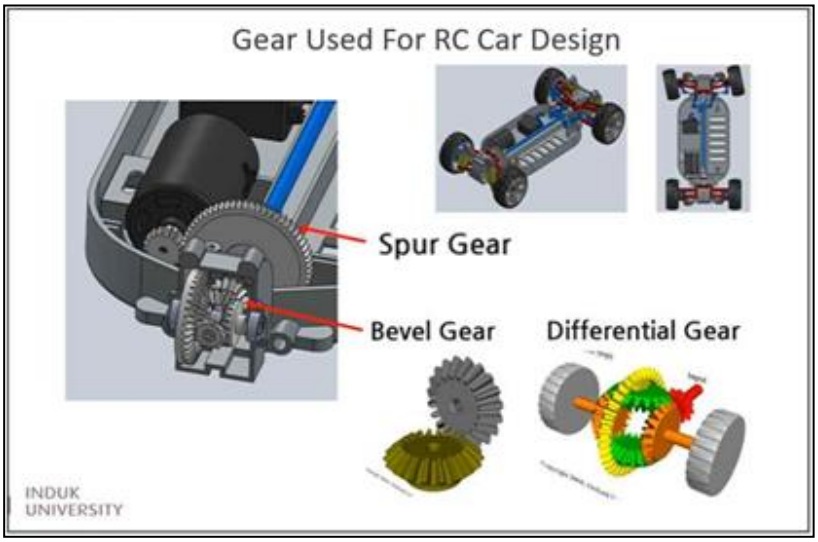


Fig. 3 Gear animation contents using flux player software

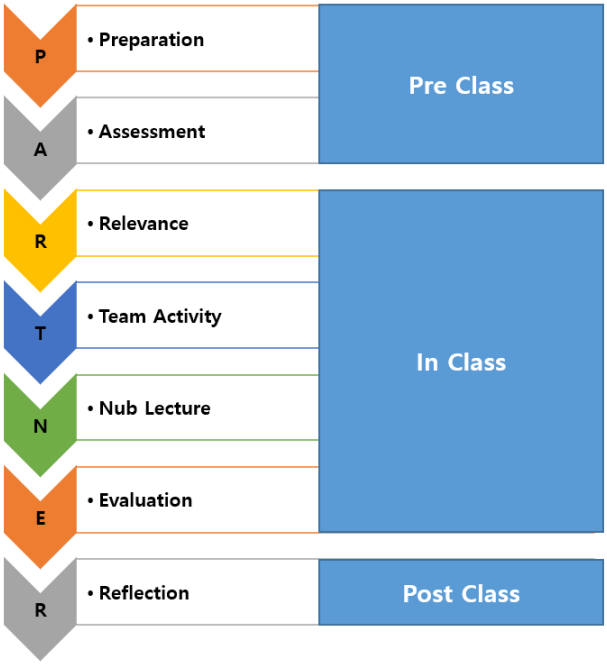


Fig. 4 PARTNER teaching & learning model for flipped learning

Practice Product Planning Process

Student Name : _____ Date of Submission : _____

Describe the process of designing the current personal mobility (electric powered single-person mobility) from an existing manual kick-board or tri-ski product according to the described design process described.

Fig.1 Manual Kick-board

Fig.2 Tri-ski Product

Fig.3 Personal Mobility

What to write

1. What are some inconveniences with traditional manual kick-boards or tri-ski products?

2. What are the improvements on current personal mobility devices over traditional manual kick-boards or tri-ski products?

3. Please propose or plan future personal mobility, including features or improvements you want to add to your current personal mobility.

Fig. 5 The contents of the team learning for the product planning process of engineering design

2.2 교수법 적용 결과

비대면 온라인 수업에서는 기어, 기어열(gear train), 벨트 등의 동력전달요소의 작동 동영상 콘텐츠와 실제 사용 사례를 포함한 내용을 학생들에게 제공함으로써, 동력전달요소에 대한 이해도를 높일 수 있었다. 이러한 상태에서 대면 실습 수업에서는 TK Solver 소프트웨어를 사용하여 기어와 벨트 등의 동력전달요소의 설계변수를 구하는 실습을 효과적으로 수행할 수 있었다.

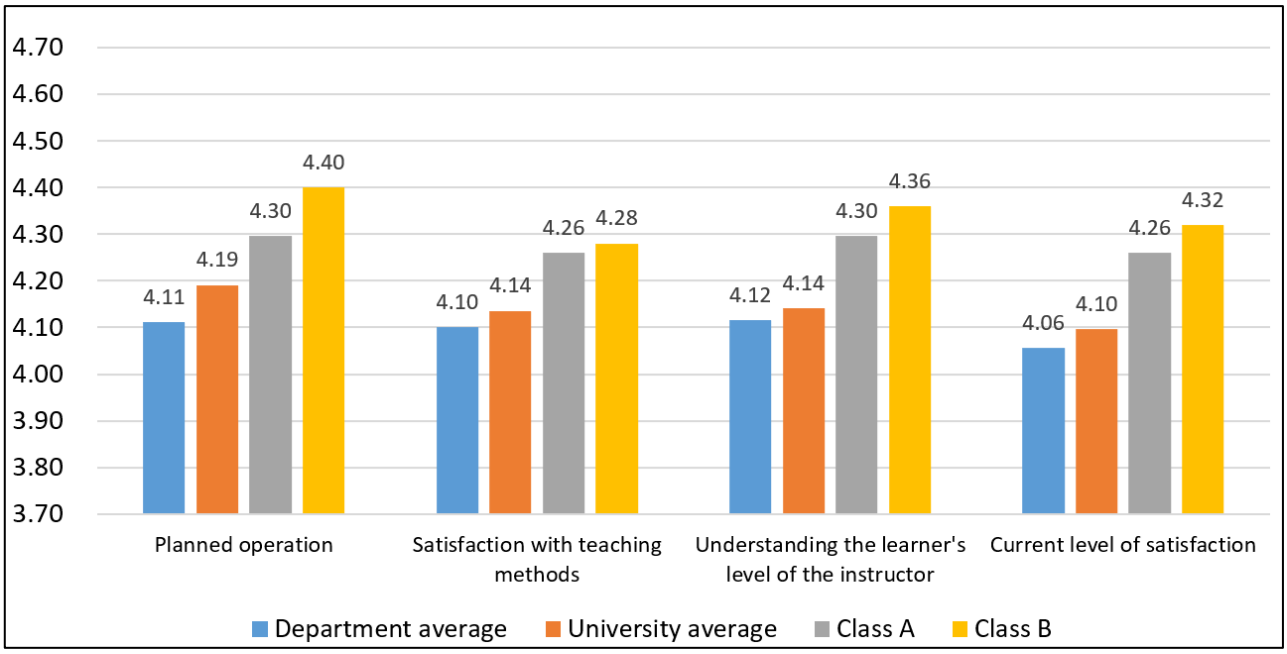


Fig. 6 Results of intermediate lecture evaluation on mechanical element design course

8주차에는 대학교 본부에서 일괄적으로 중간 교수강의 평가를 실시하였다. 계획적 운영, 교수법 만족도, 교수자의 학습자 이해 수준, 현재까지의 만족도 이상 4가지 항목에서 2학년 B반 수강생의 응답 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 5점 만점에 각각 4.40, 4.28, 4.36, 4.32점을 나타내어 학과 평균과 학교 평균을 상회하였다. 계획적 운영 항목의 설문 내용은 “수업은 강의계획서(기대했던 내용)대로 진행되고 있다”이며, 교수법 만족도 항목의 설문 내용은 “교수님의 수업 방식은 교과목 이해에 도움이 된다”였다. 교수자의 학습자 수준이해 항목의 설문 내용은 “주차별 학습량과 진도가 적절하다”였으며, 현재까지의 만족도 항목의 설문 내용은 “현재까지 진행한 수업으로 볼 때, 앞으로의 수업도 기대가 크다”였다.

15주차에는 해당 과목의 학습관리시스템의 설문 기능을 이용하여 수강생들에게 수업 방식과 만족도 등에 대한 총 16개 문항에 대한 심층 설문을 실시하였다. 이번 설문 조사를 통해 일반 대면수업과 비교하여 본 교과목 운영에서 실시한 블렌디드와 플립 러닝에 대한 학생들의 인식과 만족도를 조사하고, 본 교과목의 학습 목표인 동력전달요소 설계능력의 달성도를 조사하고자 하였다. 새로운 교수법에 대한 학생들의 인지도를 조사하기 위해 “블렌디드 러닝(비대면 온라인 수업과 대면 수업의 혼합 방식)과 플립 러닝(사전 비대면 학습 후 사후 대면 학습 방식)에 대해 어느 정도 알고 있었나요?”라는 설문에 대한 조사 결과가 Fig. 7에 나와 있다. “블렌디드 러닝과 플립 러닝에 대해 매우 잘 알고 있었다” 28.6%와 “어느 정도 잘 알고 있었다” 53.6%를 합치면 82.2%가 해당 교수법에 대해 인지하고 있는 것으로 나타났다. 새로운 교수법을 적용한 수업 방식에 대한 선호도를 조사하기 위하여 “본 과목이 블렌디드 러닝과 플립 러닝 방식으로 진행되었습니다. 이러한 수업 진행방식에 대한 의견은?”이라는 설문에 대해, Fig. 8에서 보는 바와 같이 “매우 좋았다”가 67.9%, “어느 정도 좋았다”가 25.5%, “보통이다”가 7.1%이고 “별로 안 좋았다”와 “매우 안 좋았다”는 0%로 나타났다. 블렌디드와 플립 러닝 수업 방식에 대한 긍정적인 평가가 93.4%로 매우 높았으며, 유보적 의견이 7.1%, 부정적 평가는 0%로 전반적으로 학생들이 이러한 수업 방식을 선호한다는 것을 알 수 있었다.

8주차에 실시한 중간평가에서 교수법 만족도 항목의 설문은 “교수님의 수업 방식은 교과목 이해에 도움이 된다”였으며, 15주차의 설문 내용은 “본 과목이 블렌디드 러닝과 플립 러닝 방식으로 진행되었습니다. 이러한 수업 방식에 대한 의견은?”으로 보다 구체적으로 질문 문항으로 작성하였다. 수업 방식에 대한 수강생들의 만족도는 중간평가보다 기말평가 때 A반은 8.2%, B반은 4.2% 향상하였으며, 5점 만점의 5단계 리커드 척도에서 4.60점과 4.46점으로 수업 방식에 대한 만족도가 높게 나왔다.

종강 후에 대학교 본부에서 실시한 교수강의 평가는 강의계획, 수업시간 준수, 강의내용, 학생-교수자 상호작용, 출결관리, 성적평가 등 총 8개 항목에 대한 내용으로 구성되어 있다. 기계요소설계 교과목에 대

한 강의평가는 문항 별로 편차 없이 고르게 점수가 나왔다. Fig. 9에는 교수법 적용 이전과 플립 러닝 및 블렌디드 러닝 교수법을 적용한 금년의 강의평가 평균점수를 비교하였다. 평균점수는 2학년 A반과 B반 수강생 강의평가 평균점수가 각각 4.57점, 4.55점으로 나왔다. 이는 학과 평균 4.13점, 공학계열 평균 4.29점, 대학교 전체평균 4.32점을 모두 상회한 값이다. 교수법을 적용하기 전과 비교하기 위해 이전 연도의 강의평가 평균점수를 살펴보면 A반은 4.19점이고, B반은 4.17점이었다. 따라서 A반 기준으로는 교수법 적용 이전과 이후를 비교할 때 강의평가 평균점수가 9.1%, B반의 경우에는 9.0% 향상한 결과를 나타내었다. 이로부터 교수법 적용에 의해 수강생의 만족도가 높아졌다는 것을 확인할 수 있었다.

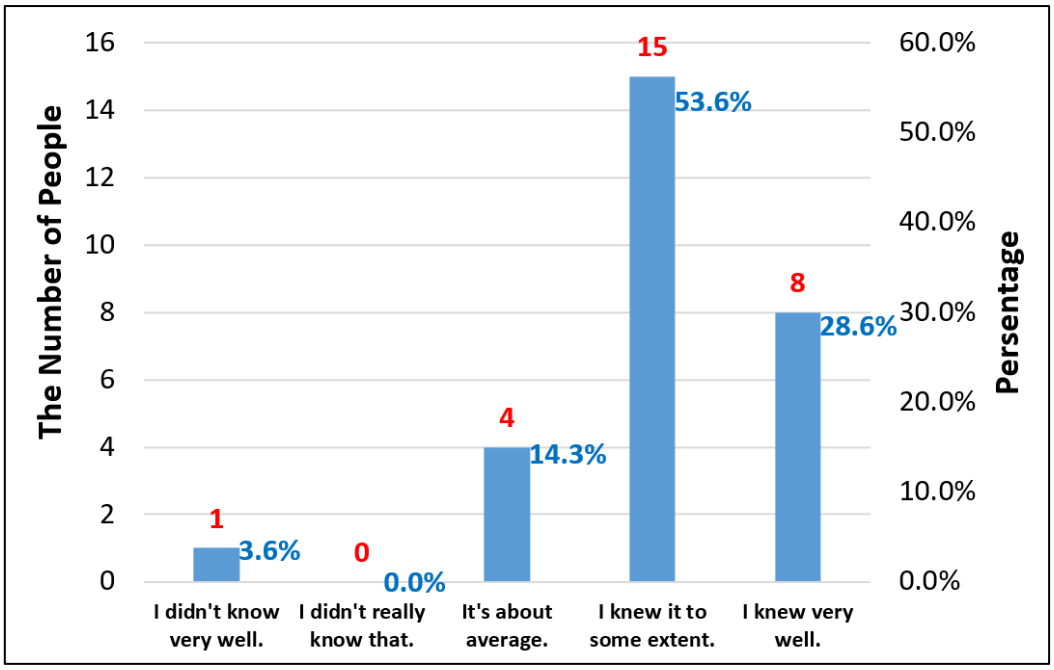


Fig. 7 Results of awareness survey on blended learning and flipped learning

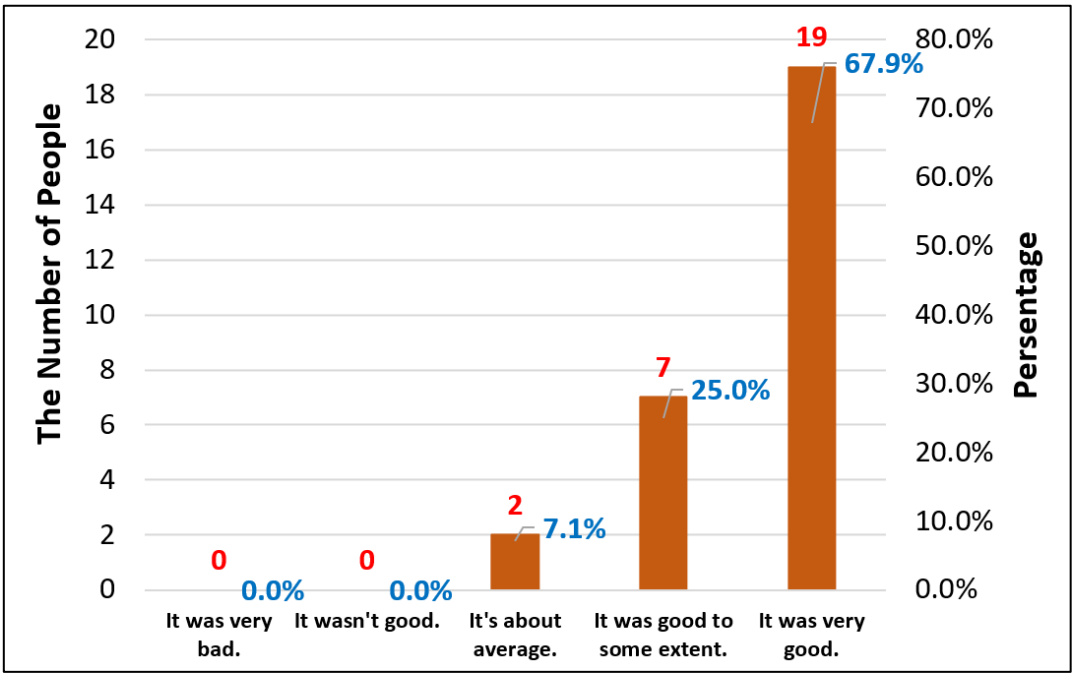


Fig. 8 Results of preference survey on blended learning and flipped learning

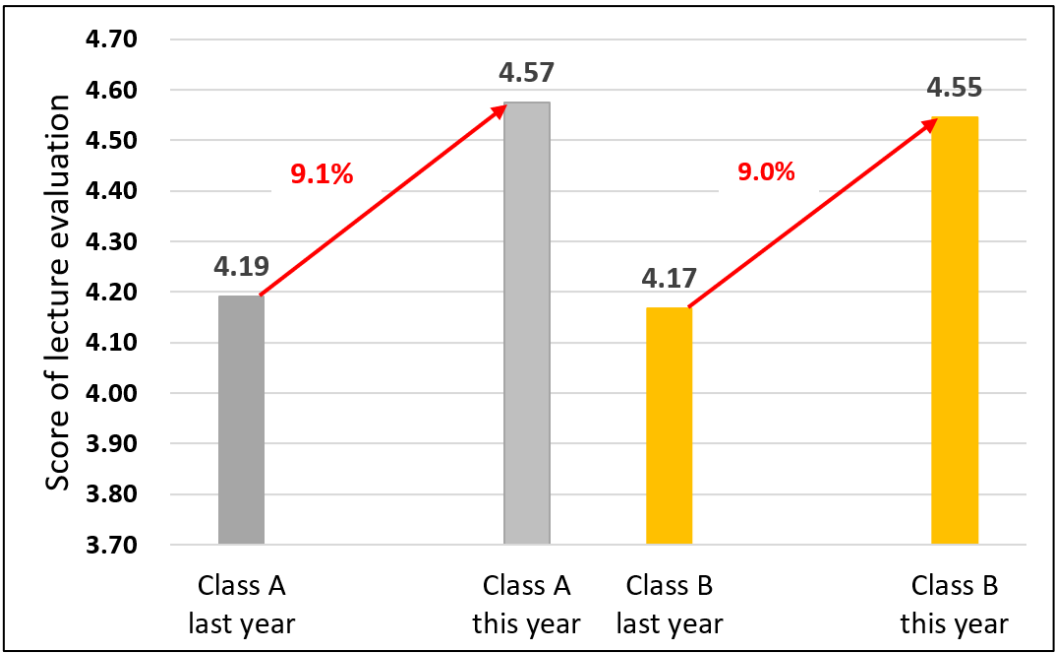


Fig. 9 Comparison of the average score of lecture evaluation this year and last year

