

기술과 교육

TECHNOLOGY AND EDUCATION

제13권 제1호, 2025년 3월 | VOL.13, NO.1, March 2025

대한기계학회 논문집

C

TRANSACTIONS OF THE KSME C

TECHNOLOGY AND
EDUCATION

기술과 교육

(대한기계학회논문집)



제13권 제1호, 통권 제28호

ISSN 2288-3991(Online)

2025년 3월

차 례

< 응용기술논문 >

엑셀 사용 능력과 전공성적과의 상관관계에 관한 고찰	정 태 은	1
2인 탑승 방지를 위한 전동킥보드 데크 설계	조한승 · 이현석 · 최승애 · 김민구	9
ESG 기반 통합 관제 작업자 위치 측위 플랫폼 안전관리에 관한 연구	서 원 기	21
LNG 추진 선박용 연료공급 시스템을 위한 지능형 상태 모니터링 시스템 개발 연구	오광원 · 김성용 · 백중진 · 최백규 · 김광희 · 강인필	33
이방성 탄성계수의 Voigt-Reuss 경계조건	윤 영 준	43

TECHNOLOGY AND EDUCATION

Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers



Vol. 13, No. 1

ISSN 2288-3991(Online)

March, 2025

C O N T E N T S

< Application Technical Papers >

- A Study on the Correlation between Excel Use Ability and Major Grades
..... Tae Eun Chung... 1
- The Design of an E-Scooter Deck to Prevent Two-Person Boarding
..... Hanseung Jo, Hyunsuk Lee, Seungae Choi and Mingu Kim... 9
- A Study on Strengthening Safety of ESG-Based Integrated Monitoring Operator Location Positioning
Platform
..... Won Gi Seo... 21
- Development of SSAMS (Safe & Smart Ambient-Airr Monitoring System) for FGSS (Fuel Gas Supply
System) of LNG-Powered Vessels
..... Gwang-Won Oh, Sung-Yong Kim, Jung-Jin Baek,
Baek-Gyu Choi, Kwang-Heui Kim and Inpil Kang... 33
- Voigt and Reuss Bounds for Anisotropic Technical Elastic Constants
..... Young June Yoon... 43

엑셀 사용 능력과 전공성적과의 상관관계에 관한 고찰[§]

정 태 은^{*†}

* 인덕대학교 메카트로닉스공학과

A Study on the Correlation between Excel Use Ability and Major Grades

Tae Eun Chung^{*†}

* Dept. of Mechatronics Engineering, Induk University

(Received January 20, 2024; Revised October 21, 2024; Accepted October 22, 2024)

Key Words: Excel Use Ability(엑셀 사용 능력), Engineering Major Grades(공학 전공성적), Correlation(상관관계)

초록: 공학 전공 교과목에서 공식 계산이나 그래프를 만드는 작업은 빈번히 발생한다. 이러한 경우에 마이크로소프트사의 엑셀이 가장 많이 사용되고 있다. 기계공학 교과목에서 학생들은 기구의 운동을 구하거나 변위선도와 같은 그래프를 만드는데 엑셀을 사용할 수 있다. 다양한 엑셀 활용 능력을 가진 학생들이 공학 전공과목을 이수할 때, 엑셀 사용 능력과 공학 전공성적 사이의 상관관계에 대해 조사를 하였다. 상관관계의 연구 결과로부터 학생들의 엑셀 사용 능력과 전공 성적 사이에는 상관관계가 없다는 것이 나타났다. 이러한 결과는 기계공학 교과목의 전공성적에 영향을 미치는 것이 엑셀 사용 능력과 같은 컴퓨터 활용 능력 보다는 전공 교과목에서 요구하는 수행 능력이라는 것을 보여주었다.

Abstract: Formula calculations or graphs are frequently made in engineering majors. In this case, Microsoft's Excel software is the most commonly used. In mechanical subjects, students can use Excel to practice finding the motion of the mechanisms and creating graphs such as displacement diagrams. It was investigated whether there was a correlation between Excel use ability and engineering major grades when students with various Excel skills completed engineering majors. From the results of the correlation study, it was found that there was no correlation between students' Excel use ability and major grades. These results showed that it is the performance ability required by the major subjects that affects the major performance of the mechanical engineering subject rather than computer utilization ability such as Excel use ability.

1. 서론

1.1 교육 현장에서의 엑셀 활용 연구 동향

고등학교에서 수학 부진 학생들을 대상으로 엑셀을 활용한 함수의 과정-대상 관점 형에 대한 연구가 있었다.⁽¹⁾ 대학생을 대상으로 엑셀 기반 컴퓨터 교육 모형의 설계와 효과 분석에 관한 연구가 진행된 바 있다.⁽²⁾ Park 등은 소프트웨어 비전공자들도 엑셀과 같은 ICT 활용 도구로도 컴퓨팅 교육을 효과적으로 접할 수 있다고 주장하였다. 정역학 수업에 엑셀 프로그램을 활용한 사례가 발표된 바 있다.⁽³⁾ 공학 전공 교과목에서 수식 계산과 그래프를 생성하는 경구가 많이 있으며, 이러한 경우에 가장 대표적으로 많이 사용하는 것이 마이크로소프트 회사의 엑셀 소프트웨어라고 할 수 있다. 기계공학 과목에서 학생들은 기구의 운동을 구하고 변위선도 등의 그래프를 생성하는데 엑셀을 많이 사용하고 있다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2023년 학술대회(2023. 11. 1. - 4., 송도컨벤시아) 발표 논문임.

† Corresponding Author, techung@induk.ac.kr

© 2025 The Korean Society of Mechanical Engineers

1.2 디지털 스킬 직무 능력에 대한 인식

최근 ChatGPT와 같은 생성형 인공지능의 보급 등 디지털 신기술의 발달에 따라 공학 전공자에게 필요한 핵심 직무역량에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 신입과학기술인 직무역량에 대한 직장상사-신입간 인식 비교 분석 보고서를 통해 핵심 직무역량의 우선 순위 군 조사 연구가 발표된 바 있다.⁽⁴⁾ 이 보고서에서는 엔지니어링 과학용 도구 활용 능력, 컴퓨터 프로그래밍 언어 활용 능력, 통계 프로그래밍 언어 활용 능력, 사람-기술 상호작용 기술 프로그램 활용 능력 등 디지털 스킬 분야에 대한 현재 보유수준과 미래 중요도 수준에 대한 내용을 다루었다. 분석 결과에 따르면 신입과학기술인과 직장상사는 모두 동일하게 디지털 스킬 항목 중에서 인공지능 활용 능력 항목에서 격차를 크게 인식하였으며, 중요도가 높은 디지털 스킬 항목으로는 데이터 분석 능력을 선택하였다. 지식 분야에서는 신입과학기술인은 융합 지식을, 직장상사는 주 전공 실무 및 응용 지식을 최우선 지식으로 선택하였다. 스킬 분야에서는 공통적으로 문제해결능력을 최우선 스킬로 선택하였다. 반면에 전국경제인연합회에서 조사한 2022년 하반기 대기업 신규채용 계획조사에서는 대졸 신규직원 채용 시 중요한 평가요소로 1순위는 직무 관련 업무 경험(19.2%), 2순위는 직무 이해도(17.5%), 3순위는 전공과 직무간 관련성(16.3%)이라고 조사되었다. 직무능력에 대한 인식조사나 직무 중요도에 대한 조사는 결국 우수한 인재를 선발하기 위해 중요한 요소가 무엇인지를 찾는 것이 목적인다고 할 수 있다. 대학교 교육현장에서 우수한 인재를 양성하기 위해서도 엑셀 사용 능력과 같은 디지털 스킬이 학업 성취도에 어떤 영향을 미치는지를 아는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 공학 전공과목을 이수할 때 엑셀을 다루는 능력이 다양한 학생들의 엑셀 사용 능력과 전공성적 사이의 상관관계에 대한 조사를 실시하였다.

2. 학습자 설문 조사

2.1 엑셀 사용 경험 조사

공학계열 메카트로닉스공학과 2학년 전공과목 수강생 31명을 대상으로 1주차 수업에 마이크로소프트 회사의 엑셀 소프트웨어 사용 경험에 대한 설문 조사를 실시하였다. 설문 문항의 내용은 엑셀에 대한 기본 내용부터 단계 별 기능에 대해 알고 있거나 할 수 있는지를 묻는 내용이며, 상세한 내용은 Table 1에 나와 있다. 해당 과목에서는 기구 설계에 엑셀 소프트웨어를 사용하였으며, 5주차 수업을 진행한 후에 결석자를 제외한 28명을 대상으로 동일한 설문 조사를 실시하였다.

엑셀의 기능과 관련한 인지도와 수행 능력에 대해 1주차와 5주차 수업에서 실시한 설문 결과를 Fig. 1부터 Fig. 5에 나타내었다. 1주차 설문에서는 문항 1의 행과 열을 알고 있다는 답변이 Fig. 1에서와 같이 80.6%로 다른 설문 문항에 비해 가장 높게 나왔다. 반면에 문항 5의 차트 마법사를 사용할 수 있다는 답변이 Fig. 5에서와 같이 22.6%로 상대적으로 가장 낮게 나왔다. 1주차 설문에서 알고 있다 또는 할 수 있다는 답변은 행과 열에 대해 알고 있다가 80.6%, 셀에 대해 알고 있다가 77.4%, 셀의 형식을 변경할 수 있다가 61.3%, 수식입력줄에 식을 입력할 수 있다가 45.2%, 차트 마법사를 사용할 수 있다가 22.6%로 나타났다.

Table 1 Questions about experience with Excel

No.	Questionnaire items	Answers
1	I know what rows and columns in Excel	<input type="checkbox"/> I know <input type="checkbox"/> I don't know
2	I know what a cell is in Excel	<input type="checkbox"/> I know <input type="checkbox"/> I don't know
3	I can change the format of the cell in Excel	<input type="checkbox"/> I can do it <input type="checkbox"/> I can't do it
4	I can enter an expression in Excel formula bar	<input type="checkbox"/> I can do it <input type="checkbox"/> I can't do it
5	I can create charts using the chart wizard in Excel	<input type="checkbox"/> I can do it <input type="checkbox"/> I can't do it
6	Please select how many questions you answered you know (or can) from the five questions above	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5

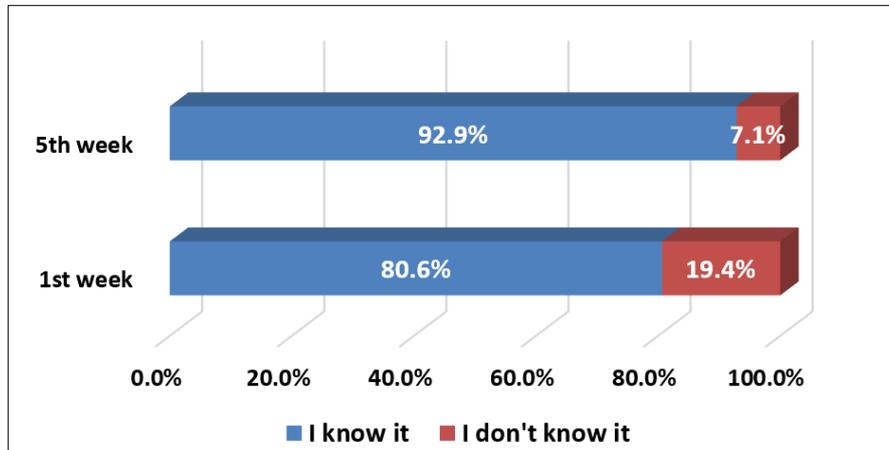


Fig. 1 Awareness survey of rows and columns in Excel

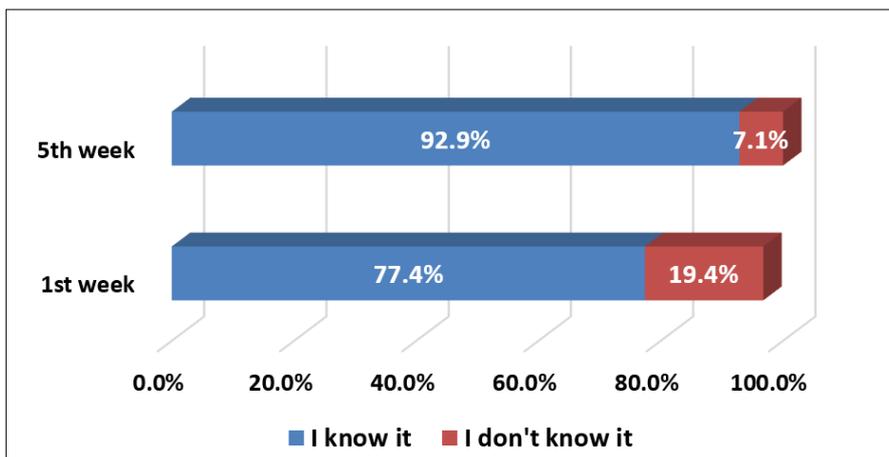


Fig. 2 Awareness survey of cells in Excel

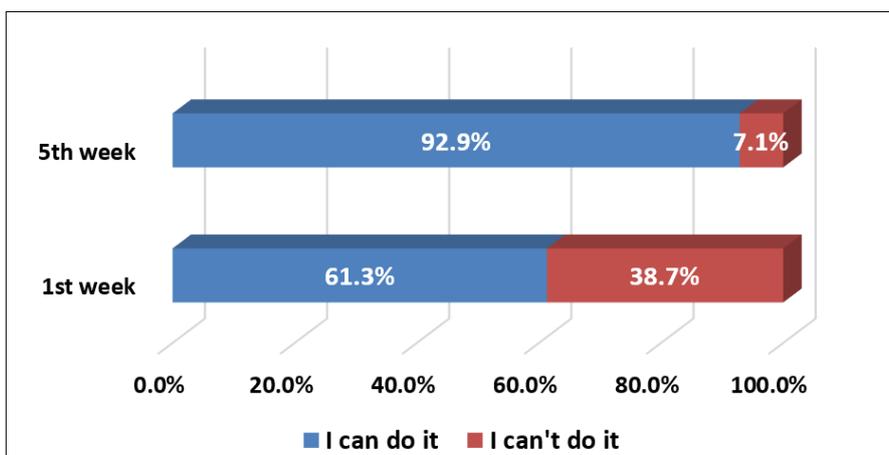


Fig. 3 Performance capability survey for cell format change of Excel

5주차에는 모든 문항에 대해 알고 있다 또는 할 수 있다는 답변의 결과가 92.9%에서 96.4%로 나왔으며, 전반적으로 인지도나 수행 능력이 향상한 결과를 나타내었다. 5주 동안 엑셀을 사용한 실습을 수행하면서 대부분의 학생들이 엑셀을 사용하여 수식 입력줄에 식을 입력하고 차트 마법사를 이용하여 필요한

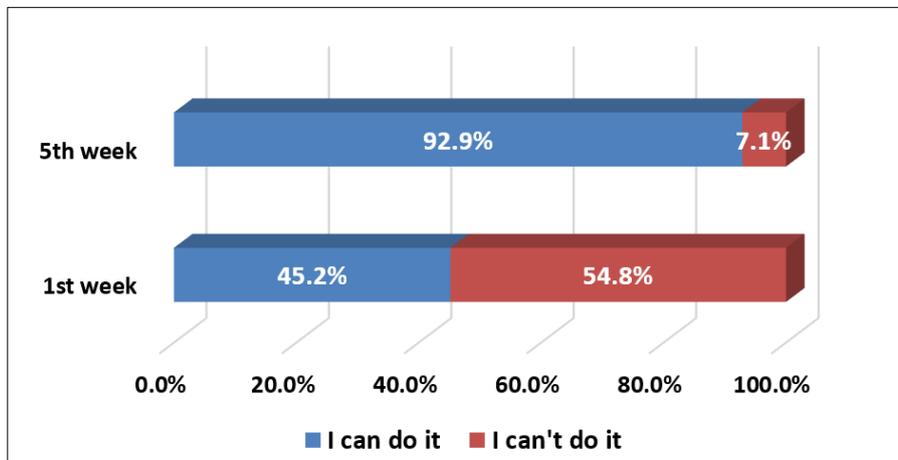


Fig. 4 Survey on the ability to enter expressions in Excel formula bar

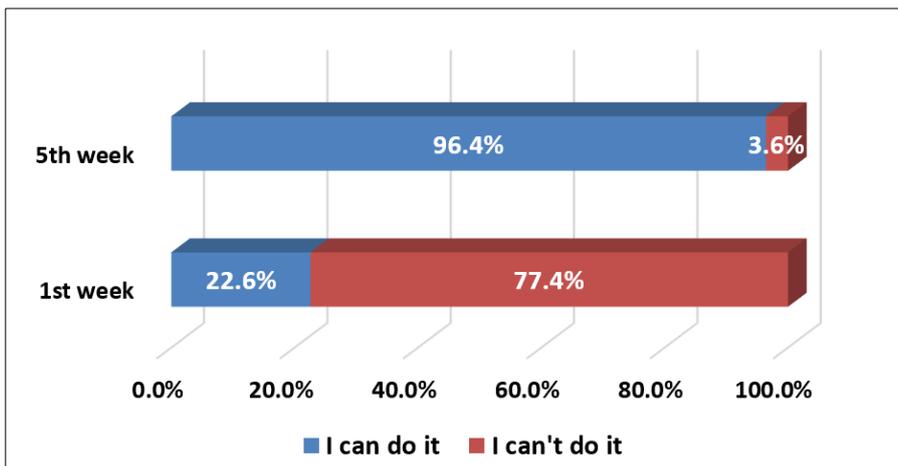


Fig. 5 Survey about the availability of the chart wizard

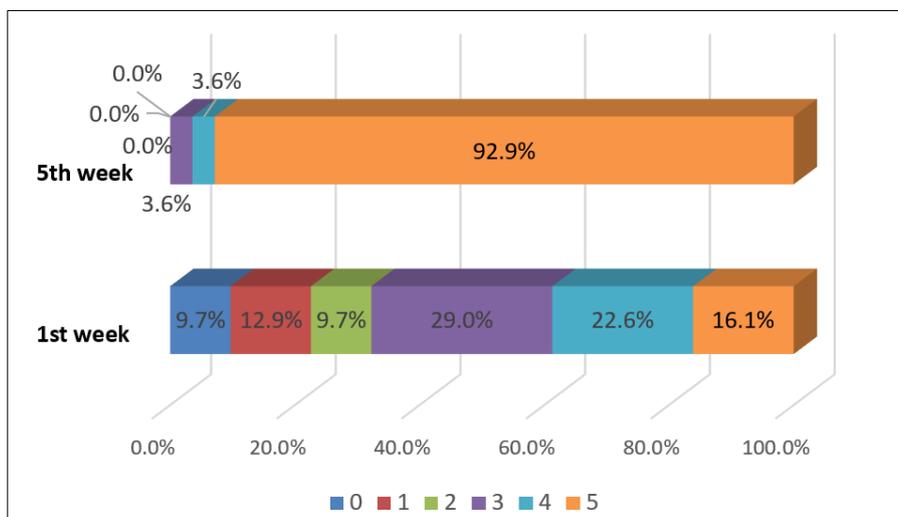


Fig. 6 Survey about the availability of the chart wizard

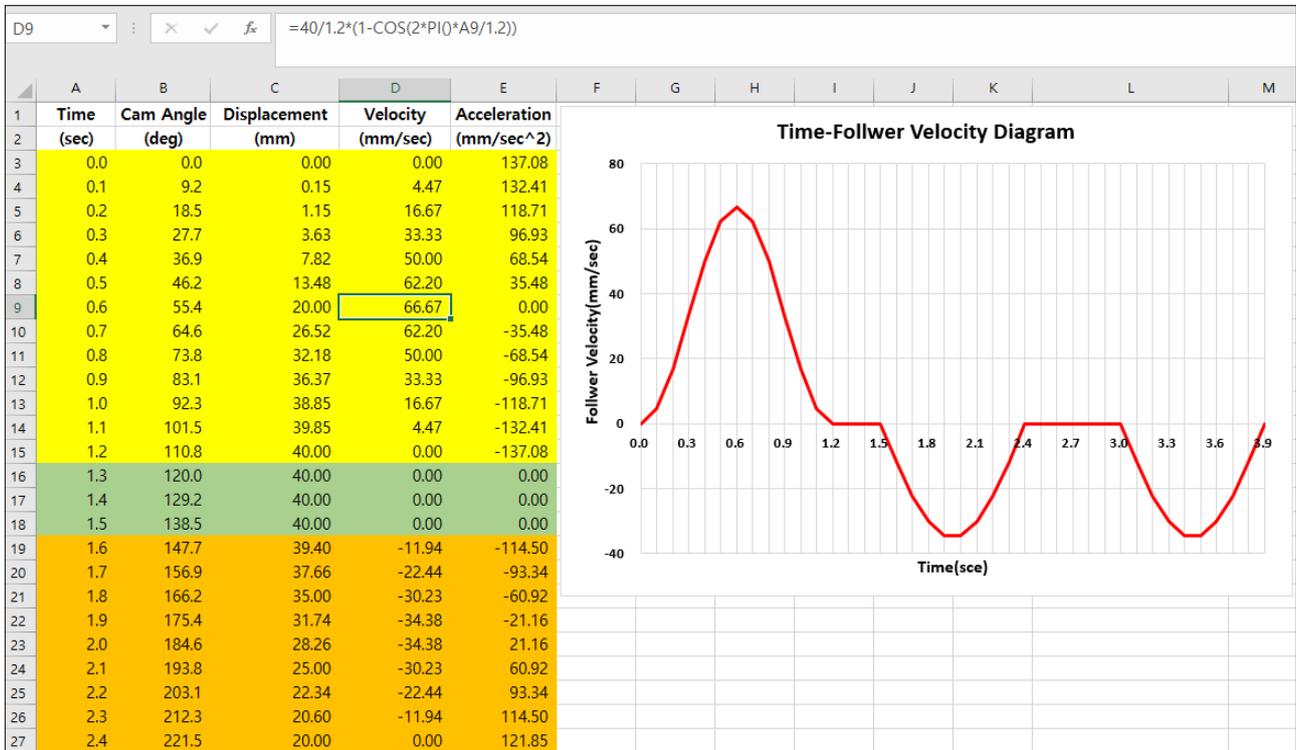


Fig. 7 Example of Excel practice for cam-follower design

그래프를 그릴 수 있는 능력을 갖추게 되었다고 판단할 수 있다. 이러한 변화를 세부적으로 살펴보면 엑셀의 5가지 기능에 대해 1주차에는 알거나 할 수 있는 기능이 0개 9.7%, 1개 12.9%, 2개 9.7%, 3개 29.0%, 4개 22.6%이고, 전부인 5개가 16.1%였다. 5주차에는 알거나 할 수 있는 기능의 개수가 0개에서 2개는 없었으며, 3개가 3.6%, 4개가 3.6%, 전부인 5개가 92.9%를 나타내었다, 해당 교과목의 실습을 수행하는데 필요한 엑셀의 5가지 기능에 대해 1주차에 5개 전부를 할 수 있는 학생의 비율이 16.1%에서 5주차에는 92.9%로 증가하였다. Fig. 7은 해당 수업에서 엑셀을 사용한 실습 문제의 한 사례이다. 캠과 종동절의 운동에서 종동절(follower)이 조화 운동(harmonic motions)을 하면서 상승-정지-하강-정지-하강 운동을 하는 경우에 대한 문제로서, 셀에 입력 또는 구해지는 값의 서식을 지정하고, 수식입력줄에 운동식을 입력하여 계산하고 최종적으로 차트 마법사를 이용하여 필요한 그래프를 그리는 과정이 포함되어 있다.

2.2 엑셀 사용 능력과 전공성적 사이의 관계

2.1절에서 엑셀 사용 능력에 대해 1주차와 5주차 조사 결과를 비교하였다. 해당 전공과목의 중간시험은 주로 엑셀의 수식입력줄에 운동식을 입력하여 주어진 기구의 변위, 속도, 가속도 등의 운동 상태를 구하고, 차트 마법사로부터 운동 그래프를 구하는 수행 평가로 진행되었다. 엑셀 사용 능력과 엑셀을 사용하여 운동을 구하는 능력을 평가한 중간시험 사이의 상관관계를 조사하였다. 1주차와 5주차 엑셀 설문 조사에 참여한 학생 중에서 중간시험에 응시한 학생은 총 27명이며, 이 학생들을 대상으로 상관관계를 분석하였다.

1주차에 실시한 엑셀의 초기 수행 능력과 중간시험 성적 사이의 관계 분포는 Fig. 8과 같으며, 상관계수는 -0.055로 엑셀 초기 수행 능력과 중간시험 성적 사이에는 유의미한 상관관계가 없는 것으로 나왔다. 여기서 엑셀 초기 수행 능력은 1주차에 실시한 설문 문항에서 조사한 엑셀의 기능 5개 중에서 몇 개를 알거나 할 수 있는 지로 설정하였다. 5주차에서 엑셀의 수행 능력이 전반적으로 향상하였기 때문에 1주차의 초기 엑셀 수행 능력은 중간성적에 영향을 미치지 않았다고 볼 수 있다.

