

VOL. 31 NO. 5 October 2021 ISSN 1598-2785(Print) ISSN 2287-5476(Online)

한국소음진동공학회논문집

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering



http://www.ksnve/or.kr

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering 한국소음진동공학회논문집

http://Journal.ksnve.or.kr

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering(Transactions of the KSNVE)Aims & Scope : This journal provides original articles on any aspect of noise and vibration issues in various fields including
mechanical engineering, construction engineering, environmental engineering and so on. This journal publishes fundamental work,
theoretical analysis, experimental investigation and practical application on noise and vibration problems.
Recently, articles on advanced technology of active noise and vibration control are also included in this journal.
ISO abbreviation of fittle : Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.
Transactions history : Journal of KSNVE(Bi-monthly) was launched in August 1991
and the Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering(Transactions of the KSNVE) has been published
bi-monthly since July 2001 separately from the journal.한국소음진동공학회논문집
목적과 범위 : 이 논문집은 기계공학, 건축공학, 환경공학 등 여러 분야에서 발생하는 소음과 진동에 관한

특적과 남귀 : 이 근근접은 기계공약, 건국공약, 관경공약 등 여러 준아에서 발생하는 소음과 신동에 판만 독창적 연구논문을 제공하는 것이 목적이며, 소음과 진동의 기본 연구, 이론적 연구, 실험적 연구 그리고 실제현장에서 일어나는 문제를 다룬 연구논문을 출판하며, 나아가서 첨단기술과 접목된 능동소음 및 능동진동 제어에 관한 연구논문도 이 논문집의 범주에 포함된다. **청간 및 발행** : 이 논문집은 1991년 8월 "소음·진동(Journal of KSNVE/격월간)"로 창간되어, 2001년 7월 한국소음진동공학회논문집(Transactions of the Korean Society for Noise and vibration Engineering, Transactions of the KSNVE)으로 분리하여 격월간 발행되고 있습니다.

Indexed/abstracted in : KCI(Korea Citation Index)/DOI(CrossRef)

Subscription info : For subscription of printed issues, contact to the journal office(subscription fee Korean \20,000(member \10,000)). | 이 논문집 인쇄본의 가격은 20,000원(회원 10,000원)으로 학회 사무국을 통해 구매 가능합니다. | The URL address of the Society is http://journal.ksnve.or.kr and the electronic version of a journal article is freely accessible by public without charge through the same URL address. | 한국소음진동공학회논문집의 URL 주소는 http://journal.ksnve.or.kr이며 논문집의 전자화된 논문 역시 같은 주소를 통해 일반에게 자유롭게 별도의 구독비용 없이 제공되고 있다.

Volume 31 Number 5 October 2021

Published by The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Published on October 20, 2021 (Bi-monthly) Publisher Young Min Park (President, KSNVE) Manuscript(Managing) Editor Jin Tai Chung(Vice president, KSNVE)

Journal Office Renaissance Officetel 1406-ho, 69, Seochojungang-ro, Seocho-gu, Seoul, 137-729 KOREA Tel 82-2-3474-8002/8003 | Fax 82-2-3474-8004 | http://Journal.ksnve.or.kr | E-mail ksnve@ksnve.or.kr

Printed by Nurimedia Co., Ltd. (63, Seonyu-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul, 07281 Korea)

Copyright © The Korean Society for Noise and Vibration Engineering.

 \otimes This journal is printed on acid-free paper, which exceeds the requirements of KS X ISO 9706, ISO 9706-1994 and ANSI Z39.48-1992 specification for permanence of paper and library materials.

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Editorial Board

Editor-in-Chief

Prof. Jin Tai Chung Department of Mechanical Engineering, Hanyang University jchung@hanyang.ac.kr Tel: 82-31-400-5287

Editors

Associate Editors

Prof

Dr. Byung Kwon Lee

Environmental Assessment Group, Korea Environment Inst.

nicelbk@gmail.com

Tel: 82-44-415-7321

Jung Woo Sohn Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Tech. jwsohn@kumoh.ac.kr

Tel: 82-54-478-7378

Prof

Prof.

Sang Wook Kang Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung Univ.

swkang@hansung.ac.kr Tel: 82-2-760-4228

Prof Won Ju Jeon

Department of Mechanical Engineering, KAĬST wonju.jeon@kaist.ac.kr Tel: 82-42-350-3219

Prof.

Cheol Ung Cheong

Department of Mechanical Engineering, Busan Univ.

ccheong@pusan.ac.kr

Dr Deuk Sung Kim

NV

kdsworlds@hanmail.net

Dr. Han Shin Seol

Naval Ship Engineering Research Center, KRISO

seol@kriso.re.kr

Prof Heon Jun Yoon

Department of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.

heoniun@ssu.ac.kr

kangj@inha.ac.kr

Engineering,

Inha Univ.

Jae Young Kang

Department of Mechanical

Prof. Jin Gyun Kim

Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee Univ.

jingyun.kim@khu.ac.kr

Prof. Jin Woo Lee

Department of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

jinwoolee@ajou.ac.kr

Dr Jin Yun Chung

Korea Conformity Laboratories

jinyun97@gmail.com

Prof. Jong Seok Oh

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju Univ.

jongseok@kongju.ac.kr

Dr Jung Bin Im

Daewoo EnC

jungbin.im@daewooenc.com

Prof Nam Keun Kim

Department of Mechanical Engineering, Incheon National Univ. nkim@inu.ac.kr

Dr Pyung Sik Ma

Department of System Dynamics, KIMM psma@kimm.re.kr

Seon Jun Jang

Prof.

Department of Mechanical Engineering, Hoseo Univ

mweagle@hoseo.edu

Prof Won Seok Yang

Department of Automotive Engineering, Univ. of Transportation

wsyang@ut.ac.kr

Prof Yong Hee Kim

Department of Architectural Engineering, Youngsan Univ.

yhkim@ysu.ac.kr

Prof Yong Hwa Park

Department of Mechanical Engineering, KAISTE

vhpark@kaist.ac.kr

Editorial Staffs Copy editor Ho-Cheol Lee and Tae-Hee Kim

고상 결함 감시 및 신난	······이상권·김풍일 ··· 563
고무공 충격음의 우회전달에 의한 공동주택 상하층	세대에서의
바닥충격음레벨 분포	······· 이송미 · 김정훈 · 김수홍 · 송한솔 · 류종관 ··· 574

합성곱 오토인코더를 이용한 체인 전동 장치의

경량벽체로 구성된 소형 공동주택의 바닥충격음 특성 연구 김태민·배진영… 551

배관계 시간이력 다지점 가진 해석의 입력 방법에 관한 연구 …………………………………………… 라치웅·이은호·이창균·임진우·박노철 … 543

각종 주름판 코어 샌드위치 패널의 강성 및 진동 해석 …………………………………………… 정강… 535

영상 기반 딥러닝을 통한 배관 누설 가시화 기술 ……… 서호건·정변영·전지현·최영철… 521

달착륙선 모사체 개발 및 검증 ……………최한솔·김영배·정현재·박정훈·김현·임재혁… 511

균열을 가지는 폭이 테이퍼진 보의 굽힘 진동 해석 …………………………………………………………… 이정우 … 504

진동 특성 평가 ………………………………………………………………………………이상문·전법규·윤다운·정우영…495

실제 어린이 뜀 분석을 통한 신중량 충격모델 개발 …………………………… 김수홍·송민정·류종관 … 486

기과 지기지 때 법원이 드러 가구가 주거마에 개발 기상추 사라가 근구하는 400

그래핀 표면에서의 라카아제 효소의 동적 거동 및 고정:

목 차

2021년 10월 제 31 권 제 5 호 통권 262호

한국연구재단 KCI(한국학술지인용색인) 등재학술지 한국소음진동공학회논문집

지진 시 발전소 내 운용설비의 지지조건에 따른

풋댐퍼가 적용된 경량착륙장치 기반

October 2021 Volume 31 Number 5

$C \cdot O \cdot N \cdot T \cdot E \cdot N \cdot T \cdot S$

Dynamic and Immobilization Properties of Laccase on Graphene Sheet: Kim, Y. J., Park, W. B. and Na, S. S. ... 475 The Development of New Heavy-weighted Impact Source by Analysis of Children's Running in Dwelling Kim, S. H., Song, M. J. and Ryu, J. K. ... 486 Evaluation of Vibration Characteristics According to Conditions of Support for Operating Facilities in a Power Plant under an Earthquake Lee, S.-M., Jeon, B.-G., Yun, D.-W. and Jung, W.-Y. ... 495 Bending Vibration Analysis of Width-tapered Beams with a Crack Lee, J. W. ... 504 Development and Validation of a Lunar Lander Demonstrator with Foot-damper based Landing Gears Choi, H.-S., Kim, Y.-B., Jeong, H.-J., Park, J.-H., Kim, H. and Lim, J. H. ... 511 Video-based Deep Learning for Pipe Leakage Visualization Seo, H. G., Jeong, B. Y., Jun, J. H. and Choi, Y. C. ... 521 Mistuning Effects caused by the Blade Assembling Conditions Cha, D. S. ... 529 Analysis on Rigidities and Vibration of Various Corrugated Core Sandwich Panels Jung, K. ... 535 A Study on Time History Analysis of Multi-support Excitement by Input Methods Ra, C. W., Lee, E.-H., Lee C. K., Im, J. W. and Park N.-C. ... 543 A Study on the Floor Impact Noise of Small Size Multi Residential House with Light-weight Dry Walls Kim, T.-M. and Bae, J.-Y. ... 551 Fault Detection and Diagnosis of Chain Transmission System Using Convolutional Auto-encoder Lee, C.-H., Lee, S.-K. and Kim, P.-I. ... 563 Floor Impact Sound Level Distribution in Upper and Lower Units of an Apartment Based on Flanking Transmission by the Impact

of a Rubber Ball Lee, S. M., Kim, J. H., Kim, S. H., Song, H. S. and Ryu, J. K. ... 574

그래핀 표면에서의 라카아제 효소의 동적 거동 및 고정: 분자동역학을 이용한 연구

Dynamic and Immobilization Properties of Laccase on Graphene Sheet: A Molecular Dynamics Study

윤 태 영^{*}·최 현 성^{*}·장 현 준^{*}·김 윤 중^{*}·박 우 범^{*}·나 성 수[†] Taeyoung Yoon^{*}, Hyunsung Choi^{*}, Hyunjoon Chang^{*}, Yoonjung Kim^{*}, Wooboum Park^{*} and Sungsoo Na[†]

(Received March 22, 2021 ; Revised May 4, 2021 ; Accepted August 18, 2021)

Key Words: Electron Transfer(전자전달), Laccase(라카아제), Graphene(그래핀), Molecular Dynamics(분자동역학)

ABSTRACT

The interfacial direct electron transfer (DET) between a biocatalyst and an electrode is crucial for developing electrochemical devices. Graphene is a promising material for high-performance electrodes because of its electric conductivity, material properties, and low cost. However, the interfacial effect of the oxygen reduction enzyme called laccase (LAC) and graphene has not been studied yet. In this study, immobilization of LAC on graphene results in better DET performance compared to that for previous materials. Moreover, molecular dynamics simulation was performed to visualize the interfacial effects, in terms of the binding site, orientation form, and structural affinity. Graphene and LAC were strongly immobilized by vdW force, and the obtained data were validated by comparison with those of other materials. Our research reveals that immobilization of LAC on graphene results in good DET performance through structural changes of graphene.

----기 호 설 명 -------

- *h* : planck constant
- R : gas constant
- K_B : boltzmann constant
- H_{AB} : electric coupling between A and B
- T : temperature in Kelvin
- ΔG : free energy difference
- λ : reorganization energy

* Department of Mechanical Engineering, Korea University, Student

효소 기반 바이오 연료 전지(enzymatic biofuel cells)는 의료 및 상업적 목적으로 30년 이상 사용되어 왔다. 바이오 연료 전지는 미래 에너지 생산을 위한 가장 유망한 재료 중 하나이다. 다른 BFC(biofuel cells)와 달리 EBFC(enzymatic biofuel cells)는 인간의 혈액과 눈물을 사용하여 전자 장치에 전력을 공급할 수 있는 전자를 생성한다. 기질의 산화 환원 효소는

1. 서 론

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference

- ‡ Recommended by Editor Nam Keun Kim
- © The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

[†] Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Engineering, Korea University, Professor E-mail : nass@korea.ac.kr

혈액과 눈물의 포도당과 산소와 관련된 화학 반응을 가속화한다. 산화-환원 반응을 촉진하는 단백질-인 효 소는 혈당을 이용하여 전기 에너지를 생성한다. 산화 (예: 포도당 산화 효소(glucose oxydase) 및 포도당 탈수소 효소(glucose dehydrogenase)) 및 산소 감소 (예: 라카아제(laccase) 및 빌리루빈 산화 효소 (bilirubin oxydase))를 촉진하는 다양한 효소가 있다. 효율적인 전자 전달(ET)과 효소 촉매 작용을 통해 혈 액으로부터 충분한 전력을 저장하기 위해서는 효소가 전극에 강하게 고정되어야 한다⁽¹⁻⁴⁾. 효소의 산화 환 원 전위는 효소 활성에 중요한 영향을 미친다. 이는 전자 생산 및 전달과 밀접한 관련이 있다⁽⁵⁾. 이러한 연료 전지는 웨어러블 장치⁽⁶⁻⁸⁾와 같은 소형 전자 장 치에 적합할 수 있지만 저전력 출력과 짧은 수명으로 인해 광범위한 응용 분야에 방해가 된다.

EBFC의 성능을 향상시키기 위해 여러 연구가 수 행되었으며, 이는 작동 메커니즘에 따라 두 가지 유 형, 즉 직접 전자 전달(direct electron transfer, DET) 및 매개 전자 전달(mediated electron transfer, MET) 장치로 분류될 수 있다. 현재, MET는 매개체 사용으 로 인해 향상된 산화 환원 전위로 인해 더 높은 전력 출력을 나타낸다. MET의 주요 단점은 복잡한 제조, 단락을 유발하는 구조적 문제 및 비용이다. DET는 전자 전달을 위해 전극과 효소 사이에 불편한 매개체 를 필요로 하지 않는다⁽⁹⁾. 따라서 DET는 전극 표면 에 대한 연구를 통하여 성능 개선의 가능성이 높다. 그럼에도 불구하고 효율적인 DET 과정을 달성하는 데는 몇 가지 근본적인 장애물이 있다. i) 효소가 전 극을 향하는 활성 부위의 위치 파악(활성 부위 배향); ii) 효소와 전극 사이의 높은 표면적 달성; 및 iii) 강 하게 고정된 효소-전극 복합체를 제작하여 EBFC의 안정성을 향상하는 방법이 있다^(8,10~13).

지금까지 Au 및 Au 나노 입자(AuNP)와 같이 높 은 전기 전도성을 나타내는 물질은 다양한 표면 변 형(예: 공유 결합, 가교 및 자기 조립된 단층)을 가진 EBFC에 사용되어왔다^(14,15). 반면 다공성 전극은 고 도로 전기 활성이 높은 효소 표면을 생성하여 강화 된 ET를 위해 효소 복합체와 효율적인 표면 상호 작 용을 수행한다⁽¹⁶⁾. 예를 들어, 탄소 나노 튜브 복합체 (예: 단일 벽 및 다중 벽 탄소 나노 튜브(SWCNT 및 MWCNT))는 강한 소수성 상호 작용으로 인해 LAC 의 흡수이 뛰어나다^(17,18). 최근 유기 용매의 추가 LAC는 탄소 나노 튜브의 배향을 향상시켜 더 큰 전 류 밀도를 달성할 수 있게 한다⁽¹³⁾. 그러나 EBFC에 서 그래핀 기반 전극을 적용하는 것과 관련된 문헌 은 매우 부족하다. 그래핀 시트는 EBFC 적용시 높 은 투명성과 높은 전기 전도도 및 우수한 물성을 나 타내는 2차원 탄소 소재로 일반 흑연에서 파생되어 CNT에 비해 제작이 용이하여 일반적으로 저렴하다. 실제로 그래핀의 표면 특성은 화학적 도핑과 유도체 화를 통해 무한히 변형되어 그래핀 산화물과 같은 동족체를 생성할 수 있다⁽²⁰⁾. Tkac 등⁽²²⁾은 그래핀 기반의 EBFC와 기타 관련 합성물의 성능을 비교하 는 리뷰 기사를 발표했다. 그들은 그래핀이 다른 재 료에 비해 더 높은 전력 밀도로 인해 유리하다는 결 론을 내렸다.

이 연구의 목적은 그래핀 기반 EBFC의 차별성을 확인하고 성능 향상을 위한 기본 지식을 얻는 것이 다. Marcus 이론을 적용하여 서로 다른 효소-전극 계 면에서의 ET 상수와 속도를 도출하였다. 또한 그래 핀 계면에서 LAC 및 BOD(bilirubin oxidase)와 같 은 다중 구리 효소를 수용하는 전자의 고정화를 다루 는 문헌은 매우 부족한 실정이다. 따라서 그래핀에 효소를 고정하고 흡수 메커니즘과 원자 규모에서 시 뮬레이션을 이용하여 효소와 전극 계면의 구조적 특 징을 밝히는 것은 굉장히 중요하다. 분자 동역학 (MD) 시뮬레이션은 나노 단위에서 시각화를 가능하 게 하고 계면 거동에 대한 정보를 제공한다^(23,24,65). 기존에 Au, SWCNT 및 자기 조립 단층(self-assembled monolayer)과 같은 다른 전극 후보를 사용하여 계면 MD 시뮬레이션을 수행한 여러 연구가 있다^(25~27). 그 럼에도 불구하고 그래핀과의 상호 작용은 아직 밝혀 지지 않았다. 현재 시뮬레이션 결과는 그래핀 시트의 효소 고정 메커니즘과 원자 규모의 흡수 거동에 대한 통찰력을 제공하며, 체계적인 실험 검증에 의해 확인 되었다. 이 논문은 흡수 및 고정화를 위한 그래핀 기 반 전극과 LAC의 여러 변형의 바이오 촉매로서의 가능성을 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 분자 모델링: LAC와 그래핀

Protein data bank의 구리 함유 산화 효소 LAC, "1GYC"가 야생형으로 선택되었다. 1GYC는 구리 이

온의 완전한 구조를 포함하는 산화된 형태의 실온에 서 결정으로 추출되었다⁽²⁸⁾. 누락된 수소 원자는 GROMCAS 5.0.7 소프트웨어를 사용하여 미리 추가 되었다⁽³⁶⁾. MD 시뮬레이션 동안 T1 사이트는 산화된 상태였다. Trametes versicolor의 1GYC는 지금까지 효소 활성에 대한 돌연변이의 영향을 연구하는 데 사 용되었기 때문에 선택되었으며, BFC 응용 분야에 유 리한 다른 LAC에 비해 더 높은 산화 환원 전위 (600 mV ~ 700 mV)를 제공한다^(34,37). 그래핀 전극에 고정화 메커니즘을 탐구하기 위해 전극은 LAC 단량 체에 맞는 6 nm × 6 nm 및 8 nm × 8 nm 그래핀 시트로 구성되었다⁽³⁹⁻⁴¹⁾. 그래핀 시트는 VMD의 nanotube builder를 사용하여 구성되었으며 그래핀의 모든 분 자역학 매개변수는 automated topology builder(ATB) 웹서버를 사용하여 생성되었다⁽³⁸⁾.

2.2 분자 동역학 시뮬레이션

세 가지 시뮬레이션 단계의 세부 기능과 목표는 결과 및 토론 섹션에 설명되어 있다. 시뮬레이션을 위한 프로토콜은 다음과 같다. LAC-그래핀 계면에서 의 상호 작용은 GROMOS54A7 force-field를 사용 하여 GROMACS 5.0.7 소프트웨어로 계산되었다. 경계조건은 십이면체 상자가 있는 시스템에서 1.2 nm 의 거리를 두어 설정했다. 그 후, SPC(simple point charge) 물 분자를 십이면체 상자에 추가하고 구리 이온의 1 nm 이내의 물 분자를 제거하여 중첩을 방지 했다. 염 농도를 0.15 mol L-1로 설정하고 반대 이온 (Na⁺ 및 Cl⁻)을 첨가하여 시스템을 중화시켰다. 에너 지 최소화 과정(energy minimization)은 효소안에 포 함된 구리 이온을 고정하고 물이 자유롭게 움직일 수 있도록 허용 오차 1 kJ mol⁻¹·nm⁻¹에서 가장 가파른 하강 방법을 통해 최대 10 000회 수행되었다. 등온-등온(NVT) 앙상블을 사용한 100 ps MD 시뮬레이션 으로 평형을 달성한 다음 각각 1 bar 및 300 K에서 100 ps 등온-등압(NPT) 앙상블을 사용했다. 장거리 정전기 상호 작용은 particle mesh Ewald 방법을 사 용하여 계산되었다. 단거리 및 vdW(van der Waals) 상호 작용은 거리 컷오프가 12 Å로 계산되었다. 마지 막으로, 안정화 절차 후 2단계에 100 ns, 1단계와 3단 계에 50 ns를 적용하여 아무런 제약없이 평형 MD를 수행했다. 모든 궤적은 각 시간 단계에 대해 1 ps로 저장되었다.

2.3 계산 방법을 위한 데이터 분석

LAC의 구조적 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 RMSD, 그래핀의 접촉 원자 수, LAC의 회전 반경, LAC와 그래핀 사이의 최소 거리를 계산했다. 고정화 상태를 평가하기 위해 LAC와 그래핀 시트 사이의 거 리가 6Å 미만인 접촉 원자의 수와 최소 거리를 도출 하였다. 모든 데이터는 GROMACS 5.0.7 플러그인을 사용하여 계산되었다⁽³⁶⁾. 각 효소 및 잔기의 접촉 확률 은 1 ns 간격으로 전체 시뮬레이션 궤적을 통해 거리 를 계산하여 MATLAB 2018a를 이용하여 도출되었다.

결합 친화도를 적절하게 평가하기 위해 각 실행의 마지막 1 ns에 대해 분자역학/푸아송-볼츠만 표면적 (MM/PBSA) 분석을 수행하여 LAC-그래핀 계면의 자 유 에너지를 계산했다. MM/PBSA는 정확한 사용이 검 증되었으며 단백질-리간드 결합, 단백질-단백질 결합 및 생체 분자 상호 작용에 널리 적용된다⁽⁴³⁻⁴⁶⁾. 자유 에 너지는 결합 친화도와 상관관계가 있으며 GROMACS 의 g mmpbsa 모듈을 사용하여 계산되었다⁽⁴⁷⁾.

3. 결과 및 토론

3.1 분자 동역학을 통한 Laccase-graphene 계면 평가

(1) 1단계: LAC에 대한 단량체 평형 시뮬레이션 그래핀에 효소 모델을 정렬하기 전에 각 단량체에 대해 평형 분자동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 이 것은 1단계로 정의한다. MD 시뮬레이션은 효소 단량 체에 대해 50 ns에 대해 수행되었으며 총 시뮬레이션 시간은 150 ns이다(Fig. 1 참조).

각 모델의 궤적과 평형을 연구하기 위해 용액에 4개 의 구리 이온을 포함하는 LAC의 root mean square deviation(RMSD)을 계산했다. Fig. 2는 4개의 구리 이



Fig. 1 Equilibration MD simulation of LAC monomer (inset shows the enlarged T1 Cu site)

온을 포함하는 효소에 대한 1단계의 최종 형태를 보여 준다. Fig. 2는 RMSD가 40 ns의 분자 역학(MD) 궤적 에 따라 0.3 nm의 값에서 포화됨을 보여준다. 40 ns의 MD 궤적에 따른 평균 및 표준편차값은 0.315±0.01이 다. RMSD 값은 평형 상태에 도달하여 이 데이터를 통하여 각 모델의 단량체가 안정화되었고 그래핀에 고 정화를 위한 평형 구조에 도달했음을 알 수 있다.

(2) 2단계: 그래핀 시트에 LAC가 결합하는 메커니즘 그래핀에 LAC가 결합하는 메커니즘을 이해하기
위에 효소 크기를 고려하여 6 nm×6 nm의 그래핀 시
트를 제작했다. 이 시뮬레이션은 2단계로 정의된다.
LAC-그래핀 계면은 LAC-CNT 계면과 유사한 소수
성 상호 작용에 의해 대부분 영향을 받는 것으로 예
측된다^(25,61). 효소 표면에서 정보를 수집합니다.

Fig. 3은 시간 종속 시뮬레이션에서 얻은 초기에서 최종 궤적을 보여준다. 5 ns 후, 두 개의 그래핀 시트 가 T1 Cu 사이트에 쌓였다. 또한 다른 면에 위치했던



(b) RMSD of graphene interfacial trajectories

Fig. 2 RMSD of monomer LAC and graphene interfacial MD simulation

그래핀은 10 ns의 시뮬레이션 후 T1 Cu 사이트에서 세 번째 층으로 적층 되었다. 10 ns 시뮬레이션 후 최 대 100 ns까지 동일한 모양이 유지되었으며, 동적 거 동을 통하여 최종 구조를 확인할 수 있다. 바닥의 3층 적층 그래핀 시트와 LAC의 각 면에 있는 2개의 그래 핀 시트도 지속적으로 유지되었다.

다음으로 결합 시뮬레이션에서 가장 결합 빈도가 높은 아미노산을 확인하여 특징 분석을 하였다. 가장 높은 빈도를 나타낸 아미노산은 LYS194, PHE265, THR292, PHE332, ALA362 이며, 잔기 중 4개는 소 수성 특징을 가지고 있다⁽⁶³⁾. 또한, 3층 적층 그래핀 시트는 T1 Cu 사이트에 매우 밀접하게 결합되어 있 다. 따라서 분자동역학 시뮬레이션을 통하여 우리는 다음 두 가지 특징을 발견하였다. i) 결합 잔기는 소 수성이며 이는 효소-그래핀 계면에 매우 중요하다. ii) 그래핀 시트에는 LAC에 대한 세 가지 주요 잠재적 결합 부위가 있다. 특히, T1 Cu 사이트에 가까운 기 판 입구 근처의 사이트는 가장 강한 결합 사이트이며 DET를 개선하기 위한 배향 목표가 될 수 있다.

(3) 3단계: 단일 그래핀 시트에 결합한 LAC 고정 시뮬레이션

고정화 과정, 활성 부위의 배향 특징, 결합 형태, 결합 친화도 및 DET를 조사하기 위해 그래핀과 LAC에 고정을 분석하기 위하여 50 ns MD 시뮬레이



Fig. 3 Multi-graphene sheets and LAC binding simulation

선을 수행했다. 이것은 3단계로 정의된다. 효소는 Fig. 4와 같이 8 nm × 8 nm 그래핀 시트에 고정화되



Fig. 4 Immobilized LAC on graphene sheet



Fig. 5 MD results between LAC and graphene

었다. 효소의 초기 위치는 그래핀 시트의 방향을 고려 하여 12 Å 거리에서 T1 Cu 결합 부위를 그래핀 시트 를 향해 정렬되었다. MD 궤적은 SEM 이미지에 의해 그래핀 전극에서 1GYC에 대해 확인된 바와 같이, 그 래핀 시트에 잘 고정되어 있음을 보여준다. 2D 평면 에서 효소-전극 계면의 특징을 이해하기 위해 3단계에 서 그래핀 시트의 크기를 2단계보다 2 nm 더 넓게 설 정했다. 가장 접촉 빈도가 높은 아미노산을 분석해보 니 1단계에서 관찰된 경향과 유사하게 16개 잔기 중 12개는 소수성 잔기를 포함하는 아미노산이었다.

효소의 흡수도는 중심에서 T1 부위 벡터와 중심에 서 그래핀 벡터 사이의 각도를 계산하여 평가했다. 각도는 50 ns MD 궤적의 마지막 5 ns를 추출한 다음 평균을 구하여 계산하였다. 그래핀 시트는 MD 시뮬 레이션의 X-Y 전역 좌표에 배치되었다. Fig. 4는 전 극의 표면 흡수도와 각도 θ를 41.952°임을 보여준다. Fig. 4는 2단계에서 얻은 결과와 같이 T1 Cu 부위가

특정 결합 부위로 적절하게 배향되어 있음을 보여준다. 따라서 더욱 많은 표면이 그래핀에 고정되고 T1 Cu 부 위와 그래핀 사이의 거리가 가까움을 확인하였다.

LAC가 전체 시뮬레이션 궤적에서 확실하게 고정 되었는지 확인하기 위해 효소와 그래핀 사이의 최소 거리를 계산하였다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 최소 거리는 3 ns~9 ns 후에 0.74±0.028 nm에서 수렴되었 다. 접촉 횟수의 경우 효소와 그래핀 사이의 거리가 0.6 nm 미만을 기준으로 계산하였다. 따라서 MD는 3개의 LAC가 전체 궤적에 걸쳐 그래핀에 적절하게 흡수되었음을 보여준다.

흡수된 효소의 동적 및 구조적 특징은 이전 연구에서 수행된 계산 값과 비교하며 분석하였다⁽³⁹⁻⁴¹⁾. Figs. 5~6 을 확인하면, 2개의 LAC-그래핀 시스템에 대한 RMSD 값은 23 ns 후 0.39 nm에서 0.52 nm 사이에서 포화되었 다. 수소결합의 평균 수는 WT 및 F463Y에 대해 각각 315±10 및 327±16이었다. 회전 반경은 50 ns MD 궤적 의 평균에 대해 2.24±0.009 nm 및 2.24±0.016 nm였다. 시뮬레이션을 통하여 시간에 따른 데이터를 확인함으로 써 수소 결합 및 회전 반경 결과는 그래핀에 흡수된 효 소가 MD 궤도에 걸쳐 매우 안정적인 구조를 유지함을 보여준다.

그래핀 계면에서 LAC의 구조적 변화를 연구하기 위해 먼저 1단계(벌크 솔루션)와 3단계(그래핀에 고 정됨)의 평균 RMSD 차이를 비교했다. 여기에서 거 리는 0.080 nm 및 0.083 nm임을 확인했다. 이 결과는 Zho 등이 수행한 다른 분자 연구에서 얻은 결과와 상 당히 비교됨을 알 수 있다. 양전하 또는 음전하 SAM 에 흡수된 LAC의 경우 총 RMSD가 크게 변하지 않 는 것으로 나타났다(0.05 nm 미만)⁽²⁶⁾. 그러나 그래핀 계면에서 흡수된 정도는 SAM 계면에서 보다 최대 3 배나 더 크다. 이것은 결합 특징이 효소-기질 계면에 서 물질의 특성에 의해 지배된다는 것을 의미하며. 더 강한 결합은 고정화 효능의 긍정적인 지표이다. 양전하 또는 음전하 SAM은 효소 구조를 유지하면서 동시에 LAC의 방향을 변경할 수 있지만 그래핀에 비 해 흡수 강도가 좋지 않다. 또한, LAC는 MD 시뮬레 이션을 기반으로 고정된 표면보다는 그래핀에 흡수된 후 더 많은 형태적 변화를 겪는 것으로 밝혀졌다. 이 연구에서의 Au와 그래핀의 전류 밀도를 비교한 데이 터는 이 주장을 뒷받침하며 그래핀에서의 고정력은 우수하고 구조적 안정도가 높음을 확인하였다.

또한, LAC는 MD 시뮬레이션을 기반으로 고정된



(b) Time dependent radius of gyration



표면보다는 그래핀에 흡수된 후 더 많은 형태적 변화 를 겪는 것으로 밝혀졌다. 이 연구에서의 Au와 그래 핀의 전류 밀도를 비교한 데이터는 이 주장을 뒷받침 하며 그래핀에서의 고정력은 우수하고 구조적 안정도 가 높음을 확인하였다.

접촉 원자의 수와 결합 에너지를 측정하여 결합 친 화도를 정량적으로 비교할 수 있다. Fig. 5(b)는 1GYC 의 경우 최대 12 226으로 전체 원자 개수에 비해 34 % 정도의 원자가 접촉하는 것을 확인하였다. Fig. 5(c)에 제시된 결합 에너지 데이터는 비 결합 상호 작용, 특히 vdW 힘이 총 결합 에너지를 결정하는 데 중요한 역할 을 한다는 것을 보여준다. 순수한 그래핀 시트는 순 전 하가 0이기 때문에 정전기 상호 작용을 겪지 않기 때 문에 분자동역학을 사용하여 계산된 에너지에는 정전기 에너지가 포함되지 않았다. 결합 에너지는 1888 kJmol⁻¹ 로 vdW, nonpolar 그리고 polar 에너지의 총합을 바탕 으로 계산되었다. MD 데이터의 종합하면 LAC-그래 핀 계면에서의 결합 친화도도 축 리간드의 소수성에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

3.2. Marcus 이론 및 전자 커플 링에 의한 전자 전달 역학 평가

전자전달 이론을 정립한 Marcus 이론에 따르면 효 소와 그래핀 사이의 계면 DET는 T1 Cu 사이트가 전 극 표면에 충분히 가까운 경우에만 발생할 수 있다. 용 액에서 약하게 결합된 전자 공여체 A와 수용체 B 사 이의 전자 전달 속도 상수는 식(1)에 의해 설명된다.

$$K_{ET} = \frac{4\pi^2 H_{AB}^2}{h\sqrt{4\pi\lambda K_B T}} exp\left[\frac{-(\Delta G + \lambda)^2}{4\lambda K_B T}\right]$$
(1)

방정식의 상수는 h(플랑크 상수), R(이상 기체 상 수) 및 K_B(볼츠만 상수)이다. H_{AB}는 A와 B 사이의 전자 커플링, T는 온도, ΔG는 ET의 자유에너지 차 이, λ는 재구성 에너지이다. 여기서 전자 커플링은 주 로 다음 수식의 HAB에 의해 결정된다.

$$H_{AB}^{2} = \left(H_{AB}^{0}\right)^{2} e^{-\beta(\gamma_{DA} - \gamma_{0})}$$
(2)

여기서 H_{AB}^{0} 은 vdW 거리(r₀)에서의 전자 결합입니 다. 터널 매개변수 β는 단백질에 대한 ET의 효율성을 반영하며 단백질 구조에 따라 다르다. 따라서 이 이 론에 따르면 계면 DET에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중 하나는 활성 부위와 전극 표면 사이의 거리 가 된다⁽⁶²⁾. 계면 ET 속도의 거리 의존성은 효소-전극 어셈블리 뿐만 아니라 다양한 생체 분자(예: DNA, 펩타이드 및 단백질)의 ET에서도 관찰된다^(63,64). Crespilho 등⁽⁶⁵⁾은 GOx와 전극 표면을 포함하는 산화 환원 중심에 대한 ET 속도를 거리에 따라서 분석하 였다. 그들은 서로 다른 전극 재료에 대해 동일한 β를 가정하여 전자 커플 링을 단순화하고 다양한 생성된 효소 전극 모델의 ET 비율에 대한 비율을 제안했다. 따라서 MD 연구를 통하면 T1 Cu 사이트의 중심 좌 표와 그래핀 사이의 최소 거리를 바탕으로 ET 속도 상수를 계산할 수 있다.

MD 시뮬레이션에서 결정된 평균 d는 0.78±0.12였 으며, 이는 전자 커플링의 최소 단위인 ~ 1.4 nm의 거 리 범주 안에 포함됨을 확인하였다. 최종적으로, ET 비율의 비교는 식(1)과 (2)에서 β값이 동일하다고 가 정한다면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\left[\frac{K_{ET} \text{ (at m utated enzyme)}}{K_{ET} \text{ (at wild type enzyme)}}\right] = \frac{d_{MT}}{d_{WT}} \quad (3)$$

한편으론, MD는 원자 규모에서 단량체 효소와 그래핀의 단층 사이의 계면을 고려하는 반면 습식 실험에서는 효소 응집, 배향 및 전극의 고정되지 않 은 효소를 고려해야하기에 실험과 시뮬레이션의 통 합은 전극 표면 개발을 효율적으로 하는 방향성을 제시한다.

더 나아가 MD 시뮬레이션은 고정화 프로세스에 대한 자세한 통찰력을 제공하고 ET 성능을 향상시키 는 매개변수를 강조하여 향후 효소 개량의 가능성을 보여준다. 한편으론 야생형 LAC는 강력한 vdW 및 소수성 상호 작용을 통해 T1 Cu 사이트를 통해 그래 핀에 결합한다는 결론을 내릴 수 있다. 이것은 야생 형 LAC도 효소가 추출되는 종에 따라 다양한 특성을 가지기에 이 연구에서 사용된 "1GYC"는 그래핀 전 극에 적용하기에 적합하다는 점을 알려준다. 또한, 축 리간드의 소수성은 효소-전극 계면인 외부 측면의 거 동을 변화시키기 때문에 효소 내부 부위의 산화 환원 전위 뿐만 아니라 결합 친화도에 영향을 미친다. 따 라서 효소 활성 부위와 그래 핀 사이의 거리에 따라 결합 친화도와 ET 속도 데이터를 변화를 바탕으로 효소 개량을 통하여 바이오 전극의 효율을 개선할 수 있다는 점을 시사한다. 최종적으로 LAC-그래핀 계면 에 대한 이 연구는 EBFC에 대한 그래핀의 활용도를 확장할 것으로 기대한다.

4. 결 론

이 연구에서는 LAC 효소와 그래핀 전극 사이에서 의 계면 특성을 분자동역학 계산 방법을 통하여 분석 하였다. LAC-그래핀 계면의 MD 연구는 원자 규모의 효소 고정화 과정을 이해하고 DET 성능을 향상시키 기 위해 어떤 매개변수를 조작할 수 있는지 밝히기 위해 수행되었다. 첫째, 다중 그래핀-LAC 시뮬레이 션에서는 향상된 DET를 달성하기 위해 전자 수용체 역할을 하는 T1 Cu 부위에 가까운 특정 결합 부위의 방향을 고려해야 함을 보여주었다. 둘째, LAC를 그 래핀에 고정하여 흡수하는 과정에서 결합 형태와 ET 속도를 확인하였다. MD 결과는 축 리간드의 소수성 이 활성 부위의 내부 좌표에 약간만 영향을 주지만 결합 친화도 및 ET 속도에도 영향을 미친다는 것을 보여준다. 또한, 우리는 MD를 사용한 구조적 형태 비교를 통하여 그래핀에 고정되었을 때 기존 전극에 비하여 LAC가 더 많이 흡수되는 것을 관찰하였다. 결론적으로, 시뮬레이션 방법을 통하여 실험에서는 볼 수 없는 LAC-그래핀 계면에서의 동적 특성을 분 석함으로써 향상된 ET 속도 및 고정화를 가능함을 입증하였다. 더 나아가 이 MD 결과는 효소 개량 부 분을 실험적으로 검증하기에 앞서 시뮬레이션으로 예 측하여 비용을 저감하고 바이오 전극의 성능을 개선 할 수 있는 가능성을 보여주었다.