3. 결 론

자기 주도적 학습과 학습 흥미 유발을 일으키기 위해 SMART 교수학습모형에 근거한 블렌디드 러닝 방식의 교수법을 적용하여 기계요소설계 교과목을 개발하였다. 일부 팀별 학습이 필요한 주차에는 사전 학습, 협력 학습, 평가와 사후 성찰단계로 이루어진 PARTNET 교수학습모형에 근거한 플립 러닝 방식의 교수법을 적용하여 팀별 협력 학습을 실시하였다.

설문조사를 통하여 기계요소설계 교과목은 실습 과목이지만 교육 수요자인 학생들이 대면 수업보다는 비대면 온라인 수업과 대면 수업이 혼합된 블렌디드 수업을 선호한다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 앞으로의 교과목 운영은 이러한 학습자의 수요를 반영하여 실습 과목에 대해서도 100% 대면수업보다는 블렌디드 러닝 방식을 보다 적극적으로 도입할 필요가 있다고 생각한다.

학습자의 학습 흥미를 유도하기 위해서는 교육 콘텐츠의 변화가 필요하다. 동력전달요소 설계능력 배양이라는 기계요소설계 교과목의 학습 목표를 달성하기 위해 기어 등의 동력전달요소의 작동 동영상과 사용 사례를 비대면 온라인 공간에서 제공하여 학생들이 자기 주도적으로 학습한 후에, 대면 수업에서 설계 프로그램을 사용하여 설계변수를 구하는 실습을 수행함으로써, 학생들의 참여와 학습 효과를 높일 수 있었다. 강의 평가와 설문 조사로부터 교수법을 적용한 기계요소설계 교과목에 대한 강의평가점수가 교수법 적용 이전보다 9%가량 향상하였으며, 학과와 계열 및 대학교 전체 강의평가 평균점수보다 높게 나옴으로써 학생들의 만족도가 향상되었다고 판단할 수 있다. 교육 수요자인 학생들의 만족도를 높이고 학습 효과를 달성하기 위해서는 기존의 교과목에 대한 콘텐츠와 운영 방식에 머무르지 않고, 해당 교과목에 적합한 교수법을 도입하고 교수학습 모형에 맞게 운영하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 인덕대학교 연구비에 의해 수행되었습니다.

참고문헌
(References)

(1) National Competency Standards, 2021, *Power Transmission Element Design* (https://www.ncs.go.kr/unity/hth01/hth0101/selectChkNcsCompeUnitReport.do), NCS, Ulsan, Republic of Korea, pp. 1~5.

(2) Lee, J. Y., 2020, “Research on SMART Learning Model Based on 5 Steps Using Media-Based Teaching and Learning Method,” *Public Value*, Vol. 5, No. 2, pp. 4~5.
(3) Universal Technical System, Inc., *TK Solver Software* (https://www.uts.com/Products/TKSolver), UTS, Illinois, USA.
(4) Byun, M. J. and Yang, S. J., 2021, “A Study on Instructional Design for Occupational Health Nursing Education Using Flipped Learning,” *Health & Nursing*, Vol. 33, Nol. 1, pp. 35~46.
(5) Cleghorn, W. L. and Dechev, N., 2017, *Mechanics of Machines*, Oxford Univ. Press, Oxford, UK, pp. 1~640.
(6) Han, S. M. and Rim, K, H. 2021, “A Study on The Design and Application of Non-Face-to Face Flipped Learning for Intensified Theory Subject in Engineering Education,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 9, No. 2, pp. 153~163.
(7) Lee, D. H., 2018, “Case Study of Convergence Curriculum Based on Mechanical Engineering Used Blended E-Learning Method,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 6, No. 2, pp. 103~106.

<응용기술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2024.12.1.031** ISSN 2288-3991(Online)

캠 설계를 위한 소프트웨어 활용 교육 사례 연구§

정 태 은*†
* 인덕대학교 메카트로닉스공학과

Case Study of Software Utilization Education for Cam Design

Tae Eun Chung*†
* Dept. of Mechatronics Engineering, Induk University

(Received August 20, 2023 ; Revised September 16, 2023 ; Accepted September 29, 2023)

Key Words: Cam Design(캠 설계), Software(소프트웨어), Automation(자동화), Educational Effect(교육 효과)

초록: 일정한 주기를 갖고 반복 운동을 하는 자동화 장비에 사용하는 캠과 종동절 기구를 설계하기 위해서는 캠과 종동절의 종류, 위치, 형상 등의 설계변수와 종동절의 운동 형태를 결정하여야 한다. 캠 설계에는 다양한 소프트웨어를 사용할 수 있다. Microsoft Excel 실습에서는 수식 입력줄에 운동식을 입력하면서 학생들이 정의된 종동절의 운동식의 의미를 이해하게 된다. 캠 설계 전용 소프트웨어인 CamDesign™을 이용할 경우에는 설계변수와 운동 조건을 입력한 후에 운동 그래프를 한번에 구할 수 있다. Working Model® 2D를 이용하면 캠 형상 좌표로 곡선 다각형 형태의 캠을 만든 후, 주어진 조건의 종동절을 만들어서 동작을 구현할 수 있다. 캠을 설계할 수 있는 소프트웨어마다 기능과 결과물의 형태가 다르므로, 교육 효과에 맞게 다양한 소프트웨어를 이용하는 것이 바람직하며, 소프트웨어의 특성에 맞는 학습 목표를 제시하는 것이 중요하다.

Abstract: It is necessary to design a cam and a follower used in automation equipment that performs repetitive movements with a certain period. For this design, the designer must determine the design variables such as the type, position, and shape of the cam and the follower, and the form of motion of the follower. In Microsoft Excel practice, students understand the meaning of the defined formula. When using CamDesign™, students can obtain diagrams at once after entering design variables and motion conditions. Using Working Model® 2D, students can simulate the movement of the cam and follower. Since each cam design software has different functions and types of results, it is desirable to use various software according to the educational effect, and it is important to present learning objectives that fit the characteristics.

1. 서 론

1.1 자동화를 위한 캠 설계

일정한 주기를 갖고 반복 운동을 하는 자동화 장비에 사용하는 캠(cam)과 종동절(follower) 기구를 설계하기 위해서는 캠과 종동절의 종류, 위치와 형상 등의 설계 변수와 종동절의 운동 형태를 결정하여야 한다. 캠은 일반적인 기구 요소이며, 캠과 짝이 되는 종동절을 구동한다. 대부분의 경우에 캠은 일정한 속도로 회전하며, 종동절은 여러 종류의 운동식에 따라 변위, 속도, 가속도 등 운동 특성에 관련한 값을 갖는다. 캠 기구가 사용되는 사례 중에서 대표적인 것으로 자동차 엔진의 흡기 밸브와 배기 밸브를 여닫는 밸브 트레인(valve train)에 캠 기구가 사용된다. 상자를 아래 이송대에서 위 이송대로 반복적으로 들어올리는 작업을 하기 위한 승강장이나, 컨베이어 벨트 시스템의 자동 부품 적하기(automated part loader), 공작기계 등에 캠 기구가 사용된다.(1)

§ 이 논문은 대한기계학회 2023년 교육부문 춘계학술대회(2023. 6. 23., 서울대학교) 발표 논문임.
† Corresponding Author, techung@induk.ac.kr
ⓒ 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

캠 기구는 종동절 기구와 직접 접촉을 하면서 미리 정의된 시간 동안에 원하는 운동을 반복적으로 수행하도록 설계된다. 캠 기구는 비교적 구조가 간단하면서도 이와 연동하는 종동절의 다양하고 복잡한 운동을 발생시기 때문에 기구학 등의 교과목에서 설계 실습을 수행하는데 좋은 설계 사례가 된다.

1.2 캠 설계와 관련한 소프트웨어

캠과 종동절의 운동식을 계산하기 위해 일차적으로 스프레드시트 소프트웨어인 Microsoft Excel을 이용할 수 있다. 범용 소프트웨어인 Excel 사용 시에는 수식입력줄에 운동식을 입력하여 계산을 수행할 수 있고, 차트 마법사(chart wizard) 기능을 이용하여 운동과 관련한 차트를 손쉽게 그릴 수 있다. 캠 전용 소프트웨어로는 토론토 대학교의 Cleghorn 교수 연구실에서 개발한 CamDesign™[(2)]이 있다. 이 소프트웨어는 판형 캠(plate cam)과 다양한 형상의 종동절을 설계할 수 있으며, 설계 변수(design parameters)와 캠각 변화에 따른 종동절의 운동방정식(equations of motion)의 종류를 입력함으로써, 손쉽게 운동 특성을 얻을 수 있다. 또한 중첩(superimpose) 기능을 이용하여 설계 원안과 설계 변경안을 비교 분석할 수 있다. 2차원 기구동역학 소프트웨어인 Working Model® 2D[(3)]는 Design Simulation Technologies사에서 개발하였다. 이 소프트웨어는 기구 뿐만 아니라 여러 기계요소를 모델링하여 물리적 시제품 제작(physical prototyping)을 하여 기구동역학 해석과 시뮬레이션을 할 수 있다. 캠 형상 데이터를 이용하여 다각형 물체(polygon body)로 캠을 모델링하고 정의된 종동절을 모델링하여 접촉에 의한 캠과 종동절의 운동을 시뮬레이션할 수 있기 때문에, 실제 동작을 확인하기 위해 Working Model® 2D를 사용하는 것이 효과적이다. 캠과 종동절 설계와 관련한 소프트웨어의 특징과 차이점에 대해 알아보고, 각 소프트웨어를 사용하는데 따른 교육적 효과를 다루고자 한다.

2. 소프트웨어별 캠 설계 사례

2.1 사례 정의

일반적인 캠과 종동절 설계 사례를 다루기 위하여 자동 부품 적하기(automation part loader)를 대상으로 하였다. 자동 부품 적하기의 플랫폼(platform)을 움직이기 위한 종동절의 규정된 운동은 다음과 같다.[(1)]

1) 조화 운동으로 15초 내로 15 cm를 상승(rise)한다.
2) 2초 동안 머물러 있는다.
3) 조화 운동으로 15초 내로 원래 위치로 되돌아온다(fall).
4) 2초 동안 일시 정지(dwell) 한다.

이러한 순서를 반복한다.

자동 부품 적하기에 반지름 0.5 cm인 일렬 롤러 종동절(in-line roller follower)이 반지름 3.5 cm인 기초원(base circle)을 지닌 캠 위에 사용된다. 종동절이 조화 운동(harmonic motion)으로 상승할 경우에 종동절의 운동식은 Table 1과 같다.[(1)] 이상과 같이 정의된 캠 설계 사례에 대해 전체 주기 7초 동안 캠이 일정 속도로 회전할 때 종동절의 운동을 구하고 캠 형상을 구하면서, 세 종류의 캠 설계 소프트웨어의 특징, 차이점, 각 소프트웨어 사용 시 교육 효과를 비교하고자 한다.

Table 1 Cam follower kinematics for harmonic motion[(1)]

Motion	Rise	Fall
Displacement	$\Delta R_i = H_o + \frac{H_i}{2}[1 - \cos(\frac{\pi t_i}{T_i})]$	$\Delta R_j = H_F + \frac{H_j}{2}[1 + \cos(\frac{\pi t_j}{T_j})]$
Velocity	$v_i = \frac{\pi H_i}{2T_i} \sin(\frac{\pi t_i}{T_i})$	$v_j = -\frac{\pi H_j}{2T_j} \sin(\frac{\pi t_j}{T_j})$
Acceleration	$a_i = \frac{\pi^2 H_i}{2\,T_i^2} \cos(\frac{\pi t_i}{T_i})$	$a_j = -\frac{\pi^2 H_j}{2\,T_j^2} \cos(\frac{\pi t_j}{T_j})$

Table 2 Excel sheet for cam follower motions

	A	B	C	D	E	F	G
1	time,t	cam angle,Φ	displacenet,s	velocity, v	inst. anlge,α	Rx	Ry
2	(sec)	(deg)	(cm)	(cm/s)	(deg)	(cm)	(cm)
3	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.000	3.500
4	0.25	12.9	0.10	0.79	12.05	-0.905	3.498
5	0.50	25.7	0.38	1.36	19.11	-1.841	3.445
6	0.75	38.6	0.75	1.57	20.22	-2.804	3.239
7	1.00	51.4	1.13	1.36	16.47	-3.720	2.786
8	1.25	64.3	1.40	0.79	9.20	-4.455	2.057
9	1.50	77.1	1.50	0.00	0.00	-4.875	1.113
10	1.75	90.0	1.50	0.00	0.00	-5.000	0.000
11	2.00	102.9	1.50	0.00	0.00	-4.875	-1.113
12	2.25	115.7	1.50	0.00	0.00	-4.505	-2.169
13	2.50	128.6	1.50	0.00	0.00	-3.909	-3.117
14	2.75	141.4	1.50	0.00	0.00	-3.117	-3.909
15	3.00	154.3	1.50	0.00	0.00	-2.169	-4.505
16	3.25	167.1	1.50	0.00	0.00	-1.113	-4.875
17	3.50	180.0	1.50	0.00	0.00	0.000	-5.000
18	3.75	192.9	1.40	-0.79	-9.20	1.014	-4.801
19	4.00	205.7	1.13	-1.36	-16.47	1.888	-4.247
20	4.25	218.6	0.75	-1.57	-20.22	2.534	-3.455
21	4.50	231.4	0.38	-1.36	-19.11	2.949	-2.561
22	4.75	244.3	0.10	-0.79	-12.05	3.209	-1.661
23	5.00	257.1	0.00	0.00	0.00	3.412	-0.779
24	5.25	270.0	0.00	0.00	0.00	3.500	0.000
25	5.50	282.9	0.00	0.00	0.00	3.412	0.779
26	5.75	295.7	0.00	0.00	0.00	3.153	1.519
27	6.00	308.6	0.00	0.00	0.00	2.736	2.182
28	6.25	321.4	0.00	0.00	0.00	2.182	2.736
29	6.50	334.3	0.00	0.00	0.00	1.519	3.153
30	6.75	347.1	0.00	0.00	0.00	0.779	3.412
31	7.00	360.0	0.00	0.00	0.00	0.000	3.500

2.2 Microsoft Excel 이용 사례

Microsoft Excel 소프트웨어를 이용할 때에는 학생들이 수식입력줄에 Table 1에 나와 있는 조화 운동 상승식과 하강식을 입력하면서 조화운동에 사용하는 운동식의 의미를 이해하게 된다. Table 2는 이러한 방식으로 구한 캠과 종동절의 운동 및 캠 형상의 x, y 좌표값의 계산 결과 데이터가 나와 있다. Table 2에서 A열은 시간, B열은 캠각, C열은 종동절의 변위, D열은 종동절의 속도, E열은 캠과 롤러 종동절의 순간 접촉각(instantaneous contact angle), F열은 캠 형상의 x 좌표값, G열은 캠 형상의 y 좌표값이다. Excel의 차트 마법사(chart wizard)를 이용하여 변위 선도(displacement diagram)와 속도 선도(velocity diagram)를 Fig. 1과 같이 구할 수 있다. Fig. 1의 속도 선도의 형태는 전형적인 조화 운동의 속도 선도의 형태임을 확인할 수 있다. 캠 형상은 Table 2의 캠 형상 좌표값 데이터로부터 차트 마법사의 분산형 차트를 이용하여 Fig.2(a)와 같이 나타낼 수 있다. 도형을 삽입하여 기초원, 캠의 회전 중심과 회전 방향, 일렬 롤러 종동절을 그려서 해당 설계 사례의 조건을 표현할 수 있으며, 학생들은 Excel에서 구한 데이터가 Fig. 2(a)와 같은 캠과 종동절로부터 얻어진 운동이라는 것을 확인할 수 있다.