엑셀을 사용한 실습은 5주차에 마무리가 되었으며, 5주차에 실시한 최종 엑셀 수행 능력과 중간시험 성적 사이의 상관관계를 조사하였다. 두 인자 사이의 관계는 Fig. 9에서 보는 바와 같으며, 5주차에 실시

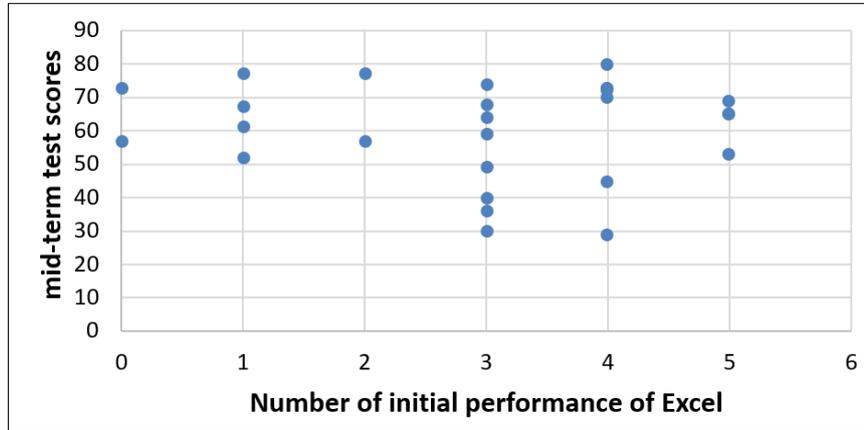


Fig. 8 Relationship between initial performance of Excel and mid-term score

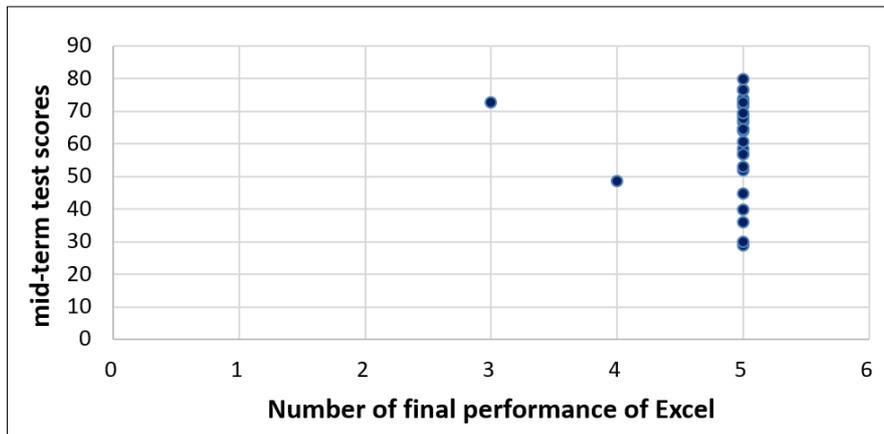


Fig. 9 Relationship between final performance of Excel and mid-term score

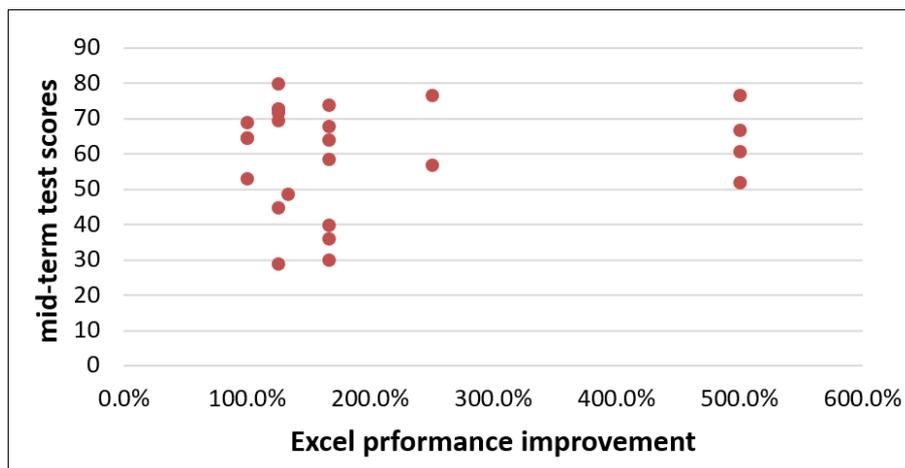


Fig. 10 Relationship between Excel performance improvement and mid-term score

한 최종 엑셀 수행 능력과 중간시험 성적 사이의 상관계수는 -0.083 으로 엑셀 최종 수행 능력과 중간시험 성적사이에도 유의미한 상관관계가 없는 것으로 나타났다. Fig. 6에서와 같이 5주차의 설문 조사에서 엑셀의 5가지 기능을 모두 알거나 할 수 있다는 학생의 비율이 92.9%이기 때문에 중간시험 사이의 상관관계를 얻을 수 없는 결과가 나타났다고 판단된다.

초기와 최종 엑셀 수행 능력이 중간시험 성적과 상관관계가 없다는 결과가 나왔으므로, 엑셀 수행 향상도와 중간시험 성적 사이의 상관관계를 조사하였다. 엑셀 수행 능력 향상도는 1주차에 알거나 할 수 있다고 답한 기능의 개수가 5주차에 몇 배로 향상하였는지 구한 것이다. 이 과정에서 초기 엑셀 수행능력의 개수가 0개인 경우가 2명이었으며, 이 학생들의 최종 엑셀 수행능력 개수가 각각 3개와 5개로 향상하였으나 초기 0개에 대한 엑셀 수행 능력 향상도를 계산할 수 없어서 이 경우에 대해서는 결측값으로 판단하여 제외하였다. 엑셀의 기능에 대해 초기 1주차에 비해 최종 5주차에 알거나 할 수 있다는 기능의 개수가 줄어든 경우는 없으며, 동일한 경우의 향상도가 100%, 1개에서 5개로 증가한 경우가 500%에 해당한다. 엑셀 수행 능력 향상도와 중간시험 사이의 관계는 Fig. 10에 나와있으며, 이때 상관계수는 0.108로 이전 값인 -0.055, -0.083보다 절대값이 조금 크긴 하지만 이 경우에도 유의미한 상관관계가 없다고 할 수 있다.

이상의 결과로부터 엑셀 사용 능력이 전공성적과 상관관계가 없다 즉 관련이 없다는 결론을 내리게 되었다. 엑셀을 사용하는 전공과목에서 해당 과목을 수행하기 위해서는 선수 과목에서 엑셀에 대한 사용 능력을 갖추도록 하는 것이 필요하고, 해당 전공과목에서는 학생들이 엑셀의 기본 사용법을 익혔는지 확인하는 것이 필요하다.

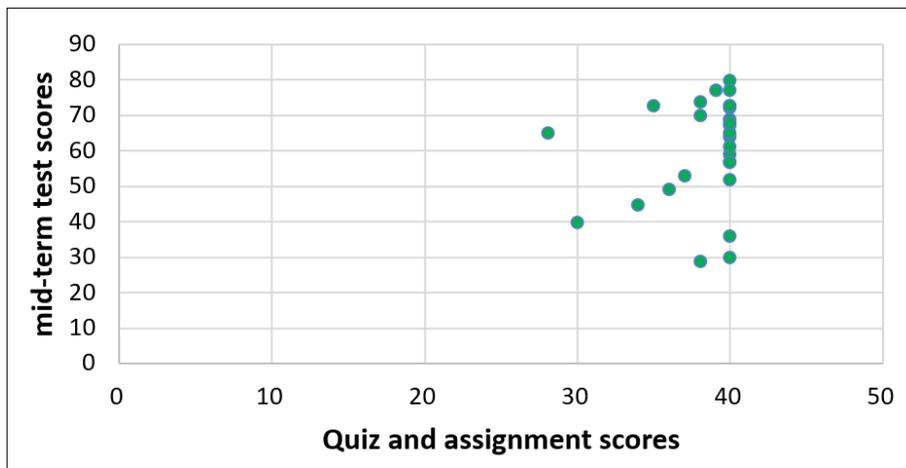


Fig. 11 Relationship between quiz & assignment scores and mid-term score

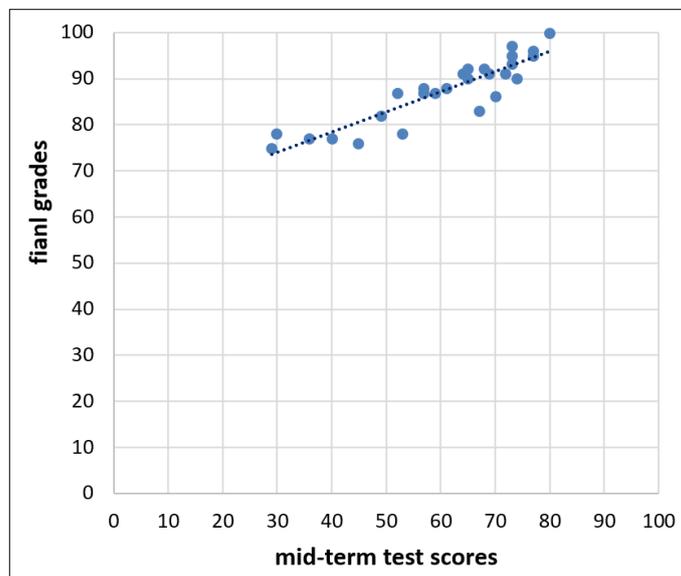


Fig. 12 Relationship between mid-term scores and final grades

중간시험 성적과 연관이 있는 인자를 찾기 위해 2주차부터 5주차까지 전공 수업에서 실시한 퀴즈 및 과제의 성적이 중간시험 성적과 상관관계가 있는지를 조사하였다. 평소 성적에 해당하는 퀴즈 및 과제의 성적과 중간시험 성적 사이의 관계는 Fig. 11에 나와있으며, 상관관계는 0.211로 구해졌다. 이 값은 이전 값보다 크긴 하지만 0.5보다 작으므로 상관관계가 없다고 할 수 있다. 해당 기간의 퀴즈 및 과제의 총점은 40점이며 학생들의 참여와 성취 의욕을 높이기 위해 기본적인 내용으로 퀴즈와 과제를 실시하여서 40점 만점의 학생 비율이 63%를 나타내었다. 따라서 평소에 실시한 퀴즈와 과제의 성적은 해당 전공 과목을 이수하기 위한 최소한의 기본 성적의 성격이 있다고 할 수 있다. 이러한 점에서 퀴즈 및 과제의 성적이 중간시험 성적과 연관이 없었다고 볼 수 있다.

마지막으로 중간시험 성적과 해당 과목의 최종 평점 사이의 관계를 조사하였다. 5주차까지는 실습에서 엑셀을 사용하였으며, 6주차부터는 캡 설계 전용프로그램인 CamDeisign™과 기구동역학 모델링과 빠른 해석 수행이 가능한 Working Model® 2D 프로그램을 사용하였다. 따라서 엑셀 수행 능력과 관련한 수업은 1주차부터 5주차까지에 해당하지만, 8주차까지의 수행 평가 결과가 최종 평가와 어떤 관계가 있는지를 살펴보기 위해 중간시험 성적과 최종 평점 사이의 관계에 대해 알아보았으며, Fig. 12에 해당 관계를 나타내었다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 중간시험 성적과 최종 평점 사이에 추세선이 선형적으로 비례 관계를 보였으며, 상관계수는 0.9로 계산되었다. 일반적으로 예상할 수 있는 것과 같이 중간시험 성적과 최종 평점 사이에는 상관관계가 높다는 결과를 나타내었다.

3. 결 론

엑셀을 실습으로 사용하는 전공과목에서 엑셀 사용 능력과 전공성적 사이의 상관관계를 조사하였으며, 학생들의 엑셀 사용 능력과 전공성적 사이에는 상관관계가 없다는 결과가 나왔다. 엑셀 사용 능력과 같은 소프트웨어를 활용하는 능력은 선수과목에서 익히도록 하거나, 해당 전공과목에서 학생들이 실습에 사용하는 소프트웨어를 충분히 사용할 수 있도록 훈련하는 것이 필요하다.

기계공학의 전공과목을 이수하는데 많은 프로그램이 사용되고 있지만, 전공과목의 성적 또는 직무수행능력에 영향을 미치는 것은 엑셀 사용 능력과 같은 컴퓨터 활용 능력 또는 디지털 스킬 능력 보다는 해당 전공과목에서 요구하는 수행 능력이라고 할 수 있다. 따라서 전공과 관련한 소프트웨어의 수행 능력은 기본적으로 필요한 능력이며, 학생들이 학습 목표를 달성하기 위해서는 해당 교과목에서 제시하는 수행 능력을 성취할 수 있도록 학생들을 지도할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 인덕대학교 연구비에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Choi, J. Y. and Heo, H. J., 2013, "A Study on Formation of the Process-Object Perspective of Function Using Excel to Specialized High School Math Underachievers," *J. of Educational Research in Mathematics*, Vol. 23, No. 2, pp. 213~235.
- (2) Park, Y. S., Lee, M. J. and Lee, S. J., 2019, "The Analysis of Design and Effect for Software Non-majors of Computing Education Model using Excel," *J. of Digital Contents Society*, Vol. 20, No. 10, pp. 1969~1978.
- (3) Kim, Y. H., 2014, "Application of MS Excel in Teaching Statics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 2, No. 1, pp. 21~28.
- (4) Park, S. B., 2023, "Analysis of Different Views on Job Competency of New Scientists and Engineers between Mentor and New Employee in S&T," *KISTEP Issue Paper 2023-09*, Vol. 349, pp. 1~26.

2인 탑승 방지를 위한 전동킥보드 데크 설계

조한승* · 이현석* · 최승애* · 김민구**

* 한성대학교 기계전자공학부

The Design of an E-Scooter Deck to Prevent Two-Person Boarding

Hanseung Jo*, Hyunsuk Lee*, Seungae Choi* and Mingu Kim**

* Division of Mechanical and Electronics Engineering, Hansung University

(Received April 26, 2024 ; Revised November 18, 2024 ; Accepted November 19, 2024)

Key Words: E-Scooter(전동킥보드), Force Sensing Resistor(힘 감지 저항), Pressure Sensors(압력센서), Threshold(임계값), Filtering(필터링), Personal Mobility(개인형이동장치)

초록: 본 논문에서는 2인 탑승을 방지하기 위한 전동킥보드 데크 설계를 다룬다. 전동킥보드는 한국을 비롯한 전 세계에서 상용화되었으며, 많은 사람들이 이용하고 있는 교통수단 중 하나이다. 전동킥보드는 공용과 개인용으로 구분되며, 핸들을 통해 잠금을 풀고 속도와 방향을 조절해 쉽게 조작할 수 있다. 하지만 빠르고 쉽게 작동할 수 있는 안전 시스템이 부족하며, 특히, 2인 탑승은 사고 발생 시 큰 피해를 야기시킨다. 본 논문에서는 사고를 예방하기 위하여 2인 탑승 방지를 위한 전동킥보드 데크를 설계하고 제작한다. 본 논문에서는 2인 탑승 판별 알고리즘을 설계하기 위해 압력센서와 임계값 기법을 사용하였으며, 킥스탠드와 모터를 이용해 전동킥보드 제동 시스템을 설계하였다. 실험을 통해 제안한 전동킥보드 시스템의 2인 탑승 여부 판별 성능을 검증하였다.

Abstract: This paper deals with the design of an E-scooter deck to prevent two-person boarding. Commercial E-scooters are easily operated by unlocking and adjusting speed and direction through the handle. However, the safety system of E-scooters is insufficient. Especially, two-person boarding poses the highest risk in the event of an accident. In this study, an E-scooter deck is designed and manufactured to prevent accidents by addressing the issue of two-person boarding. Pressure sensors and thresholding technique are used to design the two-person boarding detection algorithm. The designed kickstand and PWM(Pulse-width-modulation) signals are utilized for the E-scooter braking system. Hardware experiments are performed to demonstrate the performance of the proposed E-scooter deck to prevent two-person boarding.

1. 서론

현재 1인 가구, 청년 가구 비율이 높아지면서 가격과 크기가 부담스럽지 않은 개인형 이동수단(PM: personal mobility)을 찾고 있다. 개인형 이동수단은 전동휠, 전동킥보드, 전기자전거 등 전기를 동력으로 하는 1인용 이동 수단을 말하는데, 편리성, 기동성, 자율성 등으로 인해 대중의 관심 및 이용이 증가하고 있다.⁽¹⁾ 특히, 인구가 밀집된 대도시에서 대중교통을 이용하기 위해 지하철역, 버스정류장 등 근거리 구간 이동에 개인형 이동수단 사용이 용이하다.⁽²⁾ 그중 많은 사람들의 이동수단으로 사용되는 전동킥보드는 악셀 버튼과 손잡이의 방향 조정으로 작동되는 개인형 이동수단이다. 짧은 거리를 쉽고 빠르게 이동이 가능함에 따라 소비율이 높아졌고 공유 전동킥보드 사업이 국내에 들어오면서 시장이 폭발적으로 성장했다. Fig. 1은 서울특별시의 공유 전동킥보드 운영현황으로 2018년 150대에서 2023년 1월 37,117대로

† Corresponding Author, mingukim@hansung.ac.kr

© 2025 The Korean Society of Mechanical Engineers

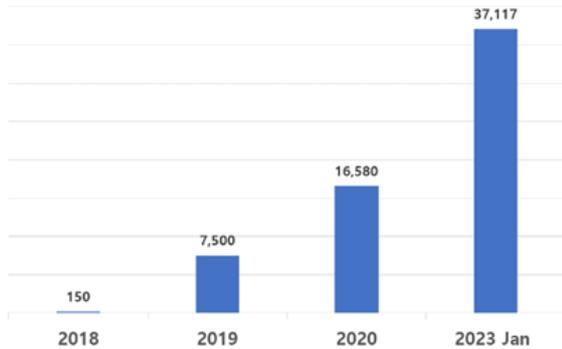


Fig. 1 Operation status of public e-scooter in Seoul

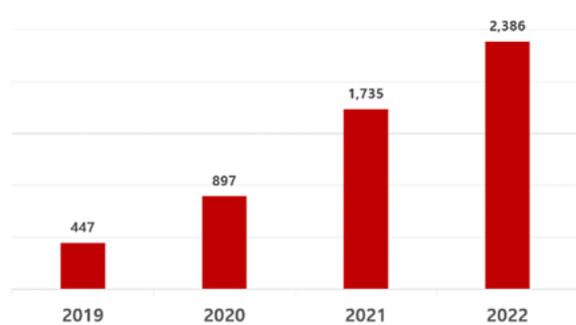


Fig. 2 The personal mobility accidents by year

증가하였음을 보여준다.⁽³⁾

하지만 이용률이 증가함에 따라 교통사고 또한 매년 증가하고 있다. Fig. 2는 도로교통공단에서 제공하는 전동킥보드를 포함한 개인형 이동장치의 연도별 교통사고 건수를 보여주고 있다. 통계에 따르면 2019년에 비해 2022년에는 약 5배 이상 증가하였다.⁽⁴⁾ 특히 많은 사람들이 안전장치 미착용과 2인 탑승 등 교통법규를 지키지 않아 사고 발생률이 높고 자동차와 달리 안전장치가 미흡하기 때문에 피해 크기가 크다. 이러한 이유로 전동킥보드를 포함한 개인형 이동장치 안전사고 방지를 위한 연구가 활발히 진행되었다.⁽⁵⁻⁷⁾ 공유서비스를 제공하는 기업에서는 공유 전동킥보드를 운전하는 사용자의 안전을 위해 헬멧 착용과 1인 탑승 확인 절차를 반드시 시행해야 한다. 싱가포르의 한 공유킥보드 기업에서 '전동킥보드 브레인'이라는 2인 탑승 금지를 예방할 수 있는 시스템을 시범 테스트하고 있는 것으로 알려졌으나 국내에 도입되진 않았다.

본 연구에서는 여러 개의 압력센서를 이용하여 분포되는 압력을 측정함으로써 탑승 인원을 판별하고자 하였다. 압력센서는 보행패턴 추정에 대한 연구⁽⁸⁾, 누운 자세 판별 연구⁽⁹⁾ 착석 위치 추정과 관련된 연구,⁽¹⁰⁾ 배관 압력 모니터링 연구⁽¹¹⁾ 등과 같이 다양한 분야에서 활용되었으며, 본 연구에서 목표로 하는 2인 탑승 감지에 적합하다고 판단하였다. 기존의 2인 탑승 방지 관련 연구로 로드셀을 이용하여 탑승 중량 측정을 통한 2인 탑승 방지 연구,⁽¹²⁾ 초음파센서와 압력센서를 이용해 탑승자의 발 크기와 몸무게 측정을 통한 2인 탑승 방지 연구⁽¹³⁾ 등이 수행된 적이 있다. 본 연구에서는 전동킥보드의 구조상 2인 탑승 시 탑승자가 발을 디딜 수 있는 공간이 한정됨을 착안하여 압력센서만을 이용해 2인 탑승 여부를 판단하는 알고리즘을 제안하였다.

본 연구에서는 여러 개의 압력센서를 사용하므로 발생할 수 있는 측정 오차를 줄이고 2인 탑승 판별 알고리즘의 정확성을 높이기 위해 적절한 임계값(threshold)을 설정하고 필터링(filtering)을 통해 2인 탑승 여부를 판별할 수 있도록 설정하였다. 2인 탑승이 감지되면 전동킥보드가 운행되지 않도록 키스텐드가 내려가도록 하였으며, 주행 중 감지되었다면 서서히 속도를 줄이도록 하는 제어를 설계하였다.

본 논문의 2절에서는 다수의 압력센서를 이용한 2인 판단 알고리즘과 센서 값의 오차를 줄이기 위한 임계값을 이용한 필터링 설계를 서술하고, 제어기 설계를 다룬다. 3절에서는 자체 제작한 부품인 키스텐드를 포함한 전동킥보드 데크 하드웨어 설계를 다룬다. 4절에서는 본 연구에서 제안한 2인 탑승 방지시스템의 성능 검증을 위한 하드웨어 실험을 다룬다. 5절에서는 결론을 내리며 본 논문을 마무리한다.

2. 2인 탑승 판별 알고리즘 및 제어기 설계

본 연구에서는 전동킥보드 2인 탑승을 방지하기 위해 먼저 2인 탑승 감지 시스템을 설계하였다. 공유 전동킥보드를 주행하기 위해선 운전면허증이 필요하기 때문에 만 18세 이상 남녀 발 사이즈를 기준으로 2인임을 감지하는 알고리즘을 설계하였다. Table 1은 한국인 인체 치수 조사 통계 자료 중에서 한국 성인 남녀의 발 사이즈를 정리한 표이다.⁽¹⁴⁾ 남자의 발 사이즈 최대값 297.1 mm인 점을 고려하여 설계 기준

Table 1 Foot size for adult men and women and foot size for design

	Minimum	Maximum
Men	215 mm	297 mm
Women	193 mm	272 mm
Design criteria	190 mm	300 mm

Table 2 Deck size by public e-scooter company

A	46 cm × 15 cm
B	48 cm × 18 cm
C	46 cm × 15 cm
The designed deck	50 cm × 22 cm

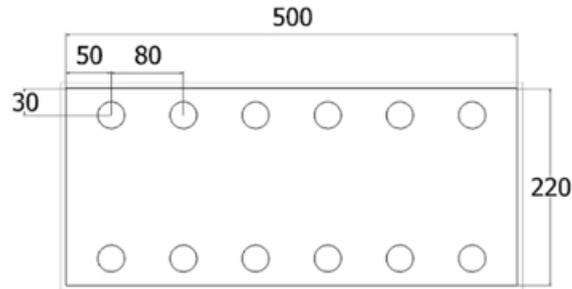


Fig. 3 Pressure sensors distribution (unit: mm)

발 사이즈의 최대값을 300 mm로 정하였고 성인 여자의 발 사이즈 최소값 193 mm를 고려하여 설계 기준의 발 사이즈 최소값을 190 mm로 정하였다.

전동킥보드에 2인이 탑승할 경우 경고등과 경고음으로 경고를 준 후 PWM(pulse width modulation) 신호를 통해 전동킥보드의 후륜 바퀴의 속도를 늦춘다. 이후 익스텐드를 이용하여 후륜 바퀴를 물리적으로 제동하여 2인 주행을 못하도록 막는다.

본 연구에서는 스케이트보드를 이용하여 개조가 어려운 전동킥보드의 데크를 대체하여 진행하였다. 한국에서 운영 중인 공유 전동킥보드 업체 중 규모가 큰 3곳의 데크 크기를 고려하여 연구에서 사용할 스케이트보드를 정하였다. 측정된 전동킥보드 데크의 크기는 Table 2에 정리하였고 이를 바탕으로 설계할 데크의 크기를 정하였다.