후 기

이 논문은 2020년도 추계 소음진동 학술대회에서 학생 포스터 발표 우수 논문상을 받은 연구이자 2021 년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2018H1A2A1062291 & NRF-2 019R1A2C1086103).

References

(1) Fernandez-Fernandez, M., Sanromán, M. Á. and Moldes, D., 2013, Recent Developments and Applications of Immobilized Laccase, Biotechnology Advances, Vol. 31, No. 8, pp. 1808~1825.

(2) Chung, M., Nguyen, T. L., Tran, T. Q. N. et al., 2018, Ultrarapid Sonochemical Synthesis of Enzyme-incorporated Copper Nanoflowers and Their Application to Mediatorless Glucose Biofuel Cell, Applied Surface Science, Vol. 429, pp. 203~209.

(3) Christwardana, M., Kim, D. H., Chung, Y. et al., 2018, A Hybrid Biocatalyst Consisting of Silver Nanoparticle and Naphthalenethiol Self-assembled Monolayer Prepared for Anchoring Glucose Oxidase and Its Use for an Enzymatic Biofuel Cell, Applied Surface Science, Vol. 429, pp. 180~186.

(4) Castrovilli, M. C., Bolognesi, P., Chiarinelli, J. et al., 2019, The Convergence of Forefront Technologies in the Design of Laccase-based Biosensors – An Update, TrAC Trends in Analytical Chemistry, Vol. 119, 115615.

(5) Cadet, M., Gounel, S., Stines-Chaumeil, C. et al., 2016, An Enzymatic Glucose/O2 Biofuel Cell Operating in Human Blood, Biosensors and Bioelectronics, Vol. 83, pp. 60~67.

(6) Tahar, A. B., Romdhane, A., Lalaoui, N. et al., 2018, Carbon Nanotube-based Flexible Biocathode for Enzymatic Biofuel Cells by Spray Coating, Journal of Power Sources, Vol. 408, pp. 1~6.

(7) Escalona-Villalpando, R. A., Ortiz-Ortega, E., Bocanegra-Ugalde, J. P. et al., 2019, Clean Energy from Human Sweat Using an Enzymatic Patch, Journal of Power Sources, Vol. 412, pp. 496~504.

(8) Cosnier, S., Gross, A. J., Le Goff, A. et al., 2016, Recent Advances on Enzymatic Glucose/Oxygen and Hydrogen/Oxygen Biofuel Cells: Achievements and Limitations, Journal of Power Sources, Vol. 325, pp. 252~263.

(9) Bullen, R. A., Arnot, T. C., Lakeman, J. B. et al., 2006, Biofuel Cells and Their Development, Biosensors and Bioelectronics, Vol. 21, No. 11, pp. 2015~2045.

(10) Mano, N. and de Poulpiquet, A., 2017, O₂ Reduction in Enzymatic Biofuel Cells, Chemical Reviews, Vol. 118, No. 5, pp. 2392~2468.

(11) Lee, Y. S., Baek, S., Lee, H. et al., 2018, Construction of Uniform Monolayer - and Orientation -Tunable Enzyme Electrode by a Synthetic Glucose Dehydrogenase without Electron-transfer Subunit Via Optimized Site-specific Gold-binding Peptide Capable of Direct Electron Transfer, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 10, No. 34, pp. 28615~28626.

(12) Kahoush, M., Behary, N., Cayla, A. et al., 2019, Surface Modification of Carbon Felt by Cold Remote Plasma for Glucose Oxidase Enzyme Immobilization, Applied Surface Science, Vol. 476, pp. 1016~1024.

(13) Wu, F., Su, L., Yu, P. and Mao, L., 2017, Role of Organic Solvents in Immobilizing Fungus Laccase on Single-walled Carbon Nanotubes for Improved Current Response in Direct Bioelectrocatalysis, Journal of the American Chemical Society, Vol. 139, No. 4, pp. 1565~1574.

(14) Lalaoui, N., Rousselot-Pailley, P., Robert, V. et al., 2016, Direct Electron Transfer between a Site Specific Pyrene-modified Laccase and Carbon Nanotube/Gold Nanoparticle Supramolecular Assemblies for Bioelectrocatalytic Dioxygen Reduction, ACS Catalysis, Vol. 6, No. 3, pp. 1894~1900.

(15) Dagys, M., Laurynenas, A., Ratautas, D. et al., 2017, Oxygen Electroreduction Catalysed by Laccase Wired to Gold Nanoparticles Via the Trinuclear Copper Cluster, Energy & Environmental Science, Vol. 10, No. 2, pp. 498~502.

(16) Holmberg, S., Rodriguez-Delgado, M., Milton, R. D. et al., 2015, Bioelectrochemical Study of Thermostable Pycnoporus Sanguineus CS43 Lacase Bioelectrodes based on Prolytic Carbon Nanofibers for Bioelectrocatalytic O_2 Reduction. ACS Catalysis, Vol. 5, No. 12, pp. 7507~7518.

(17) Lalaoui, N., David, R., Jamet, H. et al., 2016, Hosting Adamantane in the Substrate Pocket of Laccase: Direct Bioelectrocatalytic Reduction of O_2 on Functionalized Carbon Nanotubes, ACS Catalysis, Vol. 6, No. 7, pp. 4259~4264.

(18) Tavares, A. P., Silva, C. G., Dražić, G. et al., 2015, Laccase Immobilization over Multi-walled Carbon Nanotubes: Kinetic, Thermodynamic and Stability Studies, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 454, pp. 52~60.

(19) Li, D. and Kaner, R. B., 2008, Graphene-based Materials, Science, Vol. 320, No. 5880, pp. 1170~1171.

(20) Shi, Y., Kim, K. K., Reina, A., Hofmann, M., Li, L. J. and Kong, J., 2010, Work Function Engineering of Graphene Electrode Via Chemical Doping, ACS Nano, Vol. 4, No. 5, pp. 2689~2694.

(21) Rewatkar, P. and Goel, S., 2019, 3D Printed Bioelectrodes for Enzymatic Biofuel Cell: Simple, Rapid, Optimized and Enhanced Approach, IEEE Transactions on Nanobioscience, Vol. 19, No. 1, pp. 4~10.

(22) Filip, J. and Tkac, J., 2014, Is Graphene Worth Using in Biofuel Cells? Electrochimica Acta, Vol. 136, pp. 340~354.

(23) Zhao, D., Li, L., He, D. and Zhou, J., 2016, Molecular Dynamics Simulations of Conformation Changes of HIV-1 Regulatory Protein on Graphene, Applied Surface Science, Vol. 377, pp. 324~334.

(24) Zhao, D., Li, L. and Zhou, J., 2018, Simulation Insight into the Cytochrome C Adsorption on Graphene and Graphene Oxide Surfaces, Applied Surface Science, Vol. 428, pp. 825~834.

(25) Chen, M., Qin, X. and Zeng, G., 2016, Single-walled Carbon Nanotube Release Affects the Microbial Enzyme-catalyzed Oxidation Processes of Organic Pollutants and Lignin Model Compounds in Nature, Chemosphere, Vol. 163, pp. 217~226.

(26) Liu, J., Xie, Y., Peng, C., Yu, G. and Zhou, J., 2017, Molecular Understanding of Laccase Adsorption on Charged Self-assembled Monolayers, The Journal of Physical Chemistry B, Vol. 121, No. 47, pp. 10610~10617.

(27) Yang, S., Liu, J., Quan, X. and Zhou, J., 2018, Bilirubin Oxidase Adsorption onto Charged Self-assembled Monolayers: Insights from Multiscale Simulations. Langmuir, Vol. 34, No. 33, pp. 9818~9828.

(28) Piontek, K., Antorini, M. and Choinowski, T., 2002, Crystal Structure of a Laccase from the Fungus Trametes Versicolor at 1.90-Å Resolution Containing a Full Complement of Coppers, Journal of Biological Chemistry, Vol. 277, No. 40, pp. 37663~37669.

(29) Pardo, I. and Camarero, S., 2015, Laccase Engineering by Rational and Evolutionary Design, Cellular and Molecular Life Sciences, Vol. 72, No. 5, pp. 897~910.

(30) Hong, G., Ivnitski, D. M., Johnson, G. R., Atanassov, P. and Pachter, R., 2011, Design Parameters for Tuning the Type 1 Cu Multicopper Oxidase Redox Potential: Insight from a Combination of First Principles and Empirical Molecular Dynamics Simulations, Journal of the American Chemical Society, Vol. 133, No. 13, pp. 4802~4809.

(31) Sakurai, T. and Kataoka, K., 2007, Structure and Function of Type I Copper in Multicopper Oxidases, Cellular and Molecular Life Sciences, Vol. 64, No. 19, pp. 2642~2656.

(32) Lucas, M. F., Monza, E., Jørgensen, L. J., Ernst, H. A., Piontek, K., Bjerrum, M. J. et al., 2017, Simulating Substrate Recognition and Oxidation in Laccases: from Description to Design. Journal of Chemical Theory and Computation, Vol. 13, No. 3, pp. 1462~1467.

(33) Santiago, G., De Salas, F., Lucas, M. F., Monza, E., Acebes, S., Martinez, A. T. et al., 2016, Computer-aided Laccase Engineering: Toward Biological Oxidation of Arylamines, ACS Catalysis, Vol. 6, No. 8, pp. 5415~5423.

(34) Götze, J. P. and Bühl, M., 2016, Laccase Redox Potentials: pH Dependence and Mutants, a QM/MM Study, Journal of Physical Chemistry B, Vol. 120, No. 35, pp. 9265~9276.

(35) Monza, E., Lucas, M. F., Camarero, S., Alejaldre, L. C., Martínez, A. T. and Guallar, V., 2015, Insights into Laccase Engineering from Molecular Simulations: Toward a Binding-focused Strategy, Journal of Physical Chemistry Letters, Vol. 6, No. 8, pp. 1447~1453.

(36) Abraham, M. J., Murtola, T., Schulz, R., Páll, S., Smith, J. C., Hess, B. and Lindahl, E., 2015, GROMACS: High Performance Molecular Simulations through Multi-level Parallelism from Laptops to Supercomputers, SoftwareX, Vol. 1, pp. 19~25.

(37) Xu, F., Palmer, A. E., Yaver, D. S., Berka, R. M., Gambetta, G. A., Brown, S. H. and Solomon, E. I., 1999, Targeted Mutations in a Trametes Villosa Laccase: Axial Perturbations of the T1 Copper. Journal of Biological Chemistry, Vol. 274, No. 18, pp. 12372~12375.

(38) Humphrey, W., Dalke, A. and Schulten, K., 1996, VMD: Visual Molecular Dynamics, Journal of Molecular Graphics, Vol. 14, No. 1, pp. 33~38.

(39) Kim, Y., Lee, M., Baek, I., Yoon, T. and Na, S., 2018, Mechanically Inferior Constituents in Spider Silk Result in Mechanically Superior Fibres by Adaptation to Harsh Hydration Conditions: A Molecular Dynamics Study, Journal of the Royal Society Interface, Vol. 15, No. 144, 20180305. (40) Choi, H., Lee, M., Park, H. S. and Na, S., 2016, The Effect of Structural Heterogeneity on the Conformation and Stability of A β -tau Mixtures, RSC Advances, Vol. 6, No. 57, pp. 52236~52247.

(41) Choi, H., Chang, H. J., Lee, M. and Na, S., 2017, Characterizing Structural Stability of Amyloid Motif Fibrils Mediated by Water Molecules, ChemPhysChem, Vol. 18, No. 7, pp. 817~827.

(42) Schmid, N., Eichenberger, A. P., Choutko, A., Riniker, S., Winger, M., Mark, A. E. and van Gunsteren,
W. F., 2011, Definition and Testing of the GROMOS Force-field Versions 54A7 and 54B7, European Biophysics Journal, Vol. 40, No. 7, pp. 843~856.

(43) Miller III, B. R., McGee Jr, T. D., Swails, J. M., Homeyer, N., Gohlke, H. and Roitberg, A. E., 2012, MMPBSA. py: An Efficient Program for End-state Free Energy Calculations, Journal of Chemical Theory and Computation, Vol. 8, No. 9, pp. 3314~3321.

(44) Brown, S. P. and Muchmore, S. W., 2006, High-throughput Calculation of Protein-ligand Binding Affinities: Modification and Adaptation of the MM-PBSA Protocol to Enterprise Grid Computing, Journal of Chemical Information and Modeling, Vol. 46, No. 3, pp. 999~1005.

(45) Wong, S., Amaro, R. E. and McCammon, J. A., 2009, MM-PBSA Captures Key Role of Intercalating Water Molecules at a Protein–protein Interface, Journal of Chemical Theory and Computation, Vol. 5, No. 2, pp. 422~429.

(46) Kumari, R., Kumar, R., Open Source Drug Discovery Consortium and Lynn, A., 2014, g_mmpbsa: A GROMACS Tool for High-throughput MM-PBSA Calculations, Journal of Chemical Information and Modeling, Vol. 54, No. 7, pp. 1951~1962.

(47) Hebie, S., Holade, Y., Maximova, K., Sentis, M., Delaporte, P. et al., 2015, Advanced Electrocatalysts on the Basis of Bare Au Nanomaterials for Biofuel Cell Applications, ACS Catalysis, Vol. 5, No. 11, pp. 6489~6496.

(48) Miyake, T., Yoshino, S., Yamada, T., Hata, K. and Nishizawa, M., 2011, Self-regulating Enzyme- nanotube Ensemble Films and Their Application as Flexible Electrodes for Biofuel Cells, Journal of the American Chemical Society, Vol. 133, No. 13, pp. 5129~5134. (49) Bandyopadhyaya, R., Nativ-Roth, E., Regev, O. and Yerushalmi-Rozen, R., 2002, Stabilization of Individual Carbon Nanotubes in Aqueous Solutions, Nano Letters, Vol. 2, No. 1, pp. 25~28.

(50) An, K. H., Kim, W. S., Park, Y. S., Moon, J. M., Bae, D. J. et al., 2001, Electrochemical Properties of High-power Supercapacitors Using Single-walled Carbon Nanotube Electrodes, Advanced Functional Materials, Vol. 11, No. 5, pp. 387~392.

(51) Laviron, E., 1979, General Expression of the Linear Potential Sweep Voltammogram in the Case of Diffusionless Electrochemical Systems. Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, Vol. 101, No. 1, pp. 19–28.

(52) Allen, P. L. and Hickling, A., 1957, Electrochemistry of Sulphur: Part 1. — Overpotential in the Discharge of the Sulphide Ion, Transactions of the Faraday Society, Vol. 53, pp. 1626~1635.

(53) Bard, A. J. and Faulkner, L. R., 2001, Fundamentals and Applications, Electrochemical Methods, Vol. 2, No. 482, pp. 580~632.

(54) Frasconi, M., Boer, H., Koivula, A. and Mazzei, F., 2010, Electrochemical Evaluation of Electron Transfer Kinetics of High and Low Redox Potential Laccases on Gold Electrode Surface, Electrochimica Acta, No. 56, No. 2, pp. 817~827.

(55) ElKaoutit, M., Naranjo-Rodriguez, I., Temsamani, K. R., Domínguez, M. and de Cisneros, J. L. H. H., 2008, Investigation of Biosensor Signal Bioamplification: Comparison of Direct Electrochemistry Phenomena of Individual Laccase, and Dual Laccase-tyrosinase Copper Enzymes, at a Sonogel-carbon Electrode, Talanta, Vol. 75, No. 5, pp. 1348~1355.

(56) Navaee, A. and Salimi, A., 2015, Graphene-supported Pyrene-functionalized Amino-carbon Nanotube: A Novel Hybrid Architecture of Laccase Immobilization as Effective Bioelectrocatalyst for Oxygen Reduction Reaction, Journal of Materials Chemistry A, Vol. 3, No. 14, pp. 7623~7630.

(57) Vasilescu, I., Eremia, S. A., Kusko, M., Radoi, A., Vasile, E. and Radu, G. L., 2016, Molybdenum Disulphide and Graphene Quantum Dots as Electrode Modifiers for Laccase Biosensor, Biosensors and Bioelectronics, Vol. 75, pp. 232~237. (58) Christenson, A., Dimcheva, N., Ferapontova, E. E., Gorton, L., Ruzgas, T. et al., 2004, Direct Electron Transfer between Ligninolytic Redox Enzymes and Electrodes, Electroanalysis, Vol. 16, No. 13-14, pp. 1074~1092.

(59) Trohalaki, S., Pachter, R., Luckarift, H. R. and Johnson, G. R., 2012, Immobilization of the Laccases from Trametes Versicolor and Streptomyces Coelicolor on Single-wall Carbon Nanotube Electrodes: A Molecular Dynamics Study, Fuel Cells, Vol. 12, No. 4, pp. 656~664.

(60) Pettersen, E. F., Goddard, T. D., Huang, C. C., Couch, G. S., Greenblatt, D. M., Meng, E. C. and Ferrin, T. E., 2004, UCSF Chimera: A Visualization System for Exploratory Research and Analysis, Journal of Computational Chemistry, Vol. 25, No. 13, pp. 1605~1612.

(61) Rose, G. D., Geselowitz, A. R., Lesser, G. J., Lee, R. H. and Zehfus, M. H., 1985, Hydrophobicity of Amino Acid Residues in Globular Proteins, Science, Vol. 229, No. 4716, pp. 834~838.

(62) Hush, N. S., 1985, Distance Dependence of Electron Transfer Rates, Coordination Chemistry Reviews, Vol. 64, pp. 135~157.

(63) Degani, Y. and Heller, A., 1987, Direct Electrical Communication between Chemically Modified Enzymes and Metal Electrodes. I. Electron Transfer from Glucose Oxidase to Metal Electrodes Via Electron Relays, Bound Covalently to the Enzyme, Journal of Physical Chemistry, Vol. 91, No. 6, pp. 1285~1289.

(64) Degani, Y. and Heller, A., 1988, Direct Electrical Communication between Chemically Modified Enzymes and Metal electrodes. 2. Methods for Bonding Electron-transfer Relays to Glucose Oxidase and D-amino-acid Oxidase, Journal of the American Chemical Society, Vol. 110, No. 8, pp. 2615~2620.

(65) Martins, M. V., Pereira, A. R., Luz, R. A., Iost, R. M. and Crespilho, F. N., 2014, Evidence of Short-range Electron Transfer of a Redox Enzyme on Graphene Oxide Electrodes, Physical Chemistry Chemical Physics, Vol. 16, pp. 17426~17436.

(66) Kwon, J., Kim, J, I., Baek, I. and Na, S., 2015, Applying Mechanical Vibration and Coarse-grained Methods to Analyze Mechanical Properties of Actin Filaments, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 187.

(67) Na, S.-S., Kim, Y.-J., Choi, H.-S., Chang H.-S., Yoon, T.-Y. and Park, W.-B., 2020, Mechanical Property-enhancing Mechanism of Silk Fiber through Synergy of Low Energy Accumulation and Self-regeneration, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 262.



Taeyoung Yoon is from Republic of Korea. After graduating from Korea University, he obtained combined master's and doctorate course from Korea University in school of engineering science and mechanics. His research interests are in compu-

tational mechanics, molecular dynamics and biofuel cells with electrochemical experiments.



Sungsoo Na is a professor in the Department of Engineering Science and Mechanics at Korea University. He received B.S. and M.S. in engineering science and mechanics at Korea University and received Ph.D. in engineering science and mechan-

ics at Virginia Polytechnic Institue & State University. His principle research interests include detection of toxic nanomaterial and protein dynamics.

실제 어린이 뜀 분석을 통한 신중량 충격모델 개발

The Development of New Heavy-weighted Impact Source by Analysis of Children's Running in Dwelling

김 수 홍*·송 민 정†·류 종 관**

Suhong Kim^{*}, Minjeong Song[†] and Jongkwan Ryu^{**}

(Received May 21, 2021 ; Revised July 8, 2021 ; Accepted August 6, 2021)

Key Words: Children Running(어린이 뜀), New Continuous Impact Source(신중량 충격원)

ABSTRACT

The quietness of a living space greatly affects the quality of life of its residents. To maintain the quietness of an indoor space, a solution is required for the floor impact sounds that have over the years generated several civil complaints to the National Noise Information System. Accurate measurement and evaluation of the floor structure are important factors for solving the floor impact sounds. To reproduce the sound effect of children running on the floors accurately, a new impact source is designed that complements the current standard impact sources. Prior to the designing, the important factors were investigated via a questionnaire answered by experts. The experts' opinions reflected that further information was required about the step length and velocity of children running. Experiments were conducted to collect this data. The results showed that the factors showing positive correlation with the step length and velocity were age, height, and weight. The gender of a child was not related to the step length and velocity. To depict the step length and velocity based on the investigated data, the radius and angular velocity of the impact parts of the new impact source was calculated.

1. 서 론

주거지의 정온한 환경은 주거자의 삶의 질적 요소 로 중요하다. 하지만 층간소음 이웃사이센터 보고 자 료에 따르면 공동주택 층간소음관련 민원이 해마다 증가하고 있어 문제가 되고 있다.

이러한 층간소음의 해결을 위해서는 구조적인 해 결법 외에도 실제 실내에서 발생하는 소음원에 대한 바닥구조에 대한 정확한 측정과 평가가 중요한 요소 라 할 수 있다. 전문가 대상 설문조사⁽¹⁾에서 바닥구조 에 가진을 하는 충격원을 개발한다면 재현할 점에 있 어 어린이가 위치를 움직이며 뛰는 것을 반영하는 것 이 필요한 것으로 밝혀졌다. 하지만 현재 표준충격원 으로 사용하고 있는 고무공은 충격력과 주파수 관점 에서 어린이의 뜀과 비슷하나, 측정 시 한 지점에서 가진하여 측정하고 평가하고 있다. 실제 어린이가 달 리는 모습을 관찰하면 연속적이면서 가진점이 이동을

Corresponding Author; Member, Chonnam National University, Research Professor

E-mail : minjeongsong@hanmail.net

^{*} Member, Graduate School of Chonnam National University, Student

^{**} Member, School of Architecture Chonnam National University, Professor

[#] A part of this paper was presented at the KSNVE 2021 Annual Spring Conference

[‡] Recommended by Editor Byung Kwon Lee

[©] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

하는 형태이다. 따라서 이러한 어린이의 뜀을 반영한 충격원을 개발하면 현재의 충격원을 보완하여 보다 정확한 평가가 가능할 수 있다.

실제 충격원 및 표준충격원 대한 물리적 특성에 관 한 연구 중 Kim 등⁽²⁾의 연구에서는 어린이의 충격력 의 경우 체중과는 비례하나 그 경향성은 찾기 어려웠 다. Park 등⁽³⁾의 연구에서도 실제 충격원과 표준 충격 원 간의 물리적 특성의 차이가 있는 것으로 분석되었 다. Jeong⁽⁴⁾의 연구에서 고무공이 어린이의 뜀과 주 파수 측면에서 유사한 표준충격원으로 나타났다. 하 지만 Lee 등(5)의 연구에서는 표준충격원 비교에서 고 무공이 어린이 뜀과 가장 유사하나 임피던스나 충격 력에 있어 차이가 나타났다. 또 Park 등⁽⁶⁾의 연구에서 는 보행의 경우 표준 충격원보다 충격력과 주파수 스펙 트럼이 낮게 나타났고, 고무공의 경우, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz의 중심주파수 영역에서 보행의 충격력이 더 높게 나타났다. 이러한 연구들을 통해 기존의 충격원 중에서 물리적 특성이 어린이의 뜀과 가장 유사한 것 은 고무공으로 나타났지만 이러한 유사성에도 어린이 의 뜀과는 차이가 있었다.

충격원에 있어 물리적 특성과 함께 청감적인 부분 도 중요하다. 청감적 반응에 대한 심리음향학적 연구 로는 Jeon 등⁽⁷⁾의 연구에서 표준충격원(뱅머신, 고무 공, 태핑머신)의 주관적 반응을 통해 고무공이 어린이 의 뜀과 가장 유사한 반응을 보이는 것으로 나타났다. Jeong⁽⁴⁾에서도 고무공이 실제 충격음을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 하지만 Park 등⁽⁶⁾에서 고무공의 유 사성에도 불구하고 정확한 보행의 재현에 있어 차이 가 있는 것으로 나타났다. 그러므로 어린이의 뜀을 보행의 관점에서 정확히 모사하며, 이와 더불어 연속 적이고 이동이 가능한 가진점을 갖는 충격원을 고안 한다면 더 나은 평가가 가능할 것으로 판단된다. 이 를 위해서 어린이 뜀의 속도와 보폭에 대한 정보가 필요하나 이러한 데이터가 부족한 실정이었다.

따라서 이 연구에서는 어린이 뜀의 보폭과 속도 데 이터를 얻기 위해 실제 어린이의 뜀을 동영상으로 촬 영하고, 이를 분석하였다. 어린이는 실내에서 달릴 수 있는 여러 형태를 재현하기 위해 직선과 8자형 두 가 지에 대해 실험을 실시하였다. 분석은 어린이의 뜀에 영향을 미칠 수 있다고 예상되는 연령, 키, 몸무게, 성 별에 따라 하였다. 이 분석을 바탕으로 신중량 충격 모델의 속도, 보폭을 제안하고자 한다.

2. 어린이 뜀 실험

2.1 실험 방법

어린이가 뜀의 속도와 보폭의 데이터를 얻기 위해 광주광역시 북구에 위치한 어린이집을 섭외했다. 실험 은 직선경로와 8자경로 두 가지를 촬영하기 위해 2차 로 나눠 진행하였다. 여기서 8자형은 다양한 형태의 움직임을 나타내고자 실시했다. 실의 크기는 바닥면적 이 24 m²였다. 어린이의 연령은 일반적으로 2~9세까 지의 아동이 주요 원인이지만 섭외상의 이유와 Lee 등⁽⁸⁾ 에서 대뇌의 성숙을 통해 상황인지능력이 확보되는 초등학생과는 달리 미성숙한 대뇌의 성숙으로 인해 추상적 사고가 불완전하고, 대뇌성장발달에 뛰어노는 것이 주요하다는 사실을 근거로 6세까지의 아동을 대 상으로 하였다. 1차 실험은 2~6세 어린이 45명을 대 상으로 직선경로에 대해, 2차는 2~5세 어린이 32명 을 대상으로 8자형 경로에 대해 진행하였다. 실험 장 소는 Fig. 1과 같다. 실험은 다음과 같은 순서로 진행 하였다. 경로의 길이는 84 m² 타입의 아파트의 거실



Fig. 1 View of children's running experiment (straight line)



Fig. 2 View of children's running experiment (an eight shape)

을 기준으로 설정하였다.

1) 어린이집 한 교실의 바닥에 경로를 표시한다.(1

차의 경우 4.5 m, 2차의 경우 반지름 1m인 원형 2개) 2) 도착선에서 2 m 떨어진 위치에 1.5m 높이로 카 메라를 설치하다.

3) 어린이들을 출발선에서 출발하여 도착선까지 달 리도록 한다(Fig. 2 참조).

4) 촬영한 동영상을 통해 보폭과 속도를 계산한다. 보폭은 출발선에서 도착선까지의 발걸음 수로 경 로상 길이를 나눈 수치로 했고, 속도는 출발선에서 도착선까지 걸린 시간으로 경로상 길이를 나눠서 얻 은 수치로 하였다.

2.2 실험 결과

(1) 직선경로 실험 결과

직선상 뜀에 따른 45명의 어린이의 연령별 수와 보 폭, 속도에 대한 데이터는 Table 1과 같다.

```
가. 나이에 따른 보폭과 속도 분석
```

보폭과 속도에 대한 나이의 영향을 알아보기 위한

Table 1 Mean value of experimental data (straight line)

Age	N	Step length [cm]	Velocity [m/s] (Hz)	The number of step per second
2	8	45.2	1.56 (3.45)	3.51
3	9	58.1	1.94 (3.34)	3.45
4	11	66.6	2.28 (3.40)	3.47
5	5	77.7	2.54 (3.25)	3.27
6	12	81.8	2.68 (3.27)	3.32



Fig. 3 Relation between children's age and step length and velocity

실험의 결과는 Fig. 3과 같다. 나이와 보폭은 나이가 증가함에 따라 보폭이 증가하는 경향을 보였다. 상관 계수는 0.98(p<0.05)로 높은 상관성을 보였다. 나이와 속도에서 나이가 증가함에 따라 속도도 증가하는 경 향을 보였고, 상관계수는 0.98(p<0.05)로 나타났다.

나. 키에 따른 보폭과 속도 분석

보폭과 속도에 대한 키의 영향 분석은 Fig. 4와 Fig. 5와 같다. 키가 증가할수록 보폭은 증가하는 경 향을 보였고, 상관계수는 0.84(p<0.05)로 나타났다. 속도 또한 보폭과 마찬가지로 키가 증가할수록 보폭 이 증가하는 경향을 보였다. 속도와 키의 상관계수는 0.63(p<0.05)로 나타났다.

다. 몸무게에 따른 보폭과 속도 분석

보폭과 속도를 몸무게에 따라 분석한 결과는 Fig. 6 과 Fig. 7과 같다. 몸무게가 증가함에 따라 보폭과 속도 는 증가하는 경향을 보였고 상관계수는 각각 0.62 (p<0.05), 0.40(p<0.05)로 나타났다. 연령과 키에 비해



Fig. 4 Relation between children's height and step length



Fig. 5 Relation between children's height and velocity

서 추세선을 기준으로 낮은 기울기를 보이는 이유는 데 이터 중에서 특이한 분포를 지닌 데이터가 존재하기 때 문인 것으로 분석되었다. 추세에서 크게 벗어난 4개의 데이터를 삭제하고 재분석한 결과, Fig. 8과 Fig. 9의 그 래프처럼 우상향 그래프 기울기가 증가하였고, 상관계 수는 각각 0.80(p<0.05), 0.70(p<0.05)로 나타났다.

라. 성별에 따른 보폭과 속도 분석

성별에 따른 영향을 알아보기 위해 집단의 평균차 이를 t검정을 통해 분석했다. 분석한 결과는 보폭과 속도 모두 집단간 차이가 없는 것으로 나타났다. 수 치적으로는 여아가 더 크게 나와 연관성이 있다고 생 각했으나 분석결과 그렇지않은 것으로 나타났다. 수 치차이는 6~7세의 경우 남아가 6명, 여아가 9명으 로 여아가 더 많았고, 이 나이에서 키의 차이가 평균 적으로 2.08 cm정도 여아가 크기 때문인 것으로 판 단된다. 추가적으로 회귀분석에서는 Fig. 10과 같이 나타났다. 두 그래프의 경향은 유사하게 나타났다.

마. 걸음 수 분석

추가적으로 시뮬레이터 반영을 위한 자료로 초 당 걸음수를 연령에 따라 분석해 보았다. 결과는 Fig. 11



Fig. 6 Relation between children's weight and step length



Fig. 7 Relation between children's weight and velocity

과 같다. 걸음 수는 연령에 따라 감소하는 경향을 보 였다. 키와 몸무게와도 반비례 경향을 보였으며 성별 에 있어서는 경향성을 보이지 않았다.

(2) 8자경로 실험 결과

원형상으로 뛴 32명의 어린이의 연령별 수와 보폭, 속도에 대한 데이터는 Table 2와 같다.

가. 나이에 따른 보폭과 속도분석

보폭과 속도에 대한 나이의 영향에 대한 결과는 Fig. 12와 같다. 나이와 보폭은 나이가 증가함에 따라 보폭이 증가하는 경향을 보였다. 상관계수는 0.90 (p<0.05)로 높은 상관성을 보였다. 나이와 속도에서 는 4세까지는 비례하나 5세에서는 오히려 감소했다. 이 실험에서는 5세 어린이들이 천천히 달리는 경향을 보였기 때문으로 분석된다.

나. 키에 따른 보폭과 속도 분석

보폭과 속도에 대한 키의 영향 분석은 Fig. 13과 Fig. 14와 같다. 키가 증가할수록 보폭은 증가하는 경 향을 보였고, 상관계수는 0.53(p<0.05)로 나타났다.



Fig. 8 Relation between children's weight and step length (delete abnormal data)



Fig. 9 Relation between children's weight and velocity (delete abnormal data)

속도 또한 보폭과 마찬가지로 키가 증가할수록 보폭 이 증가하는 경향을 보였지만 상관계수는 0.38(p<0.05) 로 나타났다. 전체적인 응답은 직선에 비해 하향인 경 향을 보였는데, 이는 직선과는 다르게 곡선에서의 움



Fig. 10 The regression analysis on children's running by gender (abscissa means respective number of children)



Fig. 11 The number of steps per second by age

Table 2 Mean value of second experimental data(An eightshape)

Age	N	Step length [cm]	Velocity [m/s] (Hz)	The number of step per second
2	11	32.9	1.04 (3.15)	3.22
3	11	48.9	1.55 (3.16)	3.23
4	7	51.1	1.80 (3.52)	3.57
5	3	56.1	1.70 (3.03)	3.11

490 | Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 31(5): 486~494, 2021

직임이 반영된 결과인 것으로 판단된다.

다. 몸무게에 따른 보폭과 속도 분석

보폭과 속도를 몸무게에 따라 분석한 결과는 Fig. 15, Fig. 16과 같다. 몸무게가 증가함에 따라 보폭과속도 는 증가하는 경향을 보였지만 상관계수는 각각 0.25 (p<0.05), 0.39(p<0.05)로 직선경로에 비해서 낮게 나 타났다.

라. 성별에 따른 보폭과 속도 분석 남아 16명과 여아 15명에 대해 성별에 따른 보폭과 속



Fig. 12 Relation between children's age and step length and velocity (an eight-shape)



Fig. 13 Relation between children's height and step length (an eight-shape)



Fig. 14 Relation between children's height and velocity (an eight-shape)

도의 영향을 분석했다. 먼저 회귀분석의 결과는 Fig. 17 과 같았다. 두 집단은 회귀분석 상에서 비슷한 경향 을 보였다. 하지만 t검정을 통한 집단간 분석에서 보 폭과 속도 모두 집단 간 차이가 유의하지 않은 것으로 나타났다. 보폭의 평균은 남아가 45.9 cm였고, 여아는 43.1 cm이었다. 속도에 있어서 남아는 1.53 m/s, 여아 는 1.33 m/s였다. 이러한 수치적 차이는 유의하지 않 으므로 성별은 영향인자가 아닌 것으로 판단된다.

마. 걸음 수 분석

걸음 수를 연령에 따라 분석한 결과는 Fig. 18과 같 다. 연령에 따른 비교에서는 4세를 제외하고는 비슷 한 수치를 보였다. 이는 나이에 따른 영향보다는 해 당 집단의 편차가 보이는 것으로 나타났다. 키나 몸 무게, 성별에 있어서도 차이를 보이지 않았다.

2.3 결과 분석

실험의 결과 먼저, 직선경로의 경우 나이와 키, 몸 무게는 보폭, 속도와 양의 상관관계를 보이는 것으 로 나타났다. 이는 나이와 키, 몸무게가 신체의 성장



Fig. 15 Relation between children's weight and step length (an eight-shape)



Fig. 16 Relation between children's weight and velocity (an eight-shape)

을 나타내는 지표이기 때문인 것으로 분석된다. 다 만 몸무게의 경우 상관성이 나이나 키에 비해 낮게 나타나는데, 이는 키나 나이에 비해 몸무게가 많이 나가는 경우 보폭과 속도가 낮은 수치를 보일 수 있 기 때문인 것으로 분석된다. 성별의 경우 남아와 여 아간의 수치적 차이는 존재했으나 이 차이는 유의하 지 않는 것으로 나타났다. 성별은 어린이의 뜀에 있 어 보폭과 속도에 큰 영향을 미치는 요소가 아닌것 으로 분석된다.

다음으로 8자경로의 결과는 수치적으로 직선경 로에 비해 낮은 경향을 보이는데 이는 원형의 경로 를 따라 뛰어야 하기 때문에 잔걸음을 보이고, 속



Fig. 17 The regression analysis on children's running by gender (an eight-shape, abscissa means respective number of children)



Fig. 18 The number of steps per second by ages (an eight-shape)



Fig. 19 Difference of step length by two running types



Fig. 20 Difference of velocity by two running types

도 또한 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 보폭은 나이, 키, 몸무게와 양의 상관관계를 보였지만 전 체적으로 직선경로에 비해 수치가 낮았다. 속도는 키와 몸무게에 있어서만 양의 상관관계는 보였고 직선경로에 비해서는 상관관계가 낮았다. 성별은 직선경로와 마찬가지로 보폭과 속도에 영향을 미 치지 않았다.

두 경로에 따른 데이터를 보폭과 속도에 대해 각각 비교한 결과는 Fig. 19와 Fig. 20과 같다. 보폭과 속도 모두 직선에서의 수치가 높았고, 결정계수(*R*²) 또한 직선경로에서 높게 나타났다. 이는 8자의 경우 원형 의 경로를 따라 이동하게 되어 잔걸음 형태를 보이며, 속도 또한 줄어들기 때문인 것으로 분석된다.

3. 신중량 충격음원모델 가진부 제안

어린이의 뜀 동영상 분석데이터를 토대로 신중량 충격음원모델의 가진부 형태를 제안하려고 한다. 신 중량 충격음원모델의 중요 반영 인자로는 보폭과 속 도였고 보폭은 가진부의 반지름을 통해, 속도는 가진 부의 회전속도를 통해 반영할 수 있어야 한다. 이러 한 요소를 반영한 가진부의 예시는 Fig. 21과 같다.