2.3 전용 소프트웨어 CamDesign 이용 사례

캠을 전용으로 설계하기 위한 CamDesign™ 소프트웨어에서는 종동절의 형상과 운동 종류, 캠의 기초원의 지름 등의 설계변수를 Fig. 3의 design 메뉴에 입력한 후에, Fig. 4의 motion 메뉴에서 운동 조건을 입력하면, Fig. 5의 display 메뉴를 이용하여 Fig. 6에서 보는 바와 같은 변위, 속도, 가속도, 저크(jerk), 압력각의 데이터와 그래프를 한번에 구할 수 있다. 최대값이 다른 변위, 속도 등의 운동 데이터를 한번에 나타내고 일반화하기 위해, Fig. 6의 그래프에서 가로축은 캠의 회전각에 대해 나타냈으며 세로축의 변위, 속

도, 가속도, 저크, 압력각은 각각의 최대값으로 데이터를 나눠서 표현하는 정규화 과정(normalized process)을 거쳐서 여러 그래프를 한번에 표시하였다. Fig. 5의 display 메뉴에서 show contour 메뉴를 선택하면 Fig. 2(b)와 같이 캠과 종동절의 형상을 나타낼 수 있으며 애니메이션 기능을 이용하여 동작을 구현하면서 캠이 종동절에 압력을 가하면서 종동절의 상하 운동을 발생시키는 것을 확인할 수 있다.

캠 전용 설계 용도인CamDesign™ 소프트웨어에서는 설계변수의 입력이 중요하며, Table 3과 같은 설계변수를 Fig. 3의 design 메뉴에서 입력한다. 캠각의 변화에 따른 규정된 종동절의 운동은 Table 4와 같으며, 이 데이터를 Fig. 4의 motion 메뉴에 입력함으로써 Excel에서의 작업보다 훨씬 빠른 작업 시간에 결과를 얻을 수 있다.

CamDesign™을 사용하면 설계변수를 변경할 때 결과가 어떻게 달라지는지를 바로 확인할 수 있으며, 중첩(superimpose) 기능을 이용하여 설계변수가 변경되었을 때 그래프나 캠 형상의 변화를 비교하여 분석할 수 있다. 이러한 캠 설계 전용 프로그램의 장점을 이용하면 학생들이 현장에서 설계 변경이 어떻게 이루어지는지를 훈련할 수 있다. 예를 들어 현재의 일렬 롤러 종동절 설계 문제에서 편심량(offset value)이

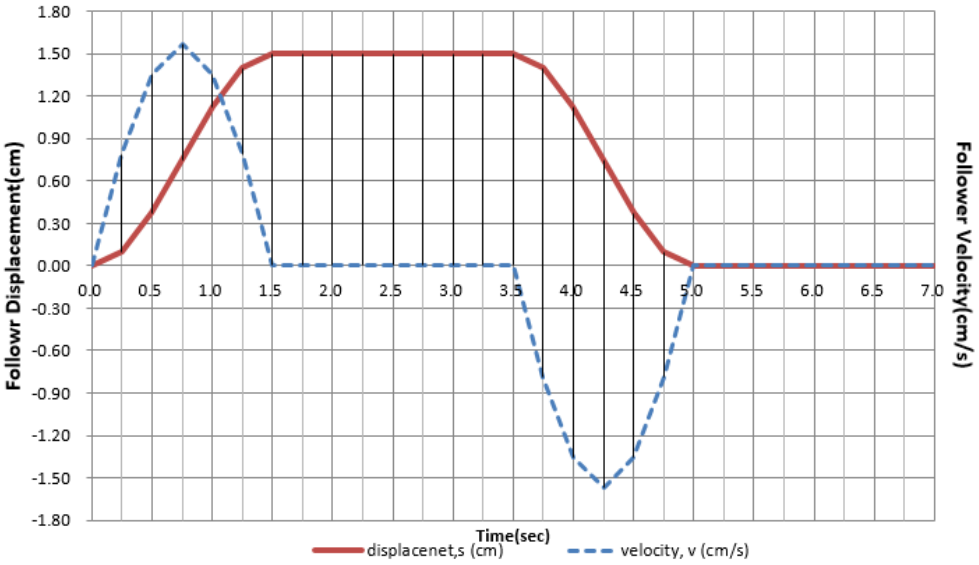
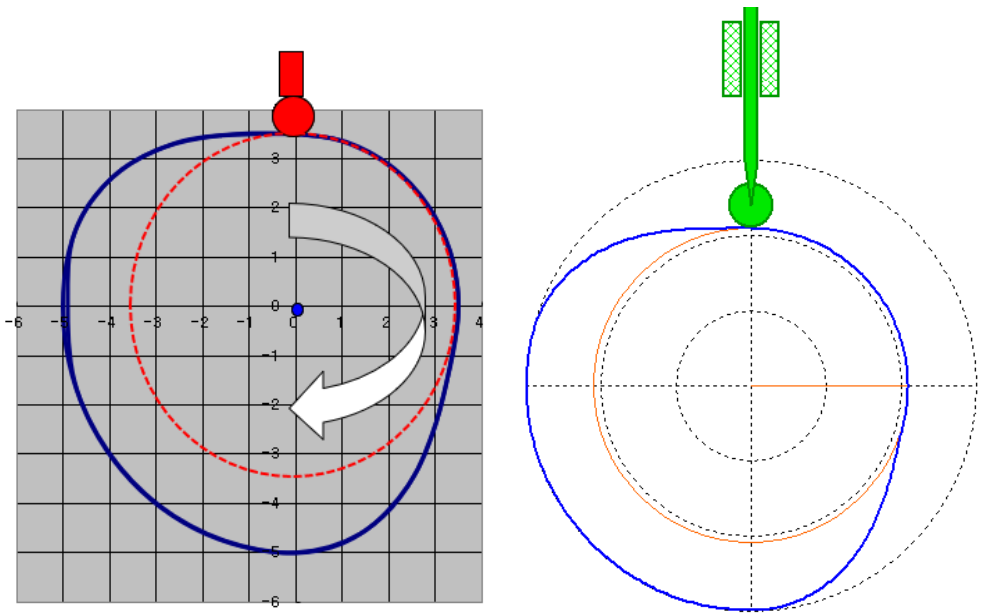


Fig. 1 Displacement diagram and velocity diagram



(a) Cam profile form Excel chart wizard (b) Cam profile from CamDesign™ display

Fig. 2 Comparison of cam profiles with Excel and CamDesign™ output

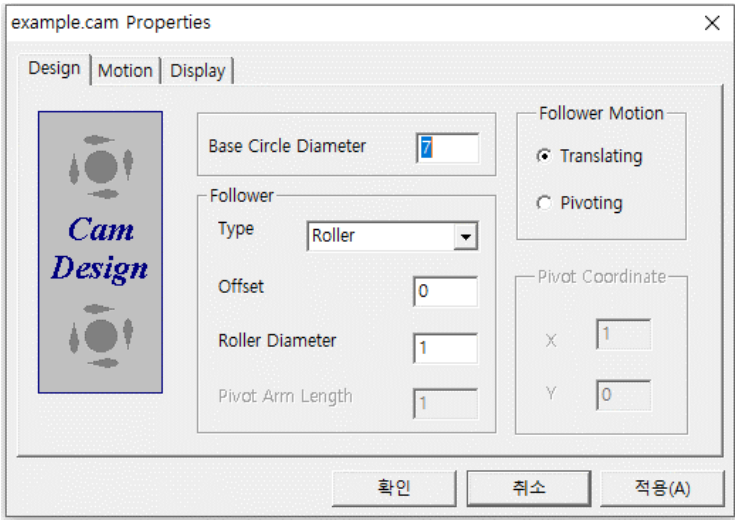


Fig. 3 Design menu for design variables

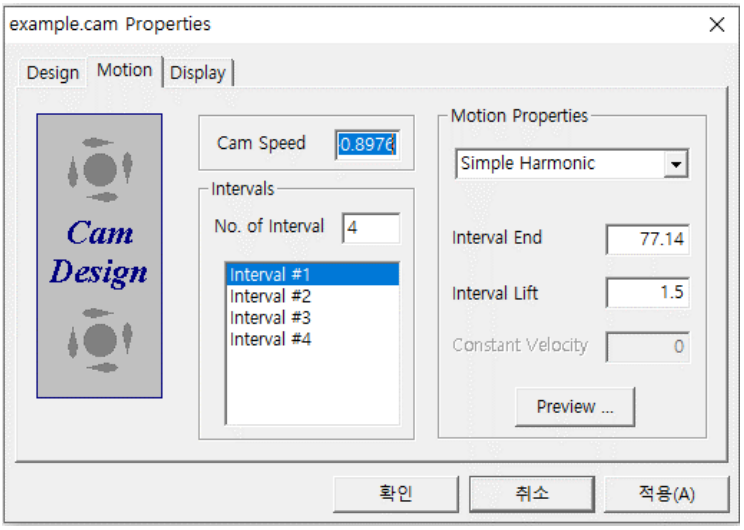


Fig. 4 Motion menu for cam speed, intervals and motion properties

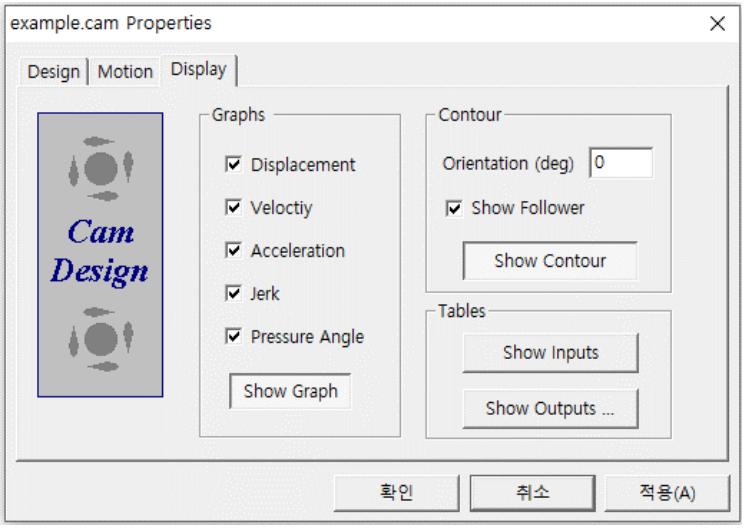


Fig. 5 Display menu for graphs, contour and tables

1 cm로 변경된 문제를 대안 설계(alternative design)라고 하였을 때, 원래 설계(original design)와 대안 설계에 대한 캠 형상과 변위선도 등을 비교할 수 있다.

2.4 Working Model® 2D 이용 사례

2차원 기구동역학 소프트웨어인 Working Model® 2D를 사용하면 캠과 종동절 기구를 바디로 모델링한 후에 접촉 해석을 하면서 운동을 애니메이션 할 수 있다. Fig. 7(a)과 같이 먼저 간단하게 4점을 선택하여 임의의 곡선 다각형 바디(curved polygon body)를 만든 후에 Table 2의 F와 G열의 캠 형상 좌표를 복사하여 붙여 넣으면 Fig. 7(b)와 같이 캠 형상의 바디를 생성할 수 있다. 캠 좌표의 원점이 회전 중심이 되므로 원점에 모터를 생성하고 캠의 회전속도를 입력하면 캠의 일정속도 회전운동을 구현할 수 있다. 최종적으로 Fig. 8과 같이 일렬 롤러 종동절을 y축 선상에 만들어서 동작을 애니메이션을 할 수 있으며, Measure 메뉴를 이용하여 실시간으로 변하는 종동절의 변위, 속도, 가속도선도를 나타낼 수 있다.

Table 3 Design parameters for in-line roller follower and plate type cam

Design parameters	Value
Basic circle diameter	7 cm
Follower type	Roller type
Follower motion	Translating motion
Offset value	0 cm (in-line)
Roller diameter	1 cm

Table 4 Specified follower motion

Interval No.	Interval starting	Interval ending	Motion type	Lift
1	0 deg	77.1 deg	Harmonic	1.5 cm
2	77.1 deg	180 deg	Dwell	0 cm
3	180 deg	257.1 deg	Harmonic	-1.5 cm
4	257.1 deg	360 deg	Dwell	0 cm

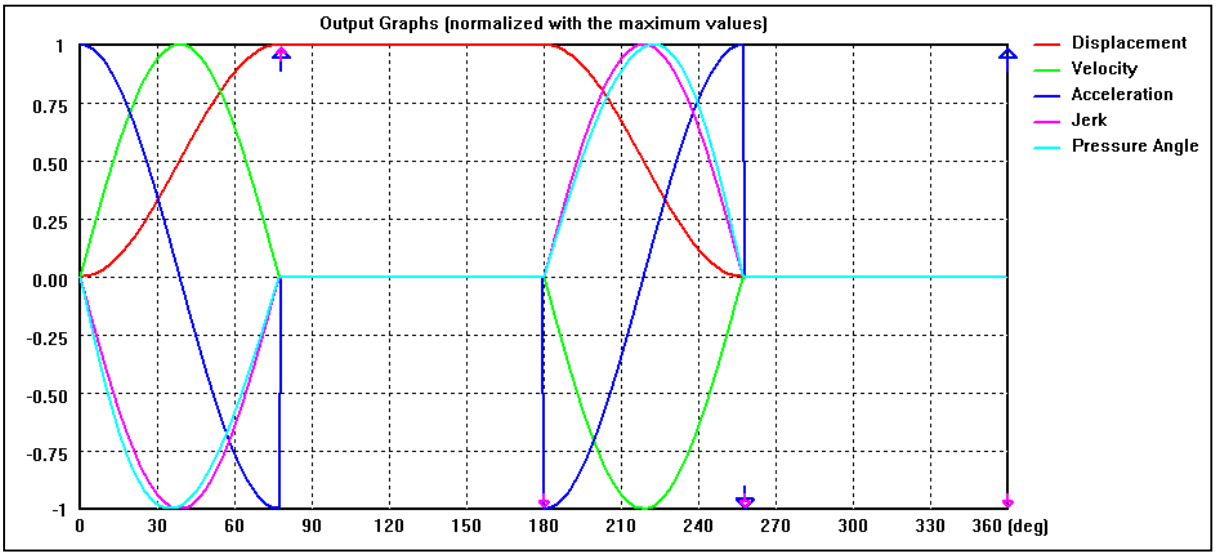
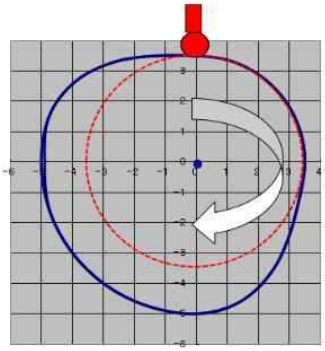
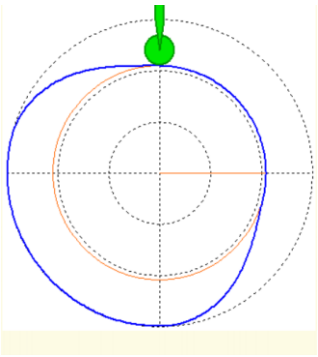
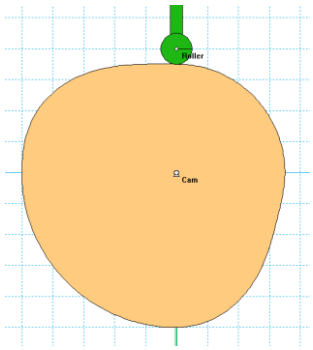