하중 감지를 위해 로드셀이 많이 사용되는데, 사람의 체중 감지를 위해 필요한 로드셀의 크기 및 큰 질량은 본 연구에서 고려하는 전동킥보드 시스템에는 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 전동킥보드 시스템 사양을 고려하여 12개의 압력센서를 배치하여 압력센서에 측정된 신호를 활용하여 탑승 인원 수를 판별하려 하고자 한다. 압력센서 배치는 데크의 크기와 성인의 발 사이즈를 고려하여 Fig. 3과 같이 배치하였다. 총 12개의 압력센서를 2개의 열에 각각 6개씩 배치하였다. 전동킥보드를 운전할 때 주행 방향을 바라보고 탑승하기 때문에 주행 방향을 기준으로 왼발, 오른발을 나누기 위해 데크를 좌우로 분리하였다. 성인 발사이즈의 최소 길이를 판별할 수 있도록 센서의 중심점을 기준으로 센서 간에는 8 cm 간격을 두고 데크의 앞과 뒤쪽에서는 5 cm 간격으로 배치하였다. 사람이 서있을 때 발의 압력이 발의 아치보다는 발날쪽에 작용하는 점을 고려하여 압력센서의 위치를 보드의 중앙이 아닌 좌우 모서리로부터 3 cm 떨어진 곳에 배치하였다.⁽⁸⁾ 본 연구에서 사용할 압력센서는 FSR-402로 센서 지름이 18 mm이다.

지름이 r인 원형 모양의 FSR-402 센서를 셀(cell)이라고 하자. 셀 간 수평 및 수직 간격을 각각 w, h라고 하고 한 발당 1 × 3개의 압력센서를 밟는다고 하면 측정 가능 물리 공간(A)은 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다.⁽⁹⁾ 본 연구에서 사용한 FSR-402 센서를 고려하였을 때 w = 142 mm, h = 62 mm, r = 18 mm이므로 측정 가능 최대 면적은 160 mm × 240 mm이다.

$$A = (r + w) \times 3(r + h) \tag{1}$$

Fig. 4는 전동킥보드에 1인과 2인이 탑승할 시 예상하는 발의 위치와 밟힌 압력센서를 표현한 그림이다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 1인, (c)는 2인이 탑승한 경우의 예상 발 위치를 보여준다. 전동킥보드의 데크 모양이 주행 방향으로 긴 직사각형 모양이기 때문에 탑승 시 양발을 모아서 타기 보다는 균형을 잡기 위

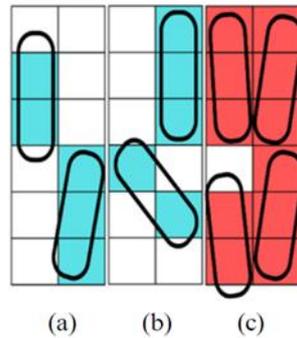


Fig. 4 The expected foot position on an E-scooter deck: (a) and (b) one-person boarding; (c) two-people boarding

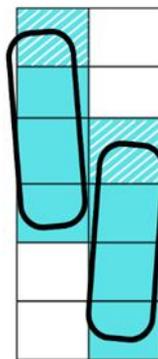


Fig. 5 The maximum length in the case of one-person boarding

해서는 앞뒤로 간격을 두고 타는 것이 일반적이다. 전동킥보드를 운전할 때 주행 방향을 바라보고 타기 때문에 몸이 주행 방향을 향한 상태로 데크 위에 올라타게 된다. 전동킥보드는 정지해 있을 때 좌우균형을 잡기 위해서는 한발을 지면에 내려 중심을 잡을 수 있고 운전을 시작한 이후에 중심을 잡기 위해서는 양발을 데크 위에 올려야 한다. 주행 중에는 정지하기 위해서 무게중심을 뒤쪽으로 옮겨 감속에 저항해야 안전한 주행을 할 수 있기 때문에 발을 앞뒤로 놓아 주행하는 사람이 많다. 1인이 탑승할 시 데크 위에서 여러가지 자세를 취할 수 있을 정도로 넉넉한 면적이지만 2인이 탑승하기에는 면적이 협소하여 양 발을 모아 나란히 서있는 자세가 유일하다.

Fig. 5의 경우는 설계 최대 발길이 300 mm인 사람 1인이 탑승한 발의 위치로 길이상 8개의 압력센서를 밟을 수 있다. 하지만 사람의 발은 아치를 가지고 있기 때문에 발바닥 전체에서 체중을 동일하게 분산하여 지지하는 것이 아니라 발바닥 각 부분마다 체중을 다르게 지지한다. 부동자세 시 하중이 가장 많이 전달되는 부분은 뒤꿈치이고 다음으로 발 날 마지막으로 앞꿈치에 전해진다.⁽⁸⁾ 또한 탑승 시 신발에 영향을 받아 하중이 모두 전해지지 않고 보다 약한 하중이 전해져 본 연구에서 설정한 임계값 보다 작으면 입력 신호값을 제거할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서 고려한 압력센서 배치도에서 1인 탑승 시 발 하나에 가해지는 압력의 유효 범위는 최대 3개의 압력센서가 측정 가능한 범위로 판단하였다.

Table 3은 발의 개수와 밟힌 압력센서의 개수를 표로 정리하였다. 최소 발 길이에서 3발일 때 밟힌 압력센서의 개수와 최대 발 길이에서 2발일 때 밟힌 압력센서의 개수가 6개로 같기 때문에 2인 이상 기준을 3발일 때 그중 밟힌 압력센서의 개수가 8개 이상일 때로 정하였다. 성인 1명의 발 하나가 가할 수 있는 유효압력센서의 수는 3개로 2인 탑승 판단 기준을 7개 이상으로 설정하여야 하지만 측정 오차를 고려하여 8개 이상이 감지되면 2인 탑승으로 판단하였다. 즉 8개 이상 압력센서가 밟혔다면 2인 탑승으로 인지하도록 설계하였다.

본 연구에서 제안하는 2인 탑승 판별 알고리즘은 Fig. 6에 정리하였다. 하중이 가해질 때 임계값 이상의 압력이 측정되는 압력센서의 수가 8개보다 많으면 2인 탑승으로 판단한다. 본 연구에서 제안한 알고리즘을 통해 2인 탑승임이 판단되면 먼저 10초 동안 경고를 준다. 경고를 준 이후에도 2인 탑승이 지속

Table 3 The number of treadable pressure sensors according to the number of feet

Number of feet	Number of pressure sensors stepped on
1	$2 \leq x \leq 3$
2	$4 \leq x \leq 6$
3	$6 \leq x \leq 9$
4	$8 \leq x \leq 12$

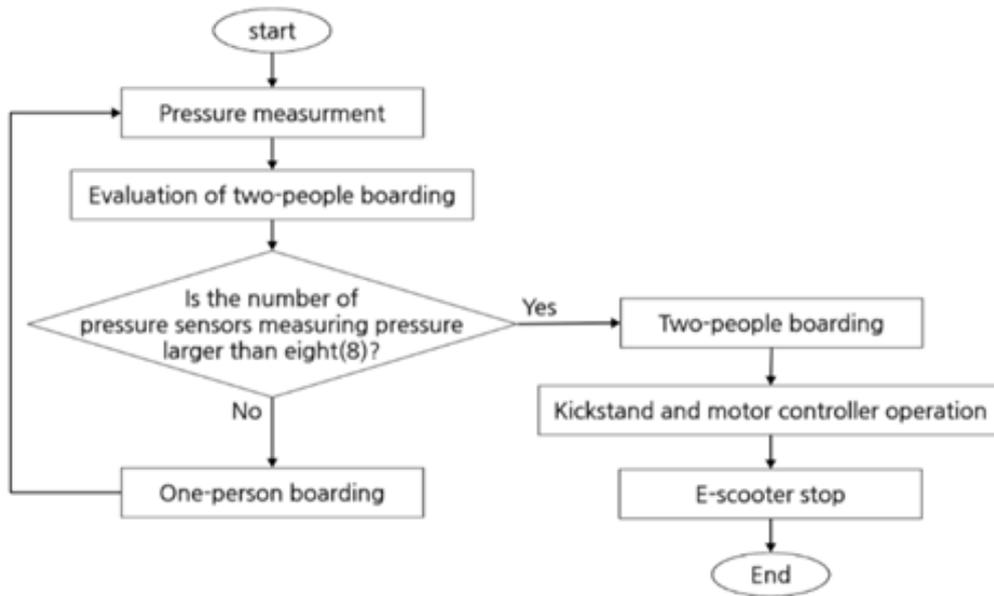


Fig. 6 Two-person boarding detection algorithm

되면 PWM 제어로 모터의 속력을 낮춘 다음 킥스탠드가 내려와 2인이 주행을 못하도록 하였다. 내려온 킥스탠드를 올리기 위해서는 2인이 아닌 상태에서 서보모터 스위치를 눌러야 올라가도록 설계하였다.

본 연구에서는 FSR-402 압력센서를 사용하였다. FSR-402는 압력에 따라 저항이 바뀌는 가변저항이다. 압력이 가해지지 않으면 높은 저항값을 나타내고 센서에 압력을 가하면 저항값이 점차 낮아진다. 따라서 압력센서는 가변저항의 특성을 이용하여 전압 분배법칙을 사용해 압력에 따라 전해지는 저항값을 수치화할 수 있다. Fig. 7은 본 연구에서 사용한 FSR-402 압력센서 형상을 보여주고 있으며, Table 4에 FSR-402 압력센서 사양을 정리하였다.

압력센서는 전압 분배법칙을 이용하여 저항값을 확인할 때 가변저항 외에 어떤 값의 저항을 사용하나에 따라 압력센서의 해상도가 달라진다. 본 연구에서는 사람의 발이 인식되기 쉽도록 비교적 낮은 저항값의 저항인 10 KΩ을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 FSR-402 압력센서를 통해 측정되는 하중은 0-1,023 사이의 값으로 표현된다. 이 수치를 v_p 라고 하고, 입력전압을 v_{cc} 라고 할 때, 출력전압 v_o 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$v_o = v_p \times (v_{cc}/1023) \tag{2}$$

본 연구에서 사람이 데크에 탑승했을 때 정상적으로 하중이 가해지면 압력센서에서 700 이상의 비트 값을 얻을 수 있음을 확인하였다. 하지만 압력센서를 밟는 발이 몸의 중심에서 멀어지는 순간이나 신발 밑창의 모양이 상이한 점, 그리고 발의 특성상 앞쪽에 하중 전달이 어려운 경우, 700비트보다 낮은 값이 출력되게 된다. 본 연구에서는 여러 번의 실험을 통해 탑승자의 발을 통해 정상적으로 하중이 가해진다고 판단하는 임계값($v_{p_{th}}$)을 300비트값으로 설정하였다. 압력센서에서 v_p 가 $v_{p_{th}}$ 보다 큰 값으로 입력

Table 4 FSR-402 specification

Actuation force	0.1 N
Force sensitivity range	0.1 - 10.0 ² N
Size	18.28 mm
Thickness range	0.2 - 1.25 mm

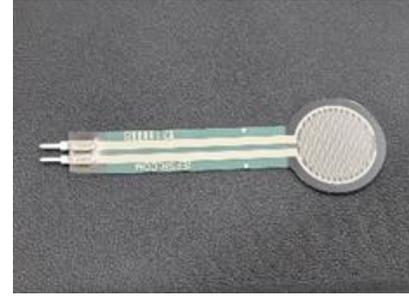


Fig. 7 FSR-402 pressure sense

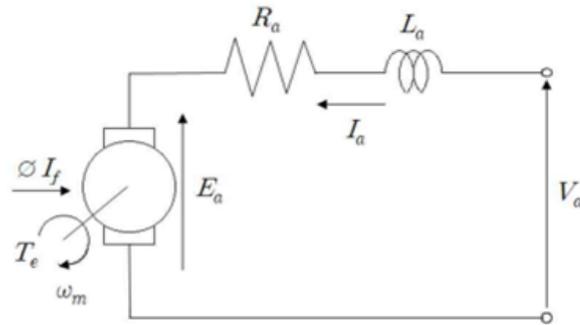


Fig. 8 Equivalent circuit of DC motor

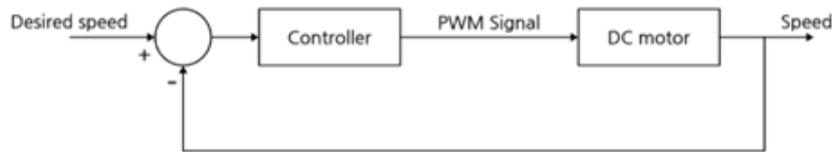


Fig. 9 The block diagram of PWM motor controller

되는 경우를 사람이 압력센서를 밟고 있는 상태로 간주하고 2인 탑승 여부를 판단하고자 한다.

실제 전동킥보드가 아닌 스케이트 보드를 이용하여 테크를 설계하였기 때문에 전동킥보드의 후륜 바퀴를 묘사하기 위해 DC 모터를 사용하였다. DC 모터는 스케이트보드를 움직이기 위해 사용한 것이 아닌 2인 탑승 여부를 판단하여 모터의 속력을 나타내고 제어하기 위해 사용하였다. 따라서 이에 용이한 소형 마그네틱 DC 모터를 사용하였다. 이는 부하 변동이 거의 없는 상황에서 용이한 제어성을 보여준다. 또한 속도 제어가 쉬우며 속도 제어 범위가 넓다는 장점을 가지고 있다. 이를 통해 가변속 구동 또는 가변 토크 제어에 가장 많이 사용된다.⁽¹⁵⁾

DC 모터 작동회로를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a I_a + E_a \quad (3)$$

$$E_a = K_e \omega_m \quad (4)$$

$$T_M = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (5)$$

여기서 V_a 는 전기자 회로에 가해지는 전압이며 L_a 은 전기자 권선의 인덕턴스, R_a 은 전기자 권선의 저항, E_a 는 역기전력, 마지막으로 I_a 는 전기자 권선의 전류를 의미한다. 식 (4)에서 K_e 는 역기전압 상수이며 ω_m 는 모터 속도이다. 식 (5)는 모터의 회전력(토크) T_M 을 계산하기 위한식으로 B와 J는 전체 시스템의 마찰 계수와 관성 모멘트를 나타내며, T_L 은 부하 토크이다.⁽¹⁶⁾ 모터의 전기자 회로 식과 토크 계산식을 이용하여 모터의 전기적, 물리적 시스템을 모델링 할 수 있다. Fig. 8은 모터의 전기적 등가회로를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 킥보드의 속도를 제어하기 위해 아두이노의 PWM 출력핀을 이용하여 PWM 제어를 활용하였다. PWM 제어는 일정한 주기에서 펄스 폭을 조절함에 따라 변화하는 평균전압을 모터에 인가하는 방식이다. On, off의 디지털 신호를 이용하여 아날로그 신호처럼 나타낼 수 있다. 주기 내에서 high 상태가 유지되는 비율을 듀티 사이클(duty cycle)이라고 하며 백분율로 나타낸다.

아두이노는 PWM 출력이 8 bit이기 때문에 0 - 255의 수치로 표현하며 아두이노 메가의 PWM 핀에서 490 Hz로 신호가 나오기 때문에 한 펄스당 약 0.002초의 주기를 갖는다. 듀티사이클의 주기는 신호가 켜져 있는 시간(T)를 이용하여 식 (6)로 표현한다.⁽¹⁷⁾ 평균전압은 듀티 사이클과 비례하여 수식을 통해 구할 수 있다. 평균전압 수식은 디지털 신호의 전압인 V_{in} , V_{out} 으로 표현한다. 아두이노에서 출력전압으로 5 V를 사용하므로 V_{in} 의 전압값은 5 V가 인가된다.

$$C_{D.C}(\%) = \frac{T_{high}}{T_{high}+T_{low}} \cdot 100 = \frac{T_{high}}{T} \cdot 100 \tag{6}$$

$$V_{avg} = \frac{1}{T} \int v dt = \frac{T_{high} \times V_{in} + T_{low} \times V_{GND}}{T} = \frac{T_{high}}{T} \times V_{in} = D_{D.C} \times V_{in} \tag{7}$$

T_{high} 는 듀티 사이클 주기 내에 전압이 인가되는 시간을 의미한다. 식 (7)은 한 주기 중 on이 되는 비율인 듀티사이클을 T_{high}/T 로 표현하였고 PWM에 사용된 디지털 신호 전압의 평균전압량을 알 수 있다. 모터의 구동 전압을 변화시켜 속도를 제어한다.

탑승자가 킥보드에 탑승하여 가속 스위치를 누르면 아두이노 메가로부터 PWM 신호를 받는다. 이때 듀티사이클 100%로 5 V가 지속적으로 가해진다. 따라서 모터는 평균전압으로 5 V가 인가된다. 만약, 킥보드 운행 중 2인 탑승임이 판별되면 속도를 감속시켜 킥보드 운행을 종료시킨다. Fig. 9는 모터 PWM 제어기의 블록선도를 보여준다.

3. 하드웨어 설계

본 연구에서 고려한 스케이트보드는 전동킥보드 데크와는 달리 특성상 바퀴가 지면에 고정되어 있지 않고 사람이 탑승할 경우 좌우로 기울어지는 문제로 인해 지지대를 제작하였다. Fig. 10은 본 연구에서 고려한 전동킥보드 형상과 이를 고려하여 실험에서 사용한 스케이트보드 데크 형상을 보여주고 있다.

Fig. 11은 본 연구에서 개발한 2인 탑승 감지 킥보드 제어부 시스템 구성도를 보여주고 있다. 먼저 2인 탑승 여부를 판단하기 위한 압력센서 12개를 사용한다. 12개의 압력값들을 한 번에 받기 위해 아날로그 핀이 많은 아두이노 메가(Arduino Mega)를 사용하였다. 스케이트보드 중앙 발판 부분에 12개의 압력센서를 Fig. 12와 같이 부착하였다. Table 5는 스케이트보드에 부착한 압력센서의 위치를 나타낸다.

다음으로 전동킥보드에 2인이 탑승할 경우 주행을 막기 위한 킥스탠드를 제작하였다. 실제 전동킥보드가 후륜 구동임을 고려하여 데크의 하단부, 후방에 모터 바퀴와 나란히 설치하였다. 킥스탠드의 모델링은 Fig. 13과 같다. 킥스탠드는 구동 중인 모터의 바퀴와 맞물려 마찰을 유발하도록 바퀴의 지름과 같은 넓이로 제작하였다. 킥스탠드를 내리기 위하여 서보모터에 결합하여 2인 탑승이 판단되면 서보모터의

Table 5 Pressure sensor number

Pressure sensor number	
Pressure sensor 1	Pressure sensor 7
Pressure sensor 2	Pressure sensor 8
Pressure sensor 3	Pressure sensor 9
Pressure sensor 4	Pressure sensor 10
Pressure sensor 5	Pressure sensor 11
Pressure sensor 6	Pressure sensor 12



Fig. 10 Comparison of actual electric kickboard and the designed skateboard deck size

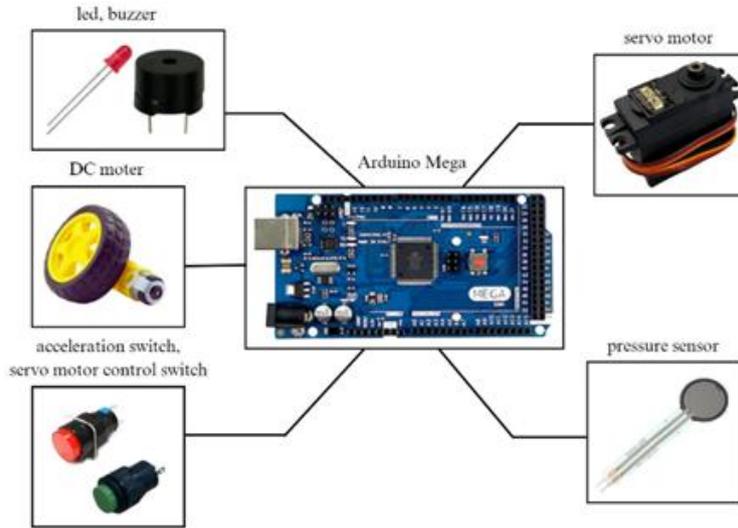


Fig. 11 Control system configuration



Fig. 12 Pressure sensor attached to the designed skateboard deck

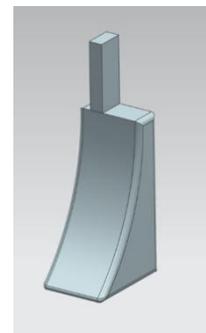


Fig. 13 Kickstand modeling

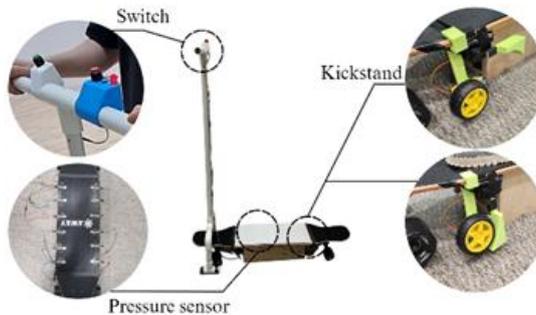


Fig. 14 Hardware integration

각도를 변화시켜 작동한다. 이에 따라 초기 상태에서는 지면과 수평 상태로 0도에 위치하고 2인 탑승 시 킥스탠드가 결합된 채 서보모터가 90도 회전한다. 내려간 킥스탠드는 2인이 아닌 상태에서 서보모터 스위치를 눌러야 주행이 가능한 본래 상태로 복귀한다. 또한 전동킥보드의 후륜 바퀴를 묘사한 DC 모터는 가속스위치를 누르면 돌아가도록 설계하였다. 스위치와 경고용 LED와 부저를 설치하기 위해 PVC 파이프 손잡이를 제작하였고 위 부품들을 부착하였다. Fig. 14는 전체 하드웨어 통합시스템을 보여주고 있다.

Table 6 One-person boarding (A type, B type, C type) results

A type		B type		C type	
901	0	0	938	0	0
964	0	0	801	952	663
965	0	0	925	954	949
0	0	851	0	963	944
925	958	970	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Table 7 Two-people boarding (D type) result

D type	
970	981
963	893
845	797
0	0
922	947
956	976



Fig. 15 One-person boarding positions (A type, B type, C type)



Fig. 16 A two-people boarding position (D type)

4. 하드웨어 실험결과

제어부와 구동부를 합친 통합 시스템을 제작하여 탑승 인수에 따른 실험을 진행하고 결과값을 분석하였다. 한국인 성인 남자(20 - 24세) 평균 체중은 약 72.68 kg, 성인 여자(20 - 24세) 평균 체중은 약 55.31 kg 으로 조사되었다.⁽¹⁵⁾ 본 실험에 참여한 피실험자는 남자 1명, 여자 1명으로 각각 평균 체중에서 ± 3 kg 범위에 있다. 1인 탑승 실험에는 남자 참여자가 수행했으며, 2인 탑승 실험에는 남자 참여자 1명, 여자 참여자 1명이 수행하였다. Fig. 15는 1인이 탑승하였을 때 여러 자세를 취한 모습이다. Table 6에서 1인이 탑승하면 각 자세마다 5개에서 6개의 압력센서가 눌리는 모습을 확인하였다. 실험에서 1인이 여러 자세값을 취해도 눌린 압력센서가 7개를 초과하지 않았다.

Fig. 16은 2인이 탑승했을 때 모습이고 Table 7은 2인 탑승 시 나온 결과값이다. 데크에 2인이 탑승할 때에는 공간이 제한적이기 때문에 취할 수 있는 자세가 한정적이다. 이 경우 10개의 압력센서에서 임계값(v_{pth})을 초과하는 하중이 감지되었으면 기준 개수 8개를 초과하므로 2인 탑승으로 판단되었다. 이후 경고등과 경보음이 울리면서 탑승자에게 2인 탑승임을 알렸다. 2인이 탑승했을 때 탑승자들의 신발은 데크 전체를 덮고 있지만 데크 위에 배치된 압력센서의 결과값은 Table 7과 같이 나타내있었다. 손잡이 가까이 위치한 운전자는 뒤에 사람이 탑승하여 몸을 앞으로 굽힌 상태로 몸의 무게 중심이 앞으로 이동하여 앞쪽에 압력이 치우친 것을 확인하였다. 또 pressure sensor 4번과 10번 위에는 뒤에 탑승한 사람의 신발이 덮여 있지만 발의 중심과 뒷꿈치에 압력이 집중되어 4, 10번에서는 압력센서의 값이 임계값을 넘지 못하였다.