Fig. 21 The prototype model of the new heavy-weighted impact source

 Table 3 Radius and rotational velocity of simulator calculated by children's running data

Туре	Radius [cm]	Period [s]	Rotational velociry [deg/s]
Straight line	49.5	0.2	290.0
Eight-shape	32.5	0.2	208.3
Mean	41.0	0.2	251.2

중앙부의 핸들을 통해 가진부의 회전 뿐만 아니라 가 진부 자체도 핸들을 중심으로 하는 원궤도를 따라 회 전을 하여 이동가능한 가진점을 재현할 수 있도록 하 였다. 가진부는 발모양의 의족 모양의 가진점을 만들 어 실제 발과 유사한 충격과 파형을 얻을 수 있도록 할 예정이다. 보폭과 속도는 두 데이터에서 만 5세를 기준으로 계산하였다. 또 두 형태의 평균치 데이터로 도 계산해보았다.

보폭은 원궤도를 따라 운동한다는 가정을 하여 다 음의 식(1)으로부터 결정하였다.

$$s = r\theta$$
 ($r = \text{radius}, \ \theta = \frac{\pi}{2}, \ s = \text{step}$) (1)

회전속도는 반지름을 r, 회전체 가장자리의 속도를 v라고 하면 시간 t 동안 이동한 거리를 L이라 하면 L = v×t이고 시간 t 동안 회전한 각도라고 하면 θ = (360×L)/2 = (360×v×t)/2가 된다.

회전하는 물체의 각속도를 ω 라고 하면 $\omega = \theta/t = (360 \times v)/2\pi v$ 에서 $v \equiv$ 구한다.

이러한 방식으로 8자와 두 방식의 평균에 대해 계 산한 결과는 Table 3과 같다. 표에는 걸음 수를 나타 낼 수 있는 값으로 주기를 추가하여 나타냈다. 주기 의 경우 5세를 기준으로 계산하면, 3가지 값들에서 차이를 보이지 않았다. Table 3에서 평균치를 제시한 것은 실제 주거지에서 어린이의 뜀은 직선과 곡선 경 로가 혼재되어 나타나게 되는데, 이를 반영한 경우를 나타내기 위한 수치로 활용하기 위함이다.

시뮬레이터의 가진부가 어린이의 뜀을 포괄적으로 모사하기 위해서는 단순히 직선경로나 곡선경로만을 고려하기 보다는 두 가지 형태 모두를 반영한 값이 필요하다. 이를 위해 신충격음원모델의 가진부는 두 경로의 평균 수치를 반영하여 제작하는 것이 효과적 이라고 판단하였다.

4. 결 론

신중량 충격원 개발을 위해 필요한 보폭과 속도의 데이터를 얻기 위해 어린이의 뜀 실험을 실시하였다. 실험의 결과는 직선경로에서는 보폭과 속도에 영향을 미치는 영향인자는 나이, 키 그리고 몸무게로 나타났 다. 나이와 키, 몸무게는 보폭과 속도에 양의 상관관 계를 보이는 것으로 나타났다. 보폭과 나이, 키, 몸무 게의 상관성은 각각 0.98(p<0.05), 0.84(p<0.05), 0.62 (p<0.05)로 나타났다. 속도와 나이, 키, 몸무게의 상 관성은 각각 0.98, 0.63, 0.40(p<0.05)으로 나타났다. 나이와 키, 몸무게는 신체적 성장지표를 나타내는 요 소이기 때문에 이러한 상관관계가 나타나는 것으로 보인다. 같은 성장 지표이지만 몸무게의 경우에는 비 만과 같이 키나 나이에 비해 몸무게가 많이 나가는 경우가 있고 이로인해 속도나 보폭이 작은 값이 나올 수 있기에 상관성이 나이나 키에 비해 낮은 것으로 분석된다. 이를 확인하기 위해서, 추세선에서 크게 벗 어나는 4개의 데이터를 제외하고 분석한 결과 상관계 수가 보폭과 속도에서 각각 0.62에서 0.8(p<0.05)로, 0.4에서 0.7(p<0.05)로 각각 증가하는 것으로 나타났 다. 성별은 보폭, 속도와 상관성이 없는 것으로 나타났 다. 8자경로에서는 보폭의 경우 나이, 키, 몸무게와 비 례하는 경향을 보였으나 그 상관관계 전체적으로 직선 경로에 비해 낮았다. 속도는 나이에서 3세~5세까지는 양의 상관관계를 보였으나 6세에서는 음의 상관관계를 보였다. 키, 몸무게는 속도와 양의 상관관계를 보이나 직선경로의 수치에 비해 낮았다. 걸음 수는 나이. 키. 몸무게가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 같 은 경로라도 신체적으로 성장함에 따라 보폭이나 속도 가 커지면서 이러한 결과를 보이는 것으로 해석된다. 이 데이터를 활용해 신중량 충격모델의 가진부를 설계해 보았다. 보폭과 속도를 효과적으로 반영하기 위해 가진부는 원형의 중심부에 90도 간격으로 인체 의 발모양을 설치하여 회전시키는 방향으로 설계하였 다. 또 가진부 자체도 핸들을 중심으로 하는 원궤도 를 따라 이동할 수 있도록 하여 어린이가 가진하는 방식을 재현하도록 했다. 만 5세 어린이를 기준으로 직선, 8자형 경로와 둘의 평균 수치에 대해 계산해 보 았다. 결과는 Table 3과 같았다. 시뮬레이터 제작에는 이 수치들 중에서 평균치를 활용하기로 하였다.

추후, 속도와 보폭만 고려한 데이터의 보완을 위해 어린이 뜀의 충격력 레벨과 주파수를 측정하여 속도 와 보폭과의 관계성이 있는지 여부를 밝히고 이를 적 용하는 것이 필요하다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2019R111A1A01054176).

References

(1) Kim, S. H., Song, M. J. and Ryu, J. K., 2020, A Survey of Experts on the Need to Improve Existing Standard Heavy-weight Impact Source and the Development Direction of New Continuous Heavy-weight Impact Source, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 340~347.

(2) Kim, K. W., Choi, G. S., Jeong, Y. S. and Yang, K. S., 2005, Impact Power Characteristics as Behavior of Real Impact Source (Child), Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 542~549.

(3) Park, H. K., Kim, K., M. and Kim, S. W., 2013, Verification of Effectiveness of the Standard Floor Impact Source by Comparing with Living Impact Sources, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 12, pp. 1117~1126.

(4) Jeong, J. H., 2019, Review and Perspective on the Researches of Floor Impact Sound, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 477~487.

(5) Lee, P. J., Jeong, J. H., Park, J. H. and Jeon, J. Y., 2006, Comparison of Standard Floor Impact Sources with a Human Impact Source, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 789~796.

(6) Park, H. G. and Mun, D. H., 2014, Characteristics of Impact Force and Floor Impact Noise for Man Walking and Standard Impact Sources, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 216~224.

(7) Jeon, J. Y., Ryu, J. K., Jeong, J. H. and Tachibana, H., 2006, Review of the Impact Ball in Evaluating Floor Impact Sound, Acta Acustica United with Acustica, Vol. 92, No. 5, pp. 777~786.

(8) Lee, J. G., Jeon, Y. H. and Park, J. C., 2015, A Study on the Double Layer Structure to Reduce of Noisy through Floor in Apartment Units, Journal of the Korean Society of Living Environmental System, Vol. 22, No. 2, pp. 305~310.



Suhong Kim graduated from Chonnam National University, Gwangju, Korea in 2020. He is currently a M.S. candidate in the school of architecture at Chonnam National University. His research interests are in the area of architec-

tural acoustics, psycho-acoustics.



Minjeong Song received his Ph.D. in Architectural Engineering from Chonnam National University. Currently, he is working as a Research Professor at Chonnam National University's Bio-Housing Research Center. and has been con-

ducting various researches on noise and floor impact sound.



Jongkwan Ryu received his Ph.D. in Dept. of Architectural Engineering from Hanyang University, Seoul. He is currently as a professor in the school of architecture at Chonnam National University. His research interests are in the area of architec-

tural acoustics, psycho-acoustics, and acoustic barrier-free.

지진 시 발전소 내 운용설비의 지지조건에 따른 진동 특성 평가

Evaluation of Vibration Characteristics According to Conditions of Support for Operating Facilities in a Power Plant under an Earthquake

이 상 문*·전 법 규**·윤 다 운**·정 우 영[†]

Sang-Moon Lee*, Bub-Gyu Jeon**, Da-Woon Yun** and Woo-Young Jung*

(Received June 15, 2021 ; Revised July 27, 2021 ; Accepted August 30, 2021)

Key Words : Electrical Cabinet(전기캐비닛), Power Plant(발전소), Rocking Response(흔들림 반응), Shaking Table Test(진동대 실험), Support Condition(지지 조건)

ABSTRACT

It was reported that the Gyeongju and Pohang earthquakes that occurred recently caused a great deal of damage to non-structural elements, such as, power generation facilities as well as structural elements, such as, buildings. In the case of electric cabinets, which are non-structural elements of typical power generation facilities, when damage occurs due to earthquakes, secondary damage may be caused. In general, using an electric cabinet is a self-supporting method of fixing the bottom of the cabinet and the concrete slab using an anchor. When a deformation occurs at the bolt connection point due to vibration of the body during an earthquake, the fixing force is weakened, which may cause structural and functional damage. This functional damage can further impair the indirect social facilities; hence, earthquake protection is of utmost importance. In this study, a vibration table test was performed to confirm whether the vibrations during earthquakes were reduced by using the number of cabinet connection bolts as a parameter to improving the fixing force.

1. 서 론

규모 5.0이상 지진의 발생 빈도는 세계적으로 매년 증가하고 있는 추세이며, 국내 또한 2019년까지 규모 4.0이상의 지진이 50회 이상, 규모 5.0이상의 지진은 10회 이상 발생하였다. 이에 국내에서도 지진 피해에 대한 안전성을 확보하기 위하여 내진설계 및 보강을 수행하고 있지만, 구조물 자체의 내진안정성을 확보 하는 것에만 주안점을 두고 있다⁽¹⁾. 최근 보고되고 있는 국내 지진피해사례를 살펴보 면 구조물이 아닌 내부에 설치된 주요 설비 및 기기 등과 같은 비구조요소의 파손사례가 많았으며, 이로 인하여 사회간접자이시설이 직·간접적으로 손상을 입 게 되어 인명 및 재산피해가 추가적으로 발생한 사례 들이 보고되고 있다⁽²⁾. 최근 발생된 2016년 경주지진 과 2017년 포항지진의 다양한 지진피해사례 중 주요 사회간접자본 시설중의 하나인 발전소의 피해사례도 있었으며, 그 중 비구조요소인 전기기기 및 배관설비 등의 피해도 다수 보고된 바 있다⁽³⁾.

‡ Recommended by Editor Jin Yun Chung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

[†] Corresponding Author; Gangneung-Wonju National University, Professor E-mail: woojung@gwnu.ac.kr

^{*} Gangneung-Wonju National University, Student

^{**} Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Researcher

시설물 내 대표적인 기계·전기 비구조요소인 전 기캐비닛의 경우 일반적으로 시설물 고유의 기능을 유지하기 위하여 제어와 통신 등의 역할을 수행한다. 그러므로 전기캐비닛의 손상은 시설의 기능장애를 유 발할 수 있으며, 특히 발전플랜트, 송변전설비와 같은 사회기반 시설의 기능장애는 사회전반적인 막대한 손 실을 동반하는 2차 피해로 이어질 수 있기 때문에 반 드시 내진 안전성이 확보되어야 한다. 이 같은 주요 기능을 담당하는 전기캐비닛의 지진거동특성을 분석 하고 내진성능을 확보하기 위하여 국내외적으로 많은 연구가 수행되고 있다⁽⁴⁻⁸⁾.

일반적으로 원자력 설비를 제외한 대부분의 시설 물 내 설치되는 전기캐비닛의 경우 콘크리트 슬래브 에 앵커로 고정된 채널과 캐비닛의 바닥판이 볼트로 연결되어 지지된다. 내진성능 확보를 위하여 보강을 하는 경우, 실제 현장에서는 주로 채널과 콘크리트 슬래브를 연결하는 앵커를 추가하는 식으로 내진성능 을 확보한다. 하지만 Fig. 1과 같이 지진 시 채널과 연결되는 캐비닛 바닥이 앵커에 비해 상대적으로 강 성이 약하여 지진 시 발생되는 rocking 현상으로 앵



Fig. 1 Rocking response and uplifting of cabinet



Fig. 2 Schematic of test boundary conditions

커볼트 주변에 국부변형(cup-like deformation)이 발 생하게 된다⁽⁹⁾. 국부변형으로 인하여 캐비닛은 들림 (uplifting)이 유발하게 되고, 이 현상으로 인하여 캐 비닛 바닥과 채널이 충돌하여 충격이 발생하게 된다. 이러한 충격은 연결부 앵커볼트의 풀림 및 손상을 야 기할 수 있으며 캐비닛 전체로 충격이 전달되어 결국 문고리 탈락현상 및 주요 장비 손상 등과 같은 피해 로 이어지게 된다. 따라서 위에서 언급한 보강방법은 내진성능향상에 큰 효과가 없을 수 있다.

Fig. 2는 이 연구의 실험 조건을 간단하게 도식화 한 것이며 rocking 현상으로 인하여 발생되는 바닥판 의 국부변형을 저감시켜 충격을 완화하고자 채널-바 닥판의 연결 볼트 수를 실제 설치 개수인 8ea와 10ea 를 보강한 18ea를 비교하여 실험을 수행하였다.

비구조요소인 전기캐비닛의 내진성능을 증명하기 위해 국내는 2019년 3월 개정된 건축물 내진설계기 준(KDS 41 17 00)⁽¹⁰⁾에서 지진 발생이후에 그 기능 이 반드시 유지되어야 하는 주요 비구조요소에 대하 여 내진성능을 증명할 것을 규정하고 있다. 원자력 발전소의 경우 안전과 관련된 주요 기기의 엄격한 내 진성능 검증이 요구되고 있으며, 방송통신시설에서는 방송통신설비의 내진 시험방법⁽¹¹⁾으로서 진동대 시험 으로 기본적인 내진설계를 검증하도록 되어 있다.

2. 비구조요소 내진시험 방법

일반적으로 지진 시 해당 시설물의 기능이 반드시 유지되어야 하는 전기캐비닛과 같은 주요 비구조요소 의 내진시험은 실제 진동대 시험을 통하여 내진성능 을 증명할 것을 국내 건축물 내진설계기준에서 규정 하고 있다. 국외 ASCE 7⁽¹²⁾기준에서는 비구조요소는 지진하중 및 상대변위 요구사항을 만족시켜야 하며, 기능적·전기적 결함이 발생하지 않아야 할 것을 명시 하고 있다. 이러한 비구조요소에 대하여 지진에 대한 요구 성능의 만족 여부는 ICC-ES AC 156등의 실험 방법으로 검증할 수 있다⁽¹³⁾.

이 연구에서는 실제 수력발전소에서 사용하였던 전기캐비닛을 확보한 후 세계 2위 규모의 지진모사 진동대를 보유한 부산대 지진방재센터에서 진동대 시 험을 통하여 내진성능 평가를 수행하였다. 시험은 ICC-ES AC 156을 참조하여 건축물 내진설계기준과 내진설계기준 공통적용사항에⁽¹⁴⁾ 부합되도록 요구응 답스펙트럼(required response spectrum, RRS)과 인 공지진파의 가속도시간이력을 작성하고 가속도 배율 을 조정하였다. 캐비닛 본체의 구조 및 기능적 손상 이 발생할 때까지 시험을 진행하였으며, 앵커하중응 답, 지진하중특성, 내부 기기의 가속도 응답과 RTU 패널의 고유 기능유지 여부를 확인하였다.

3. 시험대상 및 설치조건

이 연구에서 사용한 발전소 내 운용설비인 전기 캐 비닛은 실제 대청수력발전소에서 사용하였던 RTU (remote terminal unit) 전기캐비닛이다. RTU의 역할 은 원격지에서 데이터를 수집, 전송 가능한 형식으로 데이터를 변환한 뒤 상위 대상 시스템으로 송신하며, 데이터를 수신하여 일련의 작업 절차들을 수행하는 중요한 설비이다⁽¹⁵⁾. 시험결과의 신뢰성을 향상시키기 위하여 수력발전소 현장에서 사용하였던 2기가 연결 된 RTU를 시험대상으로 하였다. 캐비닛의 하부에 Fig. 3과 같은 base channel을 앵커볼트 M8을 사용하 여 고정하였으며, 진동대 상부 콘크리트 슬래브에 후



Fig. 3 Description of the base channel

TELL 1	D .	· .	•
able 1	Descript	ion of	specimens
	2000000		opeenneno

		Spec	Weight		
Name	Model (detail)	L	W	Н	[kg]
RTU	RTU No.2-1	880	620	2350	510
panel	RTU No.3-1	880	620	2350	516

설치 앵커볼트 M16을 이용하여 channel과 고정시킨 후 진동대 시험을 수행하였다.

Table 1은 시험대상인 RTU패널의 제원을 나타낸 다. 여기서 RTU패널은 열반된 두 캐비닛의 무게 및 받침을 포함한 무게이며, 진동대 고정을 위한 앵커볼 트는 M16 6개를 사용하였다.

시험 설치조건은 지진동으로 발생되는 rocking 현 상에 의한 캐비닛 본체의 충격을 완화하고자 Fig. 4와 같이 채널-캐비닛 간 연결 볼트의 수를 매개변수로 하 여 조정하였다. 연결 볼트 8ea로 구성된 set 2의 경우 는 실제 현장 설치조건이며, set 1의 경우는 설치 간격 을 4배수로 조정하고 좌우를 보강하기 위한 추가설치 포함, 총 18ea로 구성하여 지진동의 충격으로 발생되 는 하부 국부변형을 최대한 방지하고자 하였다. 시험 순서는 캐비닛 모체의 손상을 최소화하기 위하여 set 1을 먼저 진행하고 set 2를 나중에 진행하였다.

4. 입력지진동

일반적으로 시설물 내 설치되는 운용설비의 경우



(a) Set 1 (anchor 18ea)



(b) Set 2 (anchor 8ea)

Fig. 4 Test conditions between cabinet and channel (same conditions left and right cabinet bottom)

Name	Code	SDS [g]	z/h	AFLEX-H [g]	ARIG-H [g]	AFLEX-V [g]	ARIG-V [g]
EQ1	KDS	0.55	1	0.88	0.66	0.36	0.14
EQ2	Common application of seismic design criteria	0.825	1	1.32	0.99	0.55	0.22
EQ3	200 % of EQ1	1.10	1	1.76	1.32	0.73	0.29

Table 2 Seismic parameters for artificial earthquake



Fig. 5 Response spectrum of ICC ES AC 156

해당 설비의 역할 및 특징 등이 반영되어 일반 건축 물 및 산업시설 등에 설치된다. 따라서 일반 건축물 에 설치되는 경우와 산업시설에 설치되는 경우를 함 께 고려하기 위하여 건축물 내진설계기준과 내진설계 기준 공통적용사항을 참조하였으며, ICC-ES AC 156 에서 제시한 방법에 의해 요구응답스펙트럼을 Fig. 5 와 같이 작성하였다⁽¹⁶⁾.

시설물의 층응답을 고려한 ICC-ES AC 156의 가 속도시간이력 생성을 위한 seismic parameter는 Table 2와 같다. 기기 설비는 정의되지 않은 임의의 구조물의 모든 층에 설치될 수 있다. 그러므로 이 연 구에서는 가장 엄격한 조건인 최상층 설치를 고려하 여 구조물과 설치 위치의 비(z/h)를 1로 가정하였다. RRS는 ICC-ES AC 156의 요구사항에 따라 작성하 였으며 감쇠비는 5 %이다. 작성된 가속도 시간이력의 진동 지속시간은 30초이고, 강진 지속시간은 20초이 다. 5초 동안 가속도 크기가 상승하여 20초간 강진이 지속된 후 5초 동안 가속도의 크기가 줄어든다.

5. 진동대 시험

5.1 시험 계측

RTU 패널의 상하부 및 중앙부와 내부 주요 부품인



Fig. 6 RTU cabinet and sensor location

파워 서플라이(power supply), 릴레이(relay) 주변에 3축 가속도계(A2~A6)를 설치하여 가속도 응답을 계측하였다.

RTU패널과 부전도 면진장치를 연결하는 볼트 주 변 바닥판의 두께는 2 mm ~ 3 mm 수준으로 과도한 외력에 의해 국부적인 변형이 발생할 우려가 있다. 따라서 볼트 중심에서 20 mm 떨어진 위치에 직교하 는 수평방향으로 strain gage(SG1 ~ SG8)를 설치하였 다. Sampling rate는 512 Hz이고 계측기의 설치위치 는 Fig. 6과 같다.

5.2 시험 방법 및 순서

진동대 시험을 위하여 수력발전소에서 사용하였던 RTU 전기캐비닛을 콘크리트 기초에 연결하고 진동 대에 고정하였다. 하부 채널은 M16 확장형 후설치 앵커볼트 6개를 이용하여 4면을 고정하였다. 캐비닛 좌우 의 앵커볼트 4개에는 ring type의 로드셀을 설 치하여 시험 중 전달되는 앵커하중을 계측하였다. 시 험대상 RTU 내 power supply에 3축 가속도계를 설 치하였으며, relay가 설치되는 내부 강판에 가속도계

No	Test name	Test method			
1	Visual inspection before testing				
2	Function verification	On-off-on test			
3	Resonant frequency search	Low-level amplitude(0.05 g) single-axis sinusoidal sweep (0.5 ~ 50.0) Hz, 2 octave/min. X, Y, Z axis independently			
4	Seismic simulation EQ1	Time duration 30 s, strong motion 20 s, $0.5 \text{ Hz} \sim 50 \text{ Hz}$ damping ration 5 %, triaxial test			
5	Visual inspection after EQ1 test				
6	Function verification	On-off-on test after EQ1 test			
7	Seismic simulation EQ2	Time duration 30 s, strong motion 20 s, 0.5 Hz \sim 50 Hz damping ration 5 %, triaxial test			
8	Visua	l inspection after EQ2 test			
9	Function verification	On-off-on test after EQ2 test			
10	Seismic simulation EQ3	Time duration 30 s, strong motion 20 s, 0.5 Hz \sim 50 Hz damping ration 5 %, triaxial test			
11	Visual inspection after EQ3 test				
12	Function verification	On-off-on test after EQ3 test			

Table 3 Test procedure and method

를 설치하여 주요기기 위치에서의 가속도응답을 계측 하였다. 모든 시험 전후에 기능검사와 육안검사를 수 행하였으며, 기능검사는 내부회로의 건전성을 확인하 기 위하여 on-off-on test를 수행하였다. 시험 전 시험 대상의 공진주파수를 확인하기 위하여 구조물에 손상 을 미치지 않는 수준의 가속도 입력(0.05 g)으로 단방 향 주파수 소인 시험을 각 방향에 대해 수행하였다.

지진모사시험은 두 개의 수평축(전후, 좌우)과 하 나의 수직축(상하)에서 동시에 가진되는 동적 시험으 로서, 진동대 바닥에서 계측된 가속도 응답의 TRS(test response spectrum)가 RRS(required response spectrum)를 포락하도록 수행하였다. 시험은 시험 전 검사-기능검사-공진탐색-지진모사시험-시험 후 검사-시험 후 기능검사의 순으로 수행되었다. 시험 의 절차는 ICC-ES AC 156을 참조하여 Table 3과 같 이 수행하였다.

6. 시험 결과

6.1 육안 점검

진동대 시험 종료 후 RTU 패널의 지진동으로 인

Table 4 Results of resonance frequency search tests

Sensor	Direction	Lowest resonance frequency [Hz]		
location		Set 1	Set 2	
	Side to side (X)	10	5.25	
A4 (top)	Front to back (Y)	7.25	5	
(top)	Vertical (Z)	N/A	N/A	
A3 (middle)	Side to side (X)	10	5.25	
	Front to back (Y)	7.25	7.25	
	Vertical (Z)	N/A	N/A	
A6	Side to side (X)	10.5	5.5	
(power supply)	Front to back (Y)	7.25	5	
	Vertical (Z)	11.25	11.5	

한 구조적 손상을 육안으로 먼저 확인하였다. 시험 종료 후 연결 볼트 수가 18개인 set 1에서는 잠금장치 를 구성하는 너트의 토크가 풀리는 수준의 경미한 구 조적 문제가 발생하였다. 하지만 연결 볼트 수가 8개 인 set 2 경우 내진설계기준 공통사항에 해당되는 인 공지진하중 150% EQ2에서 잠금장치가 손상되었으 며, 200% EQ3에서는 잠금장치의 부품이 탈락되어 캐비닛 도어가 열렸다. 이는 캐비닛-채널간의 연결강 성이 충분하지 못하여 지진하중에 의해 외함의 들림 현상(uplifting)이 발생하였으며, 하판 볼트 주변에 충 격이 누적되어 결과적으로 누적소성변형으로 인하여 힌지 부분의 판넬이 휘어지는 구조적 손상이 발생된 것으로 판단된다.

6.2 공진주파수

시험대상의 공진주파수는 진동대에서 계측된 가속 도(base, a)에 대한 실험대상의 각 위치에서 응답가속 도(unit, b)의 전달함수를 계산하여 결정하였다. 전달 함수(T_{ab})는 식(1)과 같이 입력된 신호의 power spectral density(P_{aa})에 대한 입·출력신호의 cross power spectral density(P_{ba})로 계산한다.

$$T_{ab}(f) = \frac{P_{ba}(f)}{P_{aa}(f)}$$
(1)

공진주파수 분석의 정밀도를 향상시키기 위하여 각 신호는 특정 관심 있는 영역에 일정한 패턴의 대 칭적인 부분을 정확하게 묘사하는 대칭 해밍 창 (symmetric hamming window)이 적용되었다⁽¹⁷⁾. Table 4를 보면 알 수 있듯이 캐비닛-채널 연결 볼트 수





가 적은 set 2의 공진주파수가 set 1 대비 30%~40% 수준까지 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 공진주파



Fig. 8 Maximum acceleration response of the cabinet and devices

수가 낮아진다는 의미는 본체의 강성이 그만큼 작아 지는 지게 되는 것이며, 지진동과 같은 외부 하중에 노출되었을 시 본체에 전달되는 충격이 더 크게 작용 될 수 있을 것으로 판단된다.

6.3 변형률 및 가속도 응답

Fig. 7은 진동대 시험 중 캐비닛-채널 간 연결 볼트 주변에서 계측된 변형률 응답이다. Gage 홀수는 좌우 방향, 짝수는 전후방향을 계측한 결과이다. 계측 결과 를 보면 좌우방향을 계측한 홀수 gage에서 변형률이 더 크게 나타난 것을 알 수 있는데 Fig. 4와 같이 연 결 볼트를 캐비닛 바닥의 전후방향에 더 많이 설치했 기 때문인 것으로 판단된다. 검은색으로 표시된 그래 프는 set 1이며, 붉은색으로 표시된 그래프는 set 2이 다. Set 2의 결과를 살펴보면 상대적으로 set 1 대비 전반적으로 누적소성변형이 확인되고 있으며, 7번 gage에서 가장 크게 발생한 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 본체 및 내부 기기에서 계측된 가속도 응



Fig. 9 Comparison of anchor load response of set 1 and set 2



Fig. 10 Comparison of maximum anchor load response of set 1 and set 2

답을 비교한 그래프를 나타낸 것이다. 200 % EQ3 가 진 중 시험대상설비가 손상되어 직접적인 비교를 배 제하고 EQ1과 EQ2 두 가지 경우에 대해서만 비교하 였다. 가속도 응답 역시 변형률 결과와 동등하게 연결 볼트가 적은 set 2의 가속도 응답이 상대적으로 큰 것 을 알 수 있다. EQ1과 EQ2 모두 내부 기기 위치에서 의 가속도 응답은 소폭 증가하고 있으나 캐비닛 프레임 을 따라 설치된 가속도계에서 계측되는 응답은 50 %이 상 감소하고 있다. Set 1 바닥에서의 가속도 응답이 현 저히 줄어드는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 캐비닛 의 들림에 의한 충격이 연결 볼트 수의 증가에 따라 효과적으로 억제되고 있는 것으로 판단된다.

6.4 앵커 하중 응답

캐비닛 고정부 앵커에 전달되는 하중을 계측하기 위하여 캐비닛 바닥 좌우 앵커볼트 4개에 ring type 의 로드셀을 설치하여 시험 중 전달되는 앵커하중을 계측하였다. Fig. 9는 문 고정 장치가 파손된 캐비닛 에 위치한 로드셀에서 계측된 앵커하중이다. 붉은색 으로 표시된 set 2는 충격으로 추정되는 하중응답이 인공지진 150%부터 급격히 증가하고 있다. 그러나 연결 볼트의 수가 증가하여 채널과 캐비닛 하판의 체 결력이 증가된 set 1의 경우는 인공지진 150%까지 충격하중이 효과적으로 제어되고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 로드셀 1~4의 최대 앵커하중을 나타낸 것 이며, 전반적으로 set 1이 충격하중을 효과적으로 억 제하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 증가된 연결 볼트 에 의하여 캐비닛 본체의 강성이 증가됨에 따라 진동 저감 능력이 향상되는 것으로 판단된다.

7.결 론

이 연구는 발전소 내 운용설비에 대하여 지진 시 설비에 충격을 미치는 지진동의 영향을 감소시키고자 고정부 앵커의 내진보강방법에 대한 기초 연구이다. 입력지진동은 구조물에 의한 지진가속도 증폭효과를 고려하여 건축물내진설계기준과 내진설계기준 공통 적용사항을 바탕으로 작성하였으며, ICC ES AC 156 의 시험방법을 준용하여 캐비닛-채널 간 연결 볼트의 수를 매개변수로 3축 동시 가진에 의한 진동대 지진 모사실험을 수행하였다.

(1) 기존의 내진보강은 캐비닛 하부 채널과 콘크리 트 기초간의 앵커 볼트 수만 조정함으로써 지진동의 영향을 억제하고 있다. 하지만 캐비닛 본체와 채널 연결부의 강성이 약할 경우 지진동으로 인한 rocking 현상으로 들림이 발생하며 그 충격으로 응답신호가 증폭될 우려가 있다.

(2) 캐비닛-채널 간 연결 볼트 수를 매개변수로 진동대 시험을 한 결과 볼트 수를 증가시킨 set 1의 공 진주파수가 set 2 대비 40%~50% 정도 증가되었으며, 이는 체결력 향상에 따른 연결부의 강성이 증가 되었기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 연결 볼트 수의 증가에 따른 캐비닛 하판의 소 성변형이 억제되면서 앵커 하중 응답의 경우 EQ 2에 서 평균적으로 60%이상 감소되었으며, 응답 가속도 의 경우, 캐비닛 내부 기기의 가속도 응답은 중가하 나 캐비닛 프레임에서 계측되는 가속도 응답은 50% 감소되는 것으로 계측되었다.

(4) 캐비닛과 채널 간 연결 볼트 증가에 따른 전후, 좌우, 상하 방향의 동시 가진에 의한 지진모사 실험 결과 지진동의 영향이 효과적으로 제어되는 것을 알 수 있었다. 단 이 연구는 수직방향 지진의 크기가 수 평방향의 27% 수준인 ICC-ES AC 156의 요구응답 스펙트럼을 기반으로 수행된 결과이므로 수직성분이 강한 지진에 대한 성능평가가 추가로 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다. 향후 기존 전기 캐비닛의 내진 보강과 더불어 이 연구에서 수행한 내진 보강방법을 추가한다면 지진 발생에 따른 피해가 최소화 될 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지 원(21IFIP-B128598-05)에 의해 수행되었습니다.

References

(1) Lee, S. H., Choi, H. S. and Jeon, B. G., 2014, Test Procedures and Practices of Seismic Performance Certification for Nonstructural Components, Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 18, No. 3, pp. 48~56.

(2) Oh, S. H., Park, H. Y. and Choi, K. K., 2018, Seismic Damage Status and Characteristics of Non-structural Elements, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 71~77.

(3) Ministry of the Interior and Safety, 2018, 2017 Pohang Earthquake White Paper.

(4) Lee, S.-M. and Jung, W.-Y., 2020, Evaluation of Anchorage Performance of the Switchboard Cabinet under Seismic Loading Condition, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 5, Article no. 1687814020926309.

(5) Eem, S.-H., Jeon, B.-G., Jang, S.-J. and Choi, I.-K., 2019, Evaluate the Characteristics of Vibration Caused by Rocking Modes of Electric Cabinet under Seismic Loading, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 735~744.

(6) Moon, J.-Y., Kwon, M.-H., Kim, J.-S. and Lim, J.-H., 2018, Seismic Fragility Evaluation of Cabinet Panel by Nonlinear Time History Analysis, Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 19, No. 2, pp. 50~55.

(7) Gupta, A., Rustogi, S. K. and Gupta, A. K., 1999, Ritz Vector Approach for Evaluating Incabinet Response Spectra, Nuclear Engineering and Design, Vol. 190, No. 3, pp. 255~272.

(8) Chang, S. J., Jeong, Y. S., Eem, S. H., Choi, I. K. and Park, D. U., 2021, Evaluation of MCC Seismic Response according to the Frequency Contents through

the Shake Table Test, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 53, No. 4, pp. 1345~1356, doi: 10.10 16/j.net.2020.10.002.

(9) Yun, D.-W., Chang, S.-J., Jeon, B.-G., Eem, S.-H. and Choi, I.-K., 2019, An Experimental Study on Characteristics of Vibration Caused by Rocking Modes of Electric Cabinet under Seismic Loading, Transactions of the SMiRT-25, Division V.

(10) Ministry of Land, Infrastructure, and Transport,2019, Korean Design Standard 41 17 00.

(11) National Radio Research Agency, 2015, Seismic Test Method for Telecommunication Facilities.

(12) Ghosh, S. K. and Fanella, D. A., 2003, Seismic and Wind Design of Concrete Buildings (2000 IBC, ASCE 7-98, ACI 318-99), Kaplan AEC Engineering, U.S.A.

(13) American Society of Civil Engineers, 2017, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 13.2.5., ASCE 7-16.

(14) Ministry of the Interior and Safety, 2017,Common Application of Seismic Design Criteria.

(15) Salahudin, F. and Setiyono, B., 2019, Design of Remote Terminal Unit (RTU) Panel Supply Monitoring Based on IOT Case Study at PLN., 6th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, pp. 1~6.

(16) Lee, S. M., Jeon, B. G., Yoon, D. W., Kim, S. W. and Jung, W. Y., 2020, Seismic Response Characteristics of Used Molded Transformer Anchored on Concrete Slab, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 6, pp. 624–633.

(17) Mottaghi-Kashtiban, M. and Shayesteh, M. G., 2011, New Efficient Window Function, Replacement for the Hamming Window, IET Signal Processing, Vol. 5, No. 5, pp. 499~505, doi: 10.1049/iet-spr.2010.0272.



Sang-Moon Lee received his Master degree from Gangneung-Wonju National University with the topic related with evaluation of the applicability of reinforced concrete beams using FRP. He is currently a Ph.D. student at the Department of Civil

Engineering of Gangneung-Wonju National University.



Bub-Gyu Jeon received his Ph.D. degree from Pusan National University with the topic related with seismic fragility evaluation of base isolated nuclear power plant piping system. He is currently the technical laboratory manager in

Seismic Simulation Test Center. His research interests include seismic evaluation of nonstructural elements and seismic behavior of internal pressured piping system.



Woo-Young Jung received his Ph.D. degree from the State University of New York at Buffalo with the topic related with seismic retrofitting Strategies of Semi-rigid Steel Frame by using Polymer Matrix Composite Materials. He is currently a professor

at the Department of Civil Engineering of Gangneung-Wonju National University.

균열을 가지는 폭이 테이퍼진 보의 굽힘 진동 해석

Bending Vibration Analysis of Width-tapered Beams with a Crack

이 정 우†

Jung Woo Lee[†]

(Received July 2, 2021 ; Revised August 6, 2021 ; Accepted August 6, 2021)

Key Words: Bernoull-Euler Beam(베르누이-오일러 보), Crack(균열), Frobenius Method(프로베니우스 해법), Tapered Beams(테이퍼진 보), Transfer Matrix Method(전달행렬법)

ABSTRACT

In this study, the effect of cracking on the natural frequencies of width-tapered beams based on the Bernoulli-Euler beam theory was analyzed. The tapered beam model considered had a linearly reducing width along its length. The effect of cracking was modelled by a rotational spring, and the Frobenius method was used to solve the differential equation of motion. The transfer matrix method was utilized to determine the natural frequencies of these beams. The accuracy of the method was demonstrated through a comparison between the predicted results and those observed in previous studies. In addition, a detailed study was performed to analyze the variation in the natural frequencies of the width-tapered beams with respect to the variation of the crack location. Applying the results discussed in the previous studies, the effect of cracking on the natural frequencies of the three types of tapered beams was compared.

1. 서 론

선형적으로 감소하는 단면을 가진 테이퍼진 보는 크게 단면의 높이(type A)⁽¹⁾, 단면의 폭과 높이(type B)⁽²⁾, 그리고 단면의 폭(type C)⁽³⁾이 변화하는 보 구 조물로 구분할 수 있다.

Type A와 B의 경우 많은 연구자들에 의하여 블레 이드와 구조물의 프레임과 같은 많은 공학적 설계에 서 보다 정확한 동특성을 분석하기 위해 다양한 수치 적 방법들이 연구되어 왔으나 type C의 경우 앞에서 언급된 두 가지 보 구조물 보다는 상대적으로 적은 연구가 수행되었다.

이러한 보 구조물들에 대해 균열의 영향을 고려한

수치적 방법들도 type A^(4,5)와 B⁽⁶⁾에 대해서는 일부 수행되었으나 type C에 대한 균열의 영향을 분석한 연구논문은 찾기 어렵다.