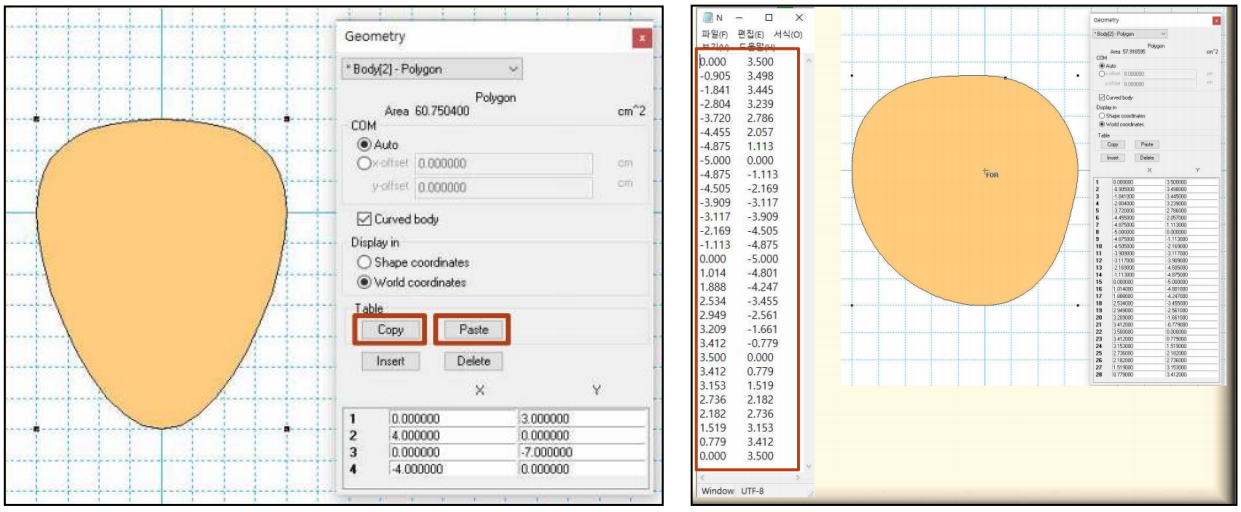
Fig. 6 Output curves normalized with the maximum values

2.5 캠 설계 소프트웨어 비교

캠 설계를 하기 위한 소프트웨어로 사무자동화 범용 소프트웨어인 Microsoft Excel과 캠 전용 설계 소프트웨어인 CamDesign™, 2차원 기구동역학해석 소프트웨어인 Working Model® 2D에 대한 캠 설계 사례를 살펴보았으며, 각 소프트웨어에 대해 제조사, 사용권한, 주 사용처, 특징, 교육 효과, 결과물인 캠 형상에 대한 요약 비교를 Table 5에 수록하였다.

Table 5 Comparison of features according to the cam design software

Contents	Microsoft Excel	CamDesign™	Working Model® 2D
Maker	Microsoft	Professor Cleghorn's Lab (Univ. of Toronto)	Design Simulation Tech
License	Microsoft Office 365	Freeware	Commercial
Usage	Office automation	Private cam design	2D kinematics & dynamics
Characteristics	Formula bar, chart wizard	Design, motion, display menu & animation	Fast run-analyze-refine cycle
Educational effects	Understanding the motion equations	Understanding design parameters of cam & follower	Applying physical prototyping, quick build, quick run & animation
Cam profiles			



(a) Any curved polygon body with 4 points (b) Defined cam polygon body using coordinates

Fig. 7 Procedure of creating a defined cam polygon body using cam coordinates

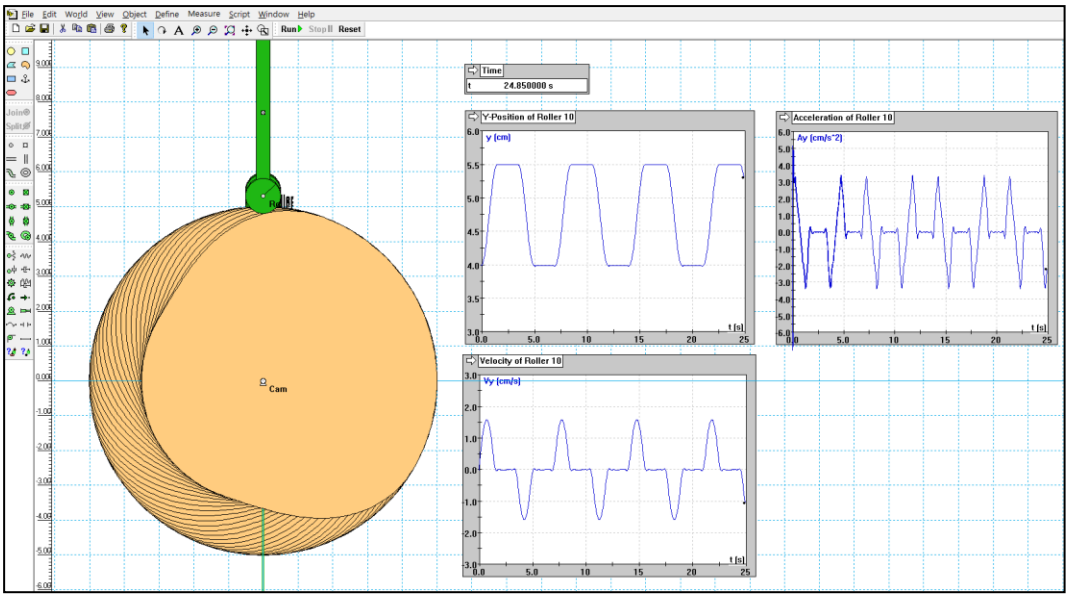


Fig. 8 Cam and follower model and animation by Working Model® 2D

3. 결 론

캠과 종동절의 운동을 구하는데 Microsoft Excel을 사용하면 학생들이 수식입력줄에 운동식을 입력하여 운동을 구함으로써 조화 운동, 사이클로이드 운동 등 해당 운동식의 의미를 이해할 수 있다.

캠 설계 전용 소프트웨어인 CamDesign™을 사용하면 학생들이 캠을 설계하는데 필요한 설계 변수와 운동식을 입력하여 캠 설계를 빠르고 손쉽게 할 수 있다. 이러한 과정을 통하여 캠 설계자는 설계변수의 의미를 이해하면서 캠과 종동절을 설계할 수 있으며, 설계변수를 다르게 적용한 설계 변경에 따른 결과를 신속하게 얻어서 비교 분석을 할 수 있다.

CamDesign™과 Working Model® 2D와 같이 애니메이션 기능이 있는 소프트웨어를 사용하면 캠의 회전에 따른 종동절의 운동을 볼 수 있으므로 학생들이 캠과 종동절의 운동을 직관적으로 이해하는데 도움이 된다. 이차원 기구동역학 해석 소프트웨어인 Working Model® 2D는 복잡한 수식 없이도 새로운 캠과 종동절 기구를 만들 수 있기 때문에 창의 설계를 하는데 유용하게 사용될 수 있으며, 프로토타입을 2차원 공간에서 제작하여 검증을 할 수 있다. 캠 설계 소프트웨어마다 기능과 결과물이 다르므로, 한 가지 소프트웨어를 사용하는 것보다 교육 효과에 맞게 다양한 소프트웨어를 사용하는 것이 바람직하다.

참고문헌
(References)

(1) Myszka, D. H., 2011, *Machine and Mechanisms: Applied Kinematic Analysis*, Pearson, London, England, pp. 223~231.
(2) Cleghorn, W. L. and Dechev, N., 2017, *Mechanics of Machines*, Oxford University Press, Oxford, England, pp. 371~396.
(3) DST, 2010, *Working Model 2D User Guide*, Design Simulation Technologies, Inc, Canton, USA, pp. 63~67.
(4) Kim, J. H., Lee, M. G., Park, J. H. and Kim, J. K., 2022, “Effects of a Cognitive Flexibility Hypertext Learning Environment for University Software Education,” *J. of Korea Multimedia Soc.*, Vol. 25, No. 12, pp. 1698~1713.
(5) Kim, C. B. and Yang, M. Y., 1993, “A Study on Design and Manufacture of Spatial Cams,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 17, No. 6, pp. 132~137.

<응용기술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2024.12.1.039** ISSN 2288-3991(Online)

PPBL 모델을 적용한 협업과 창의성 강화를 위한 교육 방법론 적용 사례§

윤 재 현* · 박 찬 수**†
* 서울사이버대학교 AI 스마트팜학과, ** 서울사이버대학교 전기전자공학과

Application of PPBL Model for Enhancing Collaboration and Creativity: A Case Study of Educational Methodology

Jaehyun Yoon* and Chan-Soo Park**†
* Dept. of AI Smart Farm, Seoul Cyber Univ.,
** Dept. of Electrical Engineering, Seoul Cyber Univ.

(Received September 3, 2023 ; Revised November 7, 2023 ; Accepted November 25, 2023)

Key Words: Puzzle Problem Based Learning(퍼즐 문제중심 학습), On-Flex(온라인 유연학습 모델), Rubric Evaluation(루브릭 평가), Drone(드론)

초록: 문제중심 학습 PBL(problem based learning)은 혁신적인 교육방법으로 주목받고 있다. 하지만 서울사이버대학교는 온라인 대학의 특성상 성인학습자들의 업무 환경에 다라 학생들과의 협업, 대면 미팅 등의 어려움으로 전통적인 PBL 모델 방식의 교육에 어려움이 있다. 따라서, PPBL(puzzle problem based learning)이라는 교육 모델을 연구하여 온라인 수업에 적용하였으며, On-Flex(online flexible)의 교육 모델로 교과과정 및 학사제도 유연화를 이루었다. 이를 통해 학습자들은 시간과 장소에 구애받지 않고 자신의 일정과 환경에 맞추어 강의를 수강할 수 있는 유연하고 개인화된 온라인 학습 환경을 경험할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 PPBL 방식과 On-Flex 교육 기반은 교육 혁신을 위한 유용한 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract: Problem Based Learning (PBL) is an innovative educational method that has gained attention. However, Seoul Cyber University faces difficulties in implementing traditional PBL models due to the nature of online universities and the work environment of adult learners, such as collaboration and face-to-face meetings. Therefore, the university has researched and applied the Puzzle Problem Based Learning (PPBL) model to online courses, achieving flexibility and personalization through the Online-Flexible(On-Flex) educational model. This allows learners to experience a flexible and personalized online learning environment that accommodates their schedules and environments. The PPBL and On-Flex models proposed in this paper can be utilized as useful methods for educational innovation.

1. 서 론

본 논문은 온라인 학습을 기반으로 운영하는 사이버대학에서의 PPBL(puzzle-problem based learning) 모델 수업 적용 사례를 다루고 있다. 현대 사회에서 빠르게 변화하는 지식과 기술의 발전으로 인하여 학생들이 단순히 지식을 습득하는 것 보다는 문제 해결 능력과 창의력을 키워야 한다는 요구가 점점 커지고 있는 실정이다. 과거 학습에서는 배운 지식만으로도 업무를 수행하거나, 적용하기에는 충분하였으나 지식사회의 변화로 사회는 평생 학습자, 창의적 문제해결자, 자기주도적 학습자들을 사회에서는 요구하고 있다. 따라서 이와 같은 사회적 요구를 반영하기 위하여 국내뿐만 아니라 전세계 교육에서는 학습자

§ 이 논문은 대한기계학회 2023년 교육부문 춘계학술대회(2023. 6. 23., 서울대학교) 발표 논문임.
† Corresponding Author, cspark@iscu.ac.kr
Ⓒ 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

중심의 교육 환경으로 변화를 이루고 있다. 학습자 중심의 학습은 일반적인 교수자의 주입식 학습 대신에 학습자의 능동적, 자기주도적의 학습 프로그램을 통하여, 다양한 학습 환경의 통합과 협업, 교육의 창의성 등을 중요시하고 있다. 이러한 교육 학습은 학습자의 지식과 경험을 토대로 하여 문제를 해석하고 의미를 부여함으로써 다양한 분야의 지식과 경험과의 관계를 통해 새로운 지식을 재구성할 수 있다. 이는 학습자 자신이 능동적인 해결에 새로운 지식을 습득하게 된다.[1~5]

이러한 문제 해결 방법에 문제중심 학습 PBL(problem based learning)은 혁신적인 교육 방법으로 주목받고 있다.[1,2,4] 이 방법은 단순히 지식을 습득하는 것보다는 문제 해결 능력과 창의력을 키우는 것을 목적으로 한다. 학습자들은 실제 문제를 해결하면서 지식을 습득하고, 팀원들과 협력하여 문제를 해결하는 과정에서 소통과 협업 능력도 함께 키울 수 있는 방법으로 현대 사회의 요구에 적합한 교수학습법이라 할 수 있다. 하지만, 서울사이버대학교는 온라인 대학의 특성상 성인학습자들의 업무 환경에 따라 학생들과의 협업, 대면 미팅 등의 어려움으로 전통적인 PBL 모델 방식의 교육에 어려움이 있다. 따라서 PPBL이라는 교육 모델을 연구하여, 온라인 수업에 적용하였으며, On-Flex(online-flexible)의 교육 모델로 교과과정 및 학사제도 유연화를 이루었다.[6,7]

PPBL 학습 모델은 공통적인 최종 목표를 해결하기 위하여 퍼즐을 맞추어 완성하듯이 조원의 각자 임무를 배정하고 그 결과를 통해 최종 목표를 해결하는 형식의 학습 방법 모델이다. 본 교육 모델은 각자의 개별 과제로 보이나, 조원의 하나의 임무가 해결되어야 다음 임무가 진행되어지는 형태임으로 모든 일정에서 모든 조원들이 모여 협업하는 형태가 아닌 결과를 주고받는 인원들과의 모임으로 협업의 인원을 최소화할 수 있도록 하는 문제 해결 방식이다. 이러한 모델을 통하여 분야의 세분화를 이루고 문제해결에 따른 책임감 부여, 이후 진행되는 과제와의 연계성, 문제 수정능력 등을 스스로 습득할 수 있는 온라인 교육에서의 효과적인 모델이다.

On-Flex는 서울사이버대학교에서 제공하는 온라인 교육 시스템 및 방법론이다. 학생들이 시간과 장소에 구애받지 않고 자신의 일정과 환경에 맞추어 강의를 수강할 수 있는 유연하고 개인화된 온라인 학습 환경을 제공한다.

본 On-Flex 학습 방법론과 PPBL의 교과과정은 2022년도부터 시행되어지고 있으며, 학생들의 참여율 및 강의 평가도 높은 편이다. 이러한 모델 구축을 통하여 학생들의 자기 주도적인 학습을 촉진시키며, 학생들의 자발적 참여도 향상 및 온라인 대학에서의 실습 수업의 제한영역을 감소시킬 수 있다

2. 수업 설계

2.1 퍼즐 문제 중심 학습(PPBL)

본 연구의 대상은 국방기술전공 현역 군인 재학생들의 대상으로 시범 적용되었다. 군 재학생들의 제한적 학습 여건에 따라 협업, 대면 미팅 등의 제한적인 환경에 크게 제한되고 있으며, 본 수업방식의 형태에 가장 적합한 대상이라 할 수 있다.

본 수업은 군에서 가장 관심도가 높고 군에서의 학습 요구가 가장 많은 드론을 대상으로 진행하였다. 3인 1개조로 구성하여 드론을 운영하고 유지보수할 수 있는 능력을 습득하기 위한 과정으로써 드론의 비행 원리 학습, 드론의 조종능력, 설계 능력과 더불어 드론의 자율비행인 코딩 능력 등을 배양하고자 하였다.

PPBL은 공통적인 최종 목표를 해결하기 위한 퍼즐형 문제 중심 학습 모델 방법이다. 전체적인 퍼즐을 완성하기 위하여 각자 한 조각의 퍼즐을 완성시켜 조합을 하는 방식이다. 각각의 퍼즐의 임무는 요소설계, 3D 형상 구현(3D CAD, 3D printing), 임무비행 3가지 과제로 구성되어있다.

일반적인 문제중심 학습 PBL과 다른 점은 모든 조원들이 소통과 협업이 필요 없다는 것이다. PPBL의 문제 해결방법은 다음 Fig. 1과 같다.

본 수업의 대상은 드론이며, 드론 운영에서의 가장 중요한 프로펠러의 설계를 통해 최종 드론 비행 임무를 수행하는 것이다.