Fig. 17의 파란색 선은 모터의 속도이고 빨간색 선은 2인 탑승 판단 알고리즘을 확인하기 위한 선으로 0과 1값으로 표현하였으며 2인 탑승이 판단될 때 1로 표현하였다. 사용한 모터 바퀴의 지름은 66 mm이고 모터에 5 V 전압이 인가될 때 모터는 100 rpm으로 회전하므로 0.356 m/s의 속도로 작동한다. 그래프에서는 10초에 2인 탑승이 감지되었고 그 이후 10초 뒤에 속력이 감소되는 것을 확인하였다.

Fig. 18의 파란색 선은 서보모터의 각도값이고 빨간색 선은 Fig. 17과 같이 2인 탑승 판단을 표현하였다. 그래프에서 5초에 2인 탑승이 판단된 후 10초 뒤 서보모터의 각도가 90° 회전하면서 키스텐드가 작동

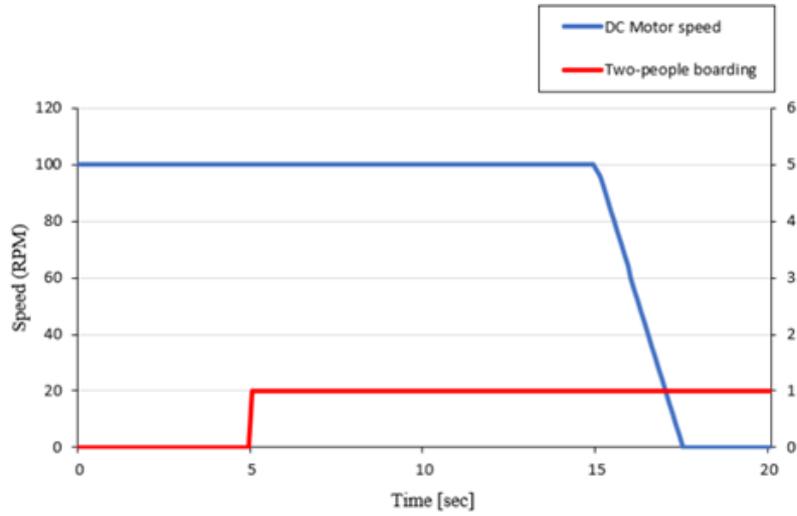


Fig. 17 Time history of motor speed control with PWM on two-person boarding

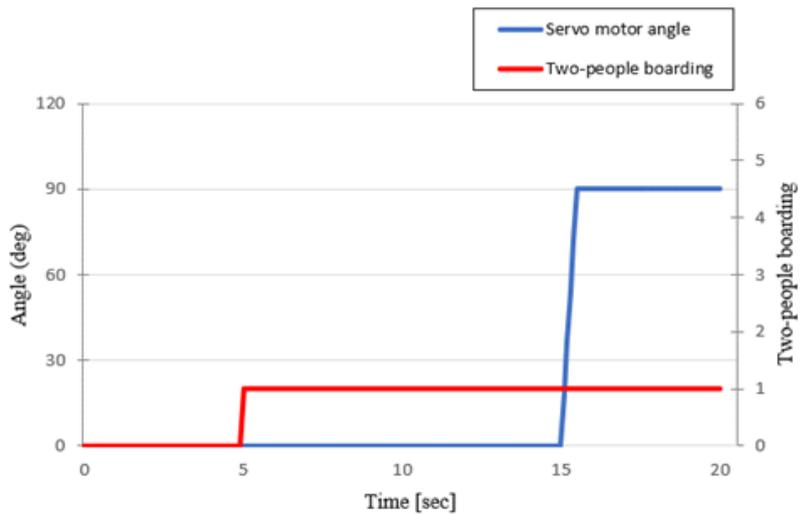


Fig. 18 90-degree rotation of the kickstand 10 seconds after the two-person boarding



Fig. 19 Kickstand operation

되는 것을 확인하였다. Fig. 19는 1인과 2인이 탑승했을 시 킥스탠드가 실제 정상적으로 작동하는 모습을 보여준다. 1인이 탑승했을 때는 2인으로 판단하지 않아 킥스탠드가 작동하지 않지만 2인이 탑승하였을 시 경고를 준 후 10초 뒤 킥스탠드가 작동하는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 전동킥보드 사고를 예방하고자 2인 탑승 방지 전동킥보드 데크 설계를 다루었다. 12개의 압력센서를 이용해 탑승자의 하중 분포를 감지하여 2인 탑승 여부를 판별하는 알고리즘을 설계하고 적용하였다. 측정 잡음 및 오작동 방지를 위해 임계값을 설정하고 임계값 이상의 데이터가 들어올 경우 하중이 정상적으로 감지되는 것으로 설계하였다. 본 연구에서 제안한 알고리즘에 의해 2인 탑승이 감지되면 경고 알람을 하고 키스탠드 작동 및 모터속도 제어를 통해 전동킥보드의 운영을 중지시켰으며, 실험을 통해 그 성능을 확인하였다. 본 연구결과를 공유 전동킥보드에 적용하면 개인형 이동장치에 관한 사고를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 2인 탑승 여부 감지를 위해 사용하는 압력센서는 내구성이 낮다는 한계를 가지고 있다. 따라서 추후 연구로 낮은 내구성 문제를 보완하기 위해 압력센서를 on-off 스위치 등으로 교체하는 것과 같은 내구성 강화 연구를 수행할 예정이다. 또한 탑승 인원 파악의 정확도를 높이기 위해 하중이 감지되는 면적을 기반으로 탑승자의 체격을 추정하고, 이에 맞는 체중을 예측하는 연구 및 센서출력 감도 측정을 통한 임계값 선정 보정 연구 등이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임.

참고문헌 (References)

- (1) Park, M., 2021, "Study on Media Reporting on Mobility Innovation," *Master's Thesis*, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea.
- (2) Hong, S., 2020, "A Study on Improving User Experience in the Electric Scooter Sharing Service: Focused on Rental through a Mobile Application and Operation Processes," *Master's Thesis*, Ewha Women University, Seoul, Republic of Korea.
- (3) Public Data Portal, 2024, *Seoul Metropolitan Government Number of Shared Electric Kickboard Devices* (<https://www.data.go.kr/data/15112123/fileData.do>), Ministry of the Interior and Safety, Sejong, Republic of Korea.
- (4) Korea Road Traffic Authority, 2023, *Statistical Analysis of Traffic Accidents* (https://taas.koroad.or.kr/web/shp/mik/main.do?menuId=WEB_KMP), Korea Road Traffic Authority, Wonju, Republic of Korea.
- (5) Kim, M. G. and Kim, J. J., 2021, "Structural Safety Analysis of Electric Kickboard According to Shape of Connection Parts Using Finite Element Analysis," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 20, No. 12, pp. 65~70.
- (6) Kim, M. G., Kim, J. S. and Kim, J. J., 2022, "2-D Topology Optimization of the Connection Part of the Electric Kickboard in Case of Front Collision," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 39, No. 11, pp. 841~848.
- (7) Kim, D. and Jung, J. W., 2022, "Deep Learning-based Electric Kickboard Helmet Detection under Night Driving Conditions," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 71, No. 10, pp. 1411~1419.
- (8) Choi, D. Y. and Kim, K. H., 2016, "A Study of Human Gait Discrimination Using Multi-Pressure Sensor," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 65, No. 4, pp. 673~677.
- (9) Cho, M. J. and Hong, Y. S., 2019, "A Multi-Tier Based Lying Posture Discrimination Algorithm Using Lattice Type Pressure Sensors Allocation," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 20, No. 6, pp. 402~409.
- (10) Park, J. W., Jung, B. C., Moon, S. J. and Yang, S. J., 2021, "A Study on the Non-Intrusive Pipeline Pressure Monitoring Sensor Using Force Sensing Resistor (FSR)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 45, No. 8, pp. 675~685.
- (11) Shin, D. H., Hwang, T. Y. and Lee, K. M., 2021, "Development of the Sitting Position Estimation Algorithm and Sitting Position Correction Chair Using Pressure Sensors," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 45, No. 8, pp. 709~714.
- (12) Kim, J. E., Kim, J. Y., Lee, J. S. and Choi, J. U., 2022, "Optimal Design of Safety Device for Riding Electric Kickboard Using Load Cells," *Proceedings of the KSMPE 2022 Spring Conference*, Yeosu, Republic of Korea, pp. 354~355.

- (13) Ahn, S. B., Min, I., Hwang, S. and Kim, S., 2023, "Electric Kick-Board with Two-Person Riding Prevention Using Ultrasonic and Pressure Sensors," *Proceedings of the KIEE 2023 Industrial Electrical Application Fall Conference*, Busan, Republic of Korea, pp. 146~147.
- (14) Size Korea, 2004, *Search for Human Items* (<https://sizekorea.kr/human-meas-search/human-data-search/meas-item>), KATRI, Seoul, Republic of Korea.
- (15) Jang, H. M., Kim, Y. B., Jeon, H. W., Park, S. H., Jun, H. S., Choi, Y. K. and Kim, Y., 1999, "Sensorless Speed Control of Micro DC Motor," *Proceedings of the KIEE 1999 Summer Conference*, pp. 382~384.
- (16) An, J. Y., 2022, "Development of Anti-Pitch Method for Sunroof Controller Using DC Motor Modeling," *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 71, No. 1, pp. 17~21.
- (17) Kim, T. S., Jang, Y. H. and Jeong, H. D., 2018, "Implementation of Autonomous Vehicle Using Raspberry Pi," *Proceedings of the 2018 Korean Society of Computer Information Summer Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 287~288.

ESG 기반 통합 관제 작업자 위치 측위 플랫폼 안전관리에 관한 연구

서 원 기^{*†}

* 넥스트코어테크놀로지

A Study on Strengthening Safety of ESG-Based Integrated Monitoring Operator Location Positioning Platform

Won Gi Seo^{*†}

* Nextcore Technology

(Received May 14, 2024 ; Revised February 20, 2025 ; Accepted February 27, 2025)

Key Words: Environment Social Governance(ESG, 환경, 사회, 지배구조), Safety Management(안전관리), Digital Twin(디지털 트윈), Position(위치)

초록: ESG는 환경(environment), 사회(social), 지배구조(governance)를 기반해 기업의 생존과 번영의 핵심 가치이며, 기업의 경영활동에 큰 영향을 미칠 ESG를 지원하기 위한 중요한 요소로 꼽을 수 있다. ESG 데이터는 기업이 경영활동을 수행하는데 관련된 내부와 외부의 수집 가능한 모든 데이터를 글로벌 ESG 정보공개 기준으로 통합하여 평가 체계에 대한 형태소 분석을 통하여 안전에 대한 평가 항목을 분석하여, ESG에서 활용할 수 있는 정량적 ‘안전평가지표’로 국내외 산업 사고 작업환경에서 작업자의 안전을 모니터링하기 위한 표준 플랫폼을 보여준다. 본 연구는 ESG 기반 작업자 안전관리 플랫폼 통해 작업자의 안전을 높이기 위해 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

Abstract: ESG, based on Environmental, Social, and Governance principles, constitutes core values for a company's sustainability and prosperity, exerting significant influence on corporate operations. ESG data integrates all available internal and external data relevant to a company's operations according to global ESG disclosure standards. Through morphological analysis of the evaluation system, safety assessment criteria are analyzed, producing quantitative “safety assessment indicators” that can be utilized within the ESG framework. This establishes a standardized platform for monitoring worker safety in domestic and international industrial accident work environments. This research demonstrates how the ESG-based worker safety management platform can be utilized to enhance worker safety.

1. 서론

최근까지 공식적인 기업가치 평가는 재무제표 등 정량적인 요소를 중심으로 이루어졌다. 그럼에도 윤리적 가치, 고객만족도 등 비재무적인 요소가 기업의 성과에 영향을 미친다는 사실은 널리 인지되었고 기업의 사회적 책임(CSR: corporate social responsibility, 이하 “CSR”) 등의 형태로 기업투자 및 경영에 있어 반영되는 등 유의미한 영향을 미쳤다. 이러한 흐름은 ‘ESG’ 개념이 2006년 UN 사회책임투자원칙(PRI: principle for responsible investment)을 통하여 정립된 이후 기후 위기, 코로나19 팬데믹(COVID-19 pandemic) 등 환경·사회적인 문제를 거쳐 지속가능성에 대한 논의가 심화하면서 더욱 가속화되고 있다.

† Corresponding Author, all@next-core.co.kr

ESG는 일반적으로 기업의 전략 실행 및 기업가치에 영향을 미칠 수 있는 환경(environment), 사회(social), 지배구조(governance)에 관한 요소를 의미한다. ESG에 관련된 주요 세부 항목과 그 내용이다. 한편, 민간 차원에서는 이미 ESG 요소가 기업 경영 및 평가에 있어 다방면으로 활용되고 있다. 신용평가사, 투자회사 등 주요 금융기업은 이미 ESG 요소를 기업투자 혹은 신규 투자상품 개발 등에 적극적으로 활용하여 ESG 글로벌 투자 규모는 2020년 6월 말 기준 2012년 대비 약 3배 성장한 40.5조 달러 규모에 이르는 것으로 파악되었다(금융위원회, 2021). 기업 내부적으로도 ESG 요소를 선제적으로 경영전략에 내재화하여 기업가치를 높이려는 움직임이 두드러지고 있다. 또한 자체적으로 ESG 평가지표를 개발하여 상장기업을 중심으로 기업평가를 시행하는 ESG 평가기관, ESG 공시 관련 서비스를 제공하는 회계기업, 컨설팅 기관 등으로 구성된 ESG 평가생태계 또한 구축되었다. 그러나 ESG 기업평가의 경우 아직 명확한 기준 없이 기업의 자율적인 공시에 맡기는 경우가 많아 혼선이 초래되기도 하며 ESG 평가 또한 평가기관의 자의적인 판단이 개입될 여지가 있어 투명성과 신뢰성을 담보할 수 없다는 비판이 제기되고 있다. 특히 정성적인 요소를 기반으로 하는 ESG 경영 특성상 명확한 평가 및 공시기준이 수립되기 어려워 중소기업을 중심으로 부담을 호소하기도 하는 상황이다. 또한 실제로 친환경 경영을 수행하지 않는 기업이 지표·보고서상 친환경 기업으로 위장하는 그린워싱(green washing)에 대한 우려가 지속해서 제기되고 있으며 명확한 판단기준 없이 평가 기준이 난립할 시에는 시장 체계 혼란을 유발할 수 있어 정부의 개입 필요성 또한 지속해서 제기되고 있다. 대처하여야 시장경쟁력을 확보하고 나아가 차기 성장동력을 얻을 수 있을 것이다. 그러나 자체적으로 ESG 대응조직을 구성하고 발 빠르게 대처하고 있는 대기업을 제외하면 중소기업 등 개별 기업 차원의 역량만으로는 효과적으로 대응하기 어려운 부분이 많다. 이에 따라 정부 차원의 제도 확립 및 지원을 통하여 방향성을 제시해야 한다는 의견이 또한 확대되고 있다. 한편 ESG 경영에 있어 정부의 적극적 개입을 우려하는 목소리 또한 높다. 먼저 정부의 개입이 기업 경영의 자율성을 저해할 수 있다는 비판이 제기되고 있다. 기업 경영은 기본적으로 민간의 자율적인 의사결정에 따라 이루어지는 것이 바람직하며 정부의 지나친 개입으로 인하여 경영의 효율성이 낮아지고 시장 질서가 왜곡될 수 있다는 것이다. 정부 전문성의 한계를 지적하는 의견도 있다. 산업영역이 확장되고 분야가 다양해지면서 정부의 역량만으로는 대처할 수 없는 다양한 전문적인 영역이 등장하였다. ESG 경영의 경우에도 각 기업 및 조직이 속한 산업 분야마다 특성이 다르고 각각 다른 기준이 적용되어야 한다는 의견이 있다. 정부의 역량만으로 다양한 산업영역을 망라하는 기준점을 제시하기는 어려우며, 민간 영역의 의견을 수렴하여 각 산업영역의 특수성을 고려한 정책 모델 구상이 필요하다는 의견이다. 반면 태생적으로 정성적인 정보를 기반으로 하는 ESG 특성상 명확한 기준점을 마련하는 것이 어렵기 때문에, 각 기업의 제반 환경, 산업환경에 맞게 평가 및 정보공시 방법을 채택할 수 있도록 하는 자율성을 부여하는 방안이 바람직하다는 의견 또한 존재한다. 이렇게 ESG 경영에 대한 정부의 역할에 있어서는 강력한 공권력을 바탕으로 시장의 혼선을 막고 질서를 수립하기 위하여 적극적으로 개입해야 한다는 목소리가 커지는 한편, 지나친 개입으로 인하여 민간기업 경영의 자율성이 훼손되는 것에 대한 우려가 공존하는 딜레마 상황에 놓여있다. 본 연구에서는 이러한 상황에서 ESG 경영에 관련된 국내외 동향을 분석하고 ESG 경영 제도 정착을 위한 정부의 사회나 시장의 요구에 부응하는 적절한 역할을 검토해 보고자 한다. 이은정¹⁾은 기후변화에 관련 EU, 영국, 중국, 일본, 한국, 중국에서 기후변화 관련 규제정책이 진행되고 있으며, 지속 가능 보고서, 기업지배구조해 보고 공시가 단계적 의무화되고, 투자자들의 ESG 요구 증대에 따른 ESG 경영에 대한 기업 대응에 관해 서술하였다. ESG 보고서와 관련 활동 현황, ESG 담당자의 현장 의견을 청취하고 각 ESG 평가기관의 기준, ESG 보고서의 우선순위 내용, 인터뷰의 내용에 ESG 요소의 빈도수를 분석하여 현재 세계적으로 ESG 정보가 표준화되어 있지 않고 통일된 기준이 없는 산업현장의 ESG 변수를 선정하고 YGPA(2021)²⁾ 사회적 가치 실현 측정 지표를 사용하여 정의하는 것이다.

2. ESG 개념 및 방향성

ESG는 기존 CSR 담론의 연장선에 있다고 보는 관점과 전혀 다른 개념이라고 보는 관점이 공존한다.

이에 ESG에 대해 논하기에 앞서 ESG의 유사 개념인 CSR의 개념과 그 이력에 대하여 논하고자 한다. CSR은 1953년 Bowen이 저서 「기업가의 사회적 책임(social responsibilities of businessman)」을 통해 제시한 개념으로 기존 자선사업, 사회공헌 위주로 논해졌던 사회적 책임의 개념을 기업의 경영활동 및 사후적 공헌 차원으로 확장하였다. 이후 Friedman(1962)은 기업의 목적은 이윤추구 및 주주 이익 극대화에 있다는 주주자본주의(shareholder's capitalism) 개념을 제시하여 기업의 사회적 공헌의 필요성을 축약하는 관점 또한 있었지만, CSR이 장기적인 차원에서 기업의 이윤으로 이어진다는 방향성의 연구 또한 다수 진행되었다. 특히, 1990년대 나이키 아동노동 사건 등 CSR을 고려하지 않은 경영전략으로 인한 기업 이미지 하락으로 인한 대규모 손실이 초래된 사례 등 기업 경영 실무상 사회, 윤리적 문제가 화두가 되는 사건이 다수 발생하였다. 또한, CSR이 기업의 윤리적 책임이 이윤에 직결될 수 있다는 인식이 심화하여 기업 자율적인 차원에서 윤리적 측면을 고려한 경영전략 설계가 일반화되었다. 각국의 정부 차원에서도 환경, 사회, 지배구조 등 개별 부문에 대한 규제정책도 다수 실시되었다. 따라서 CSR은 ESG 개념이 본격적으로 등장하기 이전부터 기업 차원에서 평판 제고 등을 일환으로 실시해 왔고 민간 차원에서 상당 부분 활성화되어 있었다고 할 수 있다. 그렇다면 ESG는 기존 CSR 개념과 어떤 차이가 있을까. 정부 규제, 이해관계자의 요구 등 외부적 요인에 의한 압력에 순응하기 위한 기업의 경영전략으로서 인식되는 CSR과는 달리 ESG는 투자자 주도의 개념으로 ESG의 추구가 장기적인 수익 창출로 이어진다는 점에서 차이가 있다. 또한 CSR이 기업이 경영활동을 통해 창출한 수익을 사회에 사후적으로 공헌하는 데 활용하는 측면에 가깝다면 ESG 경영은 기업이 본업인 경영활동을 수행하는 과정에서 환경·사회적 요인을 선행적으로 내재화하여 경영활동을 실시한다는 점에서도 근본적인 차이가 있다. ESG는 지속가능성 측면 중에서도 비재무적인 정보를 재무적 결정에 활용할 수 있도록 공시, 평가하는 측면이 강하며 비재무적인 환경, 사회, 지배구조에 관한 내용을 투자 정보로써 활용할 수 있도록 전환한다는 점에서 근본적인 차이가 있다. 그러나 실무적인 관점에서는 ESG를 기존 CSR의 연장선상에서 혼용되어 서술하는 등 명확하게 구분되지 않고 혼재되어 사용되고 있는 부분이 빈번히 관찰된다. 정부의 ESG 정책이나 기업 경영 측면에서도 기존 CSR 담당 부서가 그대로 ESG 경영을 전담하는 등 별도로 구분하지 않는 경우가 많은 편이다. 그러나 ESG 담론이 확장되면서 지속가능성 논의가 투자 차원까지 확장, 비용으로 인식되던 사회적 책임이 투자 유치의 기회로 인식되고 나아가 향후 기업과 국가의 성패를 결정짓는 중대한 요소로 인식되고 영향력이 폭발적으로 증가한 것은 저명한 사실이라고 할 수 있다.

2.1 ESG 데이터의 개념

기업의 생존과 번영의 핵심 가치이며, 기업의 경영활동에 큰 영향을 미칠 ESG를 지원하기 위한 중요한 요소로 ESG 데이터를 꼽을 수 있다. ESG 데이터는 기업이 경영활동을 수행하는데 관련된 내부와 외부의 수집 가능한 모든 데이터를 글로벌 ESG 정보공개 기준으로 통합하고 재가공한 데이터이다. Fig 1과 같이 기업이 활용하는 시스템과 생산한 데이터를 ESG 관점으로 재구성하여 ESG 이슈에 효과적으로

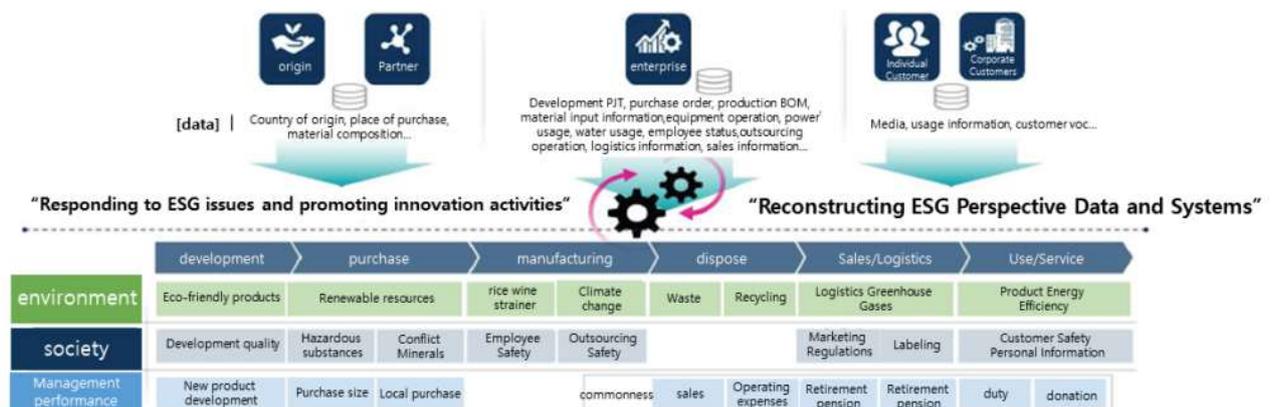


Fig. 1 ESG data concept diagram

대응하고 혁신 활동을 추진하는 데 사용한다.