일반적으로 균열에 대한 연구는 균일 단면을 가진 보에 대한 연구가 대부분이다⁽⁷⁻⁹⁾. 테이퍼진 보 구조 물에 대한 균열의 영향을 분석한 연구에 대해 Chaudhari 등⁽⁴⁾은 멱급수 중의 하나인 Frobenius법을 사용하여 방정식의 해를 구하였고 분석적 방법을 사 용하여 고유진동수에 관한 균열의 영향을 분석하였 다. Ma 등⁽⁵⁾은 전달행렬법을 사용하여 균열의 영향을 분석하였다. 이들 연구는 높이에서 선형적으로 감소 하는 단면을 가진 테이퍼진 보 구조물을 고려하였다. Lee 등⁽⁶⁾은 전달행렬법을 사용하여 type A와 B에 대 한 균열의 영향을 분석하였고 미분방정식의 근을

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

[†] Corresponding Author; Member, Department of Mechanical System Engineering, Kyonggi University, Professor E-mail: j.w.lee@kyonggi.ac.kr

[‡] Recommended by Editor Won Ju Jeon
Frobenius법을 사용하여 결정하였다.

실제 폭이 테이퍼진 보 구조물은 기계, 토목, 건축 등 다양한 분야에서 공학적 설계를 위하여 사용되는 요소이다. 그러나, 폭이 테이퍼진 보 구조물에 대한 균열의 영향을 평가 할 수 있는 수치적 방법론은 Kempe 등⁽¹⁰⁾에 의해 파괴인성치를 측정하기 위한 연 구를 제외하고는 폭이 테이퍼진 보 구조물의 고유진 동수에 관한 균열의 영향을 분석한 논문은 찾는 것이 어려웠다. 따라서, 현재의 연구는 type C의 구조물의 고유진동수에 대한 균열을 평가 할 수 있는 수치적 방법을 개발하고자 한다.

이 연구에서의 목적은 전달행렬법을 사용하여 보 요소의 길이를 따라 선형적으로 감소하는 폭을 가진 보 구조물에 대한 균열의 영향을 분석하는 것이다. 미분방정식의 해는 Frobenius법을 사용하여 결정하였 고 고유진동수를 결정하기 위한 주파수 방정식으로 전달행렬법이 고려되었다. 방법의 정확도를 검증하기 위하여 선행연구에서 검토된 결과들과 비교 하였고 균열 위치 변화에 따른 고유진동수의 변화가 변수 연 구를 통하여 조사되었다. 또한, 선행연구에서 토론된 type A와 B의 결과들을 type C에 대하여 예측된 결 과들과 비교하여 균열의 영향을 분석하였다.

2. 이 론

2.1 미분방정식

Fig. 1은 균열을 가지는 폭이 테이퍼진 보의 기하학 적 형상이고, *XYZ*는 전체 좌표계이다. *h*₀와 *b*₀ 각



Fig.1 Geometry of a width-tapered beam with cracking

각 균일한 단면을 가지는 보의 높이와 폭이다. L은 보의 길이, c는 테이퍼 비이며 b(x)는 임의의 위치 에서 테이퍼 비에 의해 감소된 단면의 폭이고, a는 균열의 깊이이다. 이 연구에서, 회전관성과 전단변형 의 영향은 무시되었고 개방균열(open edge crack)을 고려하였다.

폭이 테이퍼진 보에 대한 미분방정식과 힘 (전단력 과 굽힘모멘트)는 식 (1)~(3)과 같다⁽³⁾.

$$(EI(x)w'')'' + m(x)\ddot{w} = 0 \tag{1}$$

$$V = (EI(x)w'')'$$
⁽²⁾

$$M = - EI(x)w'' \tag{3}$$

여기서, V는 전단력, M은 굽힘 모멘트이고 EI(x)와 m(x)는 테이퍼비에 의존하여 변화하는 굽힘 강성과 단위 길이당 질량이며 다음과 같이 길이를 따라 변화 된다.

$$EI_{(x)} = EI_0 \left(1 - c\frac{x}{L}\right) \tag{4}$$

$$m(x) = m_0 \left(1 - c \frac{x}{L}\right) \tag{5}$$

여기서, *EL*₀와 *m*₀는 균일 단면을 가지는 보 요소에 대한 굽힘 강성과 단위 길이 당 질량이다.

각 주파수 ω로 조화 진동을 한다고 가정하면,

$$w(x,t) = W(x)\cos\omega t \tag{6}$$

식(6)을 식(1)에 대입하여 변수를 분리하면 무차 원 미분방정식은 식(7)과 같이 된다.

$$(1-\zeta) W''' - 2 W''' - \alpha^2 (1-\zeta) W = 0$$
⁽⁷⁾

여기서, $\zeta = c\overline{x}, \ \overline{x} = x/L$ 이고 $\alpha^2 = m_0 \omega^2 L^4 / E I_0 c^4$ 이다.

2.2 미분방정식의 해

식(7)의 근들은 멱급수의 하나인 Frobenius법을 사용하여 결정하였고 일반해의 형태는 식(8)과 같다.

$$W(\zeta,k) = \sum_{i=0}^{\infty} a_{i+1} \zeta^{k+i}$$
(8)

여기서, a_{i+1} 은 Frobenius 계수이다.

식(7)에 식(8)의 미분형태를 대입하고 정리하면

다음과 같이 결정방정식(indicial equation)을 얻을 수 있다.

$$k(k-1)(k-2)(k-3)a_1 = 0 \tag{9}$$

또한, 점화관계(recurrence relationship)는 식(10) 식(19), 식(20)과 같이 다시 쓸 수 있다. 과 같다.

$$\begin{aligned} a_{i+5} &= \frac{k+i+2}{(k+i+4)} a_{i+4} \\ &- \frac{\overline{\omega^2}}{(k+i+1)(k+i+2)(k+i+3)(k+i+4)} a_{i+1} \\ &+ \frac{\overline{\omega^2}}{(k+i+1)(k+i+2)(k+i+3)(k+i+4)} a_i \end{aligned}$$
(10)

그리고 Frobenius 계수 $a_1 - a_5$ 는 점화관계식으로 부터 식 (11)~(15)와 같이 결정할 수 있다.

$$a_1 = 1$$
 (11)

$$a_2 = \frac{(k-1)}{(k+1)}a_1 \tag{12}$$

$$a_3 = \frac{k}{(k+2)}a_2$$
(13)

$$a_4 = \frac{(k+1)}{(k+3)}a_3 \tag{14}$$

$$a_5 = \frac{(k+2)}{(k+4)}a_4 - \frac{\overline{\omega^2}}{(k+1)(k+2)(k+3)(k+4)}a_1$$
(15)

따라서, 식(9)로부터 결정할 수 있는 k=0,1,2,3의 4개에 값에 서로 다른 상수를 곱함으로써 일반해가 식(16)과 같이 된다.

$$W(\zeta,k) = A_1 f(\zeta,0) + A_2 f(\zeta,1) + A_3 f(\zeta,2) + A_3 f(\zeta,3)$$
(16)

여기서, f(ζ,k)는 식(17)과 같이 정의할 수 있다.

$$f(\zeta,k) = \sum_{i=0}^{\infty} a_{i+1} \zeta^{k+i} \tag{17}$$

2.3 균열의 영향을 고려한 전달행렬

식(17)을 미분하여 곡선의 기울기(Φ)를 결정하고,

식(2)와 식(3)에 식(8)을 대입하면 두 개의 힘은 식(19), 식(20)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V = N_1 \{ (1 - \zeta) f'''(\zeta, j - 1) - f''(\zeta, j - 1) \} A_j$$
(19)

$$M = N_2(1-\zeta)f''(\zeta, j-1)A_j$$
(20)

여기처, $N_1 = - EI_0 c^3 / L^3$, $N_2 = EI_0 c^2 / L^2$ 이다.

보의 전체 길이에 대한 시작점과 끝점에서의 상태 량은 $\overline{x}=0$ 과 $\overline{x}=1$ 을 식(16),(18)~(20)에 대입하여 찾을 수 있다.

시작점에서의 상태량:
$$\{Z\}_{\overline{x}=0} = [W, \Phi, M, V]_{\overline{x}=0}^{T}$$

 $\{Z\}_{\overline{x}=0} = [C_{ij}]\{A\}, \{A\} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}^{T}$ (21)
끝점에서의 상태량: $\{Z\}_{\overline{x}=1} = [W, \Phi, M, V]_{\overline{x}=1}^{T}$
 $\{Z\}_{\overline{x}=1} = [H_{ij}]\{A\}$ (22)

여기서, 위 첨자 T는 전치행렬이다. 두 상태량 식 (21)과 식 (22)의 관계로부터 식 (23)과 같이 요소 전달행렬을 얻을 수 있다.

$$\{Z\}_{\overline{x}=1} = [T_{ij}]\{Z\}_{\overline{x}=0}, [T_{ij}] = [H_{ij}][C_{ij}]^{-1}$$
 (23)

균열의 영향은 회전스프링으로 표현할 수 있고 길 이를 따라 변화하는 굽힘 강성의 영향을 고려하여 균 열부에서의 전달행렬 표현은 식(24)와 같이 정의될 수 있다⁽⁷⁾.

$$\{Z\}_{\overline{x}=1} = [K_{ij}]\{Z\}_{\overline{x}=0}, [K_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 - K_{\varPhi}^* \ 0 \\ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{bmatrix}$$
(24)

여기서, $K_{\phi}^* = 1/K_{\phi}$ 이고 K_{ϕ} 는 식(25)와 같다.

$$K_{\Phi} = \frac{EI_0(1-\zeta)}{6\pi(1-v^2)h_0f(s)}$$
(25)

또한,
$$s = a/h_0$$
이며 $f(s)$ 는 식(26)과 같다.

$$f(s) = 0.6272s^{2} - 1.04533s^{3} + 4.5948s^{4} - 9.9736s^{5} + 20.2948s^{6} - 33.035s^{7} + 47.1063s^{8} - 40.7556s^{9} + 19.6s^{10}$$
(26)

(29)

무차원 길이 x=0와 x=1사이에 1개의 균열이 존 재한다고 가정하면 균열의 영향이 고려된 전체 전달 행렬은 식(23)과 식(24)를 이용하여 전달행렬의 일반적 인 조립방법에 의하여 식(27)과 같이 표현할 수 있다.

$$\{Z\}_{\overline{x}=L} = \begin{bmatrix} T_{ij}^* \end{bmatrix} \{Z\}_{\overline{x}=0}, \\ \begin{bmatrix} T_{ij}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ij} \end{bmatrix}_2 \begin{bmatrix} K_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ij} \end{bmatrix}_1$$
 (27)

여기서, $[T_{ij}]_1$ 은 $\overline{x}=0$ 부터 균열부까지의 요소전달행 렬, $[T_{ij}]_2$ 는 균열부부터 $\overline{x}=1$ 까지의 요소전달행렬 이다.

식(27)로부터 균열의 영향이 고려된 보 구조물의 고유진동수를 결정할 수 있으며 현재의 연구는 고정-자유 끝 조건만이 고려되었다. 식(28)과 같이 고정단 에서 변위들이 0이 되고,

$$W, \Phi = 0 \tag{28}$$

다음 식 (29)와 같이 자유단에서 힘이 0이 된다.

M, V=0

3. 결과 및 고찰

연구된 방법의 정확도를 검증하기 위하여 문헌에서 토론된 결과들과 비교 되었으며 Table 1에 검증을 위하 여 사용된 재료 물성치가 제시되었다⁽⁶⁾. c=0 일 때 고 정-자유 끝 조건이 고려되었으며 1개의 균열을 가지는 보 구조물에서 균열의 위치는 각각 $\overline{x}=0.2$ 와 $\overline{x}=0.6$ 에서 s=0.5의 균열이 있는 것으로 가정하였다. 비교 결과는 Table 2에 제시되었으며 결과들이 잘 일치하여 제안된 방법의 정확도가 논증되었다. Table 2에서 TMM은 전달행렬을 사용하여 얻어진 결과이고 FEA 는 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 얻어진 결과 이다. 또한, 수치적 결과를 논증하기 위하여 사용된 멱급수에서의 항의 수는 60개이다.

이와 관련하여 테이퍼 비가 c=0.1, 0.3, 0.5일 때 s=0.5를 고려하여 고유진동수에 관한 균열의 영향 을 분석하였고, 특히 c=0.5일 때 s=0.1, 0.3을 추가 로 분석함으로써 동일한 테이퍼 비를 가지는 보 구조 물의 고유진동수에 대한 균열의 크기에 대한 영향을 비교하였다. $\overline{x}=1$ 의 위치에서는 어떤 균열이 존재하 더라도 고유진동수의 영향을 주지 않기 때문에 균열 의 위치는 $\overline{x}=0$ 부터 $\overline{x}=0.9$ 까지 0.1의 간격에서 위

Table 1 Material properties of the beam element

Notation	Description	Value
E	Elastic modulus	200 GPa
ρ	Density of beam material	7850 kg/m ³
L	Length of beam	0.8 m
b_0	Width of cross-section	0.03 m
h_0	Height of cross-section	0.01 m
v	Poisson's ratio	0.3

Table 2 First three natural frequencies of a beam with a single edge crack: c=0 and s=0.5

Cra al-?a	Mada	Natural frequency [Hz]					
locations	no	Descent	Lee and Lee ⁽⁹⁾				
locations	110.	Present	TMM	FEA			
	1	12.25	12.24	12.28			
$\overline{x} = 0.2$	2	79.82	79.81	79.91			
	3	221.00	220.99	221.17			
$\bar{x} = 0.6$	1	12.69	12.69	12.71			
	2	77.06	77.05	77.24			
	3	219.17	219.16	219.35			

치가 변화하였다. 예측된 결과들은 Table 3에 제시되 었다. Table 3에서 보이는 것과 같이 균열의 영향은 균열의 크기와 보의 높이 비(s)의 값이 클수록 고유 진동수에 많은 영향을 준다는 것은 잘 알려진 사실이 다. 고정-자유조건일 때 $\overline{x}=0$ 의 위치에서 균열이 존 재할 때 균열의 영향이 가장 크게 나타난다. s=0.1일 때 고유진동수에 관한 균열의 영향은 주파수 비로 확인했을 때 $\overline{x}=0$ 의 위치에서 1차와 2차는 약 0.9977, 3차는 0.9976으로 균열의 영향이 아주 작은 것을 확인 할 수 있다.

주파수 비(frequency ratio)는 균열이 있는 보 요소 의 고유진동수를 균열이 없는 보요소의 고유진동수로 나눈 값이다.

테이퍼 비 c = 0.1, 0.3, 0.5일 때 테이퍼 비의 변화에 대한 균열의 영향을 분석하기 위하여 세 가지 테이퍼 비 에 대하여 동일한 균열 크기 s = 0.5를 가지는 보 구조 물의 균열의 위치 변화에 대한 고유진동수의 변화를 주 파수 비로 그림으로 나타내었다. Fig. 2는 c = 0.1, Fig. 3 은 c = 0.3, Fig. 4는 c = 0.5일 때 균열의 영향이다. 그 림들은 curve fitting을 사용하여 그렸다.

그림들에서 보여진 것과 같이 x=0에서 1차 고유진

							Natural	frequen	cy [Hz]						
с	S	Mode	Turda ad	Cracked beam											
		110.	Intact	$\overline{x}=0$	x=0.1	x=0.2	x=0.3	x =0.4	x=0.5	x=0.6	x=0.7	x =0.8	x =0.9		
		1	13.157	12.236	12.450	12.641	12.805	12.938	13.036	13.101	13.137	13.152	13.157		
0.1	0.5	2	80.638	75.560	79.093	80.602	80.056	78.594	77.630	77.811	78.898	80.054	80.582		
		3	224.33	211.51	223.50	221.80	217.43	220.68	224.33	219.97	215.19	217.98	223.39		
		1	14.190	13.222	13.437	13.633	13.805	13.946	14.053	14.126	14.167	14.185	14.189		
0.3	0.5	0.5	0.5	2	82.565	77.389	80.929	82.515	82.018	80.529	79.506	79.654	80.757	81.953	82.507
		3	226.24	213.29	225.34	223.78	219.26	222.44	226.24	221.95	217.07	222.44	225.29		
		1	15.636	15.601	15.609	15.616	15.622	15.627	15.631	15.634	15.635	15.636	15.636		
	0.1	2	85.222	85.024	85.162	85.220	85.205	85.156	85.120	85.125	85.163	85.203	85.220		
		3	229.00	228.46	228.97	228.92	228.76	228.87	229.00	228.86	228.69	228.80	228.97		
		1	15.636	15.326	15.427	15.458	15.513	15.558	15.592	15.615	15.628	15.634	15.636		
0.5	0.3	2	85.222	83.507	85.034	85.202	85.072	84.625	84.303	84.349	84.688	85.043	85.205		
-		3	229.00	224.47	228.96	228.30	226.88	227.82	229.00	227.73	226.25	227.16	228.74		
		1	15.636	14.595	14.816	15.022	15.206	15.361	15.480	15.562	15.609	15.630	15.636		
	0.5	2	85.222	79.906	83.483	85.155	84.702	83.172	82.083	82.202	83.331	84.578	85.160		
			3	229.00	215.90	228.03	226.60	221.92	225.04	229.00	224.76	219.78	222.49	228.03	

Table 3 First three natural frequencies of cracked beams: c = 0.1, 0.3, 0.5 and s = 0.1, 0.3, 0.5



Fig. 2 Frequency ratio of the first three natural frequencies of width-tapered beams with respect to the variation of the crack location: c=0.1



Fig. 3 Frequency ratio of the first three natural frequencies of width-tapered beams with respect to the variation of the crack location: c=0.3



Fig. 4 Frequency ratio of the first three natural frequencies of width-tapered beams with respect to the variation of the crack location: c = 0.5

동수일 때 c=0.1에서 균열의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며 테이퍼 비가 작아질수록 눈에 띄는 영향을 보였다. 2차와 3차 고유진동수는 테이퍼 비에 의한 영 향이 유사한 것으로 나타났다.

마지막으로 세 가지 유형의 테이퍼진 보 구조물의 고 유진동수에 관한 균열의 영향을 비교하였다. Fig. 5(a)는 type A로 임의의 위치에 균열을 가지는 길이를 따라 단면의 높이가 선형적으로 변화하는 테이퍼진 보이 고, Fig. 5(b)는 type B로 임의의 위치에 균열을 가지 고 단면의 높이와 폭이 동일한 테이퍼 비를 가지고 선형적으로 변화하는 보 구조물이다. Fig. 1에서 제시



(a) Single tapered beam(type A)



(b) Duble tapered beam(type B)

Fig. 5 Geometry of single and double tapered beams with cracking



Fig. 6 Comparisons between the three type of beams

된 type C는 현재의 연구에서 분석된 단면의 폭이 선 형적으로 변화하는 보 구조물이다.

비교를 위하여 사용된 테이퍼 비는 c=0.5이고 균 열의 깊이는 s=0.5이다. 균열의 위치 변화에 따른 세 가지 유형의 테이퍼진 보에 관한 균열의 영향이 비교 되었고 type A와 B에 대한 결과는 Lee 등(6)에 의해 분 석된 결과를 사용하였다. 비교 결과는 Fig. 6에 나타난 다. 그림에서 보이는 것과 같이 고정단 부근에서 1차 모드에서 균열의 영향에 의하여 type C가 가장 큰 감 소를 보였다. 또한, 2차 모드와 3차 모드에서도 type A 와 B에 비하여 type C에서 균열의 영향에 의한 고유 진동수의 감소폭이 컸으며 고유진동수에서 최대 감소 가 일어나는 균열 위치는 type C 비하여 type A와 B 는 오른쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한, 균열 의 영향이 없는 노드 점 또한 type A와 B는 type C와 비교하여 오른쪽으로 크게 이동하였다. 결과적으로 type A와 B가 균열의 위치에 따라 유사한 경향성을 보였다면 균열의 영향에 의해 type C는 type A와 B와 는 전혀 다른 경향성을 보였다. Type C의 경우 균일한 단면을 가지는 보 구조물과 유사한 균열의 영향을 보 였다. 유사한 개념에서 type B는 type A와 동일한 높 이에서 변화를 가지고 폭만 감소되었기 때문에 두 가 지 타입이 유사한 경향성을 보인 것으로 분석되었다.

4. 결 론

폭이 테이퍼진 보 구조물의 고유진동수에 관한 균 열의 영향을 분석할 수 있는 수치적 방법이 전달행렬 법을 사용하여 개발되었다. 이 방법의 정확도는 문헌 에서 검토된 결과들과 비교함으로써 논증하였고 다음 과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 균열의 위치 변화에 따른 보 구조물의 고유진 동수에 관한 균열의 영향을 검토하였고 1차, 2차, 3차 고유진동수 모두 x=0에서 균열의 영향에 의해 가장 큰 감소를 보였다.

(2) 테이퍼 비 c=0.1, c=0.3과 c=0.5의 조건을 가질 때 x=0에서 1차 고유진동수의 경우 테이퍼 비의 변화에 따라 눈에 띄는 변화를 보였으나 2차와 3차 고 유진동수는 유사한 변화를 보이는 것으로 분석되었다.

(3) 세 가지 유형의 테이퍼진 보의 고유진동수에 대한 균열의 영향을 비교한 결과 type A와 B는 유사한 경향성을 가지고 변화하는 것을 볼 수 있으나 type C는 균열의 영향이 없는 노드 점의 위치나 균열의 영향에 의한 고유진동수의 감소폭에서 다른 두 가지 유형의 테이퍼 보와는 다른 경향성을 가지고 변화하였다.

후 기

이 연구는 경기도의 경기도 지역협력연구센터 사 업의 일환으로 수행하였음(GRRC경기2020-B02, 혁 신형 지능제조시스템 연구).

References

(1) Ryu, B. J., Yim, K. B., Yoon, C. S. and Ryu, D. H., 2000, Vibration and Stability of Tapered Timoshenko Beams on Two-parameter Elastic Foundations, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 1075~1082.

(2) Wang, Z. and Li, R., 2018, Transverse Vibration of Rotating Tapered Cantilever Beam with Hollow Circular Cross-section, Shock and Vibration, Vol. 2018, 1056397.

(3) Lee, J. W., Kim, J. H. and Lee, J. Y., 2015, Exact Solutions for Bending Vibration of Beam with Linearly Reduced Width along Its Length, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 420–425.

(4) Chaudhari, T. D. and Maiti, S. K., 1999, Modelling of Transverse Vibration of Beam of Linearly Variable Depth with Edge Crack, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 63, No. 4, pp. 425~445.

(5) Ma, Y., Du, X., Wu, J., Chen, G. and Yang, F., 2020, Natural Vibration of a Non-uniform Beam with Multiple Transverse Cracks, Journal of the Brazillian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 42, No. 4, pp. 1~12.

(6) Lee, J. W. and Lee, J. Y., 2018, A Transfer Matrix Method for In-plane Bending Vibrations of Tapered Beams with Axial Force and Multiple Edge Cracks, Structrual Engineering and Mechanics, Vol. 66, No. 1, pp. 125~138.

(7) Chondros, T. G., Dimarogonas, A. D. and Yao, J., 1998, A Continuous Cracked Beam Vibration Theory, Journal of Sound Vibration, Vol. 215, No. 1, pp. 17~34.

(8) Park, H. W. and Lim, T. J., 2020, A Closed-form Frequency Equation of an Arbitrarily Supportedbeam with a Transverse Open Crack considering Axial-bending Modal Coupling, Journal of Sound and Vibration, Vol. 477, 115336.

(9) Lee, J. W. and Lee, J. Y., 2017, In-plane Bending Vibration Analysis of a Rotating Beam with Multiple Edge Cracks by Using the Transfer Matrix Method, Meccanica, Vol. 52, pp. 1143~1157.

(10) Kempe, M. D., Morse, J., Eafanti, J., Julien, S., Wan, K. et al., 2021, Measurement of Crack Length in Width Tapered Beam Experiments, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 35, No. 4, pp. 357~374.



Jung Woo Lee received B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Kyonggi University in 2002, 2004, and 2017, respectively. He is currently an assistant professor at the Department of Mechanical System Engineering of Kyonggi University.

His research interests are in structural vibration, composite structures, and the transfer matrix method.

풋댐퍼가 적용된 경량착륙장치 기반 달착륙선 모사체 개발 및 검증

Development and Validation of a Lunar Lander Demonstrator with Foot-damper based Landing Gears

최 한 솔*·김 영 배*·정 현 재**·박 정 훈*·김 현***·임 재 혁[†] Han-Sol Choi^{*}, Yeong-Bae Kim^{*}, Hyun-Jae Jeong^{**}, Jeong-Hoon Park^{*}, Hyeon Kim^{***} and Jae Hyuk Lim[†]

(Received July 13, 2021 ; Revised August 18, 2021 ; Accepted August 18, 2021)

Key Words:Lunar Lander Demonstrator(달착륙선 모사체), Landing Stability(착륙안정성), Shock Absorber (충격 흡수재), Aluminum Honeycomb(알루미늄 허니콤), Foot-damper(픗댐퍼)

ABSTRACT

In this work, we propose a lunar lander demonstrator with lightweight landing gears combined with foot-dampers to absorb landing impact loads and improve landing stability. We select an appropriate aluminum honeycomb and foot-damper model through a set of compression tests and analysis. A set of landing tests with the lunar lander demonstrator is conducted to verify the landing stability considering various ground conditions. In addition, load cells and accelerometers are installed to measure the impact load and shock acceleration on the landing gear to investigate quantitative shock absorption performance. Our test results show that the developed landing gears successfully attenuate the shock and improve landing stability, meeting the design requirements.

1. 서 론

최근 미국, 러시아, 중국, 유럽, 일본, 인도의 우주 강대국에서는 우주개발에 적극적으로 참여하여 미개 척지인 달의 자원 탐사 임무를 적극적으로 추진하고 있다. 우리나라는 2018년도에 '제3차 우주개발 진흥 기본계획'을 수립하여 달 탐사 사업을 추진하고 있다. 제 1단계로 2022년 8월 한국형 달궤도선이 팰컨9호 에 탑재되어 발사될 예정이며, 2단계로 2030년까지 달착륙선을 발사하는 것을 목표로 하고 있다⁽¹⁾. 이에 달 탐사 및 후속탐사 준비를 위한 우주 탐사 기술력 습득이 필요하며 달착륙선 모사체의 착륙시험 및 해 석을 통한 착륙안정성을 검증하는 연구도 활발하게 수행되고 있다. 현재 달착륙선의 달 표면 착륙개념은 달 중력권 내부에 들어오면 추력기를 통해 급감속 후 지상표면 약 2.75 m 높이에서 정지비행을 수행한다. 이후 연료를 모두 소비하여 추력기를 멈추고, 자유낙

[†] Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University, Professor E-mail: jaehyuklim@jbnu.ac.kr

^{*} Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University, Student

^{**} Agency for Defense Development, Researcher

^{***} CAMTIC Advanced Mechatronics Technology Institute for Commercialization, Senior Researcher

[#] A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2021 Annual Spring Conference

[‡] Recommended by Editor Jae Young Kang

[©] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

하하여 달 표면에 착륙하게 된다. 착륙 시, 달착륙선 이 전복되어 임무를 수행할 수 없는 불안정상태가 되 거나 과도한 미끄럼이 발생하여 달 표면에 존재하는 분화구나 암석에 부딪혀 전복이나 달착륙선에 파손을 일으킬 수 있다. 이를 방지하기 위해 가볍고 충격을 충분히 흡수할 수 있는 착륙장치의 개발이 필수적이 다. 착륙장치의 충격흡수 매커니즘은 달의 높은 진공 및 온도환경(-170 ℃ ~ 130 ℃)에서도 작동해야 하므 로 지상에서 널리 사용되는 유압식이나 전자기식 충 격흡수방법을 사용하기 어렵다. 따라서 우주 임무에 는 충격흡수를 위해 가볍고 에너지 흡수량이 많은 알 루미늄 허니콤이 널리 사용되고 있다⁽²⁾. 알루미늄 허 니콤은 충격에너지가 가해지면 소성변형을 통해 충격 에너지를 흡수시키기 때문에 착륙과 같은 일회성 임 무에서 영구변형이 있어도 임무 수행에 문제가 없다⁽³⁾.

착륙장치 구조는 Fig. 1과 같이 충격흡수재 적용 위 치에 따라 풋패드(foot-pad) 방식과 풋댐퍼(foot-damper) 방식으로 구분할 수 있다. 풋패드 방식은 주 스트럿에 만 충격흡수재가 들어있기 때문에 착륙 후 충격에 의 해 주 스트럿 내부의 알루미늄 허니콤에 압축변형이 발생하여 착륙선의 높이가 낮아지면 달착륙선 하단에 설치된 추력기와 지면 사이의 간섭이 발생하여 사고 발생 확률이 높아진다. 이와 유사한 풋댐퍼 방식은 주 스트럿 및 착륙장치 하단에 충격흡수재가 설치된다. 착륙 시, 1차적으로 착륙장치 하단의 충격흡수재가 충 격을 흡수하고 나머지 충격에너지를 주 스트럿에서 흡수하게 된다. 풋패드 방식 대비 착륙 시, 주 스트럿 내부의 알루미늄 허니콤 충격흡수량이 적어 스트로크 길이가 짧아, 추력기와 지면 사이의 간섭 발생 확 률이 낮은 장점이 있다⁽⁴⁾. 따라서 소형 달착륙선인 미국 의 Surveyor호⁽⁵⁾나 인도의 Chandrayaan-2호⁽⁶⁾에 채택되 었다.

이외에도 관련된 연구로 국내에서 Pham 등은⁽²⁾ 달 착륙시 착륙선이 미끄러지거나 전복되는 현상을 준정 적평형방정식을 통해 유도하고 이에 따른 판정식을 제안하였다. Yang 등은⁽⁷⁾ 달 표면의 특성을 고려하여 달착륙선의 착륙거동을 해석하고 달 표면의 영향을 연구하였다. Son 등은⁽⁸⁾ 한국형 달탐사선 구조모델 설계에 관한 연구를 수행하여 발사중량을 고려한 달 착륙선 구조체의 예비 설계를 통해, 안정한 착륙에 유리한 구조를 갖는 충격흡수재 및 착륙장치 설계 기 술을 확보하였다. 국외에서는 Liu 등은⁽⁹⁾ 달 표면에서 안정적인 착륙 을 위해 달착륙선의 착륙 동역학 해석 모델을 만들고, 착륙해석을 수행하여 실험계획법과 반응 표면법을 통 해 최악의 착륙조건 및 안전한 착륙을 위한 초기속도 의 경계를 결정하였다. Yue 등은⁽¹⁰⁾ 다양한 착륙환경 에서 착륙안정성을 높이기 위해 주 스트럿과 부 스트 럿에 각각 이중 챔버 및 단일 챔버를 적용한 댐퍼 기 반의 착륙장치를 개발하였다. 제안한 모델을 통해 착 륙해석을 수행하고 실물모델의 낙하시험을 수행하여 충격흡수 적절성을 검증하였다.

이 논문에서는 풋댐퍼 기반의 착륙장치를 이용한 달착륙선 모사체를 설계 및 개발하였다. 성능검증을 위해 착륙 시 구조체의 안전을 위한 착륙요구조건을 설정하고, 착륙시험 및 수행결과를 요구조건과 비교 하여 설계를 최종 검토하였다.

2. 달착륙선 착륙장치 설계

2.1 착륙장치 설계

착륙장치는 착륙 시 발생하는 충격하중을 알루미 늄 허니콤으로 원활히 흡수하기 위해 과도구속이 발 생하지 않고 알루미늄 허니콤의 압축 스트로크 (stroke)를 발생시켜 본체에 가해지는 충격하중을 최 소화해야 한다. 또한 착륙장치의 풋댐퍼는 장착된 알 루미늄 허니콤의 단면을 균일하게 압축시킬 수 있어 야 하며 반복적인 착륙시험을 위해 허니콤의 교체가 용이해야 한다. 최종적으로 달착륙선 모사체를 되튐 (rebound)이나 전복(tip-over) 없이 안정적으로 착륙 시킬 수 있어야 한다.

이를 만족하기 위해 착륙장치는 Fig. 1(b)와 같이 주 스트럿 1개, 부 스트럿 2개 및 풋댐퍼로 설계하였 다. 주 스트럿 내부의 스트로크 및 풋댐퍼 하단에 알 루미늄 허니콤을 설치하며 각 스트럿 사이의 조인트 에 흑연 부싱, 볼베어링 등을 적용하여 자유도를 확 보하였다.

2.2 알루미늄 허니콤 선정

알루미늄 허니콤은 충격하중이 가해지면 소성변형을 일으키며 일정하게 충격을 흡수한다. 최대 충격흡수능 력은 Fig. 2에 표시된 압축강도 아래의 면적과 같다.

이 논문에서 사용한 알루미늄 허니콤은 해외 항공 우주용으로 사용되는 Hexcel사와 국내 산업용으로



Fig. 1 Configuration of two landing gears of the lunar landers

사용되는 홍성산업 사의 알루미늄 허니콤 중 착륙 시 발생하는 충격에너지를 계산하여 선정하였다⁽¹¹⁻¹²⁾. 달착륙선의 충격에너지는 식(1)과 같이 나타낼 수 있 다⁽¹³⁾. 왼쪽 항은 달착륙선의 운동에너지이고, 오른쪽 항은 4개의 다리에서 알루미늄 허니콤이 흡수하는 충 격흡수에너지이다.

$$\frac{1}{2}mV^2 = 4 \times (\sigma_{cr} \times A_{fd} \times s_{fd} + \sigma_{cr} \times A_{ps} \times s_{ps})$$
(1)

여기서 m은 달착륙선 모사체의 질량, V는 수직착륙 속도, σ_{cr}는 알루미늄 허니콤의 압축강도, A_{fd}와 A_{ps}는 각각 풋댐퍼와 주 스트럿의 압축단면적, s_{fd}와 s_{ps}는 각각 풋댐퍼와 주 스트럿 압축길이를 의미한다. 따라 서, m은 모사체 설계무게인 81.7 kg이고 V는 3 m/s를 적용하였다⁽¹⁴⁾.

따라서 달착륙선 착륙 시 필요한 알루미늄 허니콤 의 압축강도는 0.217 MPa으로 계산되었으며 실제 적용은 이보다 작은 0.17 MPa의 압축강도를 갖는 HCC-3.75-3/4-3003를 선정하였다(Fig. 3 참조).

풋댐퍼와 주 스트럿에 동일한 알루미늄 허니콤을 적용하였으며, 풋댐퍼와 주 스트럿의 단면적을 조절 하여 큰 충격하중은 풋댐퍼에서 흡수하고, 낮은 충격 하중은 주 스트럿에서 충격하중을 흡수할 수 있도록 하였다.

2.3 풋댐퍼 설계 및 검증

2.2절에서 개념 설계한 풋댐퍼 상판의 형상을 최적



Fig. 2 Shock absorption capacity of aluminum honeycomb

화하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 풋댐퍼 상판의 유한요소 모델을 생성하고 하단에 CRIII-2.6-5/32-5052 알루미 늄 허니콤을 적용하여 압축해석을 수행하였다. Fig. 4 (b)~(c)와 같이 풋댐퍼 상판의 두께 및 리브 개수에 따라 상판의 왜곡률을 계산하여 최적화된 모델을 도 출하였다. 왜곡률은 풋댐퍼 유한요소모델의 조인트 연결부 하단(node 0), 리브의 끝단(node 1), 리브 끝 단의 사이 지점(node 2)의 변위(*d_n*)를 식(2)~(3)에 대입하여 계산하였다.

$$D_1 = \frac{d_1 - d_0}{50} \times 100 \ (\%) \tag{2}$$

$$D_2 = \frac{d_2 - d_0}{50} \times 100 \ (\%) \tag{3}$$

압축해석 결과, Table 1과 같이 상판 두께가 증가하 거나 리브 개수가 늘어남에 따라 왜곡률 D₁, D₂가 줄



(b) HCC-3.75-3/4-3003



Fig. 3 Stress-strain curves of aluminum honeycomb

어드는 것을 확인하였다. 그러나 질량이 case (a) 대비 2배 이상으로 증가하였다. 따라서 case (a) 대비 질량 증가량이 크지 않고 왜곡률이 4% 이하로 소성변형이 발생하지 않은 case (f)를 최적모델로 선택하였다.

따라서 풋댐퍼는 Fig. 5와 같은 case (f)의 치수로 재질은 S45C를 사용하여 제작하였다. 그리고 풋댐 퍼 상판의 안정성을 검증하기 위해 압축시험을 수행 하였으며, 그 결과 풋댐퍼 상판에 소성변형이 발생 하지 않고 균일하게 압축하는 것을 확인하였다.



(a) Configuration of the foot-damper



(b) Variation of the thickness



(c) Variation of the number of ribs

Fig. 4 Trade-off study of the foot-damper

Table 1 Distortion ratio of the upper plates

Case	R [mm]	t [mm]	Rib [ea]	D ₁ [%]	D ₂ [%]	Mass [kg]
(a)	75	3	6	5.79	6.07	0.720
(b)	75	5	6	4.26	4.54	0.984
(c)	75	7	6	3.45	3.79	1.248
(d)	75	10	6	2.45	2.48	1.644
(e)	75	3	8	4.01	4.33	0.804
(f)	75	5	8	3.51	3.72	1.152

3. 달착륙선 모사체 착륙시험

3.1 달착륙선 시험모델 설계 및 제작

2장에서 설계한 착륙장치 4개 및 상부 프레임을 결 합하여 달착륙선 모사체를 설계하고 Fig. 6과 같은 실 물모델을 제작하였다. 달착륙선 모사체의 부품 및 전 체 무게는 Table 2와 같다. 풋댐퍼에 적용되는 알루미 늄 허니콤의 치수는 반경 53 mm, 높이 33 mm이고, 주 스트럿에 적용되는 알루미늄 허니콤의 치수는 반 경 22.5 mm, 높이 132 mm이다.