조원 A는 드론의 비행 성능을 향상시킬 수 있는 프로펠러를 설계함으로써 드론의 비행원리, 설계 방법론을 습득할 수 있다. 사전 드론의 비행 원리를 습득, 프로펠러에서의 공력성능에 영향을 주는 설계 인자들을 선택하고, 최종 설계되어진 형상 제원 결과를 조원 B에게 전달한다.

Table 1 Performance goals and targets

Step	Goal	Target
Principles of drone flight and operation	Understanding the basic principles of drone flight	All members
Propeller design	Understanding the selection of design factors/levels and design methodology to enhance light performance	Member A
3D CAD and 3D printing	Understanding 3D CAD design capabilities and 3D printing methods	Member B
Drone flight coding	Understanding of writing flight coding suitable for given tasks	Member C

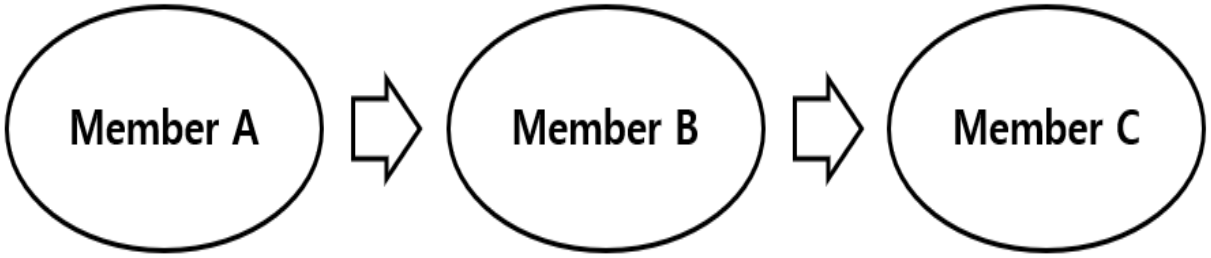


Fig. 1 Problem solving method of PPBL

조원 B는 조원 A에게 전달받은 설계 제원 값을 토대로 3D CAD P/G을 이용하여, 형상을 구현, 3D printer를 통하여 실제 프로펠러를 제작한다. 3D printer는 교내에서 출력하였으며, 조원 B에게 형상에 따른 3D printing 조건이 부여된 파일을 제공받아 출력하였다.

조원 C는 출력되어진 프로펠러를 실제 드론에 장착하여 주어진 비행 임무에 맞도록 코딩하여 수행하게 된다. 사용된 기체는 DJI사의 Tello edu를 사용하였다.

각자 임무에서 수행되어진 결과를 다음 조원에게 전달하는 과정에서 전달 자간의 소통과 협업을 통해 개인의 임무 이외 다른 임무의 지식을 능동적으로 습득할 수 있으며, 최종 결과를 얻기 위한 최소한의 모임으로써 협업이 가능하다. 드론이라는 공통적인 대상의 기본적인 협업을 위해 공통임무를 주어짐으로써 원활한 협업이 가능하도록 하였다. 해당 프로젝트의 목표와 대상은 다음 Table 1에 나타내었다.

2.2 On-Flex

On-Flex는 서울사이버대학교에서 제공하는 온라인 교육 시스템 및 방법론이다. 학습자들이 시간과 장소에 구애받지 않고 자신의 일정과 환경에 맞추어 강의를 수강할 수 있는 유연하고 개인화된 온라인 학습 환경을 제공하여 학습자들이 자신의 학습 목표를 달성할 수 있도록 돕는 방식이다.

On-Flex는 온라인 학습을 기반으로 운영하는 사이버대학의 특성상 성인 학습자들의 업무 환경에 따라 학습자들의 협업, 대면 미팅 등의 어려움으로 전통적인 PBL 모델 방식의 교육에 어려움을 유연하게 대체할 수 있는 모델이다. 유연 수업을 적용하기 위하여 15주차의 내용은 주차별 단계가 아닌 일괄 오픈되는 형태로써 진행되며, PPBL의 특성 상 학습자들은 자신의 임무에 맞는 강의를 선택적으로 수강함으로써 능동적인 해결능력과 세분화된 교과 학습을 할 수 있도록 하였다.

제한된 수업자료로 임무 수행에 어려움이 수반된다. 온라인 대학의 특성에 맞는 비대면 실시간 온라인 수업으로 동일 임무를 맡은 수강생들의 지도로 진행하였으며, 최종 결과 또한 비대면 실시간 발표로 진행하였다.

Table 2에서와 같이 총 15주차의 구성으로 수업설계가 되었지만, On-flex 유연수업 진행으로 모든 수업 자료는 개강과 동시에 모두 오픈 되며, 조원들간의 임무 배정 이후 한 학기 동안 유연하게 수강이 가능하다. 이러한 모델 적용으로 현역 군인 학생들의 제한적인 학습 환경에서 탄력적으로 학습할 수 있는 환경을 제공할 수 있었다.

3. 학습평가

학습자들의 해당 임무에 대한 학습을 평가하기 위하여 공통 과제, 개인별 임무(프로젝트)의 평가로 진행하였다. 공통과제는 DJI사의 Tello edu 기체의 오픈 application software에서 제공되는 블록코딩 미션으로 진행되었다.

해당 미션은 게임형태로서 드론의 비행원리, 비행 조종 능력, 블록 코딩을 통한 비행 임무 수행 능력 등을 평가할 수 있다. 이러한 방식으로 객관적인 문제 해결능력이 아닌 창의적인 문제 해결을 통해서 학습자들의 해당 분야의 학습 흥미도를 높일 수 있었으며, 참여도 또한 높일 수 있었다. 일부 application software의 미션은 Fig. 2와 같다.

3인의 조원은 하나의 최종 목표를 이루기 위하여 각각의 세분화된 임무를 맡아 수행한다. 설계, 제작, 코딩임무로 이에 따라 개별적인 평가기준이 필요로 한다. 이에 조원 A의 설계 부분에서는 드론의 비행원리 및 유체역학, 설계 방법론의 학습이 요구된다. 유체역학적인 지식을 통해 비행의 원리를 이해하고,

Table 2 Class design and content

Weeks	Object	Contents	Target
1	Orientation	Course objectives and methodology explanation	A, B, C
2	Types of drones and basic operations	Principles of drone flight and classification of drones	A, B, C
3	Block coding	Block coding using DJI Tello edu app	A, B, C
4	Drone propeller design	Propeller design factor/level selection and optimal combination derivation design theory	A
5	3D CAD and 3D printing practice	Basic 3D CAD learning and 3D printing settings	B
6	Performing flight missions	Block coding	C
7~14	Project and practice progress	Team project progress (regular non-face-to-face classes)	A, B, C
15	Final project result presentation	Final presentation (online presentation)	A, B, C

Fig. 2 Block coding task using Tello Edu application

이를 통해 프로펠러 설계에서의 유동학적 설계 인자들을 이해할 수 있게 된다. 동시에 최적화된 설계를 위하여 설계 방법론 또한 학습이 되어져야 한다. 조원 B의 경우 3D CAD P/G의 활용 능력이 요구되며, 전달받은 설계 제원의 구현 가능성을 파악할 수 있어야 하며, 실제 제작을 위해 형상 특성에 따라 3D printing을 위해 3D printer의 원리 또한 동반되어야 한다. 마지막 조원 C 인원은 드론의 분해 결합 능력과 조종능력, 비행 움직임에 따른 원리와 코딩 능력이 학습되어야 수행이 가능하다. 이러한 평가를 위해 루브릭 평가표를 정의하였다.

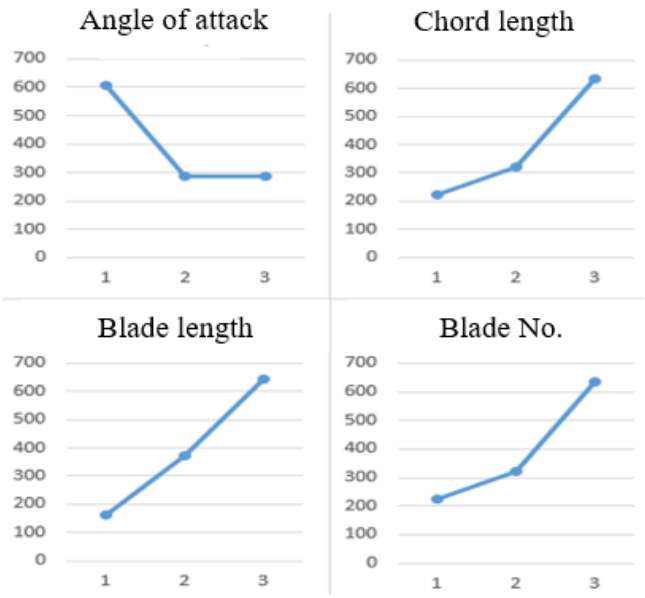
루브릭은 학습자가 과제를 수행할 때 나타내는 반응을 평가하는 기준의 집합이다.[8,9] 보통 항목별, 수준별 표로 구성되며, 표의 각 칸에는 어떤 경우에 그 수준에 해당되는지를 기술한다. 해당 PPBL의 학습자 루브릭 평가표는 Table 3과 같이 정의하였다.

Table 3의 루브릭 평가표에 의해 평가하며, 평가 대상은 보고서(프로펠러 설계), 3D CAD 파일 및 출력물(3D CAD 구현 및 3D printing), 비행 영상 녹화 파일 및 블록코딩 작성 파일(자율비행코딩)로써 평가하였으며, 임무 미흡 시 비대면 실시간 화상회의 발표를 통해 미흡 원인 분석등을 고려하여 평가하였다.

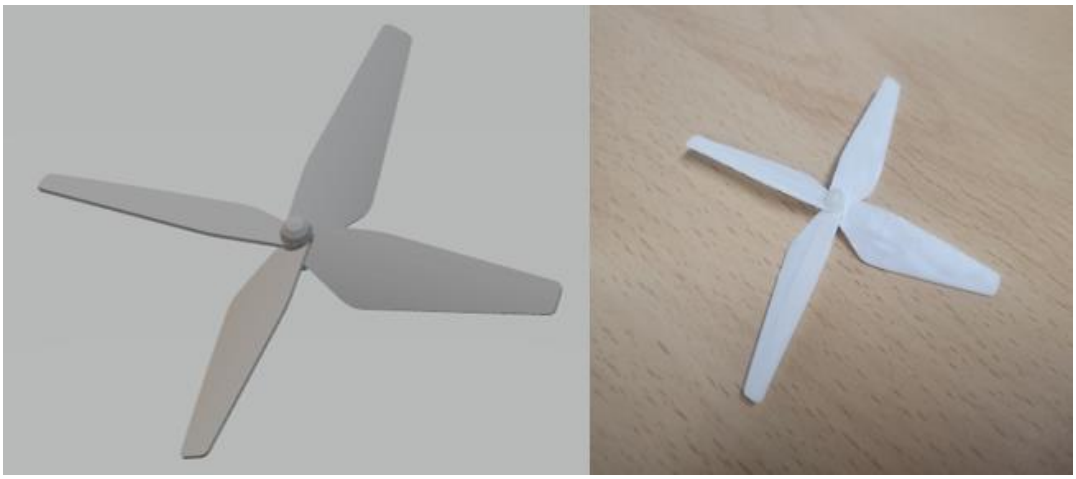
조원들의 임무의 결과는 Fig. 3과 같으며 Fig. 3(a)는 조원 A의 결과 그래프를 나타내었다. 실험계획법을 이용한 평균분석의 결과이며, 본 결과에서 예측된 각각의 인자들의 최적 수준들을 도출한 결과이다.

Table 3 Rubric evaluation sheet

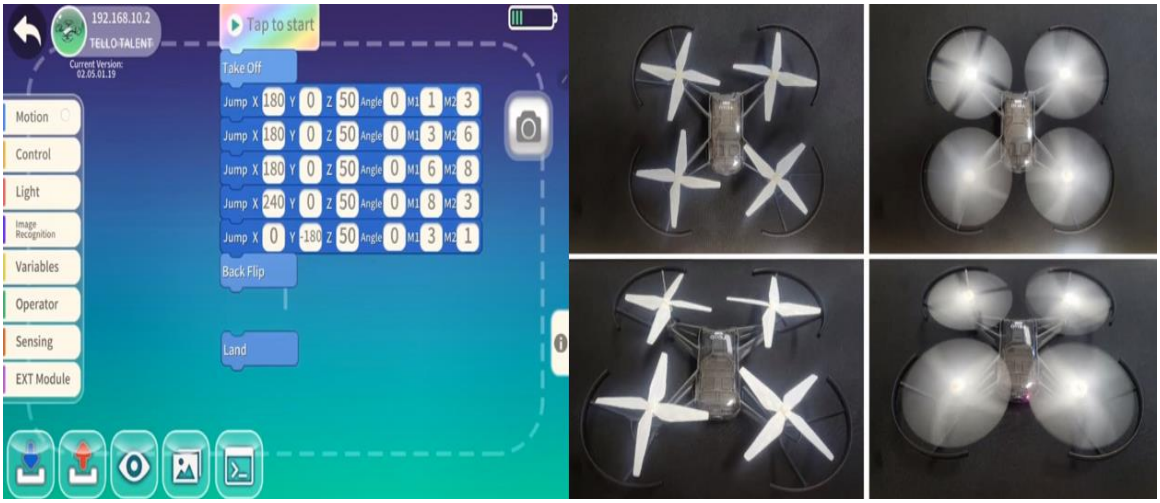
Topic	High	Medium	Low	Deliverable
프로펠러 설계	비행원리를 정확히 설명할 수 있으며, 비행성능에 영향을 주는 설계 인자와 수준을 정확히 선정, 최적의 조합 도출과 결과를 증명할 수 있다.	최적의 조합 형상을 도출하였으나, 비행에 영향을 주는 인자/수준 선택의 타당성을 설명하지 못한다(또는 설계 인자 선택 타당성을 설명하지 못한다).	설계 인자/수준 선택 미흡 및 도출과정 모두 설명하지 못한다.	결과 보고서
3D CAD 구현 및 3D printing	3D CAD 구현이 설계 값과 동일하게 모델링할 수 있으며, 블레이드 형상을 정확하게 출력할 수 있다.	3D CAD 구현이 설계 값과 동일하지 못하거나, 형상 출력 설정이 되지 못한다.	3D CAD 구현이 설계 값과 전혀 다른 형상이 출력되거나 출력하지 못한다.	3D CAD file 및 3D printer 설정 파일 (출력물)
자율비행 코딩	제작 프로펠러 체결과 임무에 맞게 단시간에 정확한 비행 조작 및 정확한 임무를 수행할 수 있는 블록 코딩 비행 구현이 가능하다.	문제없이 조작은 가능하나 주어진 임무 수행 시간이 초과된 경우, 또는 수행 임무에 맞는 블록코딩을 제대로 구현하지 못한다.	임무 비행 조건을 수행하지 못한다.	비행 영상 녹화본 제출 및 블록코딩 작성 파일



(a) Result of member A



(b) Result of member B



(c) Result of member C

Fig. 3 The final results

그 결과를 조원 B에게 전달하여 전달받은 블레이드 형상의 최적조합의 제원대로 3D modeling 및 3D printing의 결과는 Fig. 3(b)에 나타내었다. 출력된 블레이드를 조원 C에게 전달하여 블레이드를 체결하고 주어진 비행임무를 블록코딩을 통하여 직접 비행한 수행 결과는 Fig. 3(c)이며, 결과는 비행영상을 촬영한 파일로 제출되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 온라인 대학에서의 PPBL 모델 수업 적용 사례를 작성하였다. 현대 사회에서는 빠르게 변화하는 지식과 기술의 발전으로 인하여 학생들이 단순히 지식을 습득하는 것보다는 문제 해결 능력과 창의력을 키워야 한다는 요구가 점점 커지고 있다. 이러한 요구에 대응하기 위하여 교육방법 또한 변화되고 있으며 그 중에서도 문제중심 학습 PBL은 혁신적인 교육 방법으로 주목받고 있다. 서울사이버대학교는 온라인 학습을 기반으로 운영하는 사이버대학의 특성상 성인학습자들의 업무 환경에 따라 학생들과의 협업, 대면 미팅 등의 어려움으로 전통적인 PBL 모델 방식의 교육에 어려움이 있다. 따라서 PPBL이라는 교육 모델을 연구하여 온라인 수업에 적용하였으며, On-Flex의 교육 모델로 교과과정 및 학사제도 유연화를 이루었다.