글로벌 기업들은 이미 데이터 기반 ESG 경영을 추진하고 있다. Saipem은 환경단체 및 ESG 평가기관의 EPC 기업 대상 탄소 배출 절감 요구에 대응하기 위하여 '18년 4개년 탄소 배출 감축 전략계획 발표하였다.⁽³⁾ 우선 탄소 배출량을 예측하는 시스템을 자체적으로 구축하여 모든 프로젝트의 단계별 배출량을 예측하였고, 예측한 값을 기반으로 절감 방안을 도출하여 탄소 배출을 절감하였다. 탄소배출 절감목표는 '19년 12만 톤에서 18.8만 톤으로 초과 달성하여 국제 해양 계약자 협회(IMCA)의 environmental sustainability award를 획득하였다.⁽⁴⁾

2.2 ESG 중 환경(environment) 영역

ESG 중에서도 중요한 영역으로, 기업이나 투자 대상 기관이 환경적 책임과 지속가능성을 어떻게 다루고 있는지를 나타낸다. 환경적인 측면은 여러 가지 다양한 주제를 포함하고 있다. 첫 번째, 탄소 배출 및 기후변화에 대해 기업이나 기관의 온실가스 배출량을 줄이는 노력이나 탄소 중립(net zero)을 향한 노력이 이에 속한다. 기후변화에 대응하기 위한 대책과 감축 목표가 중요한 평가지표가 된다. 두 번째 에너지 사용과 효율을 위해 기업이나 기관이 에너지를 어떻게 소비하고 생산하는지, 에너지 효율성을 개선하기 위한 노력이 여기에 포함된다. 신재생 에너지 사용, 에너지 효율 프로그램 참여 등이 해당한다. 세 번째 자원관리와 재활용 중 자원 소비와 관련된 활동에 대한 투명성과 자원을 효율적으로 활용하고 재활용하는 노력이 중요하다. 폐기물 관리, 재활용 프로그램, 생태계 보호 등이 있다. 또한, 수질 관리 통해 물의 사용과 관리에 어떻게 이바지하고 있는지가 중요한 평가 요소 중 하나이다. 물의 적절한 사용 및 보호가 중요시되는 경향이 있다. 마지막으로 환경에 대한 협력과 이해관계를 기업이나 기관이 지역사회 및 환경단체와 협력하며 지속 가능한 환경을 유지하려는 노력이 여기에 해당한다. 이러한 측면들이 기업이 지속 가능한 비즈니스 모델을 구축하고 환경적 영향을 최소화하려는 의지를 나타내는 중요한 지표 중 하나로 간주할 것이다.

2.3 ESG 중 사회(social) 영역

ESG 중에서 사회(social)는 기업이나 투자 대상 기관이 사회적 책임을 어떻게 다루고 있는지를 나타내는 영역이다. 사회 측면은 주로 다양한 이해관계자들과의 상호 작용, 노동관계, 사회적 공정성, 고객 만족 등을 다루고 있다. 첫 번째 노동관계 및 인권으로 기업이나 기관이 노동자들의 권리를 존중하고 노동조건을 개선하는 노력이 중요한 평가 요소입니다. 불법 노동, 인권 침해, 노동자 안전 및 보건에 대한 관리 등이 속한다. 두 번째 사회적 공헌 및 기부 측면에서 기업이 지역사회나 전 세계적인 사회에 기부 및 지원을 통해 역할을 하는 노력이 여기에 포함된다. 사회적인 이해관계자들과의 긍정적인 상호 작용이 기업의 평판을 향상할 수 있으며 기업 내의 조직 내에서 다양한 배경을 가진 사람들을 인종, 성별, 성 정체성, 장애 여부 등 다양한 측면에서 포용하는 노력 또한 중요하다. 세 번째로 교육 및 기술 접근성으로 사회적으로 책임 있는 기업은 교육 기회를 확대하고 기술의 접근성을 높이려는 노력을 기울입니다. 이를 통해 사회적 불평등을 감소시키고 지식 기반 사회의 구축에 기여하고 나아가 서비스의 안전성, 고객의 개인 정보 보호, 소비자 권리 존중 등이 여기에 해당한다. 마지막으로 고용 관리나 직원 복지 부분에 기업이나 기관이 고용 관리와 직원 복지에 신경을 쓰는 것이 중요하고, 근로 시간, 휴가 정책, 복지 혜택 등을 포함되며 기업이 지역사회 및 다양한 이해관계자들과의 긍정적인 상호 작용을 통해 사회적 가치를 창출하려는 의지를 나타내는 중요한 지표로 간주한다.

2.4 ESG 중 지배구조(governance) 영역

ESG의 지배구조는 기업이나 투자 대상 기관의 내부 체계와 경영 구조에 대한 평가를 의미하며, 이는 기업이 어떻게 관리되고 투명하게 운영되며 이해관계자들과의 관계를 어떻게 관리하는지를 나타내며 지배구조는 기업의 지속가능성과 금융 성과에 영향을 미칠 수 있는 매우 중요한 측면 중 하나이다. 첫 번째 이사회 구성과 역할로 이사회는 독립성, 다양성, 역할 및 책임에 대한 투명성이 중요하며, 독립적인

이사회는 이해관계자들의 다양한 이익을 고려하여 기업을 효과적으로 지도할 수 있다. 두 번째로 보상 체계로 경영진과 임원들의 보상 구조가 투명하고 공정한지 확인하는 것이 중요하며, 성과에 대한 보상과 지속 가능한 비즈니스 목표에 대한 보상이 포함한다. 세 번째로 지배구조 정책 및 원칙 기업이 채택한 지배구조 정책과 원칙이 얼마나 투명하고 일관성 있는지를 평가한다. 마지막으로 윤리적 경영과 부패 방지를 위해 기업의 윤리적 행동과 부패 방지 프로그램이 얼마나 효과적으로 구축되어 있는지를 평가하고, 윤리적 행동은 기업의 신뢰성과 평판에 큰 영향을 미칠 것이다. 이러한 ESG 중 환경, 사회, 지배구조로 기업의 장기적인 성공과 안정성을 지원하는 데 중요한 역할과 환경적 책임은 기업의 이미지와 금융 성과에도 영향과 투명하고 효과적인 지배구조를 갖춘 기업은 투자자와 이해관계자들에게 높은 신뢰를 주고, 지속 가능한 경영 방향을 선도할 수 있다.

2.5 ESG 데이터 관련 국내외 정책 동향

유럽은 ESG 활동이 시작되기 전부터 탄소세와 같은 환경적인 측면의 활동을 선제적으로 시작하였다. 따라서, ESG 활동이 시작되면서부터 체계적이고 빠른 대응을 보여주고 있다. 유럽은 연합차원(EU)에서의 적극적인 ESG 활동이 두드러지는데, 현재 ESG 관련하여 입법 절차를 진행하고 있다. EU의 ESG에 관한 기업 의무를 강화하는 법제 관련 정책으로는 금융기관 투자상품의 지속가능성 정보공개 의무화한 지속 가능 금융공시 규정, 기업활동의 사회·환경 영향을 비재무제표로 공개하는 비재무정보 보고 지침, 환경적으로 지속할 수 있는 경제활동을 정의하고 판단기준을 제시하는 분류체계 규정, 기업에 공급망 전체의 환경·인권 보호 현황에 대한 실사 의무를 부여하는 공급망 실사 제도 등이 있다. EU는 정부 차원에서의 적극적인 정책에 앞서, 기업의 입장뿐 아니라 환경과 사회 부분까지 전 범위에서 ESG 활동을 추진하고 있다. 독일 기업인 알리안츠는 1890년 2월 5일에 세워진 독일의 다국적 기업이다. 알리안츠는 2002년부터 지속가능성에 관한 웹페이지를 개설한 다음 지속해서 보고서를 발간하여 ESG 경영에 선도적인 모습을 보여주고 있다. 알리안츠는 ESG 경영으로 기후변화 완화와 지구 온난화의 해결을 우선순위로 두고, 향후 5년간 탄소 배출량을 29%까지 감축하며, 2050년까지 온실가스 순 배출량을 제로로 하겠다는 공약을 내세웠다. 또한, 2018년 과학 기반의 목표 자주성에 참여하여 장기적으로 기후 위기 대책을 수립하는 등 환경 부문에서 적극적인 활동을 보여주고 있다. 이외에도 사회 부분의 활동인 기업 시민 프로그램을 통해 미래세대인 아이들에게 교육을 지원하고 있다. 그뿐만 아니라, 지배구조 부분에서는 2017년부터 세금 투명성에 대한 보고서를 발간하고 매출과 수입세금 등을 공개하는 등 환경 위주의 활동만이 아닌 사회와 지배구조 부분에서도 균형적인 발전을 추구하기 위해 노력하는 모습을 보여주고 있다. 미국은 바이든 정부 출범에 따라 파리기후협약 재가입과 2050년까지 온실가스 배출량 제로, 청정에너지 투자(약 2조 달러) 등 환경과 관련해서 적극적인 노선을 선택했다(임형철, 정무섭, 2021). 미국 노동부는 ESG 투자의 요인이 될 수 있는 민간 부문의 은퇴자와 기타 직원의 복리후생 제도에 명확한 규제 지침을 제공함으로써 복리후생 제도에 대한 당사자들의 이익을 보호하는 규칙을 제안했다고 밝혀, 미국 정부 기조로도 ESG에 대한 중요성이 주목받고 있음을 알 수 있다. 각국 정부의 ESG 사례를 살펴보면, EU가 선제적이고 높은 수준으로 관리하는 것을 알 수 있다. EU는 ESG와 관련하여 빠르게 법제화를 준비하였고, EU와 관련한 모든 공급사슬이 ESG 기준을 충족하도록 하여 사회적 활동에서 선구적 위치를 지키고 있다. 미국은 바이든 정부 출범 후 ESG 노선을 강화하고 있으며, 중국도 국가 회의에서 환경, 사회, 지배구조 부분에 대해 강조하여 국유기업, 상장기업들도 적극적으로 ESG에 대해 대비하는 상황이 되었다. 한편, 2022년 중대재해 처벌 등에 관한 법률이 시행되며 ESG 중 S(사회) 부문 위험성이 드러나고 있다. 특히 인권, 노동 등 S 부문 위험성은 기업 평판에 큰 타격을 주어 재무적인 대응 여건이 충분하더라도 브랜드 가치의 훼손 등으로 인하여 주가가 급락할 수 있다. 중대재해가 기업가치의 위험지수로 반영되어 기업의 가치 하락으로 이어질 수 있기 때문이다. 중대재해 처벌 등에 관한 법률이 경영자에게 책임을 지우듯이 S 부문에서 발생한 이슈는 결국 G(지배구조)와 이어질 수밖에 없다. 반복되는 중대재해의 원인은 인재와 부실한 내부 통제 시스템, 그리고 이를 방치한 지배구조에도 책임이 있다고 볼 수 있기 때문이다. 위와 같이 정부와 대기업 차원에서의 ESG 활동은 적극적으로 진행이 되고 있음을 볼

수 있다. 그러나, 정부와 대기업 차원의 ESG 활동과 비교할 때 중소기업의 ESG 활동은 정보의 불완전성, 비용적 부담과 같은 어려움이 상존한다. 중소기업은 한정된 정보에 의존하여 지표를 산출하기 때문에 정확한 평가를 할 수 없는 경우가 많고, 기업의 규모가 클수록 ESG 평가에서 평균적으로 높은 점수를 받는 것으로 나왔다. 한국중견기업연합회에서 실시한 설문조사에 따르면 ESG 경영 추진에 있어 가장 큰 걸림돌로 업무 및 비용 증가(47.5%)를 선정하였으며, 이와 같은 비용 부담으로 인해 ESG 경영 대응에 대해서는 ‘준비되었거나 준비 중’이라는 응답이 25.7%에 불과했으며, ‘관련 준비계획이 없다’가 34.6%로 나오는 등 아직 중소기업 자체의 ESG 준비가 부족하다는 것을 확인 할 수 있다.⁽⁵⁾ 중소기업은 활용할 수 있는 정보의 불안정성 외에도 비용적인 부담으로 인하여 ESG 준비가 부족하다. 아직 소수에 불과하지만, 몇몇 기업의 경우, 자신만의 전략으로 ESG 경영을 실천하고, ESG 환경에서 우수한 사례로 평가된 경우도 존재한다.⁽⁶⁾

3. ESG 기반 통합 관제 작업자 위치 플랫폼

3.1 연구 범위

본 연구에서는 ESG 기반 통합 관제 작업자 위치 측위 플랫폼 안전관리 시스템을 통해 ESG 경영의 핵심적인 구성 요소로서 기업의 지속 가능성을 확보하고 사회적 책임을 다하는 데 필수적인 역할을 할 수 있음을 제시한다. 이러한 시스템을 활용함으로써 기업은 안전한 작업 환경을 구축하고, ESG 평가에서 높은 점수를 받을 수 있으며, 중소기업도 ESG 경영을 효과적으로 도입하고 실현할 수 있도록 돕는 안전 관리 체계를 제공한다. 이를 통해 기업은 안전사고를 예방하고 근로자의 복지 향상에 기여하며, 궁극적으로 사회적 책임을 충실히 이행할 수 있을 것이다.

3.2 ESG 플랫폼 서비스의 필요성

ESG 경영활동이 어려운 것은 기업의 공시의무에 대한 부담과 함께, 데이터 관리의 복잡성과 ESG 제도 자체에 대한 이해 및 준비가 부족한 것을 들 수 있다. 업계 전문가와 기업 담당자들은 데이터 관리에 대한 어려움을 호소하고 있는데, ESG 평가기관마다 요구하는 자료가 다르고, 평가 결과의 차이가 발생할 수 있기 때문이다. ESG 공시의무도 기업들에 부담이 된다. 보고서를 발간하기 위해서는 비용이 소요되며, ESG 관련 데이터를 모으기 위한 인적 자원도 투입해야 한다. 자체적으로 준비하기에 한계가 있는 기업은 대형 회계법인을 이용 하겠지만, 오랜 준비기간이 필요하다. 게다가 미국, 중국, 유럽 등에 있는 공장 관련 정보를 한국 기준에 맞춰 내용을 취합하기가 어려우며, 국가별 ESG 기준도 다르다. 금융권의 첫 공공 ESG 정보 플랫폼 서비스에서 상장사 ESG 공시 정보와 ESG 투자 통계를 원스톱으로 확인할 수 있지만, ESG 포털에서 확인하는 평가 정보는 각 ESG 평가기관의 저작물이며, ESG 평가 요약 보고서 외에 개별 기업의 세부적인 평가 자료를 확인할 수 없다.⁽⁷⁾ 게다가 구체적인 투자전략을 기재하지 않고 소비자를 오해하게 하는 표현으로 명칭만 바꾸는 등의 위장 환경주의와 사회적 문제나 가치에 대해 개어있는 척하면서, 이에 반하는 행동을 하는 등의 사회적 문제에 관심 있는 척 등의 현상은 ESG에 대한 투자에도 불구하고 오히려 기업에 대한 불신과 반감만 커지게 할 수 있다. 따라서 기업의 진정성 있는 행동에 대한 중요성과 경영진의 ESG 전략 수립을 지원하고, 이해관계자에게 투명하고, 효율적인 보고가 가능하기 위해서는 체계적으로 ESG 데이터 관리를 지원할 수 있는 디지털 ESG 플랫폼 서비스 사용에 대한 전략적인 판단이 필요하다.

3.3 ESG 플랫폼 서비스의 구축 개요

플랫폼 서비스 구축은 기업 사용자마다 다를 수 있는 데이터의 형태를 하나로 통합하는 것부터 시작한다. 데이터 모델은 데이터를 하나의 저장소에 저장하기 위해 통일된 인터페이스를 사용할 수 있게 설계한다. 그리고, 사용자의 편의성을 위해 인터페이스 설정은 개별 사용자마다 선택할 수 있도록 옵션 형태로 제공해야 한다. 통합된 정보를 회사별로 다르게 제공하기 위해서는 사용자의 권한을 분리해야 한

다. 통합된 저장소는 서비스 제공자에게는 비용 효율적이지만 사용자에게는 보안의 위험이 있어 기술적, 관리적, 물리적 보안을 충족시키는 정책을 추가로 적용해야 한다. 안정적이고 신속한 시스템 구축을 위해서는 개발 공통 플랫폼을 사용해야 하며, 사용자 인터페이스를 위한 프론트엔드(frontend)와 비즈니스 로직을 위한 백엔드(backend)를 구성해야 한다. 다른 라이브러리나 기존 프로젝트, 기존 시스템과의 통합은 프레임워크 기능으로 라우터, 상태관리, 검증 등을 쉽게 결합하는 형태로 개발한다. 백엔드는 빠른 구현 시간과 쉬운 관리가 장점이며, 복잡한 설정 없이 쉽고 빠르게 시스템 구축이 가능한 스프링 프레임워크를 사용해야 하는데, 이를 위해 스프링 부트(spring boot)를 활용한다. 스프링 부트는 라이브러리 관리를 자동화하여 라이브러리 의존성을 간단히 관리할 수 있게 도와주며, 라이브러리 버전도 자동으로 관리해 준다. 스프링 프레임워크에서 자주 사용했던 설정을 자동으로 등록해 주기 때문에 스프링 프레임워크의 장점을 그대로 보존하여 개발자가 비즈니스 로직에 집중하여 생산성을 높이게 해준다.

3.4 ESG 플랫폼 서비스의 시스템 구축 방안

플랫폼 서비스의 시스템은 일반 사용자가 접속하여 사용하는 웹(web) 모듈과 관리자가 접속하여 사용하는 관리자(administrator) 모듈로 구성한다. 웹 모듈은 회사의 연역, 비전, 전략 등을 회사 개요(overview), 환경(environment)에 관한 기능, 사회(social)에 관한 기능, 지배구조(governance)에 관한 기능과 기타 자료실(digital library)로 구성한다. 회사 개요에는 CEO 메시지, 회사의 연역, 조직의 궁극적인 목표를 표현하는 성명서와 비전과 비전 달성을 위한 거시적인 원칙인 전략 방향을 소개한다. 환경 모듈에는 환경에 대한 공헌과 목표, 기후변화에 대한 조직의 대응 방안, 순환 경제에 대한 회사의 활동 내용을 표현한다. 환경에 대한 공헌에는 이산화탄소 감소, 에너지 절약, 오염물질 배출 절감 등의 설정한 목표와 현재까지의 실적을 표현한다. 사회 모듈에는 노동조건, 산업안전과 보건, 공급망 및 소비자 관계, 다양한 인권 문제, 제품의 품질과 안전 등의 기업의 사회적 책임에 관한 내용을 확인할 수 있으며 이는 기업의 사회적 책임(CSR)과는 다르다. CSR은 환경을 파괴하고 인권을 침해하거나 사회에 부정적인 영향을 미치지 않기 위한 기업의 사회공헌 활동이라고 볼 수 있으나 ESG의 사회는 적극적이며 비재무적인 요인으로 기업가치에 큰 영향을 미치기 때문이다. 지배구조 모듈은 기업이 의사결정을 내리는 프로세스와 이해관계자들의 이익을 보장하는 역할을 하므로, 투명하고 민주적인 형태를 유지해야 한다. 따라서 주요 안건들을 협의하는 이사회와 위원회의 구성, 민주적 운영 여부, 그리고 회계와 공시가 투명하게 이루어지는지, 주주의 권리가 충분히 보장되는지를 확인할 수 있다. 마지막으로 자료실(digital library)에서는 각종 공시 관련 자료와 보도자료, 영상물을 제공하여 기업의 ESG 관련 결과물을 쉽게 찾을 수 있다. 관리자 모듈에서는 사용자나 관리자의 접속 이력, 계정관리, 권한 관리기능을 제공하며, 메뉴와 사용자 로그, 설정값 등을 수정할 수 있다. 사용자 권한에 따라 각기 다른 화면을 구성하여 제공도 가능하다.

3.5 ESG 플랫폼 서비스의 주요 기술

프론트엔드 프레임워크(frontend framework)인 사용자 인터페이스를 만드는 가독성 있고, 직관적인 프레임워크이다. 웹을 이루는 개별 요소의 정보가 변경되는지 확인하고, 해당 값을 업데이트 시켜주는 역할 수행한다. 백엔드는 안전성, 성능, 의존성 주입 등의 장점이 있는 스프링 프레임워크를 사용하는데, 환경 설정을 최소화하고 비즈니스 로직에 집중하여 구축이 가능한 스프링 부트를 활용하여 생산성을 향상 시킨다. 부수적인 층과 세션 관리를 추가하지 않고도 HTTP 프로토콜로 데이터를 전달하는 REST 방식을 사용하며, rest resource control은 인터셉터 역할 수행한다. ESG 중 사회적 가치를 위해 작업자의 위험을 방지하고 안전한 현장 관리할 수 있도록 작업자의 실시간 위치를 실시간으로 모니터링하고 위험을 즉시 경보하고 회피할 수 있도록 하여 작업자 재해를 예방하기 위한 플랫폼 도입이 필요하다.

3.5.1 측위 정보 수집 기반 시설

작업자 태그로 설치된 블루투스 유닛(BTU)에서 RSSI 정보와 PDR를 통해 작업자의 위치를 측위하고 측정된 위치정보를 게이트웨이로 송신한다. 게이트웨이에 송신된 각 작업자 태그 정보는 외부 셀룰러 망을 통해 현장 관리자 서버에 전송되며, 이 정보를 작업자 안전 관리 플랫폼 등 외부 서버와 관리



Fig. 2 Worker-held devices and readers

자 프로그램이 활용할 수 있고, 이를 통해 관리자는 실시간으로 작업자의 현재 위치, 작업 상황 및 안전 상황을 모니터링하고 관제할 수 있다. 작업자 태그로부터 최초 전송되어 안전관리 플랫폼에서 활용되는 측위 정보는 Fig 2에 제시된 기반 시설을 통해 전달된다. Fig 2에서 측위 데이터처리를 위한 서버 시스템과 안전관리 플랫폼 사이의 운영 및 관리는 서버 보안 기능이 적용된 서버-클라이언트 형태로 구성한다.

3.5.2 디지털 트윈

디지털 트윈은 물리적 환경을 가상 공간에서 정확하게 모델링하는 기술로, 이를 위해 먼저 3D 모델링 표준 설계와 위치 데이터 호환 설계를 반영해야 한다. 이 과정은 현장 구조 정보와 사진 촬영을 통한 현장 실사를 바탕으로 진행되며, 발전소와 같은 시설물의 실사 데이터를 통해 공간 정보와 시설물 현행화를 진행한다. 이후 마감재, 표지판 등 각종 시설물 정보를 3D 공간 모델에 적용하여, 물리적 환경과 일치하는 디지털 트윈을 완성한다. 이를 통해 실제 환경의 상태를 실시간으로 모니터링하고 분석할 수 있는 기반이 마련된다.

3.5.3 측위 데이터 매핑

현장에 있는 작업자의 현재 위치를 정확하게 파악하는 것에서 시작되는데 이를 위해 발전소의 디지털 트윈 환경 내에서 태그 및 정보 수집 인프라를 활용하여 작업자의 측위 정보를 수집하고, 이를 디지털 매핑을 통해 실시간으로 표시한다. 이 매핑 알고리즘은 널리 사용되는 Three.js를 기반으로 한 WebGL 기술인 Potree를 활용하여, 작업자의 위치 정보를 디지털 맵에 구현한다. 이를 통해 작업자의 위치를 실시간으로 모니터링하고, 안전 관리 시스템을 보다 효율적으로 운영할 수 있다.

3.5.4 안전관리 플랫폼

안전 상황 및 사고 시나리오에서 작업자의 위치 측위 정보는 매우 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 특정 지역에서 안전 사고가 발생했을 때, 해당 지역의 작업자 위치를 실시간으로 파악하여 빠르게 대응할 수 있다. 이를 위해 디지털 트윈 시스템 내에서 실시간으로 위치 측위 정보를 추적하고, 사고 발생 지점과 작업자의 위치를 정확하게 매핑하여 사고 발생 시 신속하고 효율적인 구조 활동이 가능하도록 한다. 또한, 위험 지역에 대한 경고 시스템과 작업자의 위치 정보를 연계하여 미리 위험 요소를 감지하고 적절한 조치를 취할 수 있다.

또한, real-time mapping 기술과 PSM(process safety management), MSDS(material safety data sheet)를 기반으로 발전소 현장의 디지털 트윈을 생성하고, 작업자 태그로부터 측정된 측위 정보는 IoT 게이트웨이를 통해 수집되어 디지털 트윈 상에 실시간으로 표시하여 이를 통해 작업자의 위치와 발전소 현장 상황을 실시간으로 파악하고, 기계학습 프로그램을 통해 작업자의 위험 상황을 자동으로 판단한다. 최종적으로, 실시간 정보 전파 및 공유를 통해 작업자, 작업물, 설비 등에 대한 종합적인 위치 파악과 안전 상황 감지가 이루어지며, 비상 상황에 대한 신속한 대응이 가능해지는 안전관리 플랫폼을 완성한다.