3.2 착륙시험 요구조건

달착륙선 모사체의 착륙시험을 수행하기 위해



(a) Foot-damper



(b) Honeycomb

Fig. 5 Test model of foot-damper



Fig. 6 Lunar lander demonstrator

Table 2 Mass property of lunar lander demonstrator

Parts	Primary strut	Secondary strut	Foot damper	Body frame	Total
Quantity [EA]	4	8	1	4	1
Mass [kg]	11.66	11.55	6.47	52.02	81.70

Table 3과 같이 착륙시험 요구조건을 설정하였다. 착 륙 시 요구되는 착륙속도는 한국형 달착륙선의 착륙 속도를 참고하여 수평속도 1 m/s, 수직속도 3 m/s로

demonstrator	
Condition	Reference
Horizontal velocity	1 m/sec
Vertical velocity	3 m/sec
SRS at body and landing gear interface	≤ 1000 G
Shock absorbing ratio	≥ 50 %

Table 3 Design requirement of the lunar lander



Fig. 7 Configuration of the pendulum model

설정하였다⁽¹⁴⁾. 또한 착륙 시 본체와 착륙장치의 경계 면에서 발생하는 충격은 SRS(충격 흡수 스펙트럼) 분석결과 1000 G 이하이며, 첫 충격을 받는 착륙장치 의 충격흡수율은 50% 이상이어야 한다.

먼저 달착륙선의 수직속도 요구조건을 만족하기 위 해 자유낙하운동을 이용하여 낙하높이를 결정하였다. 수직속도를 구하는 식은 식(4)과 같으며 지구의 중력 가속도에서는 지표면으로부터 458.7 mm 위에서 자유 낙하하면 수직속도 3 m/s로 착륙할 수 있음을 확인하 였다.

 $v = \sqrt{2gH} \tag{4}$

여기서, v는 수직속도, g는 지구 중력가속도, H는 달 착륙선 모사체의 낙하높이를 의미한다.

또한, 요구 수평속도인 1 m/s를 구현하기 위해 Fig. 7 과 같이 진자 운동식을 통해 낙하시작 지점을 구하였 다. 진자 운동식은 식(5)와 같으며, 낙하지점(x=0, z=0)을 기준으로 시작점(x=342.9 mm, z=51.0 mm)의 위치를 구하였다.

$$V_H = \sqrt{g(L - L\cos\theta)} \tag{5}$$



Fig. 8 Test setup

여기서, V_H는 수평속도, g는 지구 중력가속도, L은 로프의 길이, θ는 진자운동의 수평방향 시작 각도를 의미한다.

착륙 시 달착륙선 모사체의 수직/수평 방향 착륙 속도를 검증하기 위해 디지털 카메라를 이용하였다. 착륙과정의 영상을 기록한 후 낙하 시작과 착륙 후 사이의 프레임 차이를 측정하여 비행시간을 계산하였 다. 디지털 카메라의 프레임 설정은 초당 240 frame 이며, 비행시간 계산을 위한 식은 식(6)와 같다.

 $Flight time = \frac{End frame - Initial frame}{240 \, \text{fps}}$ (6)

착륙 시점에서 충격하중과 가속도 분석을 위해 Fig. 8과 같이 착륙장치에 로드셀과 가속도 센서를 설 치하였다. 로드셀은 Leg 1과 Leg 3의 풋댐퍼 상단 (input)과 주 스트럿 상단(output)에 설치하였고, 가속 도 센서는 가장 먼저 착륙하는 착륙장치의 풋댐퍼 상 단 및 주 스트럿 상단에 설치하였다. 충격하중과 가 속도 데이터를 획득하기 위해 측정기용 DAQ와 노트 북을 사용하였다. 로드셀은 Dytran사의 1061V3와 1061V4를 사용하였으며, 가속도 센서는 PCB사의 M353B15를 사용하였다.

3.3 착륙시험 수행

착륙시험은 Table 4와 같이 총 7개의 시험을 수행 하였으며 지면에 따른 충격흡수성능을 확인하기 위해

Table 4 Test cases of landing test

Test ID	Ground type	Landing type	Vertical velocity	Horizontal velocity	Landing success [O/X]
Case 1	Steel plate	2-2	3.31	-	0
Case 2	Steel plate (20° tilt)	2-2	3.59	-	0
Case 3	Steel plate	2-2	2.66	0.81	0
Case 4	Steel plate	1-2-1	3.15	0.81	0
Case 5	Jumoonjin sand	2-2	3.32	-	0
Case 6	Jumoonjin sand	2-2	3.35	1.13	0
Case 7	Steel plate +Jumoonjin sand	2-2	3.47	_	0



(0) 1-2-1 landing

Fig. 9 Landing configuration of landing test

강철판(steel plate) 및 달토양과 기계적 물성이 유사 한 주문진 표준사(Jumoonjin sand)위에서 시험을 수 행하였다⁽¹⁵⁾. 요구되는 수평/수직 속도와 시험결과 사 이에 약간의 오차가 발생하였지만 요구되는 착륙속도 를 적절히 구현된 것으로 판단하였다.

주문진 표준사는 지면에 20 cm 두께로 적층하였다. 또한 착륙자세에 따른 충격흡수성능을 확인하기 위해 Fig. 9와 같이 2-2 착륙과 1-2-1 착륙을 수행하였으



Fig. 10 Landing test with 20° tilt ground



(a) Initial landing position



(c) 2^{nd} touchdown

며, 지면 경사각에 따른 충격흡수성능을 확인하기 위 해 Fig. 10과 같이 지면이 20°의 기울기를 갖는 가혹 한 환경에서 착륙시험을 수행하였다.

착륙시험의 과정은 Fig. 11과 같고, 모든 시험에서 착륙선의 전복(tip-over) 및 되튐현상이 없이 안전하 게 착륙하는 것을 확인하였다. 그리고 Fig. 12와 같이 착륙장치에서 발생하는 최대충격하중 및 최대가속도 가 입력 대비 출력지점에서 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

착륙 시 풋댐퍼 상단과 주 스트럿 상단에서 획득한 하중 데이터를 확인한 결과, Table 5와 같이 입력하중 대비 출력 하중이 최대 86.21 %, 평균적으로 60.30 % 가량 감소하여 요구조건 50 %을 상회하는 것을 확인 하였다.

3.4 SRS(Shock Response Spectrum) 분석

착륙에 의해 발생하는 충격하중이 구조체에 끼치는 영향을 분석하기 위해 SRS 분석을 수행하였다⁽¹⁶⁾.



(b) 1st touchdown



(d) Final landing

Fig. 11 Landing process of the lunar lander demonstrator (case 7)



Fig. 12 Test result for case 1

Table 5 Test results according to test ID

T	T (*	Maximum	load [N]	Shock
Test ID	Location	Input	Output	absorbing ratio
Casa 1	Leg 1	5302.2	2080.5	60.76 %
Case 1	Leg 3	4745.18	1865.4	60.69 %
Casa 2	Leg 1	5532.4	2018.9	63.51 %
Case 2	Leg 3	3977.9	1801.8	54.70 %
C 2	Leg 1	14 786.8	2758.7	81.34 %
Case 5	Leg 3	4626.8	2099.6	54.62 %
Casa 4	Leg 1	17 418.1	2401.8	86.21 %
Case 4	Leg 3	5777.3	2805.2	51.44 %
C 5	Leg 1	10415	2314.0	77.78 %
Case 5	Leg 3	2555.4	2098.5	17.88 %
Casa 6	Leg 1	4679.1	1584.9	66.13 %
Case o	Leg 3	1797.2	1141.7	36.47 %
Case 7	Leg 1	7524.7	1928.1	74.38 %
	Leg 3	3911.8	1631.5	58.29 %
	60.30 %			



Fig. 13 Comparison of SRS between input and output points (case 1)

Table 6 SRS analysis results

Test ID	Logation	Peak acceleration [G]			
Test ID	Location	Input	Output		
Case 1	Leg 3	391.45	103.2		
Case 2	Leg 3	507.18	87.876		
Case 3	Leg 3	256.18	128.05		
Case 4	Leg 3	451.15	90.88		
Case 5	Leg 3	295.19	136.45		
Case 6	Leg 1	89.66	78.78		
Case 7	Leg 1	115.97	76.86		

SRS 분석은 tom-irvine이 제안한 smallwood 알고리즘 을 사용하였으며 Q factor(quality factor)는 10을 사용 하였다. Smallwood 알고리즘은 기존의 디지털 필터링 방법을 사용한 kelly-richman 알고리즘 대비 높은 주 파수에서 오차가 적다는 장점이 있다. Q factor는 10 을 사용하였다⁽¹⁷⁾. SRS 분석을 통해 Fig. 13과 같이 주 파수에 따른 최대가속도의 절대값을 산출하고 Table 6 에 정리하였다. 분석결과, 강체 표면 조건인 case 1의 경우 입력지점에서 최대 충격가속도가 391.45 G, 출력 지점에서 103.20 G가 발생하였다. 토양조건인 case 5 에서는 SRS의 최대값이 295.19 G로 391.45 G보다 작 있으며 이러한 이유는 토양의 낮은 지반계수로 인해 충격을 흡수해주기 때문으로 판단된다. 충격발생지점 에서 충분히 떨어진 출력지점에서는 지면조건과 크게 상관없이 매우 낮은 100 G 수준으로 전장품에 손상이 발생할 수 있는 최대 가속도 1000 G 미만이므로 착륙 장치를 통해 전장품을 안전하게 보호할 수 있다고 판 단되었다⁽¹⁸⁾.

4. 결 론

이 연구에서는 달착륙선 모사체에 적용이 가능한 풋댐퍼 기반 경량착륙장치 개발하고 검증하였다. 먼 저 풋댐퍼를 설계하여 유한요소모델을 통한 압축해석 및 압축시험을 통해 선정한 알루미늄 허니콤을 풋댐 퍼 상판의 소성변형 없이 균일하게 압축할 수 있는 풋댐퍼 모델을 설계하였다. 이를 착륙장치 4개 및 상 부 프레임을 결합하여 전체모델을 설계하였고, 실물 모델로 제작하여 착륙시험을 수행하였다. 착륙시험은 지면화경, 착륙자세 및 수평속도 유무에 따라 수행되 었다. 모든 착륙자세에서 안정적으로 착륙에 성공하 였으며 충격하중을 먼저 받는 착륙장치에서 입력하중 대비 충격하중이 평균적으로 60% 가량 흡수하는 것 을 확인하였다. 따라서 착륙요구조건인 충격흡수율 50 %를 적절히 만족하는 것으로 판단된다. 또한 본체 에 가해지는 영향을 분석하기 위해 SRS 분석을 수행 하였다. 확인 결과 1000 G 미만으로 착륙 시, 본체에 있는 전장품의 손상 없이 안전하게 착륙할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으 로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(No. 2018M1A3A3A02065478).

References

(1) Song, E. J., Park, C. S., Cho, S. B. and Roh, W. R., 2009, Mission Design for a Lunar Orbiter Launched by KSLV-II, Aerospace Engineering and Technology,

Vol. 8, No. 1, pp. 108~116.

(2) Pham, V. L., Zhao, J., Goo, N. S., Lim, J. H. and Hwang, D. S., 2013, Landing Stability Simulation of a 1/6 Lunar Module with Aluminum Honeycomb Dampers, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 14, No. 4, pp. 356~368.

(3) Kim, W. S., Kim, S. W. and Hwang, D. S., 2011, Development Trend of Shock-absorbing Landing Gear for Lunar Lander, Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 9, No. 1, pp. 119~129.

(4) Kim, Y. B., Jeong, H. J., Lim, J. H., Jang, I. S. and Kim, J. W., 2018, Overview of Shock Absorber of Lunar Lander Using Foot Damper, Proceedings of the KSAS Annual Autumn Conference, pp. 710~711.

(5) NASA, 1969, Technical Report: Surveyor Program Result, NASA SP-184.

(6) Sundararaian, V., 2018, Overview and Technical Architecture of India's Chandrayaan-2 Mission to the Moon, AIAA Aerospace Sciences Meeting, pp. 2178~2189.

(7) Yang, S. S., Jo, J. Y., Kim, J. H., Lim, J. H. and Kim, S. H., 2012, Landing Behaviors of Lunar Lander Considering the Effect of Lunar Regolith, Proceedings of the KSAS Annual Autumn Conference, pp. 1676~1681.

(8) Son, T. J., Na, K. S., Kim, J. W., Lim, J. H. and Kim, K. W., 2013, Design of a Structural Model for Korean Lunar Explorer, Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 41, No. 5, pp. $366 \sim 372$.

(9) Liu, Y., Song, S., Li, M. and Wang, C., 2017, Landing Stability Analysis for Lunar Landers Using Computer Simulation Experiments, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 14, No. 6, pp. 1729~1740.

(10) Yue, S., Nie, H., Zhang, M., Wei, X. and Gan, S., 2018, Design and Landing Dynamic Analysis of Reusable Landing Leg for a Near-space Manned Capsule, Acta Astronautica, Vol. 147, pp. $9 \sim 26$.

(11) Hexweb, T. M., 1999, Honeycomb Attributes and Properties, Hexcel Composites.

(12) Hongseong Industrial Company, 2021, Aluminum Honeycomb Core, http://www.architecks.com/ kor/prod/rail.php?code=MIN1231691882. (accessed 10, 15, 2021) (13) Jeong, H. J., Lim, J. H. and Kim, J. W., 2018, Evaluation of Landing Stability of Lunar Lander Considering Various Landing Conditions, Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 46, No. 2, pp. 124~132.

(14) Kim, J. W., 2017, Moon Lander Configuration Study, Aerospace Industry Technology Trend, Vol. 15, No. 2, pp. 175~181.

(15) Jeong, H. J., Lim, J. H. and Kim, J. W., 2019, Development of a Coarse Lunar Soil Model Using Discrete Element Method, Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 47, No. 1, pp. 26~34.

(16) Kim, I., Koo, S. and Hwang, C., 2004, Determination of Shock Response Spectrum Using FRF of Statistical Energy Analysis Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 551~560.

(17) Sun, W., Su, Q., Yuan, H. and Liu, L., 2020, Calculation and Characteristic Analysis on Different Types of Shock Response Spectrum, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1676. 012236.

(18) NASA, 2019, NASA TECHNICAL STANDARD, NASA-STD-5002A, pp. 6~44.



Han-Sol Choi received a B.S degree in Mechanical Engineering from Jeonbuk National University in 2019. He is currently a master's candidate as a graduate student. His research interests include finite element methods, multi-body dy-

namics, shock-absorber, and deployment mechanisms.



Jae Hyuk Lim received a B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 2000 and a Master and Ph.D. degree from KAIST in 2002 and 2006. He is currently an associate professor in the Mechanical Engineering depart-

ment at Jeonbuk National University. His research interests include attenuation of shock and vibration, multi-body dynamics, finite element methods, and machine learning applications.

영상 기반 딥러닝을 통한 배관 누설 가시화 기술

Video-based Deep Learning for Pipe Leakage Visualization

서 호 건*·정 변 영*·전 지 현*·최 영 철[†]

Hogeon Seo*, Byeonyeong Jeong*, Jihyun Jun* and Young-Chul Choi*

(Received July 13, 2021 ; Revised August 19, 2021 ; Accepted August 27, 2021)

Key Words: Video(영상), Deep Learning(딥러닝), Pipe Leakage(배관 누설), Visualization(가시화)

ABSTRACT

Piping is a part of industrial structures that acts like human blood vessels. Since pipe leakages are a threat to the integrity of a structure, it is one of the major monitoring targets. If inspectors are unaware of leakages, access to pipes for inspection can cause serious injury to the human body. Therefore, it is necessary to operate a monitoring system that detects pipe leakage regions for the safety of not only facilities but also inspectors. In this study, a multi-kernel neural network was introduced to visualize the pipe leakage regions through deep learning of the characteristics of pixel-wise color variation in normal and leakage regions from camera footage. Furthermore, we present the results of properly adjusting the visualization properties through an analysis of precision and recall according to the threshold for leakage judgment based on the output of deep learning. The results show that leakage areas can be visualized in accordance with the leakage diagnosis environment and purpose by adjusting the threshold.

1. 서 론

발전소를 비롯한 산업구조물에 있어서 배관은 사람 의 혈관과 같은 역할을 하는 설비로써 누설이 발생하면 구조물 건전성에 치명적인 위협이 되므로 주요 모니터 링 대상에 해당한다^(1,2). 특히, 고온의 고압가스가 통과 하는 배관의 경우, 미세한 결함을 통해서 누설이 발생 했을 시 이를 육안으로 확인하기 곤란하다. 이를 인지 하지 못한 채로 배관 검사를 위해 접근하게 되면 인체 에 심각한 상해가 발생할 수 있다. 따라서 설비뿐만 아 니라 검사자의 안전성을 향상하기 위해서도 배관 누설 영역을 탐지하는 시스템을 운용하는 것이 필요하다. 이

* Member, Korea Atomic Energy Research Institute, Senior Researcher

를 활용해 검사자가 직관적으로 누설 영역을 식별할 수 있으면, 더욱 안전하게 적절한 조처를 할 수 있다.

배관 누설을 탐지하기 위한 기술로서 AE(acoustic emission) 센서를^(3,4) 이용한 누설 감지 기술이 주로 이용되고 있으며, 온도나 습도, 유량 등을 측정하는 다양한 센서를 이용한 누설 검출 기술 또한 연구되고 있다. 그러나 AE 센서를 이용하여 누설 탐지를 수행 하는 경우 주변 환경에 의한 영향을 크게 받기 때문 에 이를 해소하는 방안들이 필요하며, 대규모 배관 설비에 적용하기 위해서는 다수의 센서를 사용해야 하므로 비용 부담 또한 크다.

이러한 단점들을 해결하기 위하여 카메라 영상을 활용한 배관 누설 탐지 기술에 관한 연구가 수행되고

‡ Recommended by Editor Cheol Ung Cheong

[†] Corresponding Author; Member, Korea Atomic Energy Research Institute, Principal Researcher E-mail: cyc@kaeri.re.kr

[#] A part of this paper was presented at the KSNVE 2021 Annual Spring Conference

[©] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

있다⁽⁵⁻⁸⁾. 카메라를 이용한 배관 누설 탐지 기술은 수 집된 영상으로부터 누설부의 증기 및 열기에 의해 누 설부 주변이 광학적으로 왜곡되는 특징을 분석하여 누설을 진단한다. 카메라를 이용한 배관 누설 탐지 기 술은 센서를 이용한 기술 대비 광범위한 영역의 모니 터링이 가능하다는 측면에서 대규모 배관 설비 모니 터링에 효용성 크다는 장점이 있으며, 원거리 측정이 가능하므로 검사자의 안전성 보장 면에서도 유리하다. 이러한 장점에도 불구하고 카메라를 이용한 배관 누설 진단 기술은 누설에 의한 증기 및 열기의 반투 명한 특성으로 영상 분석이 까다롭고⁽⁶⁾, 진동 및 조도 와 같은 주변 환경 조건에 따라서 진단 정확도가 영 향을 받기 때문에⁽⁷⁾ 실제 현장 적용을 위해서는 환경 조건 변화와 요구되는 진단 수준에 부합할 수 있는 진단 기술의 개발이 필요하다.

합성곱 신경망(convolutional neural network)은 영 상 분석 분야에서 탁월한 성능을 나타내는 딥러닝 모 델이며⁽⁹⁾, 최근 EfficientNet-L2⁽¹⁰⁾를 활용한 Meta Pseudo Labels⁽¹¹⁾를 통해 ImageNet⁽¹²⁾ 데이터셋에서 90.2 %의 Top-1 Accuracy를 달성하였다. 각 합성곱 커널(kernel)은 이미지의 특징을 학습하고, 그러한 커 널들이 계층적으로 쌓여 심층 신경망이 구성된다. 일 반적으로 각 계층(layer)은 동일 크기의 커널들로 구 성되지만, 데이터의 특성을 다각적으로 분석할 수 있 도록 여러 크기의 다중 커널(multiple kernel)을 활용 하면 모델 성능이 향상될 수 있다^(13,14).

이 연구에서는 카메라로 촬영된 영상으로부터 정 상 영역과 누설 영역에서 나타나는 픽셀의 변화 특성 을 다중 커널 신경망의 딥러닝을 통해, 누설 영역을 판독하고 해당 영역을 가시화하는 기술을 소개한다. 누설 판정을 위한 모델의 출력값에 대한 임계값 (threshold) 설정에 따른 정밀도(precision)와 재현율 (recall)에 대한 분석을 통해 누설 영역 가시화 특성을 조절한 결과를 제시한다. 이러한 절차로 딥러닝을 활 용해 누설 영역을 검사 환경과 목적에 부합하게 가시 화할 수 있음을 보여준다.

2. 배관 누설 영상 수집 및 데이터셋 구축

2.1 모의 배관 누설 영상 수집

(1) 배관 누설 모의실험 장치 스테인레스(STS) 소재의 0.75 inch 배관을 활용하



Fig. 1 Pipe leakage monitoring system

여 모의 누설을 위한 배관을 Fig. 1과 같이 구성하였 다. 배관 내부의 증기 온도 및 압력을 측정할 수 있는 센서를 설치하여 증기 누설 시의 배관 상태를 모니터 링이 할 수 있도록 설계하였다. 해당 배관을 최대 200 ℃, 5기압의 증기를 발생시킬 수 있는 증기 발생 기와 연결하여 배관에 고온 고압의 증기가 유입될 수 있도록 하였다. 누설은 7곳에 설치된 바늘 밸브 (needle valve)를 각각 여닫는 방식으로 이뤄진다.

(2) 배관 누설 감시 영상 수집 장치

넓은 영역의 증기 누설을 감시할 수 있는 4대의 CCTV 카메라를 활용하여 모의 누설 배관 주변에 배 관 방향으로 각각 거치하고 배관 상태를 영상으로 기 록했다. 카메라를 통해 수집되는 영상은 빨간색, 녹 색, 청색의 3채널(RGB: red, green, blue)이며, 가로 1280 픽셀(pixel), 세로 720 픽셀의 크기의 프레임으 로 초당 15장씩 기록되었다.

(3) 배관 누설 모의시험

배관을 순환하는 증기 온도가 150 ℃에 2기압 조건 에서 카메라 위치 및 누설 밸브 조합에 따라서 75가 지의 조건들에 대해서 각 1분 이내의 영상을 수집했 고, 총 수집된 프레임 개수는 약 3만 장이다.

2.2 픽셀별 누설 여부 판별 데이터셋 구축

(1) 누설 여부 분석을 위한 소프트웨어 개발

영상에서 누설 영역의 픽셀들에서 색상 변화가 시 간 영역과 주파수 영역에서 어떤 특성이 있는지를 확 인할 수 있는 소프트웨어를 파이썬(Python) 기반으로 개발하였다. 이를 활용하여, 누설 여부에 따른 색상



Fig. 2 Color level variations in time domain and their frequency spectra



Fig. 3 Process to extract normalized relative color variation

변화를 살펴보면 Fig. 2와 같다. 누설이 있는 경우에 는 색상 변화가 크게 나타나며, 다양한 주파수 성분 들이 관찰된다. 누설로 인한 색상 변화의 주파수 성 분이 다양함으로 특정 주파수를 분석하는 알고리즘으 로 누설을 탐지하기 곤란하다.

(2) 픽셀 단위의 색상 변화 데이터 전처리

세 채널의 변화가 유사하다는 특징을 고려하여 Fig. 3과 같은 절차를 통해, 세 채널의 색상 변화의 평균값을 취하여 단일 채널로 만들고 다섯 프레임을 하나의 시퀀스(sequence)로 추출하여 마지막 프레임 을 기준으로 상대적 변화값으로 표현한 후, 색상 범위 의 최대값인 255로 나누는 정규화를 수행하면 Fig. 4 와 같다. 이처럼 상대적 색상 변화값을 사용하면 누설 과 무관한 조명 변화 및 배관의 색상 등에 의한 색상 특성에 대한 학습을 배제할 수 있다.

(3) 누설 여부 레이블링 및 딥러닝을 위한 분배 누설이 있는 픽셀에 대해서는 1 그렇지 않은 픽셀
은 0으로 레이블링하였다. 임의 샘플링을 통해 누설
이 없는 것(0)과 있는 것(1)에 대해 1:1의 비율로 총
10만 개의 픽셀 시퀀스로 구축하였고, 학습(train)과 검증(validation)을 위해 8:2로 재분배하여 데이테셋
을 구축하였다. 이때, 각 데이터셋에서 누설 여부에 대한 데이터 비율이 1:1로 유지될 수 있도록 Table 1 과 같이 계층적 임의 샘플링(stratified random sampling)을 수행하였다.

Tał	ole 1	Data	counts	in	train	and	validation	datasets
-----	-------	------	--------	----	-------	-----	------------	----------

Туре	Number of no leakage cases	Number of leakage cases
Train	40 000	40 000
Validation	10 000	10 000



3. 누설 확률 추정을 위한 딥러닝

3.1 모델 구성

각 픽셀의 평균 색상 변화인 단일 채널의 시간 영 역의 상대적 색상 변화값을 입력으로 하고 누설에 대 한 예측값을 확률로 출력하는 모델을 다중 커널 신경 망으로 Fig. 5와 같이 구성하였다. 다섯 프레임의 입 력 데이터의 크기는 5×1이며, 시간 영역에서 저주파







Fig. 5 Multiple kernel neural network architecture

및 고주파 특성을 모두 고려하기 위해서 색상 변화의 특징 학습을 위해 네 종류의 크기(2×1, 3×1, 4×1, 5×1)를 가진 커널을 각 64개씩 활용하였다. 최초 입 력 데이터가 동일하게 다중 커널을 통과하며, 이를 통해 출력된 특징값을 1차원으로 엮으면 640×1 형태 의 특징 벡터로 재배열된다. 이후 다섯 층(1024, 512, 256, 128, 64)의 완전 연결 계층(fully connected layer) 을 통과하게 하고, 최종적으로 누설이 아닌 경우와 누설인 경우에 대해 각각 확률을 표현하는 두 개의 값 을 출력하도록 하였다. 모델의 과적합을 방지하기 위 해, 각 완전 연결 계층을 통과한 후에는 10%의 드 롭아웃(dropout)을 적용하였다. 총 학습 파라미터는 1 354 946개이며, 이 연구에서는 TensorFlow 2.4.1을 활용하여 구현하였다.

3.2 학습 조건 및 결과

(1) 손실함수 및 최적화 기법

누설 여부에 대한 확률을 추정하므로 손실함수는 교차 엔트로피(cross entropy)를 활용하였으며, 최적



(a) Train dataset(accuracy: 92.58 %)





화 기법(optimizer)에는 가중치 학습에 관성(momentum) 과 평균 제곱근 전파(RMSProp: root mean square propagation)의 개념이 적용된 Adam(adaptive moment estimation)을 사용하였다. 관성은 가중치의 업데이트 방향을 안정화하여 학습을 가속하고, 평균 제곱근 전 파 알고리즘은 최근 업데이트 이력이 적었던 가중치 들의 학습을 촉진하는 지수가중이동평균법(exponential weighted moving average)이 적용되어 학습 성능과 효율이 향상된다.

(2) 모델 학습 및 검증

최초 학습률은 0.001로 설정하였으며, 검증 데이터 의 손실함수의 값이 5회 이상의 학습 횟수(epoch)가 지나도 최소값을 갱신하지 않으면 학습률을 50%씩 감소시켰고, 10회 이상 지나도 갱신하지 않을 경우에 는 모델의 과적합을 방지하기 위해 학습을 조기 종료 (early stopping)하였다. 임계값을 50%로 설정한 조 건에서 정확도(accuracy)는 학습 데이터셋과 검증 데 이터셋에 대해 각각 92.58%, 92.09%로 Fig. 6과 같 이 나타났다.

(3) 학습된 모델을 활용한 누설 영역 가시화

학습된 모델을 활용하여, Fig. 7과 같이 누설이 일 어나고 있는 영상에 누설부가 가시화되도록 하였다. 원본 영상에서 매 다섯 프레임씩 추출하여 픽셀별로 모델 학습을 위해 수행했던 전처리를 똑같이 적용한 후 모델에 입력하였고, 출력된 각 픽셀의 누설 확률 을 입력 영상의 크기로 재배치하여 누설 확률을 이미 지화하였다. 누설 확률이 사전에 설정한 임계값 이상 이면 해당하는 픽셀들의 빨간색 채널이 최대값이 되 도록 하여 영상을 만들고 이를 입력 영상과 합성하면 누설 영역이 가시화된다. 이 연구에서는 NVIDIA GeForce RTX 3090의 50% 성능을 활용하는 경우, 다섯 프레임의 영상(가로: 1280 픽셀, 세로: 720 픽셀, 가로 × 세로: 총 921 600 픽셀)의 누설 여부를 판독하 는 데에 약 0.286초(초당 3.5건)가 소요되었다.

4. 딥러닝 기반 누설 영역 가시화 특성 분석

4.1 임계값에 따른 정밀도-재현율 분석

학습된 모델을 통해 실제 누설 영상에서 누설부를 가시화함에 있어서 입력 영상의 대부분이 누설부가 아

에도 영상 전체에 대한 누설 판독의 정확도(accuracy) 가 높게 산출되는 경향이 있다. 누설 영역 가시화 성 능을 합리적으로 평가하기 위해서는 Fig. 8과 같이 임 계값에 따른 정밀도와 재현율을 검토하는 것이 필요 하다. 정밀도는 모델이 누설이라고 판단한 픽셀들 중 에 실제 누설에 해당하는 픽셀들의 비율이며, 재현율 은 실제 누설에 해당하는 픽셀들 중에서 모델이 누설 이라고 찾아낸 픽셀들의 비율이다. 누설에 대한 상황 대처의 시급성이 높은 유독 가스 배관 등과 같은 위 험 요소가 많은 환경일수록 낮은 임계값을 통해 높은 재현율을 담보하는 것이 필요하며, 반대의 환경에서 는 임계값을 높여서 확실한 경우에만 가시화함으로써



(a) Leakage visualization(threshold \geq 50.0 %)



(b) Leakage visualization(threshold \geq 97.0 %)



(c) Leakage visualization(threshold \geq 99.5 %)

Fig. 9 Leakage visualization according to the threshold

니므로 누설부를 못 찾는 경우보다 누설부가 아닌 영 역을 잘 찾는 픽셀의 빈도수가 압도적으로 많다. 이러 한 이유로 누설 영역을 제대로 가시화하지 못한 경우

< Input RGB Video (5 frames) >



(a) Color video

< Output: Leakage Probability (0~100%) >



(b) Pixel-wise leakage probability image

< Input + Output -> Leakage Visualization >



(c) Leakage visualization image

Fig. 7 Model input and output: color video, pixelwise leakage probability image and leakage visualization image



Fig. 8 Precision, recall, and F1-score depending on the threshold for leakage classification

오탐(false alarm)을 줄일 수 있다. 일반적으로 정밀도 와 재현율의 조화평균(F1-score)이 최대가 되는 임계 값을 선택하는 것이 합리적이며, 이 연구에서는 임계 값이 97%일 때 조화평균이 최대였다.

4.2 임계값에 따른 누설 영역 가시화 비교

정밀도가 높으면 누설이 확실시되는 영역만 누설로 판정하게 되고, 재현율이 높으면 누설의 가능성이 낮 은 영역까지도 누설로 판정한다. 임계값(50%, 97%, 99.5 %)에 따른 누설부 가시화 결과는 Fig. 9와 같다. 실제 누설 영상에서 임계값을 50 %로 설정했을 때 정 확도가 97.47 % 임에도 정밀도는 24.092 % 로 상대적 으로 낮아서, 누설 영역뿐만 아니라 누설이 아닌 영역 도 누설로 판단하는 오탐이 국부적으로 나타나는 것 을 확인할 수 있다. 반면, 임계값이 99.5 %인 경우는 상대적으로 정밀도가 높아서, 누설이 아닌 영역을 누 설로 오탐 하는 것은 현저히 줄어들었으나 누설부의 일부만 가시화됨을 확인할 수 있다. 따라서, 누설이 없 는 영역이 대부분인 실제 영상에 적용 시에는 정확도 만을 근거로 성능을 판단하는 것보다는 정밀도와 재 현율을 고려하여 허용 가능한 오탐의 수준을 결정하 고 이를 토대로 임계값을 설정하는 것이 합리적이다.

5. 결 론

이 연구에서는 카메라로 촬영된 다섯 프레임의 입 력 영상으로부터 누설 영역을 가시화하는 기술을 개 발하였다. 누설 영역을 판독하기 위해 각 픽셀의 색 상 변화 특성을 다중 커널 인공신경망을 활용하였고, 학습된 모델을 통해 각 픽셀의 누설 확률을 추정하였 다. 추정된 누설 확률이 설정된 임계값 이상이면 해 당하는 픽셀들의 빨간색 채널이 최대값이 되도록 하 여 영상을 만들고 이를 입력 영상과 합성하여 누설 영역이 가시화하였다. 임계값에 따른 누설 영역 가시 화 특성을 분석하여, 임계값이 높으면 정밀도가 높아 져 누설이 확실시되는 영역만 누설로 판정하게 되지 만, 임계값이 낮아지면 재현율이 높아져 누설의 가능 성이 낮은 영역까지도 누설로 판정하는 결과를 확인 하였다. 누설에 대한 위험도에 따라서 누설이 아님에 도 누설로 판정하는 오탐의 비중을 적절하게 조절하 는 것이 필요하며, 이는 임계값 조절을 통해 가능함 을 확인하였다. 이와 같은 딥러닝 및 임계값 분석 과 정을 통해, 영상 기반으로 누설 영역을 가시화함에 있어서 딥러닝이 누설을 감시하는 환경과 목적에 부 합하게 활용될 수 있음을 보여준다.

후 기

이 성과는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2020M2C9A1062710).

References

(1) Son, K.-S., Jeon, S.-H., Choi, Y.-C. and Park, J.-W., 2011, Oil Leak Detection on a Plant by Using CCTV Camera, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 136~141.

(2) Boaz, L., Kaijage, S. and Sinde, R., 2014, An Overview of Pipeline Leak Detection and Location Systems, Proceedings of the 2nd Pan African International Conference on Science, Computing and Telecommunications (PACT 2014), pp. 133~137.

(3) Miller, R. K., Pollock, A. A., Watts, D. J., Carlyle, J. M., Tafuri, A. N. and Yezzi Jr, J. J., 1999, A Reference Standard for the Development of Acoustic Emission Pipeline Leak Detection Techniques, NDT & E International, Vol. 32, No. 1, pp. 1~8.

(4) Mostafapour, A. and Davoudi, S., 2013, Analysis of Leakage in High Pressure Pipe Using Acoustic Emission Method, Applied Acoustics, Vol. 74, No. 3, pp. 335~342.

(5) Choi, Y. C., Jeon, H. S., Son, K. S. and Park, J. W., 2014, Correction of Error due to Camera Vibrating During Detecting Steam Leakage by Using Image, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 10, pp. 795~801.

(6) Choi, Y. C., Son, K. S., Jeon, H. S. and Park, J. H., 2010, Steam Leak Detection by Using Image Signal, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 9, pp. 828~833.

(7) Jeon, H. S., Suh, J. S., Chae, G. S., Son, K. S., Kim, S. O. and Lee, N. H., 2016, Development of Leak and Vibration Monitoring System for High Pressure Steam Pipe by Using a Camera, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 36,

No. 6, pp. 496~503.

(8) Kim, S. O., Park, J. S. and Park, J. W., 2019, A Leak Detection and 3D Source Localization Method on a Plant Piping System by Using Multiple Cameras, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 51, No. 1, pp. 155~162.

(9) Lee, K., Na, J., Sohn, J., Sohn, S. and Lee, S., 2020, Image Recognition Algorithm for Maintenance Data Digitization: CNN and FCN, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 136~142.

(10) Tan, M. and Le, Q., 2019, EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks, Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning, PMLR:97, pp. 6105~6114.

(11) Pham, H., Dai, Z., Xie, Q. and Le, Q. V., 2021, Meta Pseudo Labels, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 11557~11568.

(12) Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K. and Fei-Fei, L., 2009, ImageNet: A Large-scale Hierarchical Image Database. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 248~255.

(13) Sohn, W. B., Lee, S. Y. and Kim, S., 2020, Single-layer Multiple-kernel-based Convolutional Neural Network for Biological Raman Spectral Analysis, Journal of Raman Spectroscopy, Vol. 51, No. 3, pp. 414-421.

(14) Naim Mursalim, M. K., and Kurniawan, A., 2021, Multi-kernel CNN Block-based Detection for COVID-19 with Imbalance Dataset, International Journal of Electrical & Computer Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 2467~2476.



Hogeon Seo received his Ph.D. degree in Convergence Mechanical Engineering from Hanyang University in 2018. He is a senior researcher in Artificial Intelligence Application & Strategy Team of Korea Atomic Energy Research

Institute. His research interests is artificial intelligence for prognosis, nondestructive evaluation, and sensor fusion.



Young-Chul Choi received B.S. from Pusan National University in 1998. He then received his M.S and Ph.D. degree from KAIST in 2000 and 2005 respectively. Dr. Choi is currently a principal researcher at Korea Atomic Research Institute.

블레이드와 로터의 결합 조건에 의한 Mistuning 효과 Mistuning Effects caused by the Blade Assembling Conditions

차 덕 순

Douksoon Cha[†]

(Received July 19, 2021 ; Revised August 26, 2021 ; Accepted August 26, 2021)

Key Words : Mistuning(미스튜닝), Bladed Disk Assembly(블레이드 시스템), Fir-tree Type Blade Root(전나무 형상 블레이드 하단부), Blade Boundary Condition(블레이드 경계조건), Narrow Band Random Excitation(좁은 주파수 밴드의 랜덤 가진력), Response Variance(응답의 분산값)

ABSTRACT

In this study, the assembling conditions of blades and rotors are investigated by the FEM model of a blade with the different boundary conditions. It is assumed that the modal properties of blades are identical and the blade modal frequencies are changed by the assembling condition only. It is shown that the change in modal frequency by the assembling condition is approximately 0.25 % in normal operating conditions. However, the variance of blade response can be increased by more than 30 % under narrow-band random excitations.

1. 서 론

가스터빈의 각 단의 블레이드는 동일한 형상으로 제작되어 동일한 작동 상태에 있음에도 일부 블레이 드의 진동이 심하게 진행되는데 이는 mistuning 효과 라고 알려져 있다. 각 블레이드는 제작 공차로 인하 여 모달 특성이 미세하게 차이가 나는데, 이로 인한 진동은 큰 폭으로 차이가 나서 피로 파손의 원인으로 파악되고 있다⁽¹⁻³⁾.