PPBL 프로젝트 수행 결과 학습자들은 드론의 비행원리, 비행 조종능력, 블록 코딩을 통한 비행 임무 수행 능력 등을 평가할 수 있는 공통과제와 개인별 임무를 수행하였다. 이를 통해 학습자들은 객관적인 문제 해결 능력이 아닌 창의적인 문제 해결을 통해 해당 분야의 학습 흥미도를 높일 수 있었으며, 참여도 또한 높일 수 있었다.

프로젝트 수행 과정에서 학습자들은 전달자 간의 소통과 협업을 통해 개인의 임무 이외 다른 임무의 지식을 능동적으로 습득할 수 있었으며, 최종 결과를 얻기 위한 최소 인원의 모임으로써 협업이 가능해졌다. 또한 본 논문에서 제안한 프로젝트는 On-Flex 교육 기반을 활용하여 수행하였으며, 이를 통해 학습자들은 시간과 장소에 구애받지 않고 자신의 일정과 환경에 맞추어 강의를 수강할 수 있는 유연하고 개인화된 온라인 학습 환경을 경험할 수 있었다. 이러한 온라인 학습 방법은 현대 사회에서 필수적인 능력으로 자리 잡고 있으며, 본 논문에서 제안한 PPBL 방식과 On-Flex 교육 기반은 교육 혁신을 위한 유용한 방법으로 활용될 수 있을 것이며, 이를 통해 학습자들의 학습 효과를 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 교육부의 2023년 원격대학 교육혁신 지원사업 “성인학습자 역량 중심의 On-Flex 교육기반 구축” 사업비로 작성된 논문임.

참고문헌
(References)

(1) Yoon, J. H. and Park, C., S., 2023, “Application of PPBL Model Classes in Online University,” *Proceeding of the 2023 KSME Division of Education Annual Spring Conference*, Seoul University, Seoul, Republic of Korea, p. 26.
(2) Song, M. and Kim, M. H., 2022, “A Study on the Online Project-Based Learning (PBL) Applied Extracurricular Program Development,” *Journal of Engineering Education Research*, Vol. 25, No. 6, pp. 3~13.
(3) Koh, T. J., 2022, “A Case Study of PBL Application in the Online Classes of Indian Languages,” *Studies in Foreign Language Education*, Vol. 36, No. 3, pp. 23~42.
(4) Lee, J. W. and Kim, M., 2021, “A Study on The Ways to Improve Education Satisfaction of Military Students in Cyber University,” *Journal of Next-Generation Convergence Information Service Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 45~55.
(5) Lee, K. S., 2014, “Study of the Applications of Introduction of Computer Engineering Class Using PBL,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 15, No. 10, pp. 6303~6309.
(6) Shin, M. and Yi, Y. A., 2023, “The Effects of Differences in Convergence Majors on Learner Satisfaction and Learning Outcomes Awareness: Focused on Case Studies of Game Graphic Design Classes in Colleges Applying

Blended-PBL," *The Korean Journal of Animation*, Vol. 19, No. 2, pp. 45~67.
(7) Danford, G. L., 2006, "Project-Based Learning and International Business Education," *Journal of Teaching in International Business*, Vol. 18, No. 1, pp. 7~25.
(8) Jacques, S., Bissey, S. and Martin, A., 2016, "Multidisciplinary Project Based Learning Within a Collaborative Framework A Case Study on Urban Drone Conception," *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, Vol. 11, No. 12, pp. 36~44.
(9) Amplo, E., 2022, "Drone-Based Learning: A project-Based Learning (PBL) Programmed for Secondary School Students to Explore Making and Coding," *6th FabLearn Europe/MakeEd Conference 2022*, Copenhagen, Denmark, pp. 1~5.

<응용기술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2024.12.1.047** ISSN 2288-3991(Online)

TDI 저감 연질 폴리우레탄 폼의 배합비에 따른 기계적 특성 분석

전유영* · 전의식*,**,***† · 김영신**,***,**** · 이호준*****

* 공주대학교 미래융합공학과, ** 공주대학교 생산기술연구소, *** 충남중견기업지역혁신센터
**** 친환경미래자동차 소재부품공정 창의인재양성 사업단, ***** 서원산업(주)

Analysis of Mechanical Properties of TDI Reduced Flexible Polyurethane Foam According to a Function of Formulation Ratio

Yu-Yeong Jeon*, Euy-Sik Jeon*,**,***†, Young-Shin Kim**,***,**** and Ho-Jun Lee*****

* Dept. of Future Convergence Engineering, Kongju Nat'l Univ.,
** Industrial Technology Research Institute Kongju Nat'l Univ.,
*** Regional Innovation Center for Middle Market Enterprise in Chungnam,
**** Graduate Program for ECO-Friendly Automotive Tech., ***** Seowon Industry Co., Ltd.

(Received September 27, 2023 ; Revised October 24, 2023 ; Accepted October 27, 2023)

Key Words: Polyurethane Foam(폴리우레탄 폼), Toluene Di-Isocyanate(톨루엔 디이소시아네이트), Formulation Ratio(배합비), Mechanical Property(기계적 특성)

초록: 연질 폴리우레탄 폼(FPUF)은 가볍고 강도, 내구성이 우수한 특성으로 다양한 산업 분야에서 사용된다. FPUF는 polyol과 isocyanate를 주재료로 첨가제를 혼합하여 반응시킨 생성물로, isocyanate 중 toluene di-isocyanate(TDI)는 유해 · 위험 물질이다. TDI는 흡입, 피부 독성이 강하고 다량 취급 시 천식을 유발하며 부작용이 많아 TDI를 저감한 FPUF의 개발이 필요하다. 그러나 TDI 저감 FPUF 발포 시 유동성 및 성형성이 감소하고 발포체의 물성이 저하되기 때문에 TDI 저감에 따른 polyol 배합비의 개발 및 기계적 강도 특성 분석이 필요하다. 본 연구에서는 polyol 함량과 index 변화에 따른 TDI 저감 FPUF의 발포, 형태학적, 기계적 특성을 분석하였다. 기계적 특성 분석 결과, POP(polymer polyol) 함량이 높을수록 기계적 강도가 높고, 인열강도와 경도는 index 변화와 비례관계를 갖음을 확인하였다.

Abstract: Flexible Polyurethane Foam (FPUF) is widely used in various industries due to its lightweight, high strength, and excellent durability. FPUF is produced by mixing additives with polyol and isocyanate, with Toluene Di-Isocyanate (TDI) being one of the hazardous components among isocyanates. TDI is harmful and can cause strong inhalation and skin toxicity, leading to adverse health effects, necessitating the development of TDI-reduced FPUF. However, reducing TDI in FPUF can result in decreased flowability, moldability, and a decline in foam properties. Thus, research is needed to develop the optimal polyol blend ratio and analyze the mechanical strength properties according to changes in polyol content and index. Mechanical analysis shows that higher Polymer Polyol (POP) content leads to increased mechanical strength, and thermal resistance and hardness are proportional to changes in the index.

1. 서 론

폴리우레탄(PU)은 발포, 고무, 플라스틱, 코팅, 접착제, 단열, 완충, 포장재 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다.(1) 연질 폴리우레탄 폼(FPUF)은 밀도가 낮고 탄성이 좋으며 완충 성능이 뛰어나다는 장점이 있다.(2) 그러나 FPUF은 가연성이며 연소 시 HCN, CO, 이소시아네이트(isocyanate) 등 유독가스가 발생하여 인명에 위협이 된다.(3~6) FPUF은 폴리올(polyol)과 isocyanate를 주재료로 혼합·반응시켜 얻는 생성물이며, isocyanate 내의 toluene di-isocyanate(TDI)는 유해·위험 물질이다. TDI는 흡입독성과 피부 독성이 높고

† Corresponding Author, osjun@kongju.ac.kr
ⓒ 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Materials used to prepare FPUFs

Category		Components	Properties
Resin premix (100 mL)	Polyol	PPG 4701	Polypropylene glycol, base polyols for highly durable cold cures
		PPG 6000	Reactive base polyols for high modulus cold cures with a molecular weight of 6,000
		CS540 (POP)	Polyol prepared by dispersing and polymerizing acryl monomer in polyether polyol with a molecular weight of 43,000
	Cross-linker	Diethanolamine	Polyfunctional, secondary amine and diol, weak base
	Catalyst	BL-11	70% bis(2-dimethylaminoethyl) ether
		DABCO® 33LX	Mixture of 33% triethylene diamine and a non-emissive proprietary carrier
	Surfactant	B-8734LF2	Low VOC*, medium potency MDI** silicone surfactant
		B-8736LF2	Lowest VOC, TDI*** silicone surfactant with a wide processing latitude
	Cell opener	PPG 5021	Special polyols for cold cure used as cell openers with a molecular weight of 5,000
	Blowing agent	Water	-
Isocyanate (53.53 g)	Methylene diphenyl diisocyanate	CG4070	Isocyanate with 33.9% NCO content

* Volatile organic compounds; ** Methylene diphenyl diisocyanate; *** Toluene di-isocyanate

다량 취급 시 천식을 일으키는 유해·위험 물질이며, 호흡된 isocyanate는 단기적으로는 호흡곤란이나 알레르기 반응 등의 부작용을 일으키거나 장기적으로 노출 시 폐 기능의 심각한 손상을 가져올 수 있다.[7,8] 또한 산업안전보건법 개정에 따라 TDI의 제조, 취급, 저장에 대한 규정량을 제한하고 있으며, FPUF 발포 시 TDI 사용량의 저감이 요구된다. TDI 함량을 저감하는 것은 수산기(OHV)를 갖는 물과 폴리올의 당량비(NCO(%))가 낮은 methylene diphenyl diisocyanate(MDI)를 사용하는 것이며, 이 말은 지수(index)가 낮은, 발포제의 함량이 적은, POP 함량이 낮은 등과 같은 의미이다. TDI 저감 FPUF 발포 시 흐름성 및 성형성이 떨어지고 인장강도 및 인열강도 등과 같은 FPUF의 물성이 저하되므로[9] TDI 저감에 따른 polyol 배합비에 대한 개발과 Polyol 함량에 따른 기계적 강도 특성 분석과, polyol 배합량을 고정 후 MDI 양을 변화시키면서 경도 값의 변화를 비교분석하기 위해 index 변화에 대한 기계적 강도 특성 분석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 TDI 저감을 하면서 물리적 물성을 보완하는 것을 목표로, TDI 저감 FPUF의 polyol 함량과 Index 변화에 따른 기계적 강도 특성을 비교·분석하였다. 특히, TDI 저감 FPUF의 polyol 함량과 index 변화에 따른 발포 특성, 형태학적 특성을 분석하고 기계적 특성을 밀도(core density), 인장강도(tensile strength)와 연신율(elongation), 인열강도(tear strength), 경도(hardness 25% ILD) 시험 등을 통해 분석하고 평가하였다.

2. 실 험

2.1 재료 및 제조

TDI 저감 FPUF를 준비하는데 사용되는 재료는 Table 1에 제시하였다. 가교제, 촉매를 polyol과 혼합하여 resin premix를 제작하였다. Polyol은 polypropylene glycol이며, 고내구성 저온 경화용 베이스 polyol인 PPG 4701과 분자량 6,000의 고탄성 저온 경화용 반응성 베이스 polyol인 PPG 6000, polyether polyol 중 acryl monomer를 분산, 중합하여 제조된 polymer polyol(POP)인 분자량 43,000의 CS540을 사용하였다. 가교제는 약염기를 띄는 다기능성, 이차 amine 및 diol인 디에탄올아민을 사용하였다. 촉매로는 bis(2-dimethylaminoethyl) ether가 70% 함유된 BL-11, triethylene diamine 33%가 함유된 DABCO® 33LX가 사용되었다. 계면활성제는 중간 효능의 MDI 실리콘 계면활성제인 B-8734LF2와 넓은 처리 범위를 가진 TDI 실리콘 계면활성제인 B-8736LF2를 사용하였다. 셀 오프너로는 분자량 5,000의 셀 오프너로 사용되는 저온 경화용 특수 polyol인 PPG 5021을 사용하였으며, 발포제는 물을 사용하였다. Isocyanate는 index 100을 기준으로 NCO 함량이 33.90%인 CG4070을 사용하였다. Resin premix와 isocyanate의 비율은 각 polyol 100 g당 isocyanate CG4070을 53.35 g 첨가하였다. 발포 실험에서는 발포제 함량에 따른 컵 발포 실험을 수행하여 수분 함량에 대한 안정적인 발포 배합비를 도출하였으며, polyol 함량과 index 변화에 따른 resin premix에 isocyanate를 첨가하여 사각시편 발포 실험을 수행하였다. Polyol 함량에 따른 FPUF은 첨가되는 polyol 100 g 중 POP 함량을 10 g씩 증가시키고, PPG 4701, PPG6000은 5 g씩 감소시켜 FPUF 샘플을 제작하였다. Index 변화에 따른 FPUF은 index 90을 기준으로 발포에 필요한 모든 첨가제들의 비율을 5배씩 증가시켜 index 95, index 100 시편을 제작하였다.

2.2 특성화

가속 전압 10 kV에서 VEGA3 SBH를 사용하여 FPUF의 세포 형태 및 세포 크기 분포를 100배율로 측정하고, ImagePro(Media Cybernetics Inc.)를 사용하여 각 상태에 대해 100 ~ 150개의 데이터의 평균으로 세포 크기, 세포 벽 두께 및 홀(hole) 크기를 비교·분석하였다. 기계적 특성을 분석하기 위해 밀도(core density), 인장강도와 연신율, 인열강도 및 경도 테스트를 진행하였다. 반복성을 보장하기 위해 각 조건마다 최소 3개의 샘플을 테스트하였다. 밀도는 100 × 100 × 100 mm^3 사이즈의 시편으로 core density를 측정하였다. 인장강도와 연신율은 KS M 6518 규격에 의해 두께 10 mm의 아령형 시험편을 200 mm/min의 속도로 시험하여 시험편 파단 시 최대하중 및 거리를 측정하였다. 인열강도는 ASTM D 624 규격에 의해 200 mm/min의 속도로 시험하여 절단 시 최대하중 및 거리를 측정하였다. 경도는 ASTM D 5672 규격에 의해 200 × 200 × 50 mm^3 몰드에서 성형된 폼을 1일간 상온에서 경화시킨 후 25% 압축하여 걸리는 힘을 측정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 기초 실험 및 발포 특성

Table 2는 발포제 함량에 따른 TDI 저감 FPUF의 컵 발포 특성을 나타내며, Fig. 1(a)~(e)는 해당 컵 발포 실험의 이미지를 보여준다. 발포제 함량에 따른 컵 발포 실험은 총 5가지 종류의 샘플로 발포제를 0.3 part씩 증가하며 비교하였다. 여기서 3.5 part란 polyol 100 g을 100%로 가정했을 때 발포제가 3.5% 첨가된 것을 3.5 part라고 부른다. 발포 특성을 비교하기 위해 발포 시 폴리우레탄 원액이 혼합된 시점부터 폼이 최대로 부풀어올랐을 때까지 걸린 시간(rise time)과 자유 발포하는 폴리우레탄 폼에서 최대로 부풀어 오르고 난 직후 폼의 높이의 변화(settling)로 샘플들을 비교하였다. Fig. 1(a)는 발포제 함량이 3.5 part인 FPUF 샘플이며, 다른 FPUF과 비교하였을 때 rise time이 123 s로 가장 길고 settling 값이 4.7%로 가장 낮았다. 그에 반해 Fig. 1(e)는 발포제 함량이 4.7 part인 FPUF 샘플이며, rise time이 85 s로 가장 짧고 settling 값이 17.5%로 가장 높았다. 위의 결과로 볼 때 발포제의 함량이 증가할수록 rise time은 짧아지는 것을 확인하였으며, settling 값은 증가하는 것을 알 수 있었다. 발포제의 함량을 4.4 part로 선택한 이유는 컵 발포 시 settling 값이 가장 안정적으로 측정되었기 때문이다. 너무 낮은 settling 값은 붕괴(collapse)가 나타나기 쉽기 때문에, 많은 양의 고분자량을 필요로 하며, 밀도 증가로 인해 양산품 적용시 원가가 상승한다는 단점이 있다. 또한 4.7 part인 경우 settling 값이 너무 높아 양산품에 적용하기에 어려움이 있다. 위의 기초 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로, TDI 저감 FPUF의 polyol 함량과 index 변화에 따른 사각 시편 발포를 진행하였다.