3.5.5 ESG 데이터와 작업자 측위 기술 연계

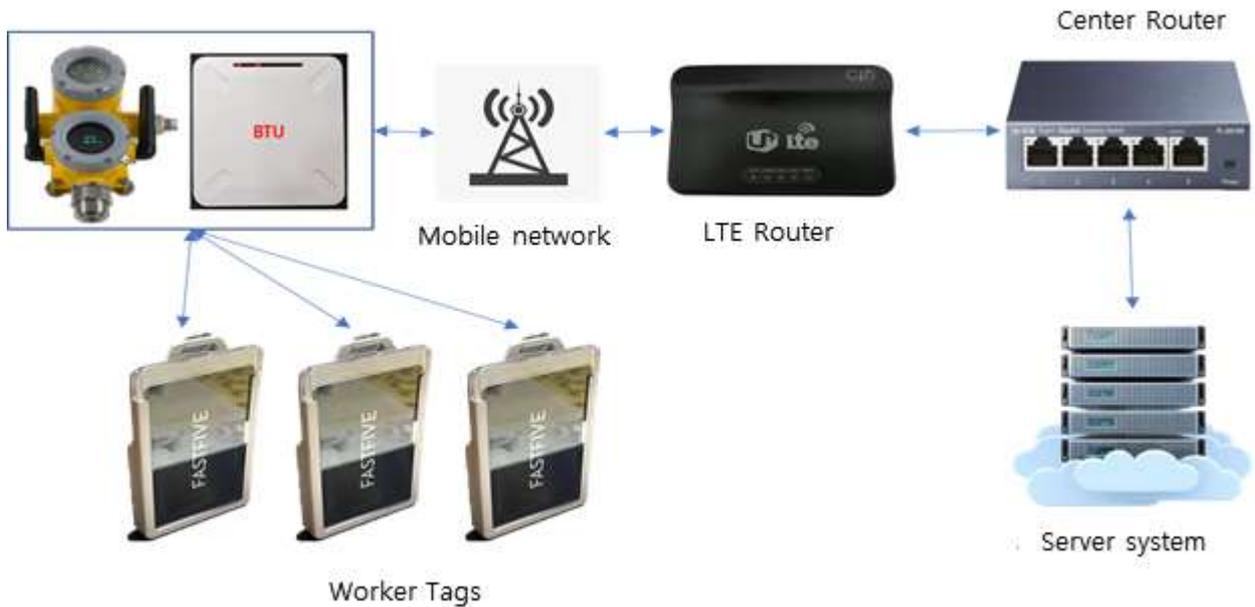


Fig. 3 Positioning information collection diagram

ESG 데이터와 작업자 측위 기술을 활용한 안전관리 연계정보는 데이터 수집, 분석, 대응, 평가의 단계를 작업자의 실시간 위치 정보와 유해 환경 데이터를 통합하여 위험 구역과 작업 환경을 모니터링 기반으로 작업자가 위험 구역에 접근할 경우 실시간 경고를 제공하며, 사고 발생 시 빠르게 대응할 수 있는 구조 및 구호 프로세스를 자동화한다. 수집된 데이터를 ESG 보고서에 활용해 안전관리 성과와 규제 준수 상황을 투명하게 공유할 수 있다. 이를 통해 작업 환경 개선, 사고율 감소, 근로자 복지 증진 등의 성과를 달성하며, ESG 목표와 기업의 지속 가능성을 강화할 수 있다.

3.5.6 제공 방안

플랫폼 서비스를 기업이 온전히 활용하기 위해서는 시범사업 및 확산 사업이 필요하다. 확산 사업을 고려할 때는 플랫폼 서비스를 빅뱅 방식으로 적용할지, 단계적으로 적용할지에 대해 기업별 특성을 고려하여 결정하는 과정이 필요하다. 긴급한 전략적 위협 앞에서 급격한 변화를 해야 하는 기업의 경우 빅뱅 전환 방식을 선호할 수 있지만, 구성원들이 새로 적응하고 안정적이면서 민첩한 변화를 추구하는 경우 단계적(실험-학습)인 전환 방식을 이상적으로 고려하여 구현하는 것이 적절하다고 볼 수 있다. 디지털 ESG 플랫폼 서비스는 긴급한 전략적 위협이나 급격한 변화가 필요하다고 볼 수는 없으므로 단계적으로 적용하는 방안을 모색하는 것이 합리적이라고 볼 수 있다.

1단계에서는 기업에 흩어져 있는 ESG 관련 데이터를 플랫폼 서비스와 연동하여 수집하여 구조화하는 것이 필요하다. 그리고, 2단계는 1단계에서 수집된 데이터를 활용하여 ESG 정보체계에 맞게 재구성하고 평가기관별 항목에 맞추어 보고서를 생성하고 기업 경영진이 확인할 수 있는 모니터링 체계를 추진한다. 마지막 3단계에서는 경영진의 확인이 된 ESG 결과를 이해관계자에게 제공하는 등 단계적으로 확산하는 전략을 사용하는 것이 바람직할 것이다. 1단계 구축은 기존 시스템에서 사용하는 내부 데이터와 외부 ESG 기준, 원산지/협력사의 외부 데이터를 수집하여 통합하는 단계이다. 기존 시스템마다 관리하는 개별 DB를 통합된 DB 구조로 수집하고 재조합하는 과정이 우선 진행되어야 한다. 통합된 ESG 데이터는 재가공 과정을 거치는데, 진단 항목, 업종, 규모, 이해관계자에 따라 영역별 가중치를 고려하여 ESG 데이터로 통합한다. 2단계 구축은 ESG 통합 DB를 활용하여 ESG 관련 서비스를 제공하는 것을 목표로 한다. ESG 전략 수립, ESG 정보관리, ESG 리스크관리, ESG 평가/공시관리 서비스에 대하여 ESG 통합 DB를 적용하고 진단 결과를 시뮬레이션하며 평가 결과를 대시보드에 표시하여 이해관계자에게 제공한

다. 2단계 구축이 원활하게 진행되기 위해서는 클라우드 환경에 최적화하여 서비스를 구성하는 것이 중요하다. 단순히 D-ESG 플랫폼 서비스를 제공하는 것으로는 즉각적인 서비스와의 차별점이 크지 않아, 클라우드 서비스의 특성인 효율성과 비용 절감, 그리고, 다른 사용자와의 유연한 데이터 연계, API 표준화 등이 함께 진행되어야 한다. 3단계는 기업에서 활용하는 D-ESG 플랫폼 서비스를 전자공시시스템(DART)이나 다른 평가공시 시스템과의 연계로 전자공시 자동화를 구현하는 것을 목표로 한다.

위치측위 기술은 작업자의 위치 데이터를 기반으로 위험 지역에 진입할 경우 실시간 경고 알림을 제공하며, 사고 발생 시 즉각적으로 작업자의 위치를 추적하여 신속한 구조 활동을 지원한다. 또한, 위험 물질 취급 구역에서는 작업자의 위치를 추적하여 유해 물질 노출 시간을 모니터링하고, 온도, 습도, 유해 물질 농도와 같은 환경 데이터를 통합 분석하여 작업 환경을 개선할 수 있다. 이와 더불어, 작업 중 발생한 안전사고 데이터를 ESG 보고서에 활용하여 안전 관리의 투명성을 높이고 작업자의 이동 데이터를 분석해 보다 안전한 작업 동선을 설계하고, ESG 관련 규제 준수를 위해 안전 데이터를 정량화하고 보고 체계를 강화할 수 있을 것이다.

4. 성능 평가

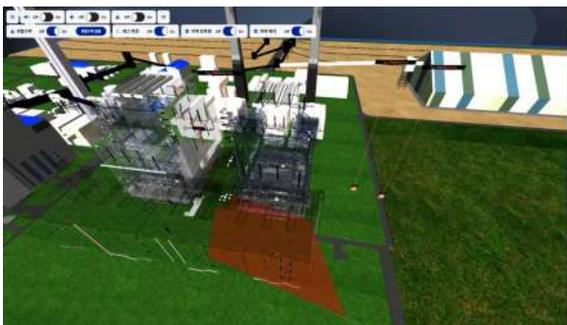
ESG 기반 사회적 기술을 적용한 안전관리 플랫폼의 UI 운영 화면은 Fig. 4에 나타나 있으며, 이 화면을 통해 두 가지 방식으로 실제 작업자의 플랫폼 성능을 검증했습니다. 첫 번째 검증에서는 태그별 기압 수집 및 BTU 기압값 차이를 이용한 고도 측정과 진동 센서의 가속도 값을 활용하여 진동 발생 시 데이터를 발생시키고, 이를 통해 위치 데이터를 측정할 결과 대시보드를 통해 모든 작업자의 위치 이동



(a) Altitude measurement data and vibration data



(b) Worker tag experiment



(c) Location data output screen dashboard screen

Fig. 4 Dashboard screen with ESG-based positioning technology applied



Fig. 5 ESG-based worker safety management platform operation screen

에 대해 정확한 결과와 위험지역 진입에 대한 입출입을 확인했다. 두 번째 검증에서는 ESG 평가 프로세스를 통한 이력 관리 기능을 제공하여, ESG 관련 데이터를 체계적으로 관리할 수 있음을 확인했다.

5. 결론

지구 온난화에 따른 기후 위기와 코로나19 팬데믹 등으로 인한 사회적 변혁으로 인해, 기관투자자들의 관심이 재무위험에서 기업의 ESG 위험성으로 이동하고 있다. ESG는 특정 국가나 지역의 일시적인 유행이 아닌 범세계적인 활동으로 그 중요성이 커지고 있다. 하지만, 그동안 ESG 활동은 대기업 위주의 평가지표 생산이나 홍보 또는 마케팅 활동의 한 부분으로 국한되어 있다는 비판이 많았다. 이에 2021년 산업통상자원부는 ESG 경영에 관심이 있는 주요 기업 등을 대상으로 간담회를 개최하고, 국내의 ESG 평가 필요성에 대한 업계 목소리를 바탕으로, 산업발전법에 근거한 통합된 K-ESG 평가지표를 준비하기에 이르렀다. 이런 변화에 따라 대기업은 물론이고 중소기업과 중견 기업에서도 ESG 평가 도입을 고려할 필요가 있으며, 이를 위해 범정부 차원에서 제공하기 어려운 플랫폼 서비스 형태의 평가 시스템 제공이 절실한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 디지털 ESG 플랫폼 서비스의 수용 의도에 영향을 미치는 요인들의 검증을 수행하였다. 사용 변수들은 관련 연구를 통해서 ESG 데이터 특성으로 정확성, 비교가능성, 신뢰성으로 구성하였고, 플랫폼 서비스의 특성으로 반응성을 설정하였다. 또한, 경영 환경 특성으로 사회적 영향과 촉진 조건을 추가하였다. 이를 통해서 ESG 데이터 특성과 플랫폼 서비스 특성이 성과기대와 노력 기대에 미치는 영향에 대해서 분석하였으며, 경영 환경 특성과 성과기대 및 노력 기대가 디지털 ESG 플랫폼 서비스의 수용 의도에 미치는 영향에 대해서 실증분석하였다. 마지막으로 혁신성, 자기 효능감, 정보 이해력 등 개인 특성 등에 따른 그룹 간의 차이를 분석하기 위한 조절 효과 분석 및 조절 변수와 인구통계학적 특성의 집단 간 빈도분석을 수행하였다. 또한, 연구에서는 기술 수용 관점의 외부 변수로 ESG 데이터의 특성인 정확성, 비교가능성, 신뢰성을 도입하였다. 연구 결과 ESG 데이터의 특성 중 비교가능성과 신뢰성은 성과기대나 노력 기대를 매개로 하여, 디지털 ESG 플랫폼 서비스의 수용 의도에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 확인하였다. ESG 중 사회적 책임 기반 통합관제 플랫폼 안전 강화에 관한 연구 디지털 트윈에 기반 발전소 현장 작업자 안전 관리 플랫폼을 구축하였고, 해당 플랫폼을 발전소 현장에서 안전 관리 플랫폼으로 활용할 수 있으며, 활용도를 확인하였으며 안전 관리 플랫폼의 핵심 기술인 측위, 디지털 트윈 기반 가상화, 측위 정보 매핑 등 주요 기술이 정확하게 플랫폼에 구현되었음이 확인되었다.

GPS, BLE, RFID 등의 위치 추적 기술을 통해 작업자의 실시간 위치를 모니터링하고, IoT 센서로 수집된 온도, 습도, 유해 물질 농도와 같은 환경 데이터를 통합하여 위험 지역을 실시간으로 식별하며, 이를 바탕으로 작업자에게 경고 메시지를 전달하고, 사고 발생 시 즉시 구조팀에 위치 정보를 제공하여

신속한 대응을 가능하게 하는 시스템을 구축하는 것이다. 또한, 디지털 트윈을 활용하여 가상의 작업 환경을 시뮬레이션하고, 사고 예방 및 환경 제어 시스템을 자동화하여 안전성을 극대화함으로써, ESG 규제 준수와 기업의 사회적 책임을 실현할 수 있을 것으로 ESG 데이터와 작업자 측위 기술의 연계를 통해 안전 관리의 효율성을 높이고 기업의 지속 가능성을 강화할 수 있음을 확인했다. 특히, GPS, BLE, RFID 기술을 통한 실시간 작업자 위치 추적과 IoT 센서를 활용한 환경 데이터 통합 관리로, 위험 지역 진입 시 경고 및 사고 발생 시 신속한 구조 지원을 제공할 수 있음을 밝혔다. 또한, 유해 환경 데이터를 실시간으로 모니터링하고, 환경 제어 기능을 통해 안전한 작업 환경을 조성할 수 있음을 확인했다.

이를 기반에 작업자의 권리를 존중하고 개선했으며, 기술성을 높여 서비스의 안전성을 통해 긍정적인 상호 작용을 통해 가치 창출하였다. 이를 통해, ESG 플랫폼 서비스의 수용 의도에 미치는 인과관계에서 조절 효과를 실증함으로써 기존 연구들과 차별화가 있다고 판단했다. 따라서, 본 연구는 향후 ESG 경영을 도입하거나 활용하는 분야 외에도, 새로운 정보기술이나 서비스에 대한 개인의 의도와 행동 간의 인과관계 연구에 할 것이다.

후 기

본 연구는 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20206610100010).

참고문헌 (References)

- (1) Lee, E., 2021, "ESG and Corporate Response," *Korean Society of Finance Symposium 2021*, Seoul, Republic of Korea, pp. 57~138.
- (2) Federation of Korean Industries, 2021, *Global Financial Stability Report*, FKI, Seoul, Republic of Korea, pp. 157~188.
- (3) Yeosu Gwangyang Port Authority, 2021, *Development Service for Social Value Realization Measurement Indicators*, YGPA, Gwangyang, Republic of Korea, pp. 100~128.
- (4) Samsung SDS, 2021, *Samsung SDS Sustainability Report 2021*, Samsung SDS, Seoul, Republic of Korea, pp. 20~138.
- (5) Korea Federation of SMEs, 2021, *Survey of Opinions from Mid-Sized Companies on ESG Management*, KBIZ, Seoul, Republic of Korea, pp. 75~123.
- (6) Ministry of SMEs and Startups, 2021, *Understanding ESG Management Guide for Small and Medium Venture Companies*, Ministry of SMEs and Startups, Seoul, Republic of Korea, pp. 8~28.
- (7) Jeong, J. Y., 2022, "A Study on Factors Affecting the Acceptance Intention of IT Companies' Digital ESG Platform Services," *Ph.D. Thesis*, Soongsil University, Seoul, Republic of Korea.

LNG 추진 선박용 연료공급 시스템을 위한 지능형 상태 모니터링 시스템 개발 연구[§]

오광원* · 김성용* · 백중진** · 최백규** · 김광희*** · 강인필****[†]

* 한국섬유기계융합연구원, ** 탈렌트엘엔지(주), *** 부경대학교 기계설계공학전공

Development of SSAMS (Safe & Smart Ambient-Air Monitoring System) for FGSS (Fuel Gas Supply System) of LNG-Powered Vessels

Gwang-Won Oh*, Sung-Yong Kim*, Jung-Jin Baek**,
Baek-Gyu Choi**, Kwang-Heui Kim*** and Inpil Kang****[†]

* Korean Textile Machinery Convergence Research Institute,

** Talent LNG Co., Ltd., *** Dept. of Mechanical Design, Pukyong Nat'l Univ.

(Received July 25, 2024; Revised November 21, 2024; Accepted November 25, 2024)

Key Words: LNG-Powered Vessel(LNG 연료 선박), Fuel Gas Supply System(연료공급 시스템), Smart Monitoring System(지능형 감시 시스템), Fault Diagnosis(고장진단)

초록: 전 세계적인 환경규제 시행으로 환경오염 물질 배출 감소 기술의 수요가 가속화되고 있으며, 그 방안 중 하나로 LNG 선박과 관련 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 LNG 선박용 FGSS(fuel gas supply system)의 에어 히터(air heater) 상태를 감시하여 고장을 진단할 수 있는 지능형 상태 모니터링 시스템(SSAMS: safe & smart ambient-air monitoring system)을 개발하였다. SSAMS는 센서와 트랜스미터, 히터, 송풍기, PLC 제어기 및 IoT 모듈로 구성되어 FGSS를 제어할 수 있으며, 무선 통신을 통해 원격 사용자에게 시스템 상태를 전달할 수 있다. SSAMS는 온도 예측 모델을 활용해 에어 히터의 온도 거동을 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위로 추정했으며, 고장진단 알고리즘을 통해 센서, 히터, 송풍기와 배관의 상태를 계측하여 이상 유무를 사용자에게 전달하였다. 시스템 상태 정보는 서버를 활용하는 경우 약간의 지연(약 3초)이 발생하나 사용자에게 오류 없이 전달되었다. 개발된 시스템은 LNG 연료공급 시스템의 안전성, 신뢰성 및 편의성을 향상할 것으로 기대된다.

Abstract: The demand for LNG vessels has increased due to the enforcement of global environmental regulations. The FGSS (fuel gas supply system) components must be monitored regularly to ensure optimal performance. To meet the FGSS's prospective functions, we have developed the SSAMS (safe & smart ambient-air monitoring system), which includes heaters, blowers, pipes, sensors, controllers, and wireless communication devices. The SSAMS utilizes two temperature sensors, a flow meter, and a pressure sensor to monitor its working conditions, and it reports real-time operating conditions using communication devices. We tested the feasibility of the SSAMS with a test bed and plan to continue upgrading its performance based on the test results.

1. 서 론

기후 변화에 대응하기 위하여 1997년 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)는 대기로

[§] 이 논문은 대한기계학회 플랜트부문 2024년 춘계학술대회(2024. 5. 15. - 18., 라마다프라다 제주호텔) 발표 논문임.

[†] Corresponding Author, ipkang@pknu.ac.kr

© 2025 The Korean Society of Mechanical Engineers

염 방지를 위하여 선박에서 배출되는 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 휘발성 유기화합물(VOCs) 등과 연료유 품질을 규제 대상으로 하는 규칙을 채택했다.⁽¹⁾ IMO 2020 규제가 시행됨에 따라, 선박 연료에 포함된 황산화물 함유량에 대한 제한이 강화되었으며, 모든 선박을 대상으로 엄격히 적용되고 있다. 이러한 강화된 규제는 친환경 연료 사용뿐 아니라 이를 안정적으로 공급할 수 있는 FGSS(fuel gas supply system)와 같은 장비의 중요성을 더욱 부각시키고 있다.

선박에서 배출되는 온실가스를 줄이기 위한 대표적인 방법으로는 1) 선박 연료 효율 증대를 통한 연료 사용량 감소, 2) 선박 운항 속도 감속, 3) 탄소세 부과 및 4) LNG/수소로 대표되는 친환경 대체 연료 사용 등이 있다.⁽²⁾ 그중에서 연료 사용량 감소를 통한 오염물질 배출 감소는 대체 연료를 사용하는 기존 대다수 선박의 경우에는 선박 형상 개선, 폐열 재활용, 엔진 효율 개선, 하이브리드 엔진 활용, 메인 엔진 공기 순환과 같은 방법들이 수행되는 것으로 보고된다.⁽³⁾ 이와 더불어 CO₂ 포집 기술은 해양선박에 대한 규제를 단기간 내에 만족시키는 방안으로 연구되고 있다.⁽⁴⁾ 그러나 보다 근본적으로 환경규제에 대응하고 기후 변화를 최소화할 수 있는 적극적인 방안과 관련 기술개발이 요구된다. 이러한 측면에서 LNG는 기존 선박 연료로 활용되던 대표적인 HFO(heavy fuel oil)인 벙커C유와 비교하여 비용적인 측면에서 효율은 낮으나 대기오염 물질 배출이 매우 적어서 친환경 대체 연료로 적합하므로 이를 선박에 적용하기 위한 기술 연구가 활발히 진행되었다. LNG는 기존 연료 대비 NOx, SOx, CO₂ 배출을 대폭 줄일 수 있어 친환경 연료로서 주목받고 있다. LNG를 선박 추진연료로 사용하면 기존 HFO 대비 NOx, SOx, CO₂의 배출이 각각 24%, 95% 및 23% 정도 감소한다는 실험 결과가 보고되었으며, 향후 아시아의 LNG 수요는 2040년까지 현재보다 2배로 증가한 약 3억 6천 300만 톤에 이를 것으로 전망하고 있어 그 관련 기술개발이 중요하다.^(5,6) 따라서 친환경 대체 연료를 선박에 적용하기 위하여 국내에서도 학술적인 연구가 진행되고 있다. 대표적인 연구 사례로 Cha와 Anh은 LNG 연료를 사용의 안전성 확보를 위하여 자연 기화 가스(boil-off gas) 발생에 관한 연구를 수행하였다.^(7,8) Kim은 LNG 저장탱크에 관한 구조해석/최적 설계 연구를 수행했으며,⁽⁹⁾ Chung은 극저온 상태에서 수송되는 친환경 연료의 사용을 위한 CHS(cargo handling system), 연료공급 시스템(FGSS: fuel gas supply system) 개발을 위해 연료 거동을 해석하여 관련 시스템을 설계하기 위한 boiling model 연구를 수행했다.⁽¹⁰⁾ Kim은 LNG 연료 선박용 FGSS의 고압 기화기와 출입구 배관에 대한 구조 건전성 평가를 수행하여 시스템의 안전성을 높이기 위한 연구를 진행하였다.⁽¹¹⁾ 이러한 연구들은 모두 LNG와 같은 친환경 연료의 안전한 사용을 위해 필수적인 기술적 기반을 제공하며, FGSS(fuel gas supply system)의 중요성이 더욱 부각되고 있다. FGSS는 LNG 연료 추진 선박에서 연료를 안정적으로 공급하고, 이를 효과적으로 관리하여 선박의 성능과 안전성을 높이는 핵심적인 역할을 한다. 또한, FGSS는 연료 공급의 안정성과 효율성을 동시에 확보하여 선박의 운영 비용 절감과 배출가스 저감을 가능하게 하는 중요한 시스템이다. 2023년부터 시행되는 선박의 에너지 효율 지표인 EEXI(energy efficiency design index for existing ships)와 선박 탄소집약도지수(CII: carbon intensity indicator)에 대응하기 위해서는 FGSS와 같은 연료 공급 시스템의 기술적 발전이 필수적이다. FGSS는 국제적인 환경 규제에 부응하며, ICT(information and communication technology)와의 융합을 통해 선박 운항의 효율성을 극대화하고 안전성을 확보하는 중요한 기반이 되며, 관련 기술시장은 지속해서 성장하고 있다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 이러한 사례로, ICT를 활용하여 선박 운항 관련 정보를 규합하여 분석함으로써 운항 효율을 향상해 환경규제에 대응하는 최적 기술로 활용되고 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서 ICT를 적용한 친환경 대체 연료 추진 선박 기술은 미래형 선박의 핵심기술로서 유망하리라 전망된다.

그러므로 친환경 대체 연료 선박을 위한 기술에 대한 수요가 전 세계적으로 높고, 이런 시장 요구에 대응하기 위해서 국내 및 해외 엔진 제조업체들은 LNG를 비롯한 친환경 연료를 이용한 엔진 개발 및 상용화를 추진하고 있다. 이와 관련하여 향후 LNG 연료 선박 FGSS는 친환경 연료를 사용하는 선박 또는 유사 시스템에 광범위하게 활용될 것으로 예상된다. 그러나 관련 주변 기술과 관련하여 국내에서는 앞서 기술한 바와 같이 학술적인 차원의 연구는 이루어지고 있으나, 산업적으로 활용될 수 있는 시장 기술 연구 개발은 저조한 상황이다. 이러한 사례로 극지방에서 운행되는 LNG 연료 선박 FGSS(fuel gas supply system)의 효율 향상을 위한 에어 히터(air heater)는 해당 국내 제품이 없어 전적으로 해외수입에

의존하고 있는 것으로 자체 조사되었다. 에너지 효율을 올리기 위하여 물, 공기 등을 가열하여 연료를 예열하는 열효율 향상 방법은 일반적으로 널리 사용되고 있다. 대표적인 사례로, 보일러 시스템에서 연소용 공기 예열은 25°C 온도 상승마다 연료 1% 절감되는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁶⁾ 이처럼 LNG를 연료로 사용하는 시스템에서 LNG 직접 가열은 위험하므로 연료 효율 향상을 위하여 FGSS 주변 온도를 높이는 방법이 활용되고 있다. 그러나 거의 대다수 관련 장비가 국내에서 개발이 저조한 상황이며, 향후 새로운 친환경 대체 연료 선박에 유사 기술이 활용될 것으로 예측됨에 따라 관련 장비들 국산화가 시급하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 강제지는 IMO 규제에 대응하기 위한 LNG 추진 선박의 연료공급시스템인 FGSS의 효율 향상을 위해 SSAMS를 개발하였음. 개발 시스템인 SSAMS(safe & smart ambient-air monitoring system)는 LNG를 연료로 사용하는 친환경 선박의 FGSS에 부착되어 흡입 공기를 예열하여 연료 효율을 높일 뿐만 아니라 상태감시 기능을 통하여 고장을 감지하여 안전성을 높일 수 있도록 개발하였다. 본 개발 사례 발표는 향후 ICT 기술과 융합된 친환경 연료공급 시스템을 모니터링하여 감시하는 안전 시스템 개발의 선행적 기초 연구 사례로 활용될 수 있을 것이다.