이러한 mistuning 효과를 해석하기 위하여 사용하 는 모델링은 블레이드의 강성 행렬에 작은 크기의 변 수를 포함하는 것이 일반적이다⁽⁴⁻⁶⁾. 집중 질량의 단 순한 모델에서^(4,5) 유한요소 모델에 기반한 복잡한 모 델까지 다양하게 사용되고 있는데⁽⁶⁾, 최근에는 블레 이드의 모달특성외에 형상의 차이에 의한 영향까지 고려하여 블레이드의 질량행렬에도 변수를 포함하여 해석하는 경우도 있다^(7,8). 개별 블레이드의 유한요소 법을 이용한 모달 해석에서는 블레이드의 상부 구조 만 해석하거나⁽⁹⁾, 블레이드의 하부와 로터를 접촉조 건이나 커플링구조를 이용하여 동시에 해석하는 방법 을 사용하였다^(10,11). 블레이드의 하부는 작동과정에서 열팽창에 의하여 로터와 결합하는데, 이러한 결합 상 태의 차이가 mistuning 효과에 미치는 영향에 대하여 는 별다른 연구가 진행된 바가 없다.

이 논문에서는 블레이드의 개별적인 모달 특성은 동 일하다고 가정하고, 로터와의 결합 조건에 의한 mistuning의 영향만을 분석하였다. 일반적으로 터빈 시스 템에서는 동일한 주파수와 일정한 위상을 가지는 engine-order-excitation을 외력으로 사용하는 경우가 일 반적이지만, 많은 경우에 터빈 시스템에 작용하는 외력 은 비주기적인 특성을 가진다고 밝혀지고 있다⁽¹²⁾. 그 리고 주파수 대역이 넓은 white noise인 경우에는 mistuning 효과가 작다는 것이 알려져 있으므로⁽⁵⁾ 좁은 주

[†] Corresponding Author; Member, Korea University of Technology & Education, Department of Mechanical Design Engineering, Professor E-mail : dscha@koreatech.ac.kr

[‡] Recommended by Editor Heon Jun Yoon

[©] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

파수 대역을 가지는 비주기적인 힘을 블레이드에 작 용하는 외력으로 가정하였다. 먼저 블레이드의 경계 조건에 의한 모달 해석의 차이를 살펴보고 이러한 차 이에 의하여 발생하는 시스템의 응답을 분석하였다.

2. 블레이드의 모달 해석

2.1 블레이드의 모델링

터빈 블레이드와 디스크의 결합은 dovetail 형태 또 는 fir-tree 형태의 블레이드 하단의 형상을 사용한다. 일반적으로 fir-tree 형식이 많이 사용되고 있는데, 그 이유는 접촉면적을 넓게 하여 fretting 피로에 내구 수 명을 길게 설계할 수 있기 때문이다. 이러한 블레이드 의 결합부는 축과 밀착되어 터빈 엔진의 작동 중에 발 생하는 원심력과 열팽창, 고압가스로 인한 휨과 비틀 림의 하중을 받는다. 이때 각각의 블레이드는 조립 공 차와 결합 조건의 미세한 차이로 인하여 각각의 블레 이드의 진동 특성도 달라진다고 할 수 있다. 이러한 진동 특성을 검토하기 위하여 fir-tree 형식의 GE J-85-CJ-610 엔진의 블레이드를 3차원 측정하여 확보 한 3D 모델을 바탕으로 형상을 단순화하여 Fig. 1과 같은 유한요소모델을 생성하였다.

이 모델은 ANSYS-workbench의 multi-zone방법을 이용하여 육면체 요소를 기본으로 메쉬를 생성하였다. 메쉬 생성에 사용한 상세한 조건은 Table 1에 나타나 있고, 해석에 사용한 물성치는 Table 2에 나타나 있다.



Fig. 1 FEM model of turbine blade

2.2 블레이드의 경계조건

터빈 엔진의 작동 과정에서 블레이드의 fir-tree 결 합부에서는 micro-slip이 발생하는데, 이러한 비선형 의 실제 작동 조건을 선형진동해석에서 적용할 수 있 는 경계조건으로 변환하는 것은 쉽지 않다. 왜냐하면 선형 해석의 경계 조건은 힘과 위치의 정보로 표현되 어야 하는데 stick-slip이 발생하는 실제 조건을 힘과 위치로 정의하는 것은 어렵기 때문이다⁽¹¹⁾. 이러한 마 찰 현상을 해석하는 일반적인 방법은 블레이드가 축 에 고정되어 있다고 가정하고 별도의 마찰 댐퍼를 추 가하는 방법이 사용된다⁽¹³⁾. 이러한 비선형 해석없이 블레이드의 모달 특성을 분석하기 위하여 경계조건에 서 결합 표면이 고정되는 상황과 결합 표면의 수직방 향으로 움직임이 제한되는 상황을 예상하였다. 그리 고 경계 조건의 차이에 의한 블레이드 동특성의 변동 을 분석하기 위하여 결합부 표면을 Fig. 2와 같이 7개

Table 1 Mesh generation of the turbine blade

Mesh method	Multizone
Mapped mesh type	Hexa
Free mesh type	Hexa dominant
Element size	2.0 mm
Nodes no.	11 801
Elements no.	2098

Table 2 Material properties of the turbine blade

Young's modulus	200 GPa
Poisson's ratio	0.3
Density	7850 kg/m ³



Fig. 2 Surface number of the blade root

로 분리하였다.

우측의 표면은 좌측의 표면과 동일한 결합조건으 로 가정하였다. 그리고 분리된 표면에 고정 조건과 수직방향의 구속 조건, 그리고 구속이 전혀 없는 자 유 조건의 3가지 조건을 혼합하여 Table 3과 같이 6가지의 상황에 대하여 진동해석을 수행하였다. 여기 서 'F'는 모든 방향에 대한 고정 조건을 나타내고, 'C'는 표면의 수직 방향에 대한 구속 조건, 그리고 '-'는 자유조건으로 구속이 없는 상태를 나타낸다.

2.3 블레이드의 모달 해석

터빈의 회전 속도의 증가에 따라 블레이드의 제1 고유진동수를 해석한 결과는 Fig. 3에 나타나 있다. 회

Fir-tree surface	1	2	3	4	5	6	7
Case1	F	F	F	F	F	F	F
Case2	С	С	F	F	F	F	С
Case3	С	С	С	C	C	C	С
Case4	F	-	F	F	F	F	F
Case5	С	-	F	F	F	F	С
Case6	С	-	С	С	C	C	С

Table 3 Cases of boundary condition

(F: fix, C: constrained, -: free)



Fig. 3 Dominant frequency of the turbine blade with the change of operating speed

 Table 4 The first natural frequency of blade with the six cases of boundary condition

Operating speed [r/min]	0	10 000	20 000	30 000
Mean value [Hz]	706.6	856.4	1182.7	1566.0
Standard deviation [%]	0.1845	0.2101	0.3207	0.5483

전의 중심축은 블레이드의 결합부 하단에서 345 mm 에 위치한 것으로 설정하였다. 원심력에 의한 stress stiffening 효과로 인하여, 회전속도가 증가하면 블레 이드의 고유진동수가 점점 증가하고 있으며, 경계 조 건의 차이에 의한 영향도 점점 증가하고 있다. 즉 완 벽하게 동일한 동특성을 가진 터빈 블레이드라고 하 더라도, 결합 상태에 따라 각 블레이드의 고유진동수 는 편차를 가질 수 있으며 이러한 결과는 Table 4에 정리되어 있다. 선정된 6가지의 경계 조건 이외에 다 른 경계조건을 검토하여도 Table 4의 결과는 크게 변 화하지 않았다.

3. 터빈 블레이드 시스템의 진동

결합 상태에 따른 각각의 블레이드의 고유 진동수 의 변동이 작동 상황에서 블레이드의 진폭에 미치는 영향을 알아보고자 Fig. 4와 같은 단순한 터빈 시스템 의 모델을 사용하여 시스템의 응답을 수치적으로 계 산하였다. 블레이드의 개수는 24개로 선정하였고 각 블레이드의 강성의 변동으로 고유진동수의 변동을 표 현하였다. 그 외의 블레이드 질량과 댐핑 계수, 디스 크의 영향에 의한 연결 강성은 일정하다고 가정하였 다. 수치 해석에 사용된 시스템 계수는 Table 5에 정 리되어 있다^(4,5,13).

블레이드의 강성 변동에 의한 고유진동수의 표준 편차는 0.25 %로 설정하였고, 이 변동량은 작동 속도 에 일정하다고 가정하였다. 터빈 시스템에 작용하는 외력은 댐핑비가 1 %인 band-pass filter를 사용하여 입력을 white noise로 하여 생성되는 narrow-band random excitation으로 설정하였다. 시스템의 운동 방 정식을 간단하게 살펴보면 식(1)~(2)와 같다.

$$\ddot{g} + 2\xi_F \omega_F C_R \dot{g} + \omega_F^2 g = \omega_F^2 w(t) \tag{1}$$

$$\ddot{Wx} + \dot{Cx} + Kx = g(t) \tag{2}$$



Fig. 4 Model of a bladed disk assembly

Table 5 System parameters

Modal mass	$m_t = 0.0114 \text{ kg}$
Modal stiffness	$k_0 = 430\ 000\ \mathrm{N/m}$
Coupling stiffness	$K_c = 45 \ 430 \ \text{N/m}$
Damping coefficient	c = 1.45 Ns/m

여기서 M, C와 K는 블레이드 시스템의 질량, 댐핑 및 강성 행렬이다. 필터에서는 외력의 bandwidth를 결정하고 w,는 외력의 주요주파수를 결정한다.

그리고 필터의 연결구조를 결정하는 C_R 에 의하여 외력의 correlation이 결정된다⁽⁵⁾. 위의 운동방정식은 적절한 상태 변수를 선택하여 다음의 일차미분방정식 으로 표현할 수 있다.

$$\dot{z} = Az + Bw(t) \tag{3}$$

외력에 대한 블레이드의 응답은 진폭의 분산값으로 정의되고, 다음의 Lyapunov 방정식에서 구해진다^(4,5).

$$AP + PA^{T} = B_{R} \tag{4}$$

식(4)에서 각 행렬은 아래와 같다.

$$z = \begin{bmatrix} g g x \dot{x} \end{bmatrix}^T \tag{5}$$

$$P = E[z(t) \ z^{T}(t)]$$
(6)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ -\omega_F^2 I & -2\xi_F \omega_F C_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ M^{-1} & 0 & -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$$
(7)

$$B = \left[0 \ \omega_F^2 I 0 \ 0\right]^T \tag{8}$$

$$B_R = -BQ_0 B^T \tag{9}$$

Q₀는 white noise의 강도로 시스템의 응답에 단순 한 비례값의 역할을 하므로 단위 값을 사용하였다. 각 블레이드 stiffness의 표준편차가 2150 N/m인 블 레이드 시스템을 정규분포를 가지도록 천개를 생성하 여 외력의 변화에 따른 블레이드의 응답 변화를 계산 하였다.

외력은 correlation 특성에 따라 서로 관련성이 없 는 경우와 Fig. 5와 같은 correlation을 가지는 2가지 경우를 대상으로 하였다. 외력의 일정한 강도에서 블



Fig. 5 Correlation example of excitation



Fig. 6 Simulation results of R_x/R_g for the uncorrelated excitation



Fig. 7 Simulation results of R_x/R_g for the correlation example

레이드 진폭의 분산값을 구하여 평균, 최대 및 최소 값과 3시그마값을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. Figs. 6, 7의 좌표축에 표시된 R_x 와 R_g 는 블레이드의 진폭과 외력의 분산값으로 식 (10)과 같이 표현된다.

$$R_x = E[x(t) \ x^T(t)] \tag{10}$$

$$R_a = E[g(t) \ g^T(t)] \tag{11}$$

Fig. 6에 표현된 것과 같이 외력이 서로 관련되지 않은 상태에서는 블레이드의 분산의 평균값은 공진 현상이 발생하는 주파수 대역의 6145 rad/s에서 큰 진 폭을 나타내고 7225 rad/s에서는 상대적으로 작은 진 폭을 보여주고 있다. 그리고 공진대역에서 최대 진폭 은 최소 진폭과 비교하여 51 %의 증가를 보여준다. 외력이 correlation을 가지는 경우에는 Fig. 7과 같이 공진 대역의 6145 rad/s와 6595 rad/s에서 두 개의 높 은 피크 값을 보여주고 7060 rad/s 이후의 진폭은 비 교적 낮아서 실질적으로 공진 대역이 좁아진 것과 같 은 현상을 나타낸다. 그리고 좁아진 공진 대역을 기준 으로 하여도 최대 진폭은 최소 진폭과 비교하여 73 % 의 증가를 보여준다.

블레이드의 진폭의 분산값은 평균에 비하여 외력 의 correlation이 없는 경우에는 최대 31% 증가하고 correlation이 있는 경우에는 최대 38% 증가하였다. 즉 결합 상태에서 발생하는 고유진동수의 변화가 약 0.25%일 때 이에 따른 블레이드의 진폭은 30%이상 증가할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

터빈 블레이드의 mistuning의 원인에 대하여 각 블 레이드의 모달 특성의 편차에 대하여는 많은 연구가 이루어졌으나 블레이드 결합 조건의 영향에 대하여는 별다른 연구가 이루어지지 않은 상태였다. 이 연구에 서는 블레이드의 fir-tree 부분을 7구역으로 나누어서 축과의 결합 조건을 고정, 구속 및 자유조건으로 구분 하여 적용한 결과 일반적인 15 000 r/min의 작동조건 에서 약 0.25 %의 모달 주파수의 표준 편차를 발생시 킬 수 있는 것을 확인하였다. 블레이드 시스템의 단순 한 모델을 이용하여 블레이드의 결합 조건의 차이로 인하여 작동상태에서는 블레이드의 진폭은 30%이상 증가할 수 있다는 것을 발견하였다. 블레이드의 진동 은 외력의 correlation에 민감하게 반응하여, 공진 조 건과 mistuning 영향이 변화하므로 이러한 영향을 충 분히 고려하여 블레이드 시스템이 설계되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 향후의 연구에서 블레이드의 작 동상태에서의 micro-slip에 의한 영향을 고려하고 외 력의 correlation에 대한 자료를 확보한다면 더욱 정 확한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교 육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

References

(1) Sogliero, G. and Srinivasan, A. V., 1980, Fatigue Life Estimates of Mistuned Blades Via a Stochastic Approach, AIAA Journal, Vol. 18, No. 3, pp. 318~323.

(2) Griffin, J. H. and Hoosac, T. M., 1984, Model Development and Statistical Investigation of Turbine Blade Mistuning, ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 106, No. 2, pp. 204~210.

(3) Sinha, A., 1986, Calculating the Statistics of Forced Response of a Mistuned Bladed Disk Assembly, AIAA Journal, Vol. 24, No. 11, pp. 1797~1801.

(4) Cha, D. and Sinha, A., 2002, Effects of the Nature of Excitation on the Response of a Mistuned Bladed Disk Assembly, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 124, No. 4, pp. 588~596.

(5) Cha, D., 2017, Effects of Correlations of Narrow Band Random Excitations on the Response of a Mistuned Bladed Disk Assembly, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 18, No. 6, pp. 853~862.

(6) Lim, S.-H., Bladh, R., Castanier, M. P. and Pierre, C., 2007, Compact, Generalized Component Mode Mistuning Representation for Modeling Bladed Disk Bibration, AIAA Journal, Vol. 45, No. 9, pp. 2285~2298.

(7) Sinha, A., 2009, Reduced-order Model of a Bladed Rotor with Geometric Mistuning, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 131, No. 3, 031007.

(8) Bhartiya, Y. and Sinha, A., 2013, Reduced Order Modeling of a Bladed Rotor with Geometric Mistuning via Estimated Deviations in Mass and Stiffness Matrices, ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 135, No. 5, 052501.

(9) Lee, A. S., Kim, Y. C. and Lee, D. H., 2004,

Evaluation of Blades Vibration Reliabilities of KGT-74 Small Gas Turbine, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 410-415.

(10) Yang, K. H. and Song, O., 2009, Variation of Dynamic Characteristics of a Low Pressure Turbine Blade with Crack Length, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 12, pp. 1281~1288.

(11) Yang, K. H., Song, O., Cho, C. W., Yun, W. N. and Jung, N. G., 2010, Fracture Mechanism of Gas Turbine Compressor Blades in a Combined Cycle Power Plant, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 1025~1032.

(12) Choi, Y-S. and Lee, K-W., 2010, Investigation of Blade Failure in a Gas Turbine, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 24, No.10, pp. 1969~1974.

(13) Cha, D., 2018, Performance of Friction Dampers in Geometric Mistuned Bladed Disk Assembly Subjected to Random Excitations, Journal of Sound and Vibration, Vol. 426, pp. 34~53.



Douksoon Cha is an assistant professor of the Korea University of Technology & Education, Cheonan, Korea. He received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Pennsylvania State University. His research interests include vibration

of turbine blade, friction damper and nonlinear dynamic.

각종 주름판 코어 샌드위치 패널의 강성 및 진동 해석

Analysis on Rigidities and Vibration of Various Corrugated Core Sandwich Panels

정 강†

Kang Jung[†]

(Received July 21, 2021 ; Revised August 24, 2021 ; Accepted August 25, 2021)

Key Words: Corrugated Plate(주름판), Core(심재), Sandwich Panel(샌드위치패널), Orthotropy(직교이방성), Waveform(파형), Flexural Rigidity(굽힘강성), Torsional Rigidity(비틀림강성), Minimum Total Energy Principle(최소에너지원리), Natural Frequency(고유진동수)

ABSTRACT

Corrugated core sandwich panels are relatively lightweight structure components compared to their large flexural rigidity, and are widely used in automotive, aerospace, ship, and plant industries. However, research on rigidity and vibration for these sandwich panels remains fairly poor. In this study, the optimal sandwich panel is determined by presenting the rigidities of corrugated core sandwich panels with sinusoidal, triangular, trapezoidal, and rectangular waves. Furthermore, by analyzing the vibration of the sandwich panels for arbitrary boundary conditions, a basic visual program for practical and efficient static and dynamic design data extraction of the sandwich panels is completed.

1. 서 론

주름판(corrugated plate)은 강성(rigidity)을 증대시 키기 위하여 평판을 정현파형(sinusoidal waveform), 삼각파형(triangle waveform), 사다리꼴파형(trapezoidal waveform), 구형파형(rectangular waveform) 등으로 주 름잡아준 판구조물이다. 특히 이러한 주름판을 심재 (core)로 하는 샌드위치 패널은 큰 굽힘강성에 비해 비교적 가벼운 경량의 구조물 구성요소로서, 자동차, 항공우주, 선박 및 플랜트 산업분야에서 널리 사용되 고 있다.

주름판 코어 샌드위치 패널(corrugated core sandwich panel)은 주름판 구조물의 기하학적 특성

상 등방성(isotropy)이 아닌 직교이방성(orthotropy) 구조물로서, 이에 대한 강성 및 진동 해석 시 어느 정 도의 정확치를 도출하는데 한계가 있을 수 있으며 주 름형상에 따라 큰 오차를 가져올 수 있다. 그러므로 주름판 샌드위치 패널의 진동해석을 하는데 있어서 주름판은 직교이방성판으로서 취급하여 엄밀 강성해 석이 선행되어야 비교적 합리적인 진동해석 결과를 가져올 수 있다.

하지만 그 동안 발표된 연구논문들을 살펴보면, Seydel⁽¹⁾은 파형 주름판에 대하여 압축실험을 통하여 강성을 규명하고자 하였고, Fung⁽²⁾은 파형 주름판을 평판에 부착시킨 패널에 대하여, Kinloch⁽³⁾는 사다리 꼴 주름판과 평판이 조립된 패널에 대하여, Perel⁽⁴⁾은 사다리꼴 주름판에 대하여 기하학적으로 강성을 구하

[†] Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University, Professor E-mail : ckang@jnu.ac.kr

[‡] Recommended by Editor Jong Seok Oh

[©] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

고자 하였으나, 실험적이거나 비교적 단순한 강성해 석으로 일반성 및 엄밀성이 떨어진다.

주름판을 비롯한 직교이방성판에 대하여 진동 해 석한 논문을 살펴보면, Hoppmann 등⁽⁵⁾이 보강판에 대한 강성을 실험을 통하여 결정하고 4변이 단순지지 인 경계조건에 대해 진동해석을 하였다. 또한 Hearmon 등⁽⁶⁻⁸⁾은 직교이방성판의 강성을 임의로 가 정하고 특정 경계조건에 대해 고유진동수를 해석하였 다. Chen 등⁽⁹⁾은 4변이 모두 자유인 경계조건의 사다 리꼴 주름판과 평판이 조립된 패널에 대하여 유한요 소법에 의한 진동해석을 하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 이 밖에도 유한요소법에 의한 장방형 절 곡판(folded plate)의 진동해석 논문⁽¹⁰⁻¹²⁾, 주름판에 대하여 등가의 개념에 의한 근사적 정적 및 동적 해 석 논문 등⁽¹³⁻¹⁵⁾을 살펴볼 수 있다. 그러나 이들 논문 들도 대부분 실험, 유한요소 및 특정 경계조건에 대 하여 진동 해석한 것이다.

그 동안 이 저자 등은 한정된 길이의 주름판을 용 접이나 볼트로 이어 결합할 때 이음부를 보강재 및 집중질량으로 고려한 사다리꼴 주름판에 대하여 진동 해석한 논문⁽¹⁶⁾, 적충복합 주름판을 균일 두께의 직교 이방성판 균질화 모델로 취급하여 강성을 해석한 논 문⁽¹⁷⁾, 사다리꼴 주름판에 대한 엄밀강성 및 자유진동 을 해석한 논문 등^(18,19), 주름판의 강성 및 진동과 관 련한 연구를 지속적으로 진행해왔다.

그러나 이들 논문의 대부분은 일반 주름판의 강성 및 진동 해석에 관한 것으로, 많은 산업분야에서 널리 사용되고 있는 중요한 구조물 구성요소임에도 불구하 고 주름판을 심재로 하는 샌드위치 패널에 관하여 강 성 및 진동 해석을 한 연구는 상당히 미진한 상태이다.

따라서 이 연구에서는 정현파형, 삼각파형, 사다리 꼴파형, 구형파형 등으로 주름잡아준 주름판 코어 샌 드위치 패널에 대한 강성을 제시함과 아울러 최적의 샌드위치 패널을 결정한다. 또한 임의의 경계조건에 대한 샌드위치 패널의 진동해석을 함으로써, 각종 주 름판 코어 샌드위치 패널의 실용적이고 효율적인 정 적 및 동적 설계데이터 추출을 위한 비주얼베이직 (visual basic) 프로그램을 완성한다.

2. 주름판 코어 샌드위치 패널의 강성해석

이 연구에서의 해석모델은 정현파형, 삼각파형, 사

다리꼴파형, 구형파형 등의 주름판을 심재로 하는 샌드위치 패널로서 Fig. 1과 같으며, Fig. 2는 각종 파형 중 사다리꼴파형 주름판을 나타낸 것이다. 여 기서, a는 주름판 및 패널의 *x*방향 길이, *b*는 *y*방향 길이, *θ*는 주름각, *t*는 면판 및 코어의 두께, $m_c(=\ell_1/\ell)$ 는 수평 및 경사 길이 비, *h*는 주름높이, a_1 은 주름판 주름요소 하나의 길이, *s*는 주름요소 하 나의 전체길이를 나타낸 것이다.



Fig. 1 Sandwich panels of various waveforms



Fig. 2 Corrugated plate of trapezoidal waveform

2.1 정현파형 샌드위치 패널의 강성

샌드위치 패널의 *x*축에 대하여 순수 굽힘모멘트가 작용하는 경우, 정현과형 주름판 코어 샌드위치 패널 의 *x*면에 대한 굽힘강성(flexural rigidity) *D_x*는 식 (1)과 같다.

$$D_x = \frac{E^3}{12(1-\nu^2)} \frac{a_1}{s} + D_{fr}$$
(1)

여기서, E는 탄성계수, ν 는 푸아송비이고, 정현과형 의 경우 $z = hcos((2\pi/a_1)x)$ 로서, 주름요소의 전체길 이는 $s = \int_0^{a_1} \sqrt{1 + ((2h\pi/a_1)sin(2\pi/a_1)x)^2} dx$ 이며 D_{fr} 은 면판의 굽힘강성으로 식 (2)와 같다.

$$D_{fr} = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left\{ 2 + \frac{24}{t^2} (h+t)^2 \right\}$$
(2)

정현파형 주름판 코어 샌드위치 패널 하나의 주름 요소에 대한 y면의 단위길이 당 면적관성모멘트를 중 립축에 대하여 구하면, 샌드위치 패널의 y면에 대한 굽힘강성 Dy는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$D_y = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{6h^2}{t^2} + D_{fr}$$
(3)

정현파형 주름판 코어 샌드위치 패널의 *x*면에 대 한 비틀림모멘트는 정현파형을 *x*축에 등가하고 면판 의 비틀림각과 합하여 유도함으로써, *x*면의 비틀림강 성(torsional rigidity) $D_{xy}(=D_{yx})$ 는 식 (4)와 같이 구 할 수 있다.

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \frac{s}{a_1} + D_{fr}(1-\nu)$$
(4)

2.2 삼각파형 샌드위치 패널의 강성

정현파형 주름판 코어 샌드위치 패널과 마찬가지 의 개념으로 유도하면, 삼각파형 주름판 코어 샌드위 치 패널의 *x*면에 대한 굽힘강성 *D_x*, *y*면에 대한 굽 힘강성 *D_y*, 각각 *x*면 및 *y*면의 비틀림강성 *D_{xy}*, *D_{yx}* 는 식 (6) ~ (8)과 같이 된다.

$$D_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}\cos\theta + D_{fr} \tag{5}$$

$$D_{y} = \frac{Bt^{3}}{12(1-\nu^{2})} \frac{4h^{2}}{t^{2}\cos\theta} + D_{fr}$$
(6)

$$D_{xy} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \frac{1}{\cos^2\theta} + D_{fr}(1-\nu)$$
(7)

$$D_{yx} = \frac{Bt^3}{12(1+\nu)} \frac{1}{\cos\theta} + D_{fr}(1-\nu)$$
(8)

2.3 사다리꼴파형 샌드위치 패널의 강성

마찬가지로 사다리꼴파형 주름판 코어 샌드위치 패널의 강성은 식(9)~(12)와 같다.

$$D_x = \frac{E^3}{12(1-\nu^2)} \frac{a_1}{s} + D_{fr}$$
(9)

$$D_{y} = \frac{Bt^{3}}{12(1-\nu^{2})} \frac{(4h^{2}+12m_{c}h^{2}+m_{c}t^{2})}{t^{2}(m_{c}+\cos\theta)} + D_{fr} (10)$$

$$D_{xy} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \frac{(m_c + \cos\theta)}{(m_c + \cos^3\theta)} + D_{fr}(1-\nu) \quad (11)$$

$$D_{yx} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \frac{s}{a_1} + D_{fr}(1-\nu)$$
(12)

2.4 구형파형 샌드위치 패널의 강성

구형과형 주름판 코어 샌드위치 패널의 강성은 식 (13)~(16)과 같다.

$$D_x = \frac{E l^3}{12(1-\nu^2)} \frac{m_c}{(m_c+1)} + D_{fr}$$
(13)

$$D_{y} = \frac{Et^{3}}{12(1-\nu^{2})} \frac{(4h^{2}+12m_{c}h^{2}+m_{c}t^{2})}{t^{2}m_{c}} + D_{fr}$$
(14)

$$D_{xy} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} + D_{fr}(1-\nu)$$
(15)

$$D_{yx} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \frac{(m_c+1)}{m_c} + D_{fr}(1-\nu)$$
(16)

3. 주름판 코어 샌드위치 패널의 진동해석

주름판 코어 샌드위치 패널의 최대변형에너지 (V_{max})와 최대운동에너지(T_{max})는 식(17), (18)과 같 이 나타낼 수 있다.

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 31(5): 535~542, 2021 537

$$V_{\max} = \frac{1}{2} \int_{0}^{b} \int_{0}^{a} [D_{x} (\frac{\partial^{2} W}{\partial x^{2}})^{2} + D_{y} (\frac{\partial^{2} W}{\partial y^{2}})^{2} + D_{y} (\frac{\partial^{2} W}{\partial x^{2}})^{2} + (D_{xy} + D_{yx}) (\frac{\partial^{2} W}{\partial x \partial y})^{2}] dx dy \quad (17)$$

$$T_{\rm max} = \frac{1}{2}\rho t\omega^2 \int_0^b \int_0^a W^2 dx dy \tag{18}$$

여기서, $D_1 = \nu_y D_x + \nu_x D_y$ 이고, ρ 는 밀도, ω 는 각진 동수(angular frequency)이다. 그리고 Betti의 상반 작용의 정리(Betti's reciprocal theorem)에 의하여 $\nu_y D_x = \nu_x D_y$ 로 나타낼 수 있고, 푸아송비 ν_x , ν_y 는 재료상수가 아닌 구조 시스템의 기하학적 형상에 따 른 탄성상수이다.

주름판 코어 샌드위치 패널의 Ritz법에 의한 진동 해석을 함에 있어 도입되는 처짐함수는 식(19)와 같 이 가정한다.

$$W(x,y) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} A_{mn} X_m(x) Y_n(y)$$
(19)

여기서, $X_m(x)$ 과 $Y_n(y)$ 는 각각 $x \ g \ y$ 방향의 직 add(orthogonality)을 만족시키는 함수로서, 이 연구 에서는 보함수(beam function)를 도입한다.

식 (20)은 최소에너지원리(minimum total energy principle)를 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial V}{\partial A_{kl}} - \frac{\partial T}{\partial A_{kl}} = 0, \quad (k = 1, 2, ..., M, \quad l = 1, 2, ..., N)$$
(20)

따라서 식(19)를 식(17)과 식(18)에 대입하고 최 소에너지원리 식(20)에 적용하면 식(21)과 같은 고 유치문제로 유도된다.

$$\sum_{m=1n=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} \left[S_{mn}^{kl} - \lambda^2 \delta_{mn} \right] A_{mn} = 0$$

$$(k = 1, 2, ..., M; \ l = 1, 2, ..., N)$$
(21)

여기서, $\lambda^2 = \rho t \omega^2 a^4 / D$, $\omega = 2\pi f_{mn}$, $\delta_{mn} = 1$ $(m = k \mathfrak{P} n = l)$, $\delta_{mn} = 0$ $(m \neq k 또는 n \neq l)$ 이다.

1)
$$m = k$$
 \mathfrak{P} $n = l \mathfrak{Q}$ \mathfrak{P}
 $S_{mn}^{kl} = \alpha \kappa_m^4 + \beta (a/b)^4 \kappa_n^4 + \delta (a/b)^2 E_{mm} F_{nn} + \gamma (a/b)^2 G_{mm} H_{nn}$
(22)

2)
$$m \neq k$$
 또는 $n \neq l$ 인 경우
 $S_{mn}^{kl} = \delta/2(a/b)^2 (E_{km}F_{nl} + E_{mk}F_{ln})$
 $+ \gamma(a/b)^2 G_{mk}H_{nl}$
(23)

여기서, α, β, δ, γ는 무차원 강성으로 식 (24)와 같다.

$$\alpha = \frac{D_x}{D}, \beta = \frac{D_y}{D}, \delta = \frac{D_1}{D}, \gamma = \frac{2(D_{xy})_a}{D}$$
(24)

D는 코어와 면판이 모두 평판인 경우의 강성 즉, $D = E(3t)^3/r12(1-\nu^2)$ 이고, $(D_{xy})_a = (D_{xy} + D_{yx})/2$ 이다.

$$E_{mm} = a \int_{0}^{a} X_{m}^{''}(x) X_{m}(x) dx$$

$$F_{nn} = b \int_{0}^{b} Y_{n}^{''}(y) Y_{n}(y) dy$$

$$G_{mm} = a \int_{0}^{a} \{X_{m}^{'}(x)\}^{2} dx$$

$$H_{nn} = b \int_{0}^{b} \{Y_{n}^{'}(y)\}^{2} dy$$
(25)

$$E_{mk} = a \int_{0}^{a} X_{m} X_{k}^{''} dx, \quad E_{km} = a \int_{0}^{a} X_{m}^{''} X_{k} dx$$

$$F_{nl} = b \int_{0}^{b} Y_{n} Y_{l}^{''} dy, \quad F_{ln} = b \int_{0}^{b} Y_{n}^{''} Y_{l} dy \quad (26)$$

$$G_{mk} = a \int_{0}^{a} X_{m}^{'} X_{k}^{'} dx, \quad H_{nl} = b \int_{0}^{b} Y_{n}^{'} Y_{l}^{'} dy$$

또한 (a/b)는 주름판 코어 샌드위치 패널의 형상 비, κ_m , κ_n 은 각각 x, y방향의 경계조건에 따른 보함 수의 파수(wave numbers), f_{mn} 은 고유진동수(natural frequencies)를 나타낸 것이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 주름판 코어 샌드위치 패널의 강성

앞서 언급한 바와 같이 주름판 코어 샌드위치 패널 은 각각 정현파형, 삼각파형, 사다리꼴파형, 구형파형 등의 주름판을 심재로 하는 샌드위치 패널로 나눌 수 있다. 따라서 이 연구에서는 이러한 각종 샌드위치 패널에 대하여 동일중량 하에서의 주름판 형상에 따 른 강성을 구하고 비교함으로써 최적의 샌드위치 패 널을 결정한다.

Table 1은 정현파형의 주름판 높이 h가 25 mm일 때와 동일중량의 크기인 각각 삼각파형, 사다리꼴파 형, 구형파형의 주름판 주름높이 *h*, 수평 및 경사 길 이 비 *m_c*(=ℓ₁/ℓ), 주름각 *θ*를 나타낸 것이다.

Table 2와 Fig. 3은 Table 1의 정현파형의 주름판 높이 h가 25 mm일 때와 동일중량의 크기인 삼각파 형, 사다리꼴파형, 구형파형의 주름판 코어 샌드위치 패널에 대한 무차원 굽힘 및 비틀림 강성을 나타낸 것이다. 그 결과, 삼각파형 주름판 코어 샌드위치 패 널의 굽힘 및 비틀림 강성이 전반적으로 다른 파형의 경우와 비교하여 큼을 알 수 있고 특히, 삼각파형 주 름판 코어 샌드위치 패널의 *y*면 굽힘 강성 *D_y*가 최 대치임을 알 수 있다.

Table 1 Waveform sizes under same weight with
cosine wave of h = 25 mm

Waveform	h	m_c	θ
Cosine wave	25	-	-
Triangle wave	26.7210	-	46.9058
Trapezoidal wave	17.0239	1	68.5062
Tectangular wave	11.5925	2.1566	-

Table 2 Rigidities of sandwich panels under same weight with cosine wave of h = 25 mm

Waveform	D_x/D	D_y/D	D_{xy}/D
Cosine wave	32.0994	37.6296	22.4898
Triangle wave	35.8761	42.0440	25.1423
Trapezoidal wave	17.3456	22.3750	12.1601
Rectangular wave	9.8882	12.6583	6.9360



Fig. 3 Rigidities of sandwich panels under same weight with cosine wave of h = 25 mm

Table 3은 정현파형, 삼각파형, 사다리꼴파형, 구형 파형의 주름판 높이 *h*가 모두 25 mm일 때의 각각 주름판 주름요소 하나의 전체길이 *s*, 수평 및 경사 길이 비 *m_e*(=ℓ₁/ℓ), 주름각 *θ*를 나타낸 것이다.

Table 4와 Fig. 4는 Table 3과 같은 주름판 높이 *h* 가 모두 25 mm일 때의 정현과형, 삼각파형, 사다리꼴 파형, 구형파형의 주름판 코어 샌드위치 패널에 대한 무차원 굽힘 및 비틀림 강성을 나타낸 것으로, 모든 파형의 샌드위치 패널에 대하여 *x*면의 굽힘 강성 *D_x* 와 비틀림 강성 *D_{xy}*의 크기가 거의 차이가 없음을 알 수 있으며, 이것은 같은 주름높이를 갖는 주름판의 경우 주름형상에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그 러나 *y*면의 굽힘 강성 *D_y*는 주름형상 및 중량에 따

Table 3 Waveform sizes when h = 25 mm

Waveform	s	m_c	θ
Cosine wave	146.37	-	-
Triangle wave	141.4214	-	45
Trapezoidal wave	164.5613	0.5	65.7
Rectangular wave	200	1	-

Table 4 Rigidities of sandwich panels when h = 25 mm

Waveform	D_x/D	D_y/D	D_{xy}/D
Cosine wave	32.0994	37.6296	22.4898
Triangle wave	32.1003	37.3119	22.4961
Trapezoidal wave	32.0994	42.2435	22.4894
Rectangular wave	32.0926	46.9259	22.4907



Fig. 4 Rigidities of sandwich panels when h = 25 mm

라 다소 차이 있음을 알 수 있다. 특히 정현파형과 삼 각파형 주름판의 경우 강성 크기가 거의 같음을 알 수 있는데, 이것은 정현파형 주름판보다 삼각파형 주 름판 코어 샌드위치 패널이 적은 중량으로 비교적 더 큰 강성을 나타냄을 알 수 있다.

4.2 주름판 코어 샌드위치 패널의 진동

이 연구에서는 각종 주름판 코어 샌드위치 패널에 대한 강성뿐만 아니라 진동해석을 하고 비주얼 베이 직 프로그래밍을 하였다. Fig. 5는 완성된 정현파형 주름판 코어 샌드위치 패널에 대한 진동해석 프로그 램의 데이터 입력창을 나타낸 것이다.

Table 5는 a/b=1, a=1000 mm, 주름판 및 면판 의 두께가 t=5 mm이고, 주름수가 $n_c=10$ 개, 주름 판 및 면판의 밀도가 $\rho=7850$ kg/m³, 탄성계수가 E=200000 MPa, 푸아송비가 $\nu=0.3$ 인 정현파형의 주름판 높이 h가 25 mm일 때와 동일중량의 크기인 삼각과형, 사다리꼴과형, 구형과형의 주름판 코어 샌 드위치 패널에 대하여, x=0와 a에서 자유와 자유, y=0와 b에서 고정과 자유의 경계조건, 즉 F-F&C-F 에 대한 5차까지의 고유진동수를 나타낸 것으로서, 강 성과 마찬가지로 삼각과형 주름판 코어 샌드위치 패 널의 진동수가 전반적으로 큼을 알 수 있다. 여기서, F-F&C-F는 자유(free), 고정(clamp), 단순지지(simply support)의 경계조건을 이니셜로 표기한 것이다.