Table 2 Cup forming test results by blowing agent contents for cream time, half time, rise time and settling rate

Blowing agent contents	3.5 part	3.8 part	4.1 part	4.4 part	4.7 part
Cream time (s)	13.0	12.6	12.0	11.2	10.7
Half time (s)	66.0	63.6	55.7	48.2	46.0
Rise Time (s)	123.0	109.9	96.9	89.6	85.0
Maximum height (mm)	169.3	167.6	178.9	182.9	196.1
Minimum height (mm)	161.4	153.2	160.0	156.8	161.8
Settling (%)	4.7	8.6	10.6	14.3	17.5

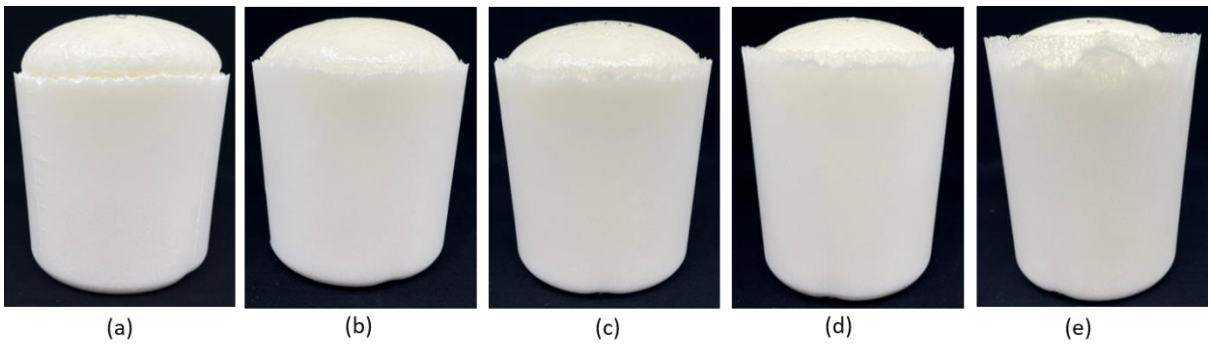


Fig. 1 Digital photograph of cup forming test results by blowing agent contents: (a) blowing agent 3.5 part; (b) blowing agent 3.8 part; (c) blowing agent 4.1 part; (d) blowing agent 4.4 part; (e) blowing agent 4.7 part

3.2 형태학적 특성 분석

3.2.1 Polyol 함량에 따른 형태학적 특성

폼의 셀 모양은 FPUF의 물리역학적 특성에 영향을 미친다. Fig. 2(a)~(f)는 reference 폼과 다양한 polyol 함량으로 제조된 FPUF 샘플 표면의 SEM 이미지를 나타낸다. Fig. 3(a)~(c)는 Polyol 함량 변화에 따른 TDI 저감 FPUF의 평균 셀 벽 두께, 셀의 hole 사이즈, 셀 사이즈와 분포도를 나타낸다. 모든 FPUF 샘플은 크기와 개방성 측면에서 불규칙한 셀 모양을 가지고 있다.

Fig. 3(a)는 FPUF의 평균 셀 벽 두께와 분포도를 나타내며, 기존(reference) 폼의 평균 셀 벽 두께는 67 ㎛로 TDI 저감 FPUF들과 비교했을 때 평균 셀 벽 두께가 가장 두꺼웠다. POP 함량이 30 g인 FPUF은 평균 셀 벽 두께가 65 ㎛로 TDI 저감 FPUF 중에 가장 두꺼운 셀 벽 두께를 갖는다. 또한 POP 함량이 40 g인 FPUF의 평균 셀 벽 두께는 55 ㎛로 가장 얇은 셀 벽 두께를 갖으며, 셀 벽 두께의 가장 적은 분포도를 갖음을 확인하였다. 이는 POP 40 g의 셀 벽 두께가 대체적으로 일정한 값을 갖음을 의미한다. 반면, POP 함량이 50 g인 FPUF의 분포도는 다른 FPUF들에 비해 높은 값을 갖는다. 이는 POP 50 g의 셀 벽 두께가 일정하지 않고 불규칙한 값을 갖음을 의미한다. Fig. 3(b)는 FPUF의 평균 hole 사이즈와 분포도를 나타내며, reference 폼의 평균 hole 사이즈는 360 ㎛로 가장 큰 hole 사이즈를 갖는다. POP 함량이 20 g인 FPUF의 평균 hole 사이즈는 292 ㎛로 가장 작은 hole 사이즈를 갖으며, POP 함량이 50 g인 FPUF의 평균 hole 사이즈는 334 ㎛로 TDI 저감 FPUF 중에 가장 큰 hole 사이즈를 갖는다. POP 40 g은 분포도에서 확인할 수 있듯이 가장 일정한 hole 사이즈를 갖으며, POP 50 g은 가장 불규칙한 hole 사이즈를 갖음을 확인하였다. Fig. 3(c)는 평균 셀 사이즈와 분포도를 나타내며, reference 폼의 평균 셀 사이즈는 761 ㎛로 POP 함량이 50 g인 FPUF에 비해 작은 셀 사이즈를 갖는다. POP 함량이 50 g인 FPUF의 평균 셀 사이즈는 788 ㎛로 다른 FPUF에 비해 가장 큰 셀 사이즈를 갖으며, 가장 불규칙한 셀 사이즈를 갖는다. 또한 POP 50 g의

경우 다른 FPUF보다 열린 셀(open cell)의 비율이 높은 것을 확인하였다. POP 함량이 20 g인 FPUF의 평균 셀 사이즈는 712 ㎛로 가장 작은 셀 사이즈를 갖으며, 다른 FPUF에 비해 가장 일정한 셀 사이즈를 갖는다.

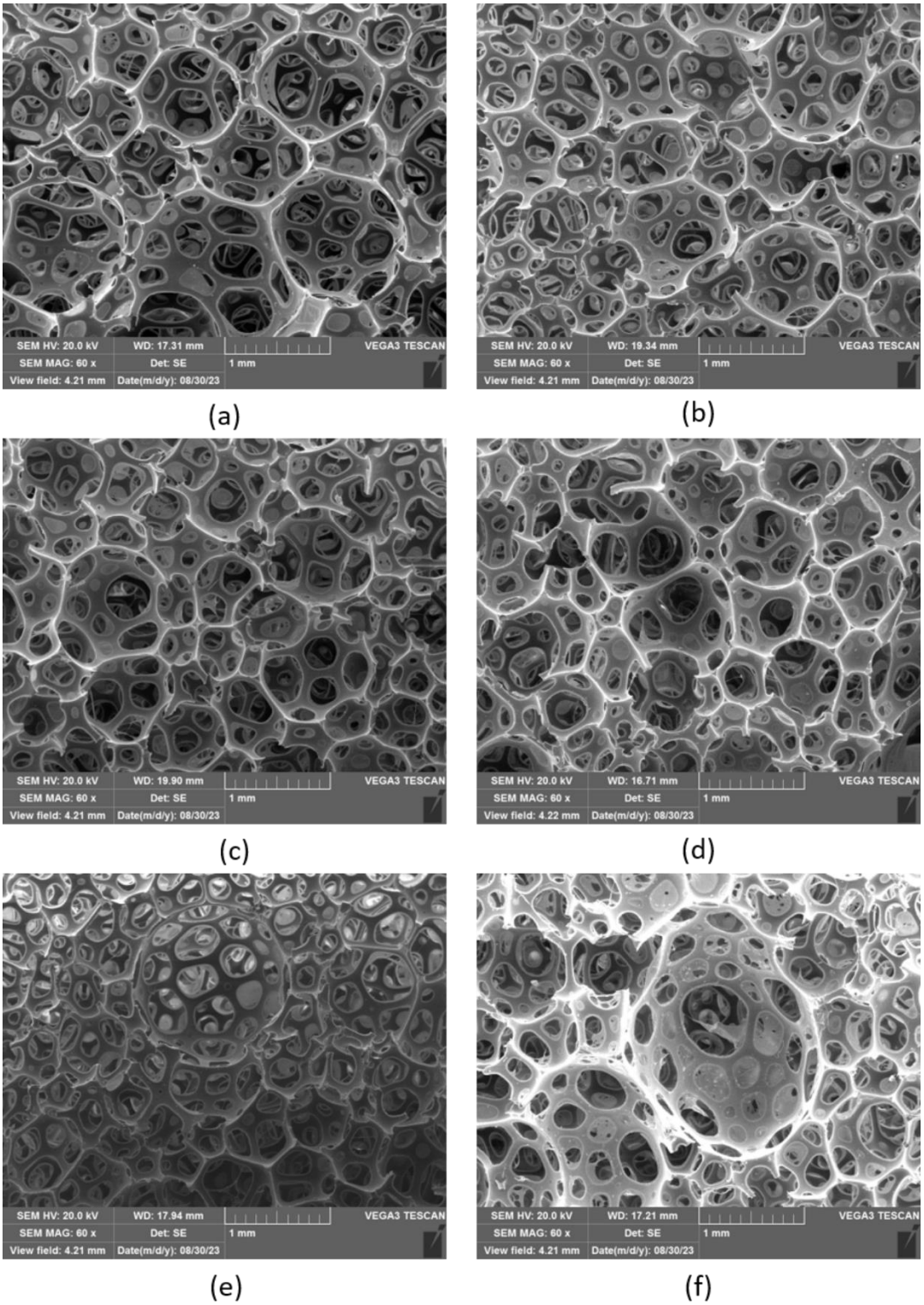


Fig. 2 Results of SEM image: (a) reference 60x; (b) POP 10 g 60x; (c) POP 20 g 60x; (d) POP 30 g 60x; (e) POP 40 g 60x; (f) POP 50 g 60x

전반적으로, TDI를 저감한 FPUF의 평균 셀 벽 두께와 평균 hole 사이즈는 기존 reference 폼에 비해 감소된 값을 갖음을 확인하였다. 셀의 모양, 셀 벽 두께, 닫힌 셀(closed cell)의 비율, hole 사이즈, 셀 사이즈 등을 고려할 때 POP 함량이 증가할수록 open cell의 비율이 높아진다.

3.2.2 Index 변화에 따른 형태학적 특성

Fig. 4(a)~(c)는 index 변화에 따른 FPUF 샘플 표면의 SEM 이미지를 보여준다. Fig. 5(a)~(c)는 index 변화에 따른 TDI 저감 FPUF의 평균 셀 벽 두께, 평균 hole 사이즈, 평균 셀 사이즈와 분포도를 나타낸다. 앞서 설명한 polyol 함량 변화에 따른 FPUF과 마찬가지로, index 변화에 따른 FPUF 샘플도 크기와 개방 성 측면에서 불규칙한 셀 모양을 가지고 있다.

Fig. 5(a)는 FPUF의 평균 셀 벽 두께와 분포도를 나타낸다. Index 95인 FPUF의 평균 셀 벽 두께는 59 ㎛로 가장 두께가 얇다. Index 100인 FPUF의 평균 셀 벽 두께는 66 ㎛로 가장 두꺼운 셀 벽 두께를 갖으며, 분포도에서 가장 큰 값을 갖는다. 이는 index 100인 FPUF이 다른 FPUF들에 비해 불규칙한 셀 벽두께를

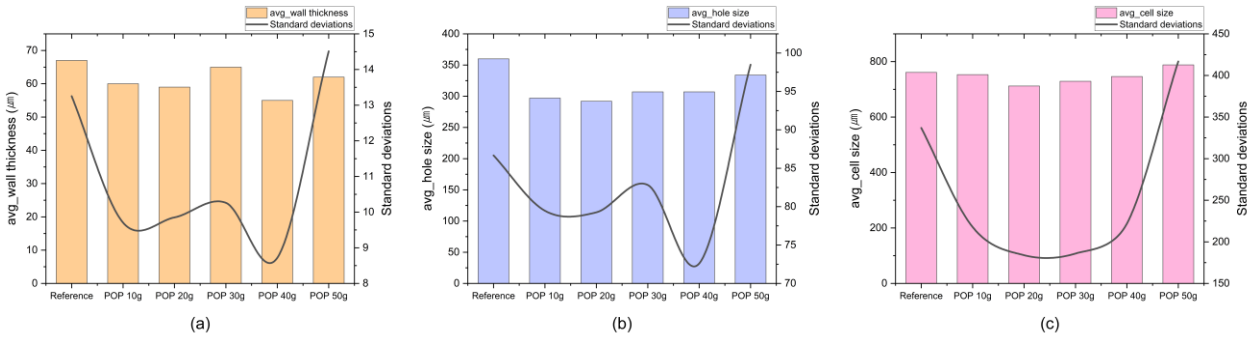


Fig. 3 Graph of polyol contents: (a) average wall thickness and standard deviations; (b) average hole size and standard deviations; (c) average cell size and standard deviations

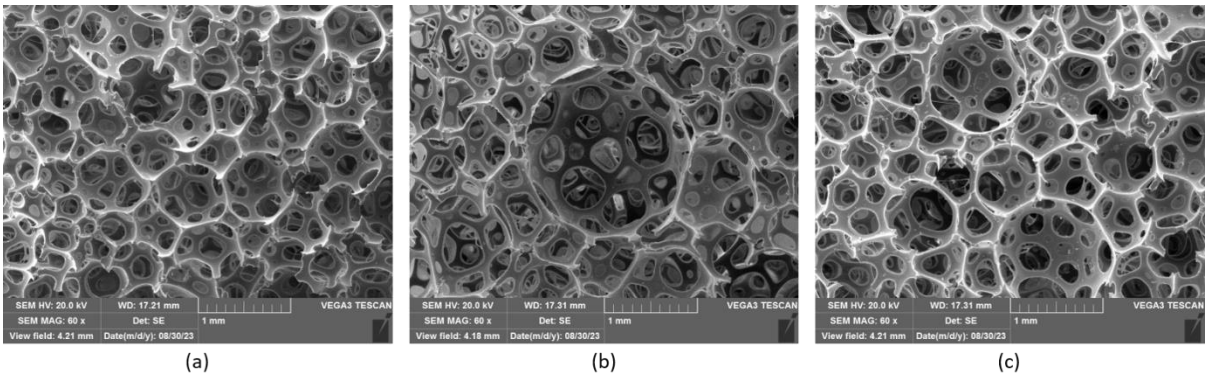


Fig. 4 Results of SEM image: (a) index 90 60x; (b) index 95 60x; (c) index 100 60x

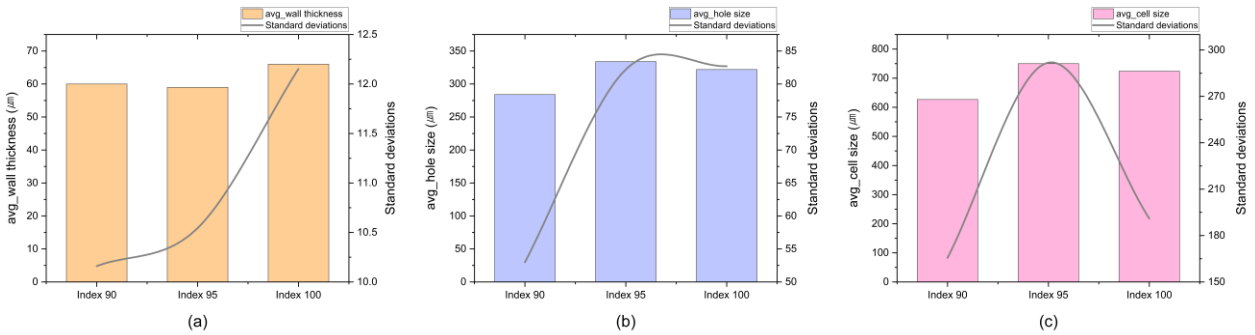


Fig. 5 Graph of index variations: (a) average wall thickness and standard deviations; (b) average hole size and standard deviations; (c) average cell size and standard deviations

갖음을 의미한다. Fig. 5(b)는 평균 hole 사이즈와 분포도를 나타내며, index 95인 FPUF의 평균 hole 사이즈는 334 ㎛로 다른 FPUF들에 비해 가장 큰 값을 갖으며, 불규칙한 hole 사이즈를 갖는다. 반면 index 90인 FPUF의 평균 hole 사이즈는 284 ㎛로 가장 적은 값을 갖으며, 다른 FPUF들에 비해 일정한 hole 사이즈를 갖는다. Fig. 5(c)는 평균 셀 사이즈와 분포도를 나타내며, index 95인 FPUF은 750 ㎛로 가장 큰 셀 사이즈를 갖는 반면, index 90의 경우 627 ㎛로 가장 작은 값을 갖는다.

Index 변화에 따른 TDI 저감 FPUF의 평균 셀 벽 두께, 평균 hole 사이즈, 평균 셀 사이즈들을 고려하였을 때, index가 높아질수록 불규칙적인 open 성향과 셀 사이즈가 커지며, 셀 벽 두께가 두꺼워지는 경향을 보인다. 이는 물리적 특성이 향상됨을 의미한다.