2. 지능형 상태 모니터링 시스템 설계 및 제작

SSAMS는 FGSS에 공급되는 연료의 주변 공기를 수동 또는 반자동으로 조절하던 기존 시스템(Fig. 1(a))과는 차별된 지능형 안전 모니터링 시스템 개발을 목표로 하였다. 따라서 효율과 안전성 향상을 위하여 에어 히터와 가열된 공기의 공급 이상을 진단할 수 있는 알고리즘이 내장되도록 하였다. 더불어 사용자에게 HMI(human machine interface) 프로그램을 통하여 원격으로 상태 정보 제공 및 시스템을 제어할 수 있도록 하도록 하였다. 이러한 기능 구현을 위하여 Fig. 1(b)와 같이 히터, 송풍기와 더불어 PLC(programmable logic controller), 센서와 트랜스미터 및 ICT 통신 모듈로써 시스템 구성을 설계하였다. 전체 시스템을 제어하는 PLC는 히터, 송풍기 등을 활용하여 FGSS에 공급할 공기 온도와 유량을 제어하며, 시스템에 장착된 센서의 정보들은 트랜스미터의 출력 전류(4 ~ 20 mA) 형태로 전송되어 고장진단 알고리즘을 통해 이상 진단에 활용하게 하였다. 연구 환경에서 상태 진단 시스템의 개발 플랫폼으로서 PC 기반 환경이 다양한 제어와 모니터링 알고리즘 개발에 적합할 수 있을 것이나, SSAMS와 같이 해상 또는 산업 환경에서 활용되는 상태 진단 시스템에서는 기능적 유연성보다는 신뢰성을 고려하여 PLC 기반 환경을 개발 플랫폼으로 선정하였다.

SSAMS 구성을 위한 센서들은 실제 작동 환경을 고려하여 선정되었으며, 에어 히터와 송풍기를 포함하는 배관에 Fig. 2와 같이 설치하였다. FGSS로 적정량의 공기를 공급하며 송풍기의 이상 여부를 모니터링

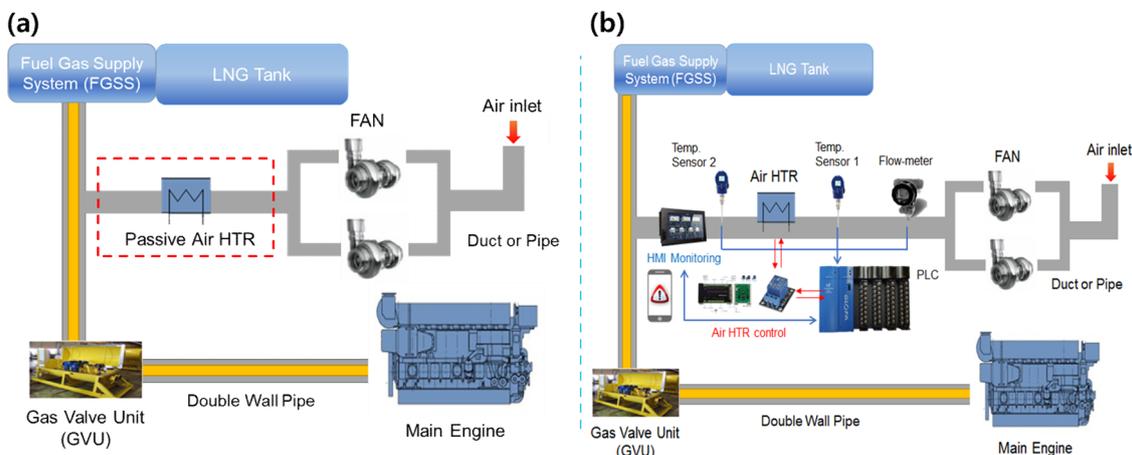


Fig. 1 Conceptual designs for air heating systems in the fuel gas supply system (FGSS): (a) conventional air heating system; (b) SSAMS (safe & smart ambient-air monitoring system)

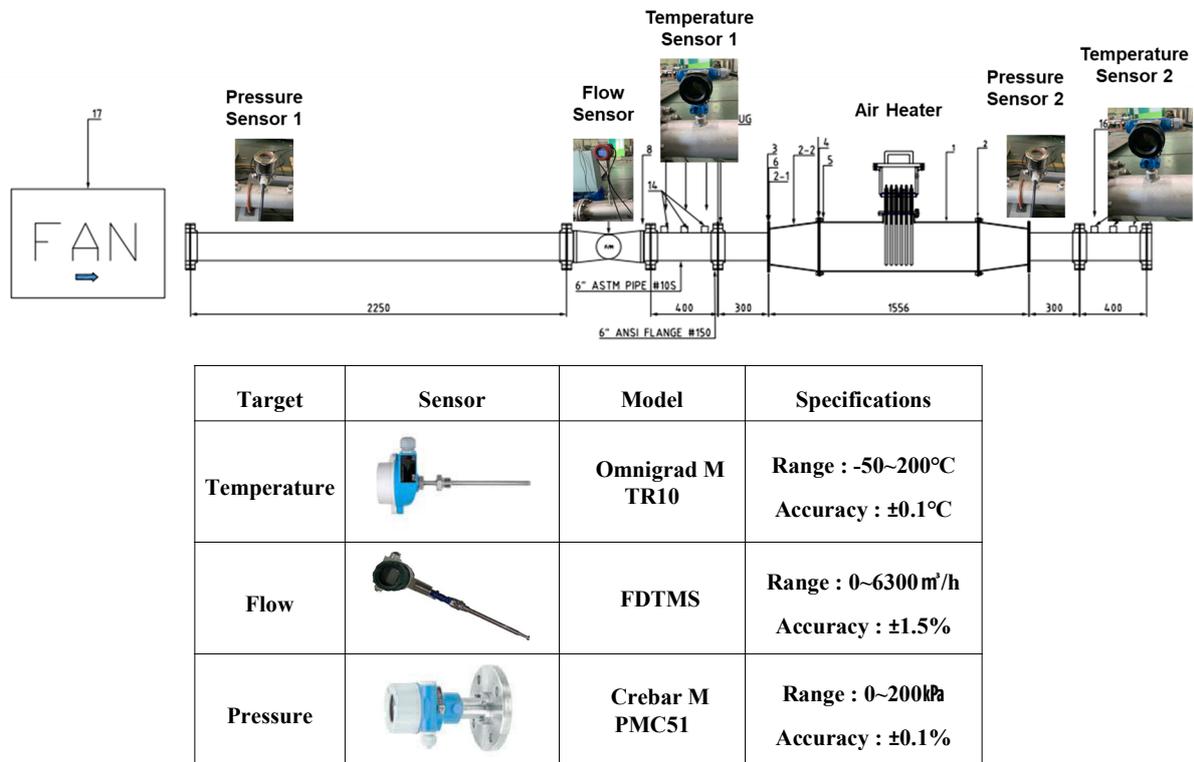


Fig. 2 The sensor configuration and overview for SSAMS

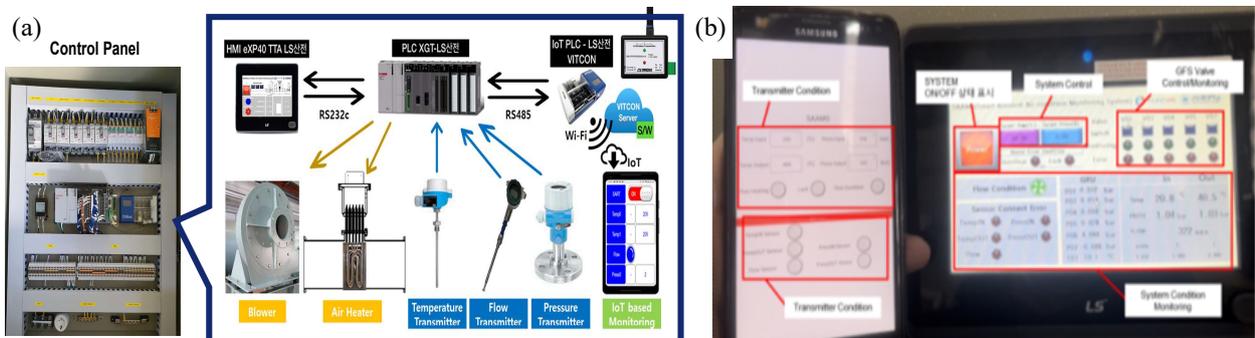


Fig. 3 The configuration of SSAMS: (a) PLC control system with an IoT module and control panel; (b) system monitoring app and in-situ HMI (human machine interface) accessed via Wi-Fi

하기 위하여 유량 센서(FDTMS-150, Flowdigital Co., Ltd.) 1개를 설치하였다. 히터의 고장 유무 판단을 위하여 히터 통과 전후로 한 쌍의 온도 센서(TIGHA-50/200C48-100-M/B, Sensys Co., Ltd.)를 배치하여 온도 변화율을 모니터링할 수 있게 하였다. 또한 배관 파손에 의한 압력 변화를 감지하기 위하여 압력 센서(PMP51-A1X70/0, Endress +Hauser Co., Ltd.) 한 쌍을 입구와 출구에 각각 배치하였다.

SSAMS는 PLC와 이를 제어하는 HMI 프로그램을 통하여 전체 시스템을 모니터링하고 제어할 수 있도록 제작하였다. SSAMS는 PLC와 이를 조작하는 HMI 프로그램을 통하여 전체 시스템을 모니터링과 제어하여 조작할 수 있도록 제작하였다. PLC는 base 모듈(XGB-M06A), power(XGP-AC12), CPU 모듈(XGI-CPU5), Data input/output(XGF-AH6A, XGI-D22B, XGQ-RY2B, XGF-AH6A) 및 외부 주변 장치들과 유선으로 연결할 수 있는 통신 모듈(XGI-CH2B)로 구성시켰다. 또한 유비쿼터스(ubiquitous) 환경을 통하여 PLC에서 IoT 기능 구현을 위하여 별도의 통신 모듈(IoT-LS, VITCON Co. Ltd.)을 추가시켜 외부 PC 또는 스마트폰과 Wi-Fi를 이용한 무선 원격 통신이 가능하게 Fig. 3(a)와 같이 구성하였다. IoT 통신 모듈은 사용

자의 편의성 및 시스템의 기능성 향상을 위하여 single board PC를 PLC와 연동시켜 시스템을 확장할 수 있으며, 서버 전송을 지니고 있어 향후 시스템의 운영 데이터를 지속해서 관리하고 개선할 수 있도록 하였다. SSAMS의 모든 구성 요소들은 현장에 설치된 통합 제어 패널(control panel)에 의해 제어될 수 있을 뿐만 아니라, 사용자가 원격으로 스마트폰 또는 내장 모니터로 제어할 수 있도록 Fig. 3(b)와 같이 HMI 화면을 통해 직관적으로 모니터링 및 조작하도록 하였다.

3. 지능형 온도 모니터링 시스템 제어 및 이상 진단 기술 개발

SSAMS는 에어 히터 시스템의 상태 정보를 기반으로 이상을 진단할 것이므로, 이상을 판단할 수 있는 기준 설계가 요구된다. 히터 고장은 기본적으로 정상(normal) 상황에서 목표 설정 온도(T_{goal})와 실제 계측되는 온도를 비교하여 과열 또는 출력 부족을 확인할 수 있다. 그러나 에어 히터 시스템을 구성하는 송풍기의 고장이나 배관 파손과 같은 각 구성 장치의 고장에 따른 배관 내 온도 변화 경향은 경우마다 다를 것이다. 따라서 히터의 설정 온도를 기준으로 시스템 출력단의 온도를 단순 비교하는 것만으로는 시스템을 구성하는 송풍기와 배관 등 주변 장치들의 고장진단에 한계가 있을 것으로 예상하였다. 그러므로 SSAMS의 히터 시스템 고장 판단 기준은 정상 상황에서 히터 거동의 물리적 모델을 세우고, 이상이 없다면 히터의 온도 상승 경향은 이와 유사할 것이며, 이상 판단을 위한 기준은 목표 온도(T_{goal})에 도달하는 시정수(time constant)로 설정하였다.

히터 거동 예측 모델은 뉴턴의 냉각 법칙(Newton's cooling law)을 따른다고 가정을 하였고, 시스템 출력 예측 온도(T_{pred})의 모델 식은 식 (1)의 1계 미분방정식을 활용하였다.⁽¹⁷⁾

$$T_{pred}(t) = T_{goal} - Ce^{-kt} \tag{1}$$

여기서 t 는 시간 변수, C , k 는 시스템 매개변수이고, 이들은 실험을 통하여 구하도록 하였다.

히터 출력(W)은 질량(m)인 물체의 온도 변화(ΔT)에 필요한 열량(Q) 공식 (2)으로부터 유도된 공식 (3)을 따른다고 가정하였고,⁽¹⁸⁾ 이 식을 Fig. 4와 같이 PLC에 프로그래밍하고 출구의 온도 센서 정보와 목표 온도(T_{goal})를 비교하여 제어하도록 설계하였다.

$$Q = mC_p \Delta T \tag{2}$$

$$W = 0.2778 \times 60 C_p \rho V \Delta T \tag{3}$$

$$\rho = \frac{P}{RT} \tag{4}$$

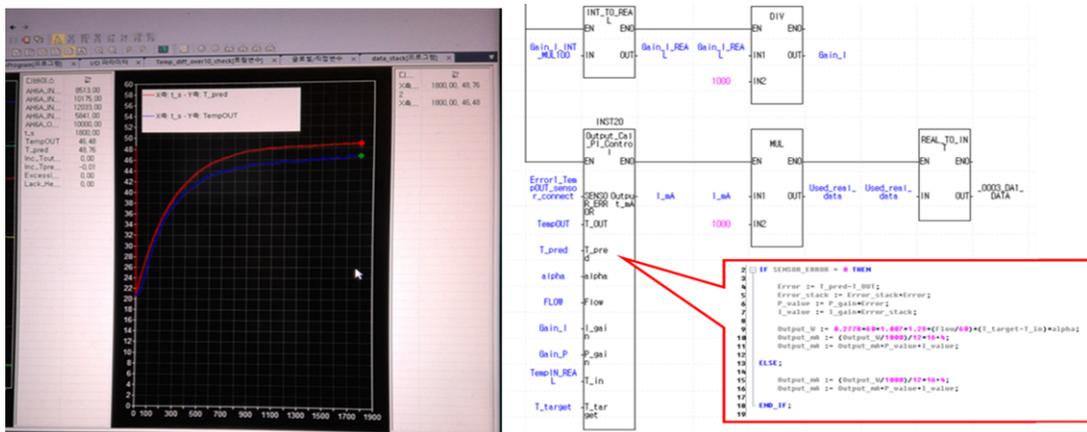


Fig. 4 Heater output control screen by PLC and program

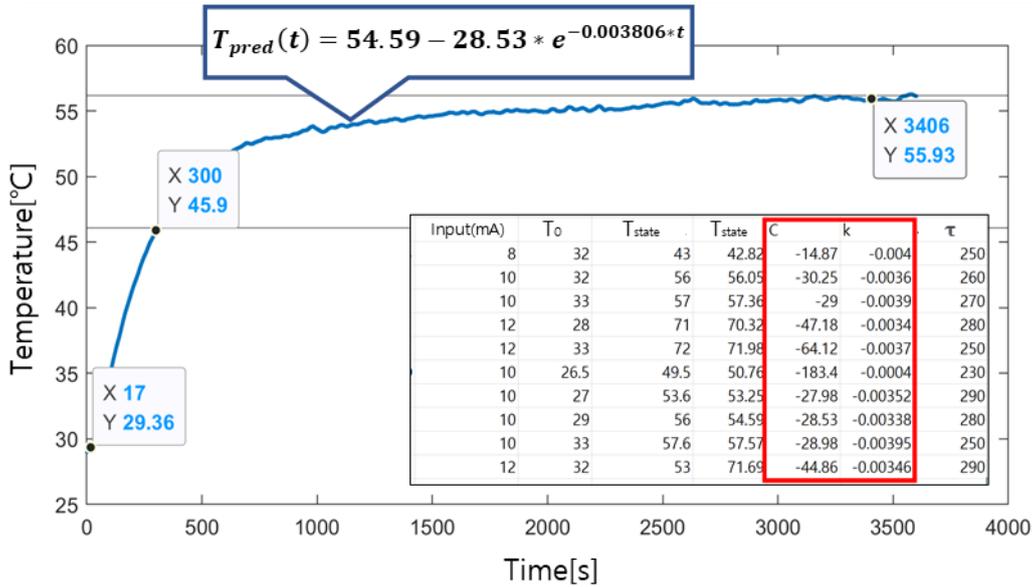


Fig. 5 Heater experiment to determine its physical model parameters

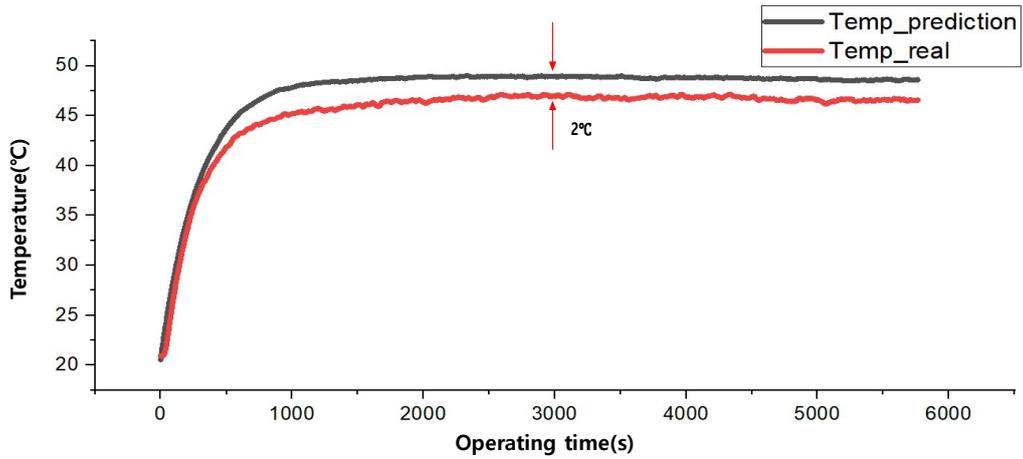


Fig. 6 Heater operating test data (goal temperature 50°C)

여기서, 온도 변화(ΔT)에 필요한 히터 출력은 유체의 비열(C_p)과 밀도(ρ), 유속(V)에 의해 결정될 수 있다. 본 연구에서는 유체에 해당되는 공기 비열(C_p)은 편의상 0.24 Kcal/kg°C로 상수로 가정하였다. 공기의 밀도(ρ)는 식 (4)를 활용하여 계산하였으며 기체상수(R)는 이상기체로 가정하여 287 J/kg·K로 선정하였으며, 압력(P)과 속도(V)는 SAMMS에서 측정되는 정보를 사용하였다.

히터의 정상 거동 기준이 되는 식 (1)의 1계 미분방정식 매개변수 C 와 k 는 일정한 송풍기 유량 조건에서 다양한 히터 초기 온도(T_0)와 히터 출력(W)을 변경하면서 Fig 5와 같이 그 결과를 여러 번 측정하고 분석하여 회귀분석법을 적용하여 $C = 28$ 와 $k = 0.0035$ 로 결정했다.

Fig. 6는 실내온도 20°C에서 히터의 약 40% 수준의 목표 온도 50°C에 도달하는 거동 사례이다. 히터 작동 순간부터 측정된 시간(operating time)에서 온도센서로 측정되는 실제온도(temp_real)과 식 (1) 온도 거동 모델을 이용한 예상값(temp_prediction)을 비교하였다. 위에서 얻은 매개변수를 적용한 온도 거동 예측 모델은 시스템이 작동하는 상황에서 Fig. 4와 같이 PLC의 연산 시스템 통해 실시간으로 실제 온도 거동과 비교되어 고장진단에 활용되게 하였다. 실험 결과 시스템의 출구 온도는 온도 센서로 측정되는 실제 온도와 식 (1) 온도 거동 모델을 이용한 예상값은 약 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 차이를 보였다. 승온 구간에서의 온도

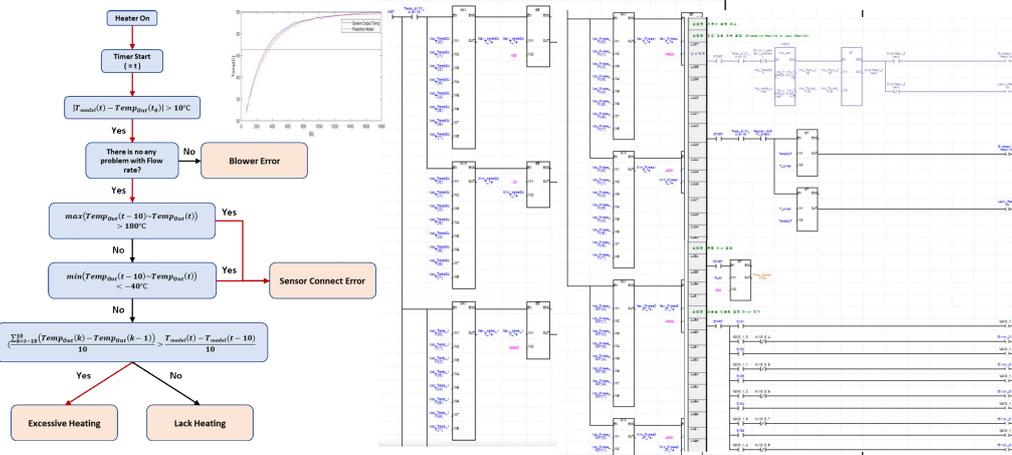


Fig. 7 SSAMS fault diagnosis algorithm & PLC program for algorithm implementation

편차는 약 0.1°C였으나, 안정화 구간에서 모델의 예측온도와 실제 온도값의 편차가 증가하였다. 정상상태에서의 온도 편차는 식 (1)의 매개변수 C에 의해 결정되므로, 이는 추가적인 실험을 통한 데이터 확보 및 이를 통해 매개변수 C를 보다 최적화함으로써 편차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

위의 온도 거동 예측 시험 결과를 기반으로 SSAMS 고장진단 알고리즘을 설계하였다. 에어 히터 시스템에서 발생 되는 고장을 진단하기 위하여 발생할 수 있는 고장사례로 (1) 히터 과열, (2) 히터 출력 부족, (3) 송풍기 이상, (4) 온도 센서 이상 등을 가정하였다. 시스템의 이상은 거동 모델에 의해 예측되는 온도(temp_prediction) 변화와 송풍기의 고장이나 배관의 파손이 발생하였을 때 출구에서 실제로 계측되는 온도(temp_real)의 변화를 실시간으로 비교하며, 그 변화 경향이 모델과 다를 경우는 이상 발생으로 판단하고 유량 센서와 압력 센서 정보를 함께 활용하여 시스템의 고장을 진단하도록 하였다. 히터가 동작 된 이후부터 시스템의 상태를 체크하며, 예측 온도와 계측 온도가 10°C 이상 차이가 날 때 1차적으로 유량 이상을 체크하여 설정 유량과 차이(10 m³/h 이상)가 있을 경우 계측 온도를 확인하여 일반적인 실제 온도(작동환경 최저 온도 ~ 히터 최대 출력 가정 온도 : -40 ~ 180°C)를 벗어나는 경우 센서 신호 이상으로 판단한다. 이후, 측정 시점으로부터 10초 이전 온도를 기준으로 예측 온도와 계측 온도의 증가량(기울기)을 비교하여 계측 온도가 높을 경우 히터의 과열로, 낮을 경우 히터 출력 부족으로 판단하였다.

센서들은 작동 환경에서 전력공급이 불안정할 경우 순간적으로 최대 혹은 최소의 출력값을 보이는 이상이 발생하므로 이를 통해 판단할 수 있다. 송풍기의 이상은, 유량계로부터 계측되는 실제 유량과 설정 유량을 비교하여 판단하도록 하였다. 배관의 손상은 내부 온도 거동과 더불어 내부 유량과 압력 변동이 허용치 이상을 초과할 경우에 이상이 있다고 판단하도록 하였다. Fig. 7은 이를 구현하기 위한 논리 및 프로그램 로직이다.