Table 6은 주름판 코어 샌드위치 패널에서 가능한 36개 경계조건 중 임의로 선택한 3가지 경계조건에 대

🖏 WCP-SWP의 진동해석(Ritz)	- 🗆 ×
파일 편집 데이타입력 및 해석 해석결과 보기	
경계조건	차원
×방향 경계조건 : Free-Free _	X방향 차원(M): 5 🗾
Y방향 경계조건 : Clamp-Free ▼	Y방향 차원(N): 5 ▼
주름판의 형상	재료성질
x 방향길이 a (mm) : 1000 🗸	프와송 비Vc: 0.3 💌
형상비(a/b): 1.0 ▼	탄성계수Ec (N/mm ²): 200000 💌
파형주름판의 높이 h (mm) : 25 🔹 💌	주름판 비중Sc: 7.85 💌
주름요소 전체길이 s (mm) : 146.37 💌	프와송 비Vf: 0.3 🔹
주름수n (개): 10 💌	탄성계수타(N/mm ²): 200000 💌
주름판 두께Tc(mm): 5 ▼	면판의 비중Sf: 7.85 🔹
면판의 두께Tf(mm): 5 . ▼	해 석 취 소

Fig. 5 Data input window for vibration analysis

하여 파형별로 진동 해석한 기본진동수(fundamental frequency)를 나타낸 것이다.

Table 5	Natural frequencies of sandwich panels under
	same weight with cosine wave of $h = 25 \text{ mm}$
	for boundary condition of F-F&C-F

Waveform	f_i	Frequencies [Hz]
Cosine wave	1 2 3	78.2027 180.227 478.074
	4 5	570.424 671.796
Triangle wave	1 2 3 4 5	82.6624 190.544 505.347 603.053 710.197
Trapezoidal wave	1 2 3 4 5	60.3401 134.351 367.096 422.765 507.297
Rectangular wave	1 2 3 4 5	45.3824 101.344 276.239 318.972 382.233

Table 6Fundamental frequencies of sandwich panelsunder same weight with cosine wave of h = 25 mm for various boundary conditions

Boundary condition	Waveform	Frequency [Hz]
	Cosine wave	768.145
	Triangle wave	812.039
C-CaC-C	Trapezoidal wave	576.648
	Rectangular wave	434.653
	Cosine wave	147.024
	Triangle wave	155.433
C-F&C-F	Trapezoidal wave	109.796
	Rectangular wave	82.8016
	Cosine wave	276.626
C-F&S-S	Triangle wave	292.430
	Trapezoidal wave	209.764
	Rectangular wave	157.991
5. 결 론

이 연구에서는 정현파형, 삼각파형, 사다리꼴파형, 구형파형 등 각종 주름판 코어 샌드위치 패널들에 대 한 강성 및 진동 해석을 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일중량의 정현파형, 삼각파형, 사다리꼴파형, 구형파형의 주름판 코어 샌드위치 패널의 경우, 삼각 파형 주름판 코어 샌드위치 패널이 최대치의 강성을 나타냄으로써 정량적 측면에서 최적의 샌드위치 패널 이라고 할 수 있다.

(2) 동일 주름높이를 갖는 샌드위치 패널의 경우, 정현과형 주름판보다 삼각과형 주름판 코어 샌드위치 패널이 적은 중량으로 비교적 더 큰 강성을 나타낸다.

(3) 비주얼베이직에 의한 각종 주름판 코어 샌드위 치 패널의 강성 및 진동 해석 프로그램을 완성함으로 써, 임의의 경계조건 및 형상에 대하여 실용적이고 효율적인 정적 및 동적 설계데이터를 쉽게 얻을 수 있다.

References

(1) Seydel, E. B., 1931, Schubknickversuche mit Wellblechtafeln(Tangential Stress Experiments on Corrugated Steel Panels), Jahrbuch d. Deutsch. Versuchsanstallt für Luftfahrt, E. V., München und Berlin, pp. 233~235.

(2) Fung, Y. C., 1962, On Corrugation-stiffened Panels, Air Force Office of Scientific Research, Washington, D.C.

(3) Kinloch, H., 1967, An Experimental and Theoretical Investigation of Orthotropic Plate Structure, Symposim at Swansea, pp. 213~299.

(4) Perel, D., 1976, The General Instability of Infinitely Long Trapezoidally Corrugated Plaes Under Shear, Requirment Thesis for the Degree of Ph.D. Syracuse University, New York.

(5) Hoppmann, W. H., Huffington, N. J. and Magness, L. S., 1956, A Study of Orthogonally Stiffened Plates, Journal of Applied Mechanics, Vol. 23, No. 3, pp. 343~350. (6) Hearman, R. S. F., 1959, The Frequency of Flexural Vibration of Rectangular Orthotropic Plates with Clamped or Supported Edges, Journal of Applied Mechanics, Vol. 26, No. 4, pp. 537~540.

(7) Vijayakumar, K., 1974, Natural Frequencies of Rectangular Orthotropic Plates with a Pair of Parallel Edges Simply Supported, Journal of Sound and Vibration, Vol. 35, No. 3, pp. 379~394.

(8) Dickinson, S. M., 1978, The Buckling and Frequency of Flexural Vibration of Rectangular Isotropic and Orthotropic Plates Using Rayleigh's Method, Journal of Sound and Vibration, Vol. 61, No. 1, pp. 1~8.

(9) Chen, F. H. K. and Carne, T. G., 1979, Vibration Analysis of Corrugation-stiffened Panels, SAE Transactions, Vol. 87, No. 2, pp. 1705~1717.

(10) Samanta, A. and Mukhopadhyay, M., 1999, Finite Element Static and Dynamic Analyses of Folded Plates, Engineering Structures, Vol. 21, No. 3, pp. 277~287.

(11) Haldar, S. and Sheikh, A. H., 2011, Bending Analysis of Composite Folded Plates by Finite Element Method, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 47, No. 4, pp. 477~485.

(12) Lee, S. Y., Wooh, S. C. and Yhim, S. S., 2004, Dynamic Behavior of Folded Composite Plates Analyzed by the Third Order Plate Theory, International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, No. 7, pp. 1879~1892.

(13) Briassoulis, D., 1986, Equivalent OrthotropicProperties of Corrugated Sheets, Computers & Structures, Vol. 23, No. 2, pp. 129~138.

(14) Peng, L. X., Liew, K. M. and Kitipornchai, S., 2007, Analysis of Stiffened Corrugated Plates Based on the FSDT Via the Mesh-free Method, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 49, No. 3, pp. 364~378.

(15) Liew, K. M., Peng, L. X. and Kitipornchai, S., 2009, Vibration Analysis of Corrugated Reissner-mindlin Plates Using a Mesh-free Galerkin Method, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 51, No. 9~10, pp. 642~652.

(16) Jung, K. and Kim, Y.-W., 2014, Vibration Analysis of Trapezoidal Corrugated Plates with Stiffeners and Lumped Masses, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering,

Vol. 24, No. 5, pp. 414~420.

(17) Park, K.-J., Jung, K. and Kim, Y.-W., 2016, Evaluation of Homogenized Effective Properties for Corrugated Composite Panels, Composite Structures, Vol. 140, pp. 644~654.

(18) Kim, Y.-W. and Jung, K., 2016, Analysis on Exact Rigidity and Free Vibration of Trapezoidal Corrugated Plates, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 7, pp. 787~794.

(19) Kim, Y.-W. and Jung, K., 2018, A Study on Optimal Shape and Refined Vibration of Trapezoidal Corrugated Plates, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 735~741.



Kang Jung received his Ph.D. de gree from Hongik University in 1990. He is a professor of department of mechanical design engineering, Chonnam National University. His research interest includes the structural vibration, mate-

rial behavior.

배관계 시간이력 다지점 가진 해석의 입력 방법에 관한 연구

A Study on Time History Analysis of Multi-support Excitement by Input Methods

라 치 응*·이 은 호*·이 창 균*·임 진 우*·박 노 철*

Chi Woong Ra*, Eun-Ho Lee*, Chang Kyun Lee*, JinWoo Im* and No-Cheol Park[†]

(Received August 17, 2021 ; Revised September 27, 2021 ; Accepted September 27, 2021)

Key Words: Multi-support Excitation(다지점 가진), Seismic Analysis(지진해석), Time History Dynamic Analysis(시간이력 동해석), Nuclear Power Plant Piping System(원전 배관계통)

ABSTRACT

The finite element analysis (FEA) of the nuclear power plant (NPP) system is generally excited by a single representative acceleration data as the supporting points have similar elevations. However, NPP pipes have multiple supporting points so that the multi-support excitation methodology which applies excitation on each support is generally considered to obtain the exact seismic responses. In this research, we study input methods for conducting multi-support excitations in FEA, and all the methods are constructed under time history analysis considered more precise than floor response spectrum analysis. Three types of input methods, namely large mass method, mode superposition transient, and displacement input transient analysis, were considered in this research. As a result, we conclude that all the methods generate similar motion parameters to the reference acceleration data on each supporting point. In addition, it is considered whether there is an appropriate input method to simulate another type of supports by changing the boundary condition on the support area.

―기 호 설 명 ―

 u
 : 절점의 변위 벡터

 φ
 : 구조물의 고유 벡터

 q
 : 모달 좌표계

 r
 : 반영 모드 차수

 X
 : 모달 좌표계로 변환된 고유 행렬

1. 서 론

원전에 대한 유한요소 해석은 지반 가진에 의한 구

 Member, School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Student 조물의 응답을 확인하며, 전체 구조물은 해석적 비용 이 크기 때문에 국부적인 기기 및 계통에 대하여 지 진해석을 수행하는 연구가 활발하다. 국부 계통에 대 한 지진해석은 일반적으로 지지점에 대하여 지진하중 을 인가하며, 대부분의 해석 대상은 지지대 설치 높 이가 같거나 유사하므로 정의된 모든 지지점에 대하 여 같은 지진하중을 입력하게 된다.

원전의 배관 계통은 주변 기기와의 연결성 그리고 외부하중에 대한 응답 감소를 목적으로 다수의 지지 점을 지니게 된다. 이에 따라 배관의 응답은 배관 자 체의 동특성과 더불어 지지대의 설치 조건 및 주변

‡ Recommended by Editor Seon Jun Jang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

[†] Corresponding Author; Member, Yonsei University, Dicision of Mechanical Engineering, Professor E-mail: pnch@yonsei.ac.kr

기기와의 연결에 의한 동특성 변화가 응답에 반영된 다⁽¹⁾. 그중에서도 지지대의 설치 높이가 다양함에 따 라 두드러지는 층 응답을 고려한 지진해석이 필요하 다. 따라서 배관계의 지진해석은 높이로 구분된 지지 점에 대하여 각기 다른 입력을 통해 응답을 예측하는 다지점 가진 입력이 요구된다^(2~5).

이때 다지점 가진 시나리오를 고려한 원전 구조물 의 지진해석은 일반적으로 비용적 장점을 지닌 응답 스펙트럼 해석을 수행하게 된다. 하지만 응답 스펙트 럼 해석은 준정적 해석에 해당하며, transient 거동을 반영함으로써 보다 정밀한 응답을 예측하는 시간 이 력 지진해석의 연구가 활발하게 진행되고 있다⁽⁶⁾.

시간이력 지진해석의 입력은 과거에 발생한 지진의 시간이력 또는 그 지진들로부터 제시된 설계 조건을 만족하는 스펙트럼을 기반으로 생성된 인공지진파를 활용한다⁽⁷⁾. 여기서 해당 연구 및 산업 분야에서 사용 되는 기준데이터의 형태는 가속도이다. 하지만 기존 유한요소해석에서의 시간이력 가속도 입력은 한정된 설치 환경에 대한 입력이 가능하다. 구체적으로 해석 대상 전체에 대한 가속도 입력만이 가능하며 이는 유 사한 높이로 정의된 지지대를 가진 해석 대상에 적합 한 입력 방법이다. 따라서 다지점 가진 지진해석 수행 을 위하여 지지대로 정의된 지점마다 독립적인 가속 도 입력이 가능한 입력 방법에 대한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 다지점 가진 지진해석을 수행하기 위하여 기존 가속도 입력 방법과는 달리, 대상 지지 점에 대하여 가속도를 생성하는 다양한 입력 방법론 을 적용하고자 한다. 구체적으로 모드중첩 시간이력 해석과 거대 질량법, 그리고 지점 변위 입력 방법의 세 가지 입력 방법론에 대하여 지진해석을 수행하고 자 한다. 더불어 각 방법론에 대하여 다지점 가진이 해석 환경에서 실제로 수행하는지 파악하기 위하여 해석의 입력으로 활용되는 가속도 이력과 대표 가속 도 크기의 일치성을 비교하고자 한다. 나아가 지지대 의 경계조건을 변경한 지진해석 수행을 통하여 다양 한 지지대의 결합조건을 모사하기에 적합한 입력 방 법을 선정하고자 한다.

2. 본 론

2.1 모사 배관계 유한요소 해석

다지점 가진 시간이력 해석의 응답을 확인하기 위

하여 실제 배관계와 유사한 형태의 모사 배관계를 대 상으로 지진 응답 해석을 수행하였다. 상용 원전인 ARP1400의 가압기 밀림관을 모사한 배관계는 Fig. 1과 같다. 모사 대상은 8개의 곡관부를 포함한 배관계로 배관 단면의 외경은 330.2 mm, 두께는 33 mm이며 곡관부 굽힘은 495.3 mm의 곡률을 지닌다. 유한요소 해석의 모델은 Table 1과 같이 구성하였으며, 방법론 에 따른 지진응답의 비교를 위하여 감쇠현상을 고려 하지 않은 탄성해석을 수행하였다. 배관의 물성은 스 테인리스강 재질이며 배관의 기존 밀도 7800 kg/m³에 유체에 해당하는 밀도를 인가하였다. 구체적으로 배 관 내부를 차지하는 유체의 부피와 밀도를 통해 총 질량을 계산하여 구조물의 밀도에 추가하는 방식으로 배관의 밀도값을 결정하였다⁽⁸⁾.

배관의 지지대는 높이에 따라 세 지점에 설치한 대 상으로 모사하였다. 2번 지지대를 기준으로 1번과 3 번 지지대의 설치 높이차는 각각 2.16 m와 2.68 m이 다. 더불어 지지대가 설치되는 배관의 단면에 대한 경계조건을 설정함으로써 지지대를 모사하였으며, 지 지대로 정의된 모든 단면에 대하여 완전히 구속되어



Fig. 1 FEM diagram of NPP piping system

Table 1 Finite element model information

	Description
Element type	Solid185
Mesh division	# of elements : 60 768 # of nodes : 76 080
Material properties (SA182 TP316)	Density : 9353.8 kg/m ³ Young's modulus : 175.4 GPa Poisson's ratio : 0.31

있음을 가정하였다. 구체적으로 모든 단면은 단면의 변형이 발생하지 않으며, 단면에 대하여 정의된 지지 점은 모든 자유도가 구속된다. 또한 배관 구조물의 진행 중에 놓인 2번 지지대의 지진하중에 따른 거동 특성을 살펴보고자 전체 지지대를 고려한 모사 배관 계와 더불어 1번, 3번 지지대만을 반영한 모사 배관 계에 대해서도 지진해석을 수행하였다. 이 논문에서 는 1번과 3번 지지대에 경계조건을 설정한 해석 경우 를 ends supported, 그리고 모든 지지대에 대한 경계 조건을 설정한 해석 경우에 대하여 all supported로 부르고자 한다.

각 지지대에 대한 시간이력 가속도 데이터는 층응답 스펙트럼을 기반으로 만들어진 인공지진파이며 시간



Fig. 2 Representative acceleration input data

에 따른 가속도 개형은 Fig. 2와 같다. 이때 인공지진 파는 모든 지지대에 대하여 동일한 위상을 갖도록 생 성되었다. 또한 각 지지대에 작용하는 실제 가속도 크기에 대하여 평균 제곱근과 최대값을 Table 2에 나 타냈다. 2번 지지대를 기준으로 1번과 3번 지지대에 작용한 가속도 크기의 평균 제곱근은 각각 +5.7%와 -10.1%에 해당하며, 인공지진파는 높이에 따라 인가 되는 가속도 크기를 달리하여 생성되었다. 전체 입력 의 시간은 20초이며, 관심 주파수 대역인 50 Hz까지의 성분을 파악하고자 time step은 5 ms로 설정하였다.

지진해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 2021R1을 활용하였으며 모드중첩 시간이력 해석의 경우 PCG(preconditioned conjugate gradient), 거대 질량법과 변위입력 시간이력해석의 경우 HHT (Hilbert-Huang transform) 알고리즘을 기반으로 지 진해석이 수행되었다.

2.2 다지점 가진 시간이력 해석 방법론

입력 방법론에 대한 구분은 full transient 해석을 수행하는지에 대한 여부로 구분한다. 해석의 기본 단 위인 절점에 대하여 모든 행렬항이 연산에 참여하는 full 시간이력해석은 transient 거동을 반영하기에 적 절하지만 해석 부하가 높게 나타난다. 이와 달리 연 산에 참여하는 행렬항을 줄인다면 시간이력해석이 지 닌 비용적 단점을 완화할 수 있게 된다. 따라서 CMS(component mode synthesis)를 기반으로 연산 행렬을 간소화할 수 있는 모드 중첩 시간이력 해석을 입력 방법으로 선정하였다⁽⁹⁾.

Table 2	Input	acceleration	data	on	each	support	

Supports	Supp [m	ort 1 /s²]	Supp [m	ort 2 /s ²]	Supj [n	port 3 1/s ²]
methods	RMS	MAX	RMS	MAX	RMS	MAX
Reference	4.83	14.86	4.57	14.00	4.11	11.49
Mode superposition	4.79	14.84	4.54	13.97	4.09	11.45
Error(%)	-0.84	-0.16	-0.69	-0.27	-0.54	-0.33
LMM	4.78	14.81	4.53	13.94	4.08	11.43
Error(%)	-1.07	-0.37	-0.91	-0.48	-0.70	-0.51
Displacement input	4.79	14.84	4.54	13.97	4.09	11.45
Error(%)	-0.82	-0.15	-0.68	-0.25	-0.53	-0.32

또한 지지점에 대하여 동일한 가속도 파라메터를 생성해내는 입력 방법론을 고려하고자 한다. 즉 지점 에 대하여 직접 가속도 입력을 하지 아니하고, 하중 또는 변위값을 입력함으로써 지점에 대한 가속도를 생성하는 입력 방법론을 적용하고자 한다. 이때 하중 을 입력으로 하는 입력 방법은 거대 질량법이며 지점 변위 입력 방법 또한 해당 분류에 속한다.

(1) 모드 중첩 시간이력 해석

Craig와 Bampton은 모드 중첩에 근거하여 구속된 경계조건에 놓인 유한요소에 대한 등가의 운동방정식 을 기술하였다⁽¹⁰⁾. 따라서 모드 중첩 시간이력 해석을 통해서는 구속된 경계조건으로 설정된 지지대에 대하 여 독립적인 가속도 입력이 가능하다.

$$u(t) = \sum_{i=1}^{r} \phi_i q_i(t) = Xq(t)$$
(1)

모드 중첩 방법론의 원리는 모달 정보를 통해 더 작은 양의 연산으로도 transient 응답을 반영하는 것 이다. 구체적으로 좌표 변환을 통하여 특정 지점에 대한 변위값을 도출하는 과정에서 연산량을 줄이는 원리가 식 (1)에 나타나 있다. 즉 모달 정보를 통해 연산에 참여하는 행렬의 항을 줄일 수 있으며, 행렬 의 모든 항이 반영되는 기존 full transient 해석 대비 해석 비용이 감소하는 장점을 지닌다.

또한 식 (1)에서 r에 해당하는 반영 모드의 차수는 해석을 진행함에 있어서 직접 결정하는 인자이다. 반 영 차수가 높을수록 full transient 해석과의 일치성이 우수하지만 해석 비용과는 상반된 관계를 지니고 있 다. 이 연구에서의 반영 차수는 모드 해석 결과로부 터 결정된 좌표축 세 방향에 대한 유효 질량을 기준 으로 결정하였다. 구체적으로 차수 증가에 따른 누적 유효 질량이 전체 구조물의 질량의 90 %가 넘는 차 수로 선정하였으며, 좌표축 세 방향에 대하여 해당 기준을 모두 만족하는 56차까지를 고려하여 지진해 석을 수행하였다.

(2) 거대 질량법(LMM; large mass method)

지진하중에 대하여 가속도 입력을 활용하는 일반 적인 방법 중 하나인 거대 질량법을 적용하여 지점 가속도 입력을 수행하였다. 해당 방법론은 구조물에 비해 상대적으로 거대한 질량을 경계조건에 부착함으 로써 이를 지반으로 지정하고, 지점에 대한 하중(가속 도×거대 질량)을 입력으로 해석을 수행하게 된다⁽¹¹⁾. 이는 기존 가속도 입력과는 달리 하중 입력은 각 지 점에 대하여 입력이 가능하기 때문에 다지점 가진과 일치성을 지닌 입력이 가능하며, 또한 주어진 가속도 데이터를 그대로 활용할 수 있다는 장점을 지니고 있 다. 지진해석에서 활용한 거대 질량은 각 지지대 단 면에 대해 정의하였으며 그 크기는 구조물 질량의 10³배의 질량으로 정의하였다.

(3) 지점 변위 입력 시간이력 해석

시간이력 변위를 입력으로 활용하기 위하여 가속 도 데이터의 수치 적분이 요구되며, 이를 통해 기존 대표 가속도와 일치성을 지닌 가속도 개형을 생성할 수 있게 된다. 하지만 수치 적분 과정에서의 미지수 인 초기 적분점의 설정에 따라 최종 시각에서 변위값 이 초기 위치와 달라질 수 있다. 이러한 오차를 줄이 고자 기준선 보정(baseline correction)을 수행하였으 며⁽¹²⁾ Fig. 3과 같이 최종 시각에 나타나는 변위값을 보정함으로써 기존 대표 가속도와의 일치성이 드러나 도록 변위 입력을 생성하였다.

2.3 방법론에 따른 다지점 가진 유효성 및 지진해석 결과 일치성 검증

다지점 가진 조건에 부합하는지 판단하기 위하여, 방법론에 따라 층 높이에 따른 각 지지점에 대해 입 력으로 활용된 가속도 값을 비교하고자 한다. 이를 위하여 각 지지대에 입력으로 활용된 시간이력 가속 도 벡터의 크기에 대한 평균 제곱근 및 최대값을 Table 2에 나타내었다. 방법론에 따라 입력된 가속도 는 대표 가속도 대비 최대 1.1%의 오차를 지니며,



Fig. 3 Generated time-history displacement input data (NS direction on support 1)

높이에 따라 입력된 가속도 크기의 차이를 확인할 수 있다. 다시 말해 세 방법론 모두 지지점을 입력 지점 으로 하는 다지점 가진이 수행되었으며, 대표 가속도 데이터와 일치성을 지닌 유효한 지진해석이 수행되었 음을 알 수 있다.

방법론에 따른 지진 해석 결과에 대한 일치성을 검증하고자 최대 응력이 나타난 지점인 취약부에 대 한 시간이력 등가응력(von-mises stress)을 비교하였 으며 ends supported 해석 경우는 Fig. 4, 그리고 all supported 해석 경우는 Fig. 5에 나타내었다. 또한 선 도에서 지점으로 표시된 시간이력 응력 선도에 나타 난 최대 응력에 해당하는 값과 최대응력이 발생한 시 각을 Table 3에 나타내었다.

Ends supported 해석 경우에 대하여 거대 질량법 과 지점 변위입력 방법의 최대 응력이 발생하는 시각 이 일치하며 그 경향성이 매우 유사하다. 또한 두 입 력 방법에 대하여 최대 응력값의 차이가 0.5 %로 일 치하는 결과가 나타난다. 이와 달리, 모드 중첩법을 이용한 가속도 입력방법은 경향성은 유사하지만 응력 분포가 변위 입력 대비 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 최대 응력값을 기준으로 다른 입력 방법의 결과 보다 약 6 % 크게 나타난다. 또한 ends supported 해



(b) Mode superposition vs. displacement input method Fig. 4 Equivalent stresses of ends supported case

석 경우에 대한 취약부는 1번 지지대 인근으로 모두 동일한 취약부를 갖는다.

All supported 해석 경우에 대하여 ends supported 해석 경우와 유사하게 거대 질량법과 변위입력 방법 의 일치성이 높고 최대 응력이 발생하는 시각이 동일 하다. 하지만 모드 중첩 방법과 변위 입력 방법 간의 최대 응력 발생 시각과 최대 응력의 크기 차이가 두드 러진다. 최대 응력이 발생한 위치는 8번 곡관의 측면 부로 동일하나, 최대 응력은 37.6 %의 차이를 지닌다. 정리하자면 거대 질량법과 변위 입력 시간이력 해 석은 다지점 가진 시나리오 구성에 대한 응답의 일치 성이 높게 나타나며, 모드 중첩 방법은 지지대의 개



(b) Mode superposition vs. displacement input method

Fig. 5 Equivalent stresses of all supported case

Table 3	Maximum	equivalent	stress	[MPa]
---------	---------	------------	--------	-------

		Туре	
Method	Ends	All	All
	supported	supported	supported(*)
Mode	591.3	234.0	234.0
superposition	(12.840 s)	(18.055 s)	(18.055 s)
LMM	557.9	171.0	171.0
	(12.850 s)	(16.090 s)	(16.090 s)
Displacement	555.7	170.0	257.3
input	(12.850 s)	(16.090 s)	(10.440 s)

* : Considering another boundary condition.

수가 많아질수록 오차가 더 커진다. 이러한 오차의 원인은 해석과정에서 요소가 가질 수 있는 자유도가 제한되기 때문이다. 구체적으로 full transient 해석에 서의 요소가 가질 수 있는 자유도와 비교할 때, 한정 된 모드 차수가 모달 좌표계로 자유도를 제한하기 때 문에 transient 거동을 예측함에 있어서 오차가 발생 한다. 따라서 모드 중첩 방법론을 적용한 입력 방법 은 ends supported와 같은 단순한 지지대 구성을 지 닌 모사 배관계에 한하여 적절한 입력 방법이 될 수 있다.

2.4 지지대 경계조건의 변경

방법론에 따른 응답의 유사성 확인을 위하여 기존 의 유한요소해석 모델에서 지지대에 대한 정의는 배 관에 지지대가 완전하게 결합한다는 가정 아래 지진 해석을 수행하였다. 구체적으로 지지점으로 정의된 지지대의 단면에 대하여 단면의 변형을 허용하지 않 고 단면에 놓인 모든 절점이 동일한 자유도를 갖도록 해석 모델을 구성하였다. 하지만 실제 지지대의 설치 및 결합조건은 다양하며, 지지대의 경계조건 설정에 따라 다른 시간이력 지진 응답이 도출될 수 있다. 따 라서 대상 모사 배관계에 대하여 배관 구조물 중간에 놓인 2번 지지대에 대한 경계조건 설정을 달리하여 지진해석을 수행하였다. 구체적으로 2번 지지대의 경 계조건에 대하여 단면에 놓인 각 절점에 대하여 독립 적인 자유도를 가질 수 있도록 설정하여 시간이력 지 진해석을 수행하였다.

경계조건 설정을 변경한 지진 해석 경우에 대하여, 최대 응력이 발생하는 8번 곡관에 대한 등가응력 선 도는 Fig. 6과 같이 나타난다. 거대 질량법의 경우 경 계조건 설정을 변경하지 않은 Fig. 5(a)와 동일한 응 답이 도출되는 반면, 변위 입력을 통한 시간이력해석 은 경계조건 설정의 변경이 반영된 응답이 도출된다. 또한 실제 해석에서 활용된 2번 지지대 단면에 대한 가속도 분포를 Fig. 7에 나타냈다. 변위 입력 방법은 Fig. 7(a)와 같이 단면 거동이 달라졌으나, 거대 질량 법에 대해서는 Fig. 7(b)와 같이 경계조건 변경 이전 시점과 일치하는 응답이 나타남을 알 수 있다. 구체 적으로 변위 입력에서 나타나는 단면 거동은 단면 중 심점에 대하여 3축 회전이 가능한 거동을 나타내지만 거대 질량법의 경우 회전에 대한 자유도가 반영되지 않았으며 두 대상 구조물은 서로 다른 동적인 특성을



Fig. 6 Equivalent stress of all supported and changing boundary condition on support 2



Fig. 7 Acceleration distribution on support 2 of displacement input method and LMM

갖는다. 따라서 배관 구조물의 동특성 변화가 반영된 변위 입력 방법에 대해서는 더 많은 자유도가 부여됨 에 따라 Fig. 6에서와 같이 8번 곡관과 같은 취약부에 서 국부적으로 응력 집중이 발생하여 더 큰 응답을 나타내기도 한다.

정리하자면 변위 입력 방법을 통해 의도하는 경계

조건의 설정이 가능하며, 거대 질량법의 경우 단면 거동에 대한 자유도를 부여했음에도 완전하게 구속 되어 있는 지지대를 모사한 해석 경우와 유사한 응답 을 나타낸다. 따라서 다지점 가진을 고려한 배관계의 지진해석 중에서도 지지대 설치 조건에 따른 구조물 의 동특성 변화를 반영하고자 할 때, 거대 질량법은 한계가 존재하며 변위 입력 방법이 적절하다고 할 수 있다.

3. 결 론

이 연구를 통해 배관계의 다지점 가진 시간이력해 석의 입력 방법에 대하여 아래와 같은 결론을 도출하 였다.

• 높이차를 지닌 배관계를 대상으로 모드 중첩 시 간이력 해석과 거대 질량법, 그리고 지점 변위 입력 방법론을 적용하여 다지점 가진 지진해석을 수행하였 으며 각 방법론에 대하여 실제 해석의 입력으로 활용 된 가속도와 대표 가속도 데이터 간의 일치성을 확인 하였다.

• 지지대의 강체 거동 및 지지단면의 단일 자유도 를 가정한 경우 거대 질량법과 지점 변위 입력 방법 론이 가능하며, 모드 중첩 시간이력 해석의 경우 양 단 지지대 설치와 같은 단순 모사 배관계에 한해 지 진해석이 가능하다.

• 지지대 단면의 거동에 대한 특성을 고려하고자 하는 다지점 가진 지진해석을 수행하는 경우 지점 변 위 입력 방법론이 가능하다.

• 위 사실을 바탕으로 모사 배관계를 대상으로 하는 지진해석 중에서도 높이 차에 의한 다지점 가진 해석을 수행하고자 할 때 적용할 수 있는 입력 방법 을 확인하였다. 또한 다지점 가진 지진해석에 있어 지지대의 경계조건의 설정 범위에 따른 적절한 입력 방법론에 대해 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 한 연구과제입니다. (No. 20193110100020, 해외 내 진분석 기술기준을 적용한 표준형 원전 설계초과지진 대응 기술개발).

References

(1) Chen, Y. and Soong, T., 1988, Seismic Response of Secondary Systems, Engineering Structures, Vol. 10, No. 4, pp. 218~228.

(2) Shaw, D. E., 1975, Seismic Structural Response Analysis for Multiple Support Excitation, http://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/284 03/K7-3.pdf?sequence=1.

(3) Leimbach, K. R. and Schmid, H., 1979, Automated Analysis of Multiple-support Excitation Piping Problems., Nuclear Engineering and Design, Vol. 51, No. 2, pp. 245~252.

(4) Liu, G. H., Lian, J. J., Liang, C. and Zhao, M., 2017, An Effective Approach for Simulating Multi-support Earthquake Underground Motions, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 4635~4659.

(5) Kai, S., Watakabe, T., Tochiki, K., Kaneko, N., Tsukimori, K. and Otani, A., 2018, Study on Piping Seismic Response under Multiple Excitation, Journal of Pressure Vessel Technology-transactions of the ASME, Vol. 140, No. 3, 031801.

(6) Park, J. B., Lee, S. J., Lee, E. H., Park, N. C. and Kim, Y. B., 2019, Seismic Responses of Nuclear Reactor Vessel Internals Considering Coolant Flow under Operating Conditions, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 51, No. 6, pp. 1658~1668.

(7) Ni, S. H., Xie, W. C. and Pandey, M. D., 2011, Tri-directional Spectrum-compatible Earthquake Time-histories for Nuclear Energy Facilities, Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, No. 8, pp. 2732~2743.

(8) Lee, C. K., Lee, S. J., Lee, E. H. and Park, N. C., 2020, Methodology for Time History Analysis of Piing System Contains internal Fluid Including Natural Frequency Separation Effect, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 112~118.

(9) ANSYS Inc., 2021, Structural Analysis Guide, 2021R1, pp. 130~140.

(10) Craig Jr, R. R. and Bampton, M. C., 1968, Coupling of Substructures for Dynamic Analyses, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 6, No. 7, pp. 1313~1319. (11) Kim, Y. W. and Jhung, M. J., 2011, Mathematical Analysis Using Two Modeling Techniques for Dynamic Responses of a Structure Subjected to a Ground Acceleration Time History, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 43, No. 4, pp 361~374.

(12) Shin, T. M. and Shin, E. S., 2000, Study on Input Baseline Corretion in Nonlinear Seismic Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 338~344.



Chi Woong Ra is a graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include structural vibration, non-linear finite element analysis especially in NPP piping systems.



systems.

Eun-Ho Lee is a graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include structural vibration, impact analysis in canister, non-linear finite element analysis especially in NPP components and piping



Chang Kyun Lee is currently an engineer at Samsung Construction & Trading Corporation. He received his master's degree in mechanical engineering from Yonsei University. His research interests include structural vibration, non-linear finite element anal-

ysis especially in NPP piping systems.





Jin Woo Im is a graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include impact analysis, non-linear finite element analysis especially in canister which contains spent nuclear fuel.

No-Cheol Park serves as a Professor in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include vibration, optics.

경량벽체로 구성된 소형 공동주택의 바닥충격음 특성 연구

A Study on the Floor Impact Noise of Small Size Multi Residential House with Light-weight Dry Walls

김 태 민⁺∙배 진 영*

Tae-Min Kim[†] and Jin-Young Bae^{*}

(Received August 17, 2021 ; Revised September 28, 2021 ; Accepted September 28, 2021)

Key Words: Floor Impact Noise(바닥충격음), Effective Plate(유효 평면), Mode Shape(모드 형상), Separated Wall(세대간 경계벽), Load-bearing Wall(내력벽)

ABSTRACT

Non-load bearing walls are widely used to facilitate the redesign of multi-residential housing spaces. However, as there are different noise characteristics between load bearing walls and non-load bearing walls, the effect of implementing non-load bearing walls on floor impact noise and slab vibration compared to load bearing walls needs to be studied. In this study, field experiments are carried out in a mock-up structure with various types of light-weight dry walls to evaluate the effect of implementing non-load bearing walls on floor impact noise and slab vibration. We find that there are little differences in the slab vibration and the floor impact noises between the different types of light-weight dry walls. This study also performs a series of numerical analyses for different types of light-weight walls and load-bearing walls to evaluate the effects on slab vibration and floor impact noise. From the numerical analyses, it is observed that the types of light-weight walls makes little difference to the effect on slab vibration and floor impact noise which is consistent with the field test result. However, the numerical analyses show that the floor impact noise characteristics are different between the load-bearing walls and the light-weight walls because the effective plates are different, although the configuration of the slab is the same.

1. 서 론

이웃사이센터에 접수된 공동주택 층간소음 피해 건수는 지속적으로 증가하고 있으며⁽¹⁾, 기술적 또는 제도적으로 층간소음을 저감하기 위한 많은 연구가 진행 중에 있다. 국토교통부에서는 2017년부터 층간 소음 범위에 바닥충격음 외 벽간소음 등 인접한 세대 간의 소음(대각선 세대 포함)을 포함하여 층간소음 방지를 위한 제도를 강화하고 있다⁽²⁾.

최근 장수명 주택 보급 증가 등 공간을 다양하게 재배치 할 수 있는 가변벽체 적용이 증가하고 있으며, 자연스럽게 철근콘크리트의 내력벽에서 비내력벽인 경량벽체 사용이 증가하고 있다. 이에 따라 벽간소음 및 바닥충격음에 대한 소음 피해를 저감하기 위한 많 은 연구가 요구된다.

벽간소음은 이웃 세대의 소음이 전달되는 현상으 로 국토부에서는 세대간 경계벽에 콘크리트조, 벽돌

[†] Corresponding Author; Member, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Cooperation, Senior Researcher E-mail: ktaemin@lh.or.kr

^{*} Member, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Cooperation, Researcher

[‡] Recommended by Editor Yong Hee Kim

[©] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

조 등을 제외한 경량벽체 적용 시에는 최소 성능 기 준 이상을 확보할 수 있도록 규정하고 있다⁽³⁾. 이와 함께 경량벽체의 구조, 구성 등을 개선하여 차음성능 을 개선하기 위한 연구도 진행 중이다. Kim 등⁽⁴⁾, Kim 등⁽⁵⁾은 벽체 종류 및 구성에 따른 차음성능 특성 을 분석하였으며, Kim⁽⁶⁾, Lee 등⁽⁷⁾은 스터드의 진동 특성을 이용하여 경량벽체의 차음성능 개선 연구를 수행하였다. Lee 등⁽⁸⁾은 3중구조의 경량벽체를 제안 하여 현장 차음성능을 개선하기 위한 연구를 수행하 였다. 한국토지주택공사(LH)에서는 벽간소음 피해를 최소화하기 위해 세대간 경계벽에 콘크리트조 옹벽의 차음성능에 상응하는 1~2등급 이상의 경량벽체(석 고보드복합패널, 경량콘크리트복합패널, ALC(복합구 조)를 적용하도록 하고 있다⁽⁹⁻¹¹⁾.