3.3 기계적 특성 분석

3.3.1 Polyol 함량에 따른 기계적 특성

Polyol 함량에 따른 TDI 저감 FPUF의 기계적 특성은 밀도, 인장강도, 연신율, 인열강도, 경도에 의해 평가되었으며, Table 3에 결과를 제시하였다. Reference FPUF의 core density는 35.0 kg/m^{3}으로 가장 낮은 값을 갖는다. POP 함량이 30 g은 42.5 kg/m^{3}으로 가장 높은 밀도 값을 갖음을 확인하였다. 인장강도는 Fig. 6(a)

Table 3 Results of mechanical properties of FPUF by polyol contents

Sample	Core density (kg/m^3)	Tensile strength (kPa)	Elongation (%)	Tear strength (kPa)	Hardness (25% ILD) (kgf)
Reference	35.0	174.9	89.3	0.9	25.3
POP 10 g	42.1	125.1	104.2	0.8	17.6
POP 20 g	41.8	154.2	112.2	0.9	19.4
POP 30 g	42.5	159.8	108.1	0.9	21.6
POP 40 g	42.2	190.1	102.4	1.0	24.5
POP 50 g	41.9	235.9	102.9	1.1	28.7

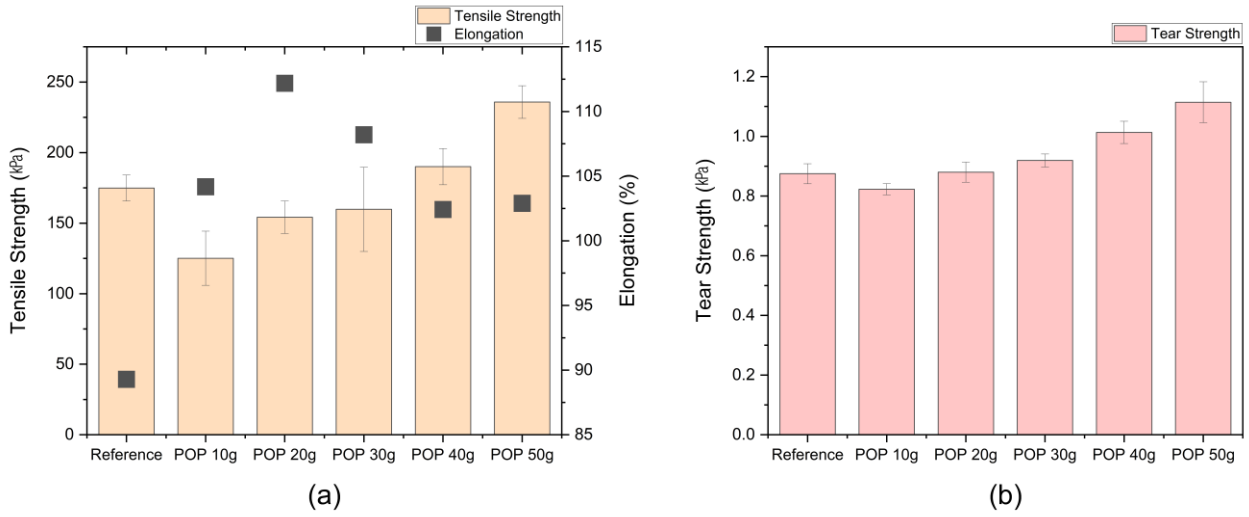


Fig. 6 Results of (a) tensile strength and elongation; (b) tear strength by polyol contents

Table 4 Results of mechanical properties of FPUF by index variations

Sample	Core density (kg/m^3)	Tensile strength (kPa)	Elongation (%)	Tear strength (kPa)	Hardness (25% ILD) (kgf)
Index 90	44.9	180.2	114.0	0.9	22.6
Index 95	39.7	245.3	100.0	1.0	29.1
Index 100	45.3	153.1	85.5	1.0	31.3

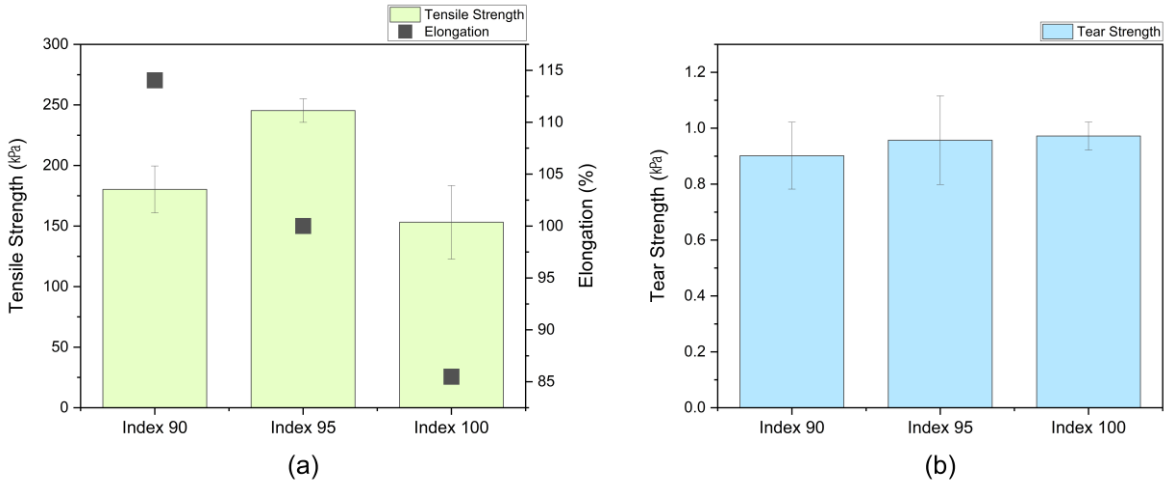


Fig. 7 Results of (a) tensile strength and elongation; (b) tear strength by index variations

에 나타나 있으며, reference 폼과 비교했을 때, POP 40 g과 POP 50 g은 인장강도가 190.1, 235.9 kPa로 각각 8.7%, 34.9% 향상된 것을 확인하였다. 반면, POP 함량이 10 g, 20 g, 30 g은 인장강도가 125.1, 154.2, 159.8 kPa로 reference 폼과 비교했을 때 각각 28.5%, 11.8%, 8.6% 감소되었다. 이는 인장강도가 POP 함량과 비례관계를 갖음을 의미한다. 연신율은 셀이 open 성향이 될수록 떨어지는 경향이 있다. POP 20 g의 연신율이 112.2%로 가장 높았고, reference 폼의 연신율이 89.3%로 가장 낮은 값을 갖음을 확인하였다. 이는 POP 20 g이 다른 FPUF에 비해 closed cell의 비율이 높고, TDI 저감 FPUF 중에서 POP 함량이 증가할수록 open cell의 비율이 높아짐을 의미한다. 인열강도는 Fig. 6(b)에 나타나 있으며, POP 40 g과 POP 50 g이 각각 1.0, 1.1 kPa로 reference 폼에 비해 11.1%, 22.2% 향상된 강도 값을 갖는 것을 확인하였다. 경도의 경우, reference 폼의 강도 값은 25.3 kgf로 POP 50 g을 제외한 FPUF보다 더 높은 경도 값을 갖는다. POP 50 g의 경도는 28.7 kgf로 기존 reference 폼에 비해 13.4% 향상된 값을 갖으며, POP 함량이 다른 FPUF들과 비교하였을 때 가장 높은 강도 값을 갖는다. 본 연구에서는 TDI를 저감한 FPUF을 개발하기 위하여 TDI 대신 POP의 함량을 증가시켜 셀의 open 경향이 높아지게 만들었으며, POP 함량이 증가되어 open 경향이 증가하면 경도가 증가됨을 확인하였다. Polyol 함량에 따른 TDI 저감 FPUF의 기계적 특성은 높은 분자량을 갖을수록 기계적 강도 값이 높음을 알 수 있다. 따라서, POP 50 g인 FPUF의 기계적 강도는 다른 FPUF에 비해 더 높은 분자량을 갖고 있음으로 높은 강도 값을 갖는다. 그러나, 양산품에 적용되기엔 POP 30 g인 FPUF이 가장 적절하다. POP 30 g인 FPUF보다 POP 함량이 낮으면 경도가 너무 낮게 나오기 때문에 물성 저하가 일어나며, POP 함량이 증가되면 open 경향이 높아져 경도 값이 증가된다.

3.3.2 Index 변화에 따른 기계적 특성

Index 변화에 따른 TDI 저감 FPUF의 기계적 특성은 밀도, 인장강도, 연신율, 인열강도, 경도에 의해 평가되었으며, Table 4에 결과를 제시하였다. Index 95의 core density는 39.7 kg/m^{3}으로 가장 낮은 밀도 값을 갖는 반면, index 100의 core density는 45.3 kg/m^{3}으로 가장 높은 밀도 값을 갖는다.

Index 변화에 따른 FPUF의 인장강도는 Fig. 7(a)에 제시하였다. Index 95인 FPUF은 245.3 kPa로 가장 높은 강도 값을 갖지만, index 100은 153.1 kPa로 가장 낮은 강도 값을 갖는다. Index가 증가될수록 셀은 open 성향이 되기 때문에 연신율은 낮은 값을 갖는다. 따라서 index 90이 114%로 가장 높은 값을 갖음을 확인하였으며, index 100이 가장 낮은 값을 갖음을 확인하였다. 인열강도는 Fig. 7(b)에 나타나 있으며, index 95, index 100인 FPUF은 1.0 kPa로 index 90에 비해 11.1% 증가됨을 확인하였다. 경도는 index가 증가될수록 더 높은 강도 값을 갖으며, index 100이 31.3 kgf로 다른 FPUF에 비해 가장 높은 강도 값을 갖는다. Index 변화에 따른 FPUF의 경우, index가 증가될수록 인열강도와 경도의 강도 값은 증가되며, 연신율은 open cell의 비율이 높아져 더 낮은 값을 갖음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 TDI 저감 FPUF의 polyol 함량과 index 변화에 따른 기계적 특성을 평가하였다. 이에 따라 TDI 저감 FPUF의 배합비에 따른 발포 특성, 형태학적 특성 및 기계적 특성을 분석하였다. TDI 저감 FPUF의 polyol 함량 변화는 reference 폼에 비해 평균 셀 벽 두께, 평균 hole 사이즈 및 평균 셀 사이즈의 감소에 영향을 미치는 것을 관찰하였다. 형태학적 특성 분석 결과, POP 함량이 50 g인 FPUF이 다른 FPUF에 비해 open cell의 비율이 높고 셀의 형태가 불규칙적임을 확인하였다. Polyol 함량에 따른 TDI 저감 FPUF의 기계적 특성은 높은 분자량을 갖을수록 기계적 강도 값이 높아짐을 알 수 있다. 그러나 POP 함량이 증가되면 셀의 open 경향이 증가되며 경도 값을 낮게 생산할 수 없으므로 양산품에 적용하기엔 POP 30 g인 FPUF이 가장 적절하다. Index 변화에 따른 FPUF은 index가 높아질수록 불규칙적인 open cell 성향과 셀 사이즈가 커지고, 셀 벽 두께가 두꺼워지는 경향을 보였다. 또한 index가 증가할수록 인열강도와 경도의 강도 값은 증가하는 반면, 연신율은 open cell의 비율이 높아질수록 더 낮아짐을 확인하였다. 따라서 본 연구는 TDI 저감 FPUF의 배합비에 관련한 기초적인 통찰력을 제공할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2022년 중소벤처기업부의 중소기업기술혁신개발사업(S3289502)의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다.

참고문헌
(References)

(1) Thirumal, M., Khastgir, D., Nando, G. B., Naik, Y. P. and Singha, N. K., 2010, “Halogen-Free Flame Retardant PUF: Effect of Melamine Compounds on Mechanical, Thermal and Flame Retardant Properties,” *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 95, No. 6, pp. 1138~1145.

(2) Weil, E. D. and Levchik, S. V., 2004, “Commercial Flame Retardancy of Polyurethanes,” *Journal of Fire Sciences*, Vol. 22, No. 3, pp. 183~210.

(3) Allan, D., Daly, J. and Liggat, J. J., 2013, “Thermal Volatilisation Analysis of TDI-Based Flexible Polyurethane Foam,” *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 98, No. 2, pp. 535~541.

(4) Garrido, M. A. and Font, R., 2015, “Pyrolysis and Combustion Study of Flexible Polyurethane Foam,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 113, pp. 202~215.

(5) Li, W., Ryan, A. J. and Meier, I. K., 2002, “Effect of Chain Extenders on the Morphology Development in Flexible Polyurethane Foam,” *Macromolecules*, Vol. 35, No. 16, pp. 6306~6312.

(6) Wang, J., Zhang, D., Zhang, Y., Cai, W., Yao, C., Hu, Y. and Hu, W., 2019, “Construction of Multifunctional Boron nitride Nanosheet towards Reducing Toxic Volatiles (CO and HCN) Generation and Fire Hazard of Thermoplastic Polyurethane,” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 362, pp. 482~494.

(7) Chester, E. H., Martinez-Catinchi, F. L., Schwartz, H. J., Horowitz, J., Fleming, G. M., Gerblich, A. A., McDonald, E. W. and Breihauer, R., 1979, “Patterns of Airway Reactivity to Asthma Produced by Exposure to Toluene Di-Isocyanate,” *Chest*, Vol. 75, No. 2, pp. 229~231.

(8) Butcher, B. T., Salvaggio, J. E., Weill, H. and Ziskind, M. M., 1976, “Toluene Diisocyanate (TDI) Pulmonary

Disease: Immunologic and Inhalation Challenge Studies," *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, Vol. 58, No. 1, pp. 89~100.
(9) Choi, H. J., Choi, W. J., Seo, W. J. and Kim, J. H., 2019, "Study of Physical Properties of Flexible Polyurethane Foam with Changing TDI Content," *Polymer*, Vol. 43, No. 4, pp. 532~539.

기술과 교육 편집위원회

ISSN 2288-3991(Online)

편 집 장

박태선
경북대학교
tsparkjp@knu.ac.kr

편 집 인

고한서 성균관대학교 hanseoko@skku.edu	구남서 건국대학교 nsgoo@konkuk.ac.kr	김흥수 동국대학교 heungsoo@dongguk.edu	박치용 한국수력원자력 parkchiyong@khnp.re.kr	유상석 충남대학교 stonex1004@hotmail.com
유승진 한국기계연구원 seungjinyoo@kimm.re.kr	윤현식 부산대학교 lesmodel@pusan.ac.kr	이경우 현대자동차 caselee@hyundai.com	임시형 국민대학교 shlim@kookmin.ac.kr	전주현 중앙대학교 memslee@kitech.re.kr
정영도 한국기계연구원 yjung@kimm.re.kr	홍주표 한국기술교육대학교 joopyo@koreatech.ac.kr	황욱렬 국립경상대학교 wrhwang@gnu.ac.kr		

부 편 집 인

구병춘 한국철도기술연구원 bcgoo@krri.re.kr	김동권 아주대학교 dkim@ajou.ac.kr	김태진 전북대학교 tjkim@jbnu.ac.kr	문장혁 중앙대학교 jhmoon84@cau.ac.kr	박원만 ㈜엘쏠텍 wmpark@elsoltec.com
박종원 한국기계연구원 jwpark@kimm.re.kr	손정현 부경대학교 jhsohn@pknu.ac.kr	송시몬 한양대학교 simonsong@hanyang.ac.kr	신재호 경일대학교 jhshin@kiu.kr	오동욱 조선대학교 dwoh@chosun.ac.kr
이봉기 전남대학교 b.lee@jnu.ac.kr	정훈의 울산과학기술원 hoonejeong@unist.ac.kr	조주형 한국기계연구원 antocho@kimm.re.kr	최동일 명지대학교 dongilc@mju.ac.kr	최승준 LS Mtron hydride@lsmtron.com

한상목
한국지질자원연구원
smhan@kigam.re.kr

대한기계학회논문집 C
제12권 제1호

발 행 일 2024년 3월 1일
발 행 인 사단법인 대한기계학회 회장 김동환
편 집 인 박태선
발 행 소 사단법인 대한기계학회, 서울시 강남구 테헤란로 7길 22
http://www.ksme.or.kr, TEL : (02)501-3646~8, FAX : (02)501-3649
은 행 지 로 7519743번
전 산 조 판 처 (주) 동 국 문 화

대한기계학회
KSME www.ksme.or.kr