4. 결론

본 연구에서는 LNG 연료공급 시스템을 위한 지능형 상태 모니터링 시스템 개발을 수행했다. 개발된 시스템은 일반적인 연료공급 시스템의 구성 요소인 배관, 전기히터, 송풍기 등과 더불어 시스템의 감시 및 제어를 위한 센서와 트랜스미터, PLC 제어장치 및 무선 ICT 장치로 구성했다. 센서와 트랜스미터는 시스템에서 공기의 온도, 유량, 압력 등을 계측하고 그 정보를 PLC 제어기에 전달하였다. PLC 제어기는 계측값을 전달받은 후, 뉴턴의 냉각 법칙에 기반한 온도 거동 모델을 활용해 히터 작동 후부터의 시스템 온도 거동을 계산하여 예측하였다. 센서의 실시간 계측 정보와 예측된 온도 거동을 바탕으로 예상되는 고장 상황에 기반한 이상 진단 알고리즘 설계하고 PLC 프로그래밍으로 제작하였다. 계측된 시스템 정보와 알고리즘이 판단한 시스템의 상태를 HMI에 전달하며, 제어기에 부착된 IoT 통신 모듈과 서버 등의 ICT 장치를 활용해 시스템 상태를 원격으로 모니터링할 수 있는 유비쿼터스 환경을 구축하였다. 모

니터링 시스템은 온도 예측 모델을 활용해 실제 거동을 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위로 추정했으며, 고장진단 알고리즘을 통해 센서, 히터, 송풍기 및 배관의 이상 상태를 판단할 수 있도록 설계하였다. 시스템의 상태는 원거리에서 서버를 활용하는 경우 약간의 지연(약 3초)은 발생하나 사용자에게 정확히 전달되었다. 개발된 시스템은 기존 수동식 LNG 연료공급 시스템에 고장진단 기능과 원격 통신 기능을 부여함으로써, 제품의 경쟁력 향상은 물론 사용자에게 시스템 신뢰성, 편의성 및 안전성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

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

참고문헌 (References)

- (1) International Maritime Organization, 1997, *Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships of 2 November 1973, as Modified by the Protocol of 17 February 1978*, IMO, London, UK, pp. 1~101.
- (2) DNV, 2017, *DNV Low Carbon Shipping Towards 2050* (<https://www.dnv.com/publications/low-carbon-shipping-towards-2050-93579/>), DNV, Høvik, Norway.
- (3) Kristensen, H. O., 2012, "Energy Demand and Exhaust Gas Emissions of Marine Engines," *Clean Shipping Currents*, Vol. 1, No. 6, pp. 18~26.
- (4) Jung, J. and Seo, Y., 2022, "Onboard CO₂ Capture Process Design Using Rigorous Rate-based Model," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 36, No. 3, pp. 168~180.
- (5) Cha, S. J., Bae, J. H., Lee, D. H., Kim, T. W., Kim, S. K. and Lee, J. M., 2018, "Experimental Analysis of Boil-Off Gas Occurrence in Independent Liquefied Gas Storage Tank," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 36, No. 3, pp. 380~385.
- (6) Yu, Y. H., 2021, "Current Status and Challenges in the Development of Smart Autonomous Ships," *TTA Journal*, Vol. 197, pp. 70~77.
- (7) Czermanski, E., Oniszczyk-Jastzabek, A., Spangenberg, E. F., Kozłowski, L., Adamowicz, M., Jankiewicz, J. and Cirella, G. T., 2022, "Implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index: An Important but Costly Step towards Ocean Protection," *Marine Policy*, Vol. 145, Article 105259.
- (8) Anh, D. P., Ryu, B. R., Lee, H. Y. and Kang, H. K., 2020 "A Pressure Control Method for Vapor Generation: Simulation Studies," *Proceedings of the KSME 2020 Annual Fall Meeting of Busan Branch*, Online, pp. 52~54.
- (9) Jin, C. Z., Jin, K. K., Ha, S. K., Seo, H. S. and Yoon, I. S., 2012, "Structure Analysis and Design Optimization of Stiffeners in LNG Tanks," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 3, pp. 325~330.
- (10) Chung, S. M., Seo, Y. S., Jeon, G. M., Kim, J. W. and Park, J. C., 2021, "Parameter Study of Boiling Model for CFD Simulation of Multiphase-Thermal Flow in a Pipe," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 35, No. 1, pp. 50~58.
- (11) Kim, C. S., Yoon, J. H., Lee, C. J., Ha, M. Y. and Cho, J. R., 2016, "Evaluation of Structural Integrity of the HP Vaporizer and Pipes of LNG Fuel Gas Supply System," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 780~785.
- (12) Suh, Y. S., Park, Y. G. and Kim, D. H., 2018, "Technology Trends and Industry Outlook in the KOSEN-Marine ICT Convergence Field," *KEIT PD Issue Report*, Vol. 18-9, No. 3, pp. 46~60.
- (13) Park, H. S., Kim, B. R., Park, S. W. and Chung, I. H., 2020, *Research on Policy Directions for Responding to IMO Greenhouse Gas Regulations*, KMI, Busan, Republic of Korea, pp. 1~214.
- (14) Jung, J. U., Son, S. H., Jang, Y. H., Yoo, K. H., Jung, J. H., Lee, S. Y. and Lee, S. M., 2020,

Changes in the International Energy Market and Diversification Directions for Korea-Middle East Energy Cooperation, KIEP, Sejong, Republic of Korea, pp. 1~223.

- (15) Enerdata, 2022, *Global Energy and Climate Statistics - 2021 Yearbook* (<https://yearbook.enerdata.co.kr/natural-gas/balance-lng-trade-world.html>), Enerdata. Grenoble, France.
- (16) Korea Energy Agency, 2014, *Boiler Energy Saving Guide* (<https://www.energy.or.kr/front/board/View10.do>), KEA, Ulsan, Republic of Korea, pp. 1~226.
- (17) Kreyszig, E., 2011, *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, pp. 1~1280.
- (18) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2007, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, pp. 1~997.

이방성 탄성계수의 Voigt-Reuss 경계조건

윤 영 준^{*†}

* 위-컨설팅

Voigt and Reuss Bounds for Anisotropic Technical Elastic Constants

Young June Yoon^{*†}

* We-Consult

(Received October 28, 2024 ; Revised December 31, 2024 ; Accepted February 19, 2025)

Key Words: Composite Mechanics(복합재료역학), Voigt-Reuss Bound(Voigt-Reuss 경계조건), Anisotropy(이방성), Elasticity(탄성론)

초록: 일반화되어 있는 Hill의 부등식은 탄성론에서 물성치의 상한경계와 하한경계를 나타낸다. 해당경계를 정의한 사람의 이름을 따서 Voigt과 Reuss 경계라고도 정의한다. 상한경계인 Voigt 경계는 경계면에 균일한 변위가 작용한다고 가정하여서 그 값을 구하고, 하한 경계인 Reuss 경계는 경계면에 균일한 힘이 작용한다고 가정하여서 그 값을 구한다. 일반적으로 Hill의 부등식은 고유값과 고유벡터를 이용하여서 구하지만, 이방성 물질에서 영률, 푸아송비에 대한 경계조건은 일반적으로 표현되어있지 않다. 복합재료 책들을 보면 등방성 조건에서의 Hill 부등식만을 표현하고 있다. 이 논문에서는 교육적인 목적에서 어떻게 이방성 물질에서의 영률과 푸아송비에 대한 경계조건을 나타낼 수 있는지를 살펴보고자 한다.

Abstract: The generalized Hill inequality describes the general bounds of Voigt and Reuss. One is for the uniform stress prescribed in the boundary, and the other is for the uniform strain. Generally, the Hill inequality is obtained from the bounds of eigenvalues of elastic materials, but the bounds for the anisotropic technical constants, such as Young's modulus and Poisson's ratio, are unknown. Thus, this paper will introduce the steps to construct the Voigt and Reuss bounds for anisotropic material.

1. 서 론

복합재료에서 두 개 이상의 물질이 결합되어 있을 때 가장 쉽게 물성치를 균질화시킬 수 있는 방법은 경계조건을 만들어서 그 범위 안에 복합재료의 물성치가 존재함을 보이는 것이다. 가장 큰 범위의 경계조건은 Hill의 부등식이라고 하는 Voigt-Reuss 경계조건이다. Voigt 경계조건은 상한경계를 나타내며, 경계면에 균일한 변위가 작용한다고 가정하고, Reuss 경계조건은 하한경계를 나타내며, 경계면에 균일한 힘이 작용한다고 가정하여서 나타낸다. 일반적으로 Hill의 부등식⁽¹⁻⁵⁾은 고유값과 고유벡터로 표현하지만, 본 논문에서는 텐서를 값을 비율로 나누어서 균질화되어진 물성치를 예측하였다. 많은 연구자들이 이 부분을 간과하고, 물성치가 스칼라 값이므로, 단지 비율로 물성치를 균질화시키는 방법은 등방성 재료에 대해서만 적용할 수 있다고 하지만, 본 논문에서 이방성 재료에 대해서도 사용할 수 있음을 나타내고자 한다. 이 결과는 복합재료의 수업시간에 학생들에게 예제문제로도 제공할 수 있다.

2. 방법

† Corresponding Author, yoon@we-consult.kr

비례식을 이용한 비율에 따른 Hill의 부등식은 텐서를 이용하여서 표현하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(1-\phi)(s_{ij}^R)_1 + \phi(s_{ij}^R)_2 \leq (1-\phi)(s_{ij}^{eff})_1 + \phi(s_{ij}^{eff})_2 \leq \left((1-\phi)(c_{ij}^V)_1 + \phi(c_{ij}^V)_2 \right)^{-1} \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 다공성을 나타내며, s_{ij} 는 i 번째 행과 j 번째 열에 속한 강성텐서(compliance tensor)의 성분이 된다. c_{ij} 는 i 번째 행과 j 번째 열에 속한 탄성텐서(elasticity tensor)의 성분이 된다. 위 첨자 R은 Reuss 경계조건인 하한경계를 나타내고, 위 첨자 V는 Voigt 경계조건인 상한경계를 나타낸다. 많은 연구자들이 이 표현 자체에 의구심을 가지고 있지만, 스칼라 값을 가지고 있는 영률의 균질화보다는 방향성을 가진 텐서의 균질화가 더 정확하고 의미가 있다고 생각한다. 우리는 텐서가 각각의 방향성을 가지고 있음을 알기에 방향성이 있는 상태의 균질화(homogenization)가 더 의미가 있음을 증명 없어도 쉽게 이해할 수 있다. 아래첨자 1과 2는 복합재료에서 2개의 다른 재질을 나타낸다. 강성텐서(compliance tensor) \hat{S} 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

여기서 E_i 는 영률, ν_{ij} 는 푸아송비, 그리고 G_{ij} 는 전단계수를 나타낸다. 식 (2)의 역행렬을 구하게 되면 탄성텐서(elasticity tensor) \hat{C} 로 표현이 가능해진다. 그러면 식 (1)을 이용하여서 먼저 영률 E_i 의 상한경계와 하한경계를 구한다.

그런 후 푸아송비의 상한경계와 하한경계를 다음의 방식으로 구한다. 식 (2)에서 1번째 행과 2번째 열의 값, s_{12} 은 푸아송비 - ν_{12}/E_1 이므로 이 성분에 대해서 영률의 상한값은 균질화된 s_{12} 값의 상한값에 곱하여서 푸아송비, ν_{12} 의 상한값을 구하고, 영률의 하한값은 균질화된 s_{12} 의 하한값에 곱하여서 푸아송비, ν_{12} 의 하한값을 구한다. 그러나 s_{12} 가 음의 값을 나타내므로 하한값이 결과적으로 상한경계가 되고, 상한값이 하한경계가 된다.

3. 결론

등방성인 경우, 식 (1), 강성텐서(compliance tensor)의 역행렬은 다음과 같이 표현된다. 이는 등방성을 가진 탄성텐서(elasticity tensor)이며, 영률, 푸아송비, 전단계수로 표현된다.

$$\hat{C} = \begin{pmatrix} \frac{E(-1+\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} & \frac{E\nu}{-1+\nu+2\nu^2} & \frac{E\nu}{-1+\nu+2\nu^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E\nu}{-1+\nu+2\nu^2} & \frac{E(-1+\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} & \frac{E\nu}{-1+\nu+2\nu^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E\nu}{-1+\nu+2\nu^2} & \frac{E\nu}{-1+\nu+2\nu^2} & \frac{E(-1+\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G \end{pmatrix}. \quad (3)$$

우리가 복합재료역학에서 흔히 표현하는 상한경계와 하한경계는 다음과 같다.

$$E^R \leq E^{eff} \leq E^V. \quad (4)$$

그러나, 텐서를 이용한 균질화 방법을 이용하면, 기존의 복합재료역학의 내용과 약간 다를 수 있다. 이유인즉 기존의 복합재료역학 교재에서는 스칼라 값을 사용한 반면 본 논문에서는 방향성을 가지고 있는 텐서 상에서 균질화를 진행하였기 때문이다. 식 (1)을 이용하면 식 (4)의 상한경계와 하한경계는 다음과 같이 표현된다.

$$E^R = \frac{E_1 E_2}{E_2 + E_1 \phi - E_2 \phi}. \quad (5)$$

$$E^V = - \frac{(E_1(-1+2\nu_2)(-1+\phi) + E_2(1-2\nu_1)\phi) - (E_1(1+\nu_2)(-1+\phi) - E_2(1+\nu_1)\phi)}{E_1(-1+\nu_2+2\nu_2^2)(-1+\phi) - E_2(-1+\nu_1+2\nu_1^2)\phi}. \quad (6)$$

그리고 푸아송비는 다음과 같이 표현된다.

$$\nu^R \leq \nu^{eff} \leq \nu^V \quad (7)$$

여기서

$$\nu^R = \frac{E_2 \nu_1 - E_2 \nu_1 \phi + E_1 \nu_2 \phi}{E_2 + E_1 \phi - E_2 \phi}. \quad (8)$$

이고

$$\nu^V = \frac{E_1 \nu_1(-1+\nu_2+2\nu_2^2)(-1+\phi) - E_2(-1+\nu_1+2\nu_1^2)\nu_2\phi}{E_1(-1+\nu_2+2\nu_2^2)(-1+\phi) - E_2(-1+\nu_1+2\nu_1^2)\phi}. \quad (9)$$

이방성 물질인 경우, 위의 식들과 같이 단순하게 표현할 수 없기에 이방성의 두 물질에 대한 수치적인 값으로 그 결과를 나타내고자 한다. 예를 들어서 뼈의 물성치(단위 GPa)⁽⁶⁾가 다음과 같은 직교이방성 (orthotropic)을 가지면서,

$$E_{11}=12.0; E_{22}=13.4; E_{33}=20; \nu_{12}=0.376; \nu_{13}=0.222; \nu_{23}=0.235; G_{12}=4.53; G_{23}=5.61; G_{13}=6.23 \quad (10)$$

뼈에 육방밀집구조(hexagonal)의 수산화인회석(hydroxyapatite)이 결합된 경우, 수산화인회석의 물성치 (단위 GPa)⁽⁷⁾는 다음과 같다.

$$c_{11}=117.6; c_{12}=34.6; c_{13}=72; c_{33}=162.5; c_{44}=44.6; c_{66}=41.5 \quad (11)$$

위에서 설명한 순서를 따라서 계산하게 되면, 영률 E_{11} 의 상한경계와 하한경계는 Fig. 1과 같고, 푸아송비 ν_{12} 의 상한경계와 하한경계는 Fig. 2와 같으며, 전단계수 G_{44} 의 상한경계와 하한경계는 Fig. 3과 같다. 언급하였듯이 푸아송비의 경계를 구함에 있어서 음수가 포함되어 있어 하한경계가 상한경계보다 큰 값을 나타내게 되었다.

기존의 내용에 대해서 약간의 설명을 첨부하자면 다음과 같다. 일반적으로 우리는 영률에 대해서 비율로 설정하여서 Voigt 경계조건(상한경계)과 Reuss 경계조건(하한경계)을 사용한다. 하지만 이 방식의 문제점은 영률이 스칼라 값이기에 방향성이 없다는 것이다. 일반적으로 표현하는 Hill의 부등식 또한 고유값과 고유벡터를 지니고 있어서, 고유값에 해당하는 고유벡터가 존재하기에 각각의 물성치에 방향성을

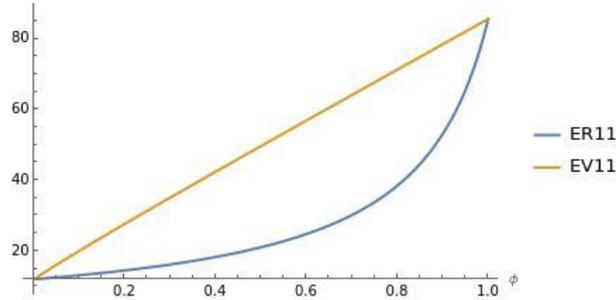


Fig. 1 The Reuss and Voigt bounds for E_{11}

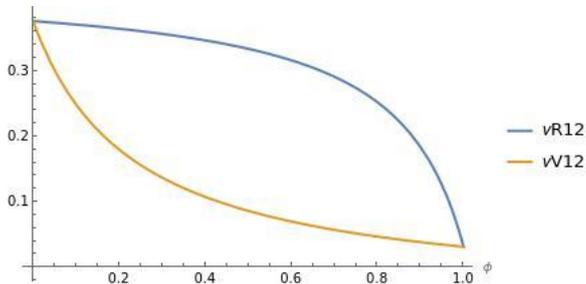


Fig. 2 The Reuss and Voigt bounds for ν_{12}

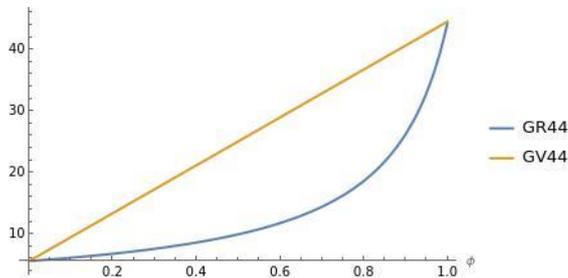


Fig. 3 The Reuss and Voigt bounds for G_{44}

가지고 있다. 그러나 가장 문제점은 영률에 대해서 상한경계와 하한경계를 사용할 경우, 해당 영률에 대한 방향성이 존재하지 않고, 고유값과 고유벡터에 대한 비율로서 복합재료의 물성치를 나타낼 경우 두 개의 물질 각각의 고유벡터가 달라지므로, 식 (1)에서 표시한 바와 같이 비율로 표시할 수 없다. 또한 기존의 두 가지 방법 - 영률의 혼합법칙(the rule of mixture)과 고유값, 고유벡터를 이용한 혼합법칙 - 모두 푸아송 비에 관한 상한경계와 하한경계를 표현할 수 없기에, 이 논문에서 설명하고 있는 방법인 방향성을 가지고 있는 텐서표현을 이용하면 기존의 전통적인 방식인 영률의 혼합법칙과 고유값과 고유벡터를 이용한 혼합법칙을 대체할 수 있는 유용한 방법으로 생각된다. Voigt-Reuss 경계조건은 복합재료에서 가장 넓은 경계조건을 형성하고, Hashin-Strikman 경계조건 등 다른 경계조건에 비해서 넓은 경계조건을 나타낸다. 하지만, Voigt-Reuss 경계조건은 가장 간편하고 실용적인 방법으로 실험결과를 입증하는데 많이 사용되고 있다. 언급하였듯이, Voigt-Reuss 경계조건은 복합재료 역학의 실험적인 결과의 타당성을 나타낼 때 유용하게 사용된다. 예를 들면 카본 화이버 복합재료의 인장거동을 살핀 후 그 실험결과를 타당성을 입증할 때 유용하게 사용된다.⁽⁸⁾ 복합재료의 거동을 살피는 실험인 경우, 화이버의 방향성에 따라서 거동의 특징이 상당히 달라지게 된다. 그러나 Voigt-Reuss 경계조건은 화이버의 방향성이 평행한 조건과 수직인 경우에 대해서 상한경계와 하한경계를 구성하기에, 일반적으로 화이버의 방향성과 무관하게 경계조건을 구성할 수 있다. 또한 기계설계의 한 분야인 최적화(optimization) 과정에서 물질의 균질화(homogenization)가 필요할 경우 유용하게 사용되고 있다.⁽⁹⁾ 특히 RVE(representative volume element)의 균질

화에 유용하게 사용될 수 있다. RVE는 멀티스케링이나 FEM(finite element method)의 기본 체적단위로 일반적으로 균질화되어 있다고 가정하고 문제를 해결하고 있다. 따라서 본 논문에서 제시하는 방법은 복합재료의 균질화가 다양한 분야에서 적용될 수 있음을 보여준다.

이 결과치는 일반적으로 복합재료역학 교재에 포함되어 있지 않고, 교습자마다 의견이 분분하여 기계공학 대학원 과정인 복합재료역학에서 교습자와 학생들에게 도움이 되고자 본 논문을 작성하게 되었다.

참고문헌 (References)

- (1) Cowin, S. C. and Mehrabadi, M. M., 1992, "On the Structure of the Linear Anisotropic Elastic Symmetries," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 40, pp. 1459~1472.
- (2) Cowin, S. C. and Mehrabadi, M. M., 1995, "Anisotropic Symmetries of Linear Elasticity," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 48, pp. 247~285.
- (3) Cowin, S. C. and Yang, G., 1997, "Averaging Anisotropic Elastic Constant Data," *J. Elasticity*, Vol. 46, pp. 151~180.
- (4) Cowin, S. C., Yang, G. and Mehrabadi, M. M., 1999, "Bounds on the Effective Anisotropic Elastic Constants," *J. Elasticity*, Vol. 57, pp. 1~24.
- (5) Yoon, Y. J., Yang, G. and Cowin, S. C., 2002, "Estimation of the Effective Transversely Isotropic Elastic Constants of a Material from Known Values of the Material's Orthotropic Elastic Constants," *Biomech. Model. Mechanobiol.*, Vol. 1, pp. 83~93.
- (6) Ashman, R. B., Cowin, S. C., Van Buskirk, W. C. and Rice, J. C., 1984, "A Continuous Wave Technique for the Measurement of the Elastic Properties of Cortical Bone," *J. Biomech.*, Vol. 17, pp. 349~361.
- (7) Osuchukwu, O. A., Salihi, A., Abdullahi, I., Obada, D. O., Abolade, S. A., Akande, A., Csaki, S. and Dodoo-Arhin, D., 2023, "Datasets on the Elastic and Mechanical Properties of Hydroxyapatite: A First Principle Investigation, Experiments, and Pedagogical Perspective," *Data in Brief*, Vol. 48, Article 109075.
- (8) Lee, D. J., 1996, "On Studies of Tensile Properties in Injection Molded Short Carbon Fiber Reinforced PEEK Composite," *J. of Mech. Sci. and Tech.*, Vol. 10, pp. 362~371.
- (9) Lim, O. K. and Lee, J. S., 2000, "Structural Topology Optimization for the Natural Frequency of a Designated Mode," *J. of Mech. Sci. and Tech.*, Vol. 14, pp. 306~313.

기술과 교육 편집위원회

ISSN 2288-3991(Online)

편집장

박태선

경북대학교

E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

편집인

구남서

건국대학교

nsgoo@konkuk.ac.kr

김흥수

동국대학교

heungsoo@dongguk.edu

박치용

한국수력원자력

parkchiyong@khnp.re.kr

송시문

한양대학교

simonsong@hanyang.ac.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

황옥렬

국립경상대학교

wrhwang@gnu.ac.kr

부 편집인

강윤정

제주대학교

youn.kang@jejunu.ac.kr

구병춘

한국철도기술연구원

bcgoo@krti.re.kr

김동권

아주대학교

dkim@ajou.ac.kr

김선영

군산대학교

sykim77@kunsan.ac.kr

김태진

전북대학교

tjkim@jbnu.ac.kr

문장혁

중앙대학교

jhmoon84@cau.ac.kr

박상인

인천대학교

sangin.park@inu.ac.kr

박종원

한국기계연구원

jwpark@kimm.re.kr

손정현

부경대학교

jhsohn@pknu.ac.kr

신재호

경일대학교

jhshin@kiu.kr

오동욱

조선대학교

dwoh@chosun.ac.kr

유재영

고려대학교

jryu@korea.ac.kr

정훈의

울산과학기술원

hoonejeong@unist.ac.kr

조주형

한국기계연구원

antocho@kimm.re.kr

최승준

LS Mtron

hydride@smtron.com

한상목

한국지질자원연구원

smhan@kigam.re.kr

대한기계학회논문집



제13권 제1호

발행인: 김태진
편집인: 박태선
발행처: 한국기계학회
주소: 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22
전화: 7519743
팩스: 7519743
발행일: 2025년 3월 1일

대한기계학회
2025년 3월 1일
사단법인 한국기계학회
발행처: 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22
http://www.ksme.or.kr, TEL : (02)501-3646~8, FAX : (02)501-3649
7519743번
(주) 동국문화