바닥충격음은 상부 세대 거주자가 뛰거나, 보행 시 바닥 슬래브를 가진하여 발생하는 구조 진동 현상으 로, 슬래브 진동으로 인해 방사되는 소음이 하부 세 대에 전달되어 소음 피해가 발생한다⁽¹²⁾. 바닥충격음 은 일반적으로 완충재를 통해 저감하고자 하며, 완충 재 설계 등의 관련 연구가 진행 중에 있다. Lee 등⁽¹³⁾ 은 공정별 바닥충격음 특성을 실험적으로 분석하였으 며, Jeong 등⁽¹⁴⁾, Ryu 등⁽¹⁵⁾, Kim 등⁽¹⁶⁾은 완충재 설계 에 따른 바닥충격음 저감 연구, Hwang 등⁽¹⁷⁾은 완충 재에 의한 바닥충격음 증폭 현상을 해석적으로 분석 하였다. 표준 충격원 특성에 대한 바닥충격음 영향, 바닥충격음과 심리적 관계 등 바닥충격음 관련 다양 한 연구가 진행 중이다⁽¹⁸⁻²⁰⁾.

LH에서 공급하는 복도형 공동주택의 경우 이웃세 대와 세대간 경계벽을 공유하며 배열되는 구조이다. 이 때 세대간 경계벽이 내력벽 또는 비내력벽인지에 따라 바닥충격음을 결정하는 유효평면⁽¹²⁾이 다르기 때문에 바닥충격음 특성에 차이가 존재할 수 있다. 이 연구에서는 세대간 경계벽이 경량벽체로 구성된 실증세대 공간을 대상으로 전산해석 및 실증실험을 통해 바닥충격원 가진 시 바닥 슬래브의 진동 및 바 닥충격음을 분석하였으며, 세대간 경계벽의 종류에 따른 바닥충격음 영향을 분석하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험실 구성

경량벽체(비내력벽) 종류에 따른 바닥충격음 영향

을 분석하기 위해 LH주택성능연구개발센터 내 실증 주택에서 벽체 종류를 변경하며 바닥충격음 실험을 수행하였다. Fig. 1은 이 연구에서 수행된 전용 면적 84 m²의 실증주택 도면과 실험대상 공간을 나타낸다. 그림과 같이 실험대상 공간은 이웃하고 있는 두 개의 방을 대상으로 하였으며, LH 세대간 경계벽으로 사 용되는 200 mm 경량벽체를 설치하여 실험을 수행하 였다. 실험대상 공간 중앙에 경량벽체가 설치되어 있 고, 두 공간의 경계가 내력벽으로 구성되어 있기 때문 에 유효평면과 바닥충격음 상관성 분석이 용이하였다. 바닥충격음 실험 시 천정 영향을 최소화하기 위해 Fig. 2와 같이 천정은 철거하였으며, 가진층과 수음실 공간 모두 맨슬래브 상태에서 실험을 수행하였다.

LH는 세대간 경계벽을 경량벽체로 시공하는 경우 Table 1의 경량벽체 중 선택하여 벽의 총 두께가 200 mm 이상이 되도록 설치하고 있다. 이 연구는 가진층(상부 층) 벽은 석고보드복합패널을 설치하고, 수음층(하부 층) 벽을 3종의 경량벽체를 변경 설치하며 바닥충격 음 및 벽체 진동을 측정하였다. 석고보드복합패널은



Fig. 1 Drawing of mock-up house



Fig. 2 Test specimen installed in mock-up house

가장 일반적으로 사용되고 있는 경량벽체로, 시공성 이 우수하나 표면의 내충격성이 취약한 단점이 존재 한다. 경량콘크리트복합패널은 내충격, 차음, 단열 등 이 우수하지만, 석고보드패널에 비해 자재가 무겁고 시공품질 확보가 상대적으로 어렵다. 최근 적용된 ALC복합구조는 석고보드패널과 ALC블록으로 구성 된 3중구조로 차음, 단열 등이 우수하지만 시공 관리 의 어려움이 존재하다⁽²¹⁾.

Table 1	Composition	of	light-weight	dry	wall
---------	-------------	----	--------------	-----	------

Туре	Composition
Type 1 : plasterboard system	Fireproof plasterboard 19T 2P + glass wool 24K 50T + fireproof plasterboard 19T 2P
Type 2 : light-weight concrete sandwich panel	Light-weight concrete panel 75T + glass wool 32K 50T + light-weight concrete panel 75T
Type 3 : ALC composite structure	Soundproof plasterboard 12.5T 2P + glass wool 24K 25T + ALC block 100T + glass wool 24K 25T + Soundproof plasterboard 12.5T 2P

Table 2 Bize of moth up nouse	Table 2	Size	of	mock-up	house
-------------------------------	---------	------	----	---------	-------

Туре	Value
Slab thickness	210 mm
Wall thickness	200 mm
Receiving room area	7.50 m^2
Wall area	6.21 m ²

The specification of test equipment	Table 3	Specification	of test	equipment
-------------------------------------	---------	---------------	---------	-----------

Equipment	Model & specification
Standard impact source	(heavy-weight) bang machine (light-weight) tapping machine
FFT analyzer	SIEMENS, SCADAS mobile · Sampling rate : ~ 204.8 kHz · Dynamic range : ~ 150 dB
Accelerometer	PCB, 352C33 · Sensitivity : 100 mV/g · Dynamic range : ~50 g · Frequency range : 0.5 ~ 10 000 Hz
Microphone	GRAS, 146AE · Sensitivity : 50 mV/Pa · Dynamic range : 18 dB ~ 133 dB · Frequency range : 3.15 kHz ~ 20 kHz

2.2 실험 방법

표준충격원으로 뱅머신과 태핑머신을 이용하였으 며⁽²²⁾, Fig. 1의 2개 지점을 가진하여 바닥충격음을 측 정하였다. 그림에서 P1은 음향공간을 기준으로 한 수 음실의 중앙 지점, P2는 선행연구⁽¹²⁾에서 제안한 유효 평면의 중앙 지점이다. 일반적으로 바닥충격음 측정 시 공간의 5개 지점에서 소음을 측정하지만 이 연구 에서는 벽체 종류에 따른 상대적인 바닥충격음 영향 분석을 목적으로 하기 때문에 소음 측정은 공간 중앙 에서 수행하고 유효평면의 슬래브 하부 중앙(P2) 및 벽체 중앙에 가속도계를 부착하여 소음과 진동을 함 께 측정하였다. Table 2는 이 연구에서 사용된 측정 장비를 나타낸다.

바닥충격음 및 가속도 측정은 narrow band로 3200 Hz 까지 수행하였으며, 바닥충격음은 1/3 옥타브밴드로 변환하여 분석하였다.

3. 실험 결과 분석

3.1 경량벽체 종류에 따른 실험 결과 분석

경량벽체 종류에 따른 바닥충격음 영향을 분석하 기 위해 동일한 공간에서 벽체 종류만을 변경하며 바 닥충격음을 측정하였다. Fig. 3은 뱅머신을 이용한 바 닥 가진 시 경량벽체 종류에 따른 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)는 음향공간 중앙 지점(P1) 가진 시 바닥충격음 측정 결과를 나타내며, Fig. 3(b) 는 유효평면의 중앙 지점(P2) 가진 시 바닥충격음 측 정 결과를 나타낸다. 그림과 같이 벽체 종류에 무관 하게 동일 지점 가진 시 비교적 유사한 바닥충격음 측정 결과를 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 태핑머신을 이용한 바닥 가진 시 바닥충격 음 측정 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)는 음향공간 중앙 지점(P1) 가진 조건, Fig. 4(b)는 유효평면의 중앙 지 점(P2) 가진 조건에 따른 경량충격음 측정 결과를 나 타낸다. 경량벽체 종류에 따른 바닥충격음 측정결과, 경량충격음이 중량충격음에 비해 상대적으로 편차가 크게 존재하지만, 벽체 종류에 무관하게 바닥충격음 측정 결과는 유사하게 분석되었다.

경량벽체 종류에 무관하게 바닥충격음 측정 결과 는 유사하게 분석되었으며, 바닥충격음 측정 시 바닥 슬래브와 경량벽체 중앙에서의 가속도를 함께 측정하 였다. Fig. 5는 음향공간 중앙지점(P1) 가진 시 벽체



(b) The center of the effective plate

Fig. 3 Measurement results of floor impact noise by type of wall : Bang machine



(a) The center of the receiving room

(b) The center of the effective plate

Fig. 4 Measurement results of floor impact noise by type of wall : tapping machine



Fig. 5 Measurement results of acceleration on wall and floor slab

1.E-02

종류에 따른 벽체 중앙지점과 슬래브 하부 중앙 지점 (P1)에서 측정된 가속도 응답 나타낸다. 동일한 가진 조건에서 석고보드복합패널이 응답이 가능 컸으며, 밀 도가 가장 큰 경량콘크리트복합패널이 진동 응답이 가장 작은 것으로 분석되었다. 반면, 바닥 슬래브의 진 동은 경량벽체 종류에 무관하게 유사한 것을 확인 할 수 있다.

바닥 슬래브와 벽 진동의 상대적인 진동 크기를 비 교하기 위해 Fig. 6과 Fig. 7 같이 가속도 측정 결과를 함께 도시화 하였다. Fig. 6은 뱅머신을 이용하여 음



(c) ALC Composite structure

Fig. 6 Difference of acceleration between slab and wall by type of wall



(b) Light-weight concrete sandwich panel



(c) ALC Composite structure

Fig. 7 Difference of acceleration between slab and wall by type of wall

향공간 중앙 지점(P1) 가진 시 슬래브 중앙 지점과 벽체 중앙 지점의 가속도 측정 결과를, Fig. 7은 유효 평면 중앙 지점(P2) 가진 시 슬래브 중앙 지점과 벽 체 중앙 지점의 가속도 측정 결과를 타나낸다. 그림 과 같이 특정 주파수에서 슬래브 진동 대비 벽체 진 동 응답이 큰 대역이 존재하였지만, 벽체 종류에 무 관하게 경량벽체의 진동 응답이 바닥 슬래브 진동에 비해 상대적으로 미비한 것으로 분석되었다.

이와 같이 경량벽체 종류가 변경되어도 바닥 슬래 브의 진동은 유사하였으며, 이에 따라 바닥충격음에 서도 큰 차이가 발생하지 않았다. 또한 상대적으로 슬래브에 비해 경량벽체의 진동 크기가 적기 때문에 경량벽체 종류는 바닥충격음의 영향이 미비한 것으로 판단된다.

3.2 가진 위치에 따른 실험 결과 분석

←Bang Machine (P1)

-∆- Tapping Machine (P1)

Tapping Machine (P2

Bang Machine (P2)

100

Frequency [Hz] (a) Bang machine 1000

1000

80

70

60

50

40

30

20

90

80

70

60 50

40 30

20

10

Sound Pressure Level [dB]

10

Sound Pressure Level [dB]

이 연구에서는 가진 위치에 따른 바닥충격음 영향

을 분석하기 위해 음향 공간의 중앙 지점(P1)과 유효 평면의 중앙 지점(P2)을 각각 가진하여 바닥충격음과 바닥 슬래브의 진동을 측정하였다.

Fig. 8은 석고보드복합패널 설치 조건에서 타격 위 치에 따른 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. 그림과 같이 1/3 옥타브밴드의 중심주파수 50 Hz~100 Hz에 서 타격 위치에 따라 상대적으로 큰 차이가 발생하였 으며, 그 외 주파수 대역에서는 타격 위치에 무관하 게 유사한 바닥충격음 측정 결과가 분석되었다.

Fig. 9는 타격 위치에 따른 바닥 슬래브의 진동 측 정 결과를 나타내며, 바닥충격음 측정 결과와 유사한 경향의 바닥 슬래브 진동 응답 결과가 측정되었다. 그림과 같이 두 가진 지점 모두 34 Hz에서 가장 높은 진동 응답과 바닥충격음이 존재하였으나, 유효평면의 중앙 지점(P2)을 가진하는 경우 55 Hz에서 상대적으 로 작은 진동 응답과 바닥충격음이 측정되었다. 중량 충격음 측정 및 평가는 1/1 옥타브밴드의 중심주파수





100

Frequency [Hz] (b) Tapping machine

Fig. 9 Measurement results of acceleration by impact point

63 Hz부터 측정하기 때문에 단일수치량에서는 차이 가 발생함을 의미한다. 이와 같이 실험공간(거실)을 산정하는 방법에 따라 타격 지점이 다르며, 이에 따 른 바닥충격음 결과도 차이가 존재함을 의미한다. 따 라서 실험공간 산정 시 내력벽과 비내력벽(경량벽체) 에 대한 영향을 고려할 필요가 있다.

전산해석을 이용한 경량벽체 적용 조건에 따른 바닥충격음의 영향 분석

4.1 바닥 슬래브의 고유치 해석

음향 해석 소프트웨어인 COMSOL을 이용하여 대 상 실증주택의 고유치 해석을 수행하였다⁽²³⁾. Fig. 10 은 COMSOL에서 구축된 실증주택 단일층 모델을 나 타낸다. 그림과 같이 바닥 슬래브 진동 특성을 결정하



Fig. 10 Analysis model on COMSOL



(a) 1^{st} Mode : 33.8 Hz



(c) 3rd Mode : 62.4 Hz

는 내력벽만 모델링 하였으며, 구조물은 철근 콘크리 트로 가정하여 탄성계수(25 GPa), 밀도(2500 kg/m³)와 푸아송비(0.167)를 입력하였다⁽²⁴⁾.

Fig. 11은 실험대상 공간의 바닥 슬래브 고유치 해 석 결과를 나타낸다. 그림과 같이 4차 모드까지의 모 드형상을 도시화 하였으며, 진동 모드를 (가로축 모드 차수, 세로축 모드 차수)로 표현하면 1차 모드는 (1,1), 2차는 (2,1) 모드로 분석되었다. 3차와 4차는 내력벽 위치에 따라 (2,1) 모드 형상과 다소 차이는 존재하지만 유사하게 분석되었다.

Fig. 12와 Fig. 13은 가진점 위치에 따른 바닥 슬래 브의 진동 해석을 통해 분석된 응답 형상(operating deflection shape, ODS)을 나타낸다.

Fig. 12는 바닥충격음이 가장 크고, 1차 굽힘 모드 가 존재하는 34 Hz의 바닥 슬래브 해석 결과를 나타 내낸다. 그림과 같이 가진 위치에 무관하게 ODS는 유사하였으나, 응답 크기 측면에서는 상대적인 차이 가 존재하였다. Fig. 11의 모드 형상에서 응답이 가장 큰 위치인 유효 평면의 중앙 지점(P2)을 가진하였을 때가 음향공간의 중앙지점(P1)를 가진하는 경우보다 응답이 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 2차 모드가 존재하는 55 Hz의 ODS를 나 타낸다. 그림과 같이 음향공간의 중앙 지점(P1)를 가 진하는 경우 34 Hz보다 응답을 작지만 2차 모드 형상



(b) 2nd Mode : 54.5 Hz



Fig. 11 Mode shape of floor slab of small room



Fig. 12 Operating deflection shape at 34 Hz



Fig. 13 Operating deflection shape at 55 Hz

과 유사한 것을 확인할 수 있다. 반면, 가진 위치에 따라 응답 형상은 유사하지만 응답 크기에서 차이가 크게 존재하였으며, 유효평면의 중앙지점(P2)을 가진 하는 경우 Fig. 11과 같이 노달 라인(nodal line) 위치 하기 때문에 진동 응답이 상대적으로 미비하였다.

1차 모드 이후에 100 Hz 이전의 모드들은 Fig. 11 과 같이 유효평면의 중앙지점(P2)이 노달 라인이 존 재하는 모드 형상을 갖고 있으며, 결과적으로 Fig. 8 과 같이 유효평면의 중앙 지점(P2)보다 음향공간의 중앙 지점(P1)를 가진 하는 경우가 바닥충격음이 더 큰 것으로 확인 할 수 있다. 이와 같이 바닥 슬래브의 모드 형상에 따른 가진 위치가 바닥충격음의 크기와 특성을 결정함을 의미한다.

일반적으로 바닥충격음 측정 시 이러한 타격 위치 별 편차를 고려하기 위해 5개 지점을 가진하도록 규 정하고 있다⁽²²⁾. 하지만 앞서 언급되었듯이 경량벽체 가 공간을 구성하는 경우에는 내력벽으로 구성된 음 향공간과 비교하여 유효평면이 다르기 때문에 바닥 슬래브의 모드 형상이 다르며, 이에 따라 바닥충격음 측정 결과가 상이하다.

4.2 내력벽과 비내력벽에 따른 바닥충격음 영향 분석

시험공간(수음실)이 동일한 조건에서 벽체가 내력 벽 또는 비내력벽(경량벽체)에 따른 바닥충격음 영향 을 분석하기 위해 실험대상 벽체를 내력벽으로 변경 하여 바닥충격음 해석을 수행하였다. 단, 가진력의 주 파수 특성을 최소화하기 위해 충격원을 단위하중으로 가정하였으며, 음향 공간의 중앙지점(P1)을 동일하게 가진하여 바닥충격음을 해석하였다. 바닥충격음은 수 음실 전체의 공간 평균 소음도, 바닥 슬래브 진동은 가진 위치의 해석 결과를 Fig. 14에 정리하였다.

그림과 같이 실험대상 벽체가 비내력벽인 경우에 는 34 Hz가 높은 가속도와 바닥충격음이 존재하는 것 으로 분석되었으나, 내력벽인 경우에는 57 Hz가 높은 가속도와 바닥충격음을 갖는 것으로 분석되었다. 실 험대상 벽이 내력벽인 경우에는 유효평면이 달라지 며, Fig. 15와 같이 1차 모드가 56.6 Hz에 존재하였 다. 즉, 평면상 동일한 수음실 조건에서 경량벽체의 종류는 바닥충격음에 영향이 미비하지만, 벽체 구성 이 내력벽 또는 비내력벽 조건에 따라 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 결과에 차이가 존재하였다.

5. 복도식 공동주택의 바닥충격음 분석

5.1 해석 모델 구성

일반적인 복도식 공동주택은 Fig. 16과 같이 세대 가 복도 방향으로 세대간 경계벽을 공유하며 배열되 어 있다. 임대주택에서도 복도식 공동주택 형태가 많 이 적용되고 있으며, 최근에는 장수명 주택의 관심이



(b) Floor impact noise

Fig. 14 Analysis results according to wall type



Fig. 15 1st mode shape of floor slab

증가하며 벽식구조에서도 공간의 재배치가 용이하도 록 세대간 경계벽에 경량벽체를 적용하고 있다.

벽식 구조의 복도형 공동주택 경우에는 Fig. 16과 같이 두 세대 간격으로 경량벽체가 적용되고 있으며, 이 연구에서는 세대간 경계벽이 비내력벽(경량벽체) 또는 내력벽인 경우를 고려하여 동일 지점 가진 조건 에서 바닥충격음을 비교 분석하였다.

세대간 경계벽 종류에 따른 바닥충격음 영향을 분



Fig. 16 Corridor type apartment building



(a) Case 1: light-weight dry wall



(b) Case 2: load bearing wall



석하기 위해 Fig. 17(a)와 같이 세대간 경계벽이 경량 벽체로 구성된 경우와 Fig. 17(b)와 같이 내력벽으로 구성된 해석 모델을 구성하였다. Fig. 17(a)의 경량벽 체는 구조 진동에 영향이 미비하기 때문에 모델링하 지 않고 음향 계수로 치환하여 대입하였다. 구조물의 물 성은 철근 콘크리트로 가정하여 탄성계수(25 GPa), 밀도 (2 500 kg/m³)와 푸아송비(0.167)를 입력하였으며, 공기



Fig. 18 Analysis results of floor imapct noise according to wall type



Fig. 19 Operating deflection shape of case 1

의 음속은 340 m/s, 밀도는 1.2 kg/m³으로 입력하였다. 바닥충격음 해석은 KS F 2810에서 제시된 실험 방법과 유사하게 Fig. 17과 같이 거실공간의 다섯 지 점에서 가진하였으며, 수음실의 공간상의 평균 음압 을 직접 분석하였다. 바닥충겨음 해석은 모드 밀도가 상대적으로 적어 개별 모드에 대한 영향이 큰 저주파 대역을 대상으로 하였으며, 일반적으로 뱅머신의 충 격력 스펙트럼을 고려하여 300 Hz까지 narrow band



Fig. 20 Operating deflection shape of case 2

로 해석을 수행하였다. 표준충격원은 주파수별 가진 력 크기의 차이가 커서 주파수별 응답성을 보기 어렵 기 때문에 이 해석에서는 단위 하중(1N)을 가진력으 로 입력하여 동일 하중 조건에 대한 주파수별 응답 크기도 함께 분석하였다.

5.2 바닥충격음 해석 결과

Fig. 18은 전산해석을 이용하여 예측된 바닥충격음 해석 결과를 나타낸다. 그림과 같이 동일한 거주 공 간 조건(동일 평면)에서도 벽체 종류(내력벽 또는 경 량벽체)에 따라 바닥충격음이 상이한 것으로 분석되 었다. 경량벽체 적용 시 15 Hz에서 첫 피크 소음이 분석되었으며, 진동 응답 형상(ODS)은 Fig. 19(a)와 같이 사각형 평판의 1차 모드(1,1)와 유사한 것을 확 인할 수 있다. 또한 경량벽체 적용 조건에서 37 Hz가 비교적 높은 소음도로 분석되었으며, Fig. 19(b)와 같 이 사각형 평판의 2차 모드(2,2)와 유사한 형상을 확 인할 수 있다⁽²⁴⁾.

반면, 세대간 경계벽에 내력벽이 적용된 경우에는 Fig. 20(a)와 같이 슬래브가 진동하는 31 Hz에서 처음 피크 주파수가 분석되었으며, 최대 피크 주파수는 Fig. 20(b)와 같이 슬래브가 진동하는 36 Hz로 분석되었다.

내력벽이 존재하는 경우 유효평면이 작아지게 되 며 이에 따라 첫 굽힘 모드가 상대적으로 높은 주파 수 대역으로 이동한다. 따라서 동일한 거실 평면 및 크기에서도 세대간 경계벽 구성(내력벽/비내력벽)에 따라 바닥충격음 측정 결과의 차이가 발생함을 의미 하며, 이는 효과적인 바닥 완충재 설계를 위해서는 대상 공간에 대한 내력벽 위치 등의 유효평면 분석이 선행되어야 함을 의미한다.

6. 결 론

공간 재배치가 용이하도록 세대간 경계벽을 콘크 리트조의 내력벽에서 경량벽체의 비내력벽으로 시공 되는 공동주택이 증가하고 있다. 최근 고차음 경량벽 체에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 콘크리트조의 벽체 대비 유사한 차음성능의 경량벽체 설계가 가능 하다. 하지만 경량벽체로 구성된 공동주택의 바닥충 격음은 기존 내력벽으로만 구성된 공동주택과 바닥충 격음 특징이 상이하기 때문에 이에 대한 연구가 요구 된다.

이 연구에서는 경량벽체로 구성된 공동주택의 바 닥충격음 특성을 분석하기 위해 경량벽체가 설치되어 있는 실증주택의 방을 대상으로 경량벽체의 종류 및 바닥 가진 위치에 따른 바닥충격음 영향을 실험적으 로 분석하였다. 또한 전산해석을 이용하여 복도형 공 동주택 모델을 구성하였으며, 세대간 경계벽을 내력 벽 또는 비내력벽(경량벽체)으로 구성하여 벽체 종류 에 따른 바닥충격음 특성을 분석하였다.

(1) 경량벽체는 수음실의 공간은 구성하지만, 바닥 슬래브의 진동 특성에는 영향이 미비하다. 따라서 경 량벽체가 설치되어 있는 공간은 벽체가 존재하지 않 는 조건과 유사한 바닥 슬래브 진동 특성이 존재하며, 경량벽체 종류에 무관하게 바닥 슬래브 진동 및 바닥 충격음 측정 결과는 유사하다.

(2) 경량벽체가 세대간 경계벽으로 설치되어 있는 공동주택의 경우에는 바닥 슬래브를 공유하고 있는 이웃 세대와 함께 유효평면이 구성되기 때문에 동일 한 평면 구성이라도 내력벽으로 구성된 공동주택과 비교하여 바닥충격음 특성은 상이하다.

(3) 따라서 경량벽체가 세대간 경계벽으로 구성된

공동주택의 경우에는 유효평면을 공유하는 이웃 세대 를 함께 고려한 바닥 슬래브 진동 특성 분석이 선행 된 후, 이를 고려한 완충재 설계가 필요함을 의미한다.

후 기

이 연구는 토지주택연구원에서 수행한 "공동주택 세대 경계벽의 현장 차음성능 향상 기술 개발 (R202007003)" 결과의 일부임.

References

 Korea Environment Corporation, 2018, The Operating Report of Center for Floor Impact Noise Complaint Issues in Residential Buildings.

(2) Ministry of Land, Infrastructure and Transport,2021, Multi-family Housing Management Act.

(3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Accreditation and Management Standards for Sound Insulation of Walls, 3029.

(4) Kim, S. W., Lee, T. G. and Song, M. J., 1998, An Experimental Study on the Sound Insulation Characteristics of Lightweight Walls, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 14, No. 12, pp. 259~268.

(5) Kim, Y. J., Choi, C. G. and Son, J. Y., 2003, The Study on the Improvement of the Sound Insulation Performance by Structure Materials and Construction Methods of Lightweight Panel, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 23, No. 2, pp. 925~928.

(6) Kim, K. H., 2016, Construction Method of Light-weight Drywall via Insertion of Resilient Channel into R-Stud, Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 16, No. 2, pp. 29~31.

(7) Lee, S. C. and Jeon, J. Y., 2014, Effect of Stud for Plasterboard Partition on Sound Insulation Performance and Vibration Mode Shape, Journal of the Korean Society of Living Environmental System, Vol. 21, No. 1, pp. 71~76.

(8) Lee, B. K., Bae, S. H. and Hong, C. H., 2004, A Study on the Development of Lightweight Wall for Sound Transmission Loss and Field Test Results of the Dry-wall System, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 699~704.

(9) Korea Land and Housing Corporation, LH Construction Specification 46511.

(10) Korea Land and Housing Corporation, LH Construction Specification 46520.

(11) Korea Land and Housing Corporation, LH Construction Specification 41540.

(12) Kim, T. M., Bae, J. Y. and Yang, H. S., 2020, The Study on Characteristic of Floor Impact Noise Using the Structural Vibration on Floor Slab: Effective Plate, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 276~285.

(13) Lee, W. H., Song, G. G. and Han, C. H., 2020, Analysis on the Characteristics of Floor Impact Sound by Floor Construction Process of Apartment Houses, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 29~36.

(14) Jeong, G. H., Ryu, J. K., Lee, J. I. and Kim, Y. S., 2014, Effects of Material Property of Floor Impact Sound Isolator on Heavy-weighted Floor Impact Sound Level in the Apartment Building, Journal of the Korean Society of Living Environmental System Vol. 21, No. 1, pp. 19~25.

(15) Ryu, J. K., Jeog, G. H., Lee, J. I. and Kim, H. B., 2013, Effect of Thickness and Composition of Isolator for Standardized Floor Structure on Floor Impact Sound Level, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 382~383.

(16) Kim, K. W., Jeong, G. C. and Sohn, J. Y., 2008, Correlation Between Dynamic Stiffness of Resilient Materials and Lightweight Floor Impact Sound Reduction Leve, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 886~895.

(17) Hwang, J. S., Moon, D. H., Park, H. G., Hong, S. G. and Hong, G. H., 2010, The Effect of Dynamic Property of Absorbing Sheet on the Amplification of Heavy Weight Floor Impact Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 651~657.

(18) Kim, K. W. and Shin, H. K., 2019, Correspondence between Standard Heavy Impact Sources and Single Number Indexes of Floor Impact Sound., Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 801~809.

(19) Cho, H. M., Kim, S. T. and Kim, M. J., 2020, Changes in Subjective Perceptions of Heavyweight Impact Sound Levels with the Same Single-number Quantity of Floor Impact Sound Insulation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 348~356.

(20) Jeong, J. H., 2020, Subjective Response on Rubber Ball Impact Sound, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 79.

(21) Lee, B. S., Son, J. R., Chun. Y. S. et al., 2019, The Study on Application of PC Construction for LH Rental Apartment House, Final Report, Land & Housing Institute.

(22) Korean Industrial Standards, 2017, Field Measurements of Floor Impact Sound Insulation of Buildings - Part 2: Method Using Standard Heavy Impact Sources, KS F 2810-2.

(23) User's Manual: Acoustic Module, COMSOL Multi-physics 5.4.

(24) Cremer, L., Heckl, M. and Petersson, B. A. T., 2005, Structure-borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies, Springer.





Tae-Min Kim received his Ph.D. at Department of Mechanical Engineering, Hongik University. He is currently Researcher of Acoustics at the LHI(Land & Housing Institute). His main fields are noise and vibration control in buildings.

Jin-Young Bae is a Ph.D. Candidate in Department of Architectural Engineering at Hanyang University. She is currently a Researcher of Acoustics at the LHI(Land & Housing Institute). Her main fields are architectural and environmental acoustics.

합성곱 오토인코더를 이용한 체인 전동 장치의 고장 결함 감지 및 진단

Fault Detection and Diagnosis of Chain Transmission System Using Convolutional Auto-encoder

이 창 훈*·이 상 권†·김 풍 일**

Chang-Hun Lee*, Sang-Kwon Lee† and Pung-Il Kim**

(Received September 1, 2021 ; Revised September 27, 2021 ; Accepted September 28, 2021)

Key Words: Fault Detection(고장 검출), Fault Diagnosis(고장 진단), Deep Learning(딥러닝), Convolutional Auto-encoder(합성곱 오토인코더), Unsupervised Learning(비지도학습), Convolutional Neural Network(합성곱 신경망)

ABSTRACT

This paper presents a method to detect the mechanical faults of a chain drive power transmission system (CDPTS) using a convolutional auto-encoder (CAE). In previous research, it was known that the methods to detect faults of the CDPTS based on an artificial neural network (ANN) and convolutional neural network (CNN) were useful. In this paper, an advanced application of CNN, the CAE function of CNN is employed to detect faults. This method uses the characteristics of reconstruction of CAE. Difference of input images of the CNN and reconstructed images extracted by CAE were used as the guideline of fault detection. In the fault condition of the system, the difference was larger than the predetermined threshold of error. The encoder of CAE can be fine-tuned to classify the fault types of CDPTS. Finally, this method was well applied to diagnose the fault types of the test CDPTS installed in the laboratory.

1. 서 론

기계 설비의 고장 검출과 진단은 설비 및 장비의 유지, 보수에 필수적이다. 설비의 고장 검출과 진단이 원활히 이루어져야 유지 및 보수 비용을 최소화 할 수 있고, 설비의 운용효율을 극대화 할 수 있기 때문 이다. 이러한 이유로, 기계 부품 및 설비의 고장 검출 과 진단에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 머 신 러닝의 발전에 힘입어 인공 신경망과 서포트 벡터 머신을 이용한 분류기에 의한 고장 진단에 대한 연구 가 활발하다⁽¹⁻⁴⁾. 하지만 이러한 방법은 특징 추출을 위한 수단과 방법에 대한 고려가 필요하다. 그 뿐만 아니라 인공 신경망과 서포트 벡터 머신은 지도 학습 기반이기 때문에 각각의 고장 신호에 대한 학습 데이 터 수집이 필수적이다. 만약, 고장에 대한 신호가 학 습되어 있지 않다면, 이에 대응할 수 없는 단점이 있 는 것이다. 이 논문에서는 이러한 단점을 극복하고

[†] Corresponding Author; Member, Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Professor E-mail : sangkwon@inha.ac.kr

^{*} Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Student

^{**} Korea Conveyor Future Technology Ind. Co., Ltd.

[‡] Recommended by Editor Yong Hwa Park

[©] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

기존 연구와 차별화하기 위해 비지도 학습 기반의 방 법을 이용했다.

이 논문에서는 체인 전동 장치의 고장 검출과 진단 을 목표로 하였다. 체인 전동 장치는 동력 전달 장치 로, 베어링, 기어박스, 기어, 스프라켓, 체인 등으로 이루어진 모터 동력 전달 시스템이다. 체인 전통 장 치는 컨베이어, 에스컬레이터 등 다양한 분야에서 이 용되는 동력 전달 장치다. 이 연구의 주요 알고리즘 으로 합성곱 오토인코더(convolutional auto encoder, CAE)를 이용하였다. 고장 검출을 위한 신호는 설비 의 기어 박스 부분에 부착된 가속도계를 이용하였다. 가속도계로부터 계측된 진동신호를 short time Fourier transform(STFT)를 이용해 시간-주파수 도메 인으로 변환하여 합성곱 오토인코더의 입력으로 활용 하였다. 정상 상태의 신호만을 합성곱 오토인코더의 입력으로 활용하면, 디코더(decoder)를 통해 정상 상 태의 신호는 잘 복원이 되는 반면, 이상 상태의 신호 는 잘 복원이 되지 않는 원리를 이용하였다. 이상 신 호는 기어의 크랙, 파손, 동력 축 편심, 베어링의 내륜 및 외륜 결함 등이 알고리즘의 검증에 이용되었다. 또한 인코더(encoder)의 특징 추출 부분을 떼어낸 후, fully connected layer와 결합한 뒤 미세조정(fine tuning)하여 지도학습 기반의 고장 진단 알고리즘도 이 논문에서 다루었다.

2. Convolutional Auto-Encoder (CAE)

합성곱 오토인코더는 스위스의 Jonathan Masci에 의해 2011년 처음 등장하였다⁽⁵⁾. 합성곱 오토인코더 는 특징을 추출하는 인코더 부분과 추출된 특징 벡터 를 다시 이미지로 복원하는 디코더 부분이 대칭적 구 조를 이루는 비지도 학습 방법이다. 합성곱 오토인코 더는 미술⁽⁶⁾, 의학⁽⁷⁾, 이미지 처리⁽⁸⁾ 등 상당히 많은 분야에서 사용되는 방법이다.

(1) Encoder

합성곱 오토인코더에는 특징을 추출하는 인코더 부분과 추출된 특징을 기반으로 이미지를 복원하는 디코더 부분으로 세분화된다. 인코더는 크게 합성곱 연산을 수행하는 합성곱 계층(convolution layer), 미 니 배치의 정규화를 위한 배치 정규화 계층(batch normalization layer), 비선형 활성화 함수 계층 (activation function layer), 입력을 압축시켜주는 풀 링 계층(pooling layer)로 이루어져 있다. 이와 같은 구조는 합성곱 신경망(convolutional neural network) 의 특징 추출 부분과 동일하다.

합성곱 계층은 흔히, 합성곱 신경망에 특징 추출을 위해 사용된다. 1번째 층의 합성곱 계층은 합성곱 연 산에 의해 *k*번째 특징 지도의 (*i*, *j*)의 출력이 생성된 다. 이와 관련된 식을 식 (1)에 나타내었다⁽⁹⁾.

$$y_{i,j,k} = b_k + \sum_{u=0}^{f_h - 1f_w - 1f_w - 1} \sum_{k'=0}^{-1} x_{i',j,k'} \cdot \omega_{u,v,k',k}$$
(1)

식(1)에서 f_h 는 합성곱 계층의 필터의 높이, f_w 는 필터의 너비를 나타낸다. f_n 은 l-1층에 있는 특징 지 도의 개수를 나타내며, b_k 는 k번째 층의 바이어스를 뜻한다. x는 입력값, ω 는 필터를 구성하고 있는 가중 치이다. 합성곱 신경망의 학습은 필터의 가중치가 입 력 이미지에 맞게 업데이트되어 학습 이미지들의 특 징들을 잘 감지할 수 있음을 뜻한다.

합성곱 계층 뒤에는 배치 정규화 계층을 통해 미니 배치의 평균과 분산을 정규화하고 재조정하게 된다. 이와 관련된 식(2)는 미니 배치의 정규화를, 식(3)은 정규화 된 미니 배치의 scale 및 shift를 나타낸다⁽¹⁰⁾.

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \epsilon}} \tag{2}$$

$$y_i = \gamma \hat{x_i} + \beta \tag{3}$$

식 (2)의 x_i 는 미니배치의 *i*번째 입력을 나타내며, μ_B 는 미니 배치의 평균을 나타낸다. 또한 σ_B^2 는 미니 배치의 분산을 나타내며, ϵ , γ , β 는 각각 정규화 매개 변수, 스케일 매개변수, 이동 매개 변수이다. ϵ 는 10e-7과 같은 작은 값을 가지며, 분모가 0이 되는 것 을 방지하는 역할을 한다. 배치정규화는 오버 피팅을 방지하고 학습 효율을 높이는 역할을 한다.

활성화 함수 중 대표적인 ReLu(rectified linear units)는 식(4)와 같이 표현된다. 활성화함수는 비선 형 함수로, 합성곱 계층의 출력을 입력으로 한다.

$$\phi = \max(0, x) \tag{4}$$

풀링 계층은 특징 지도를 압축하는 역할을 하며, 합성곱 신경망의 학습을 효율적으로 도와주는 역할을 한다.



Fig. 1 Transposed convolution (5×5 input, 3×3 kernel, unit stride, full padding)

(2) Decoder

디코더는 이미지를 복원하는 역할을 하며 전치 합 성곱 계층(transposed convolution layer)에 의해 upsampling 되어 encoder 부분에서 압축되었던 이미지 를 복원한다. 즉, 이미지의 사이즈를 키우는 upsample 과정을 최적으로 수행하는 데 전치 합성곱 계층이 사 용된다. 전치 합성곱은 합성곱 연산을 행렬 표현하였 을 때의 커널 행렬을 전치하여 인풋 행렬과 곱하여 수 행할 수 있다. Fig. 1은 전치 합성곱 계층이 upsampling 하는 간단한 예시를 보여준다⁽¹¹⁾. Fig. 1에 5×5 사이즈 의 입력에 대해 unit stride와 full padding을 적용한 3×3 사이즈의 kernel을 적용한 전치 합성곱을 나타내 었다. 이는 3×3 kernel와 unit stride를 적용하여 7×7 사이즈의 입력에 합성곱 연산을 한 것과 동일하다.

3.실 험

3.1 실험 적용 설비 장치

이 연구의 실험을 위해 사용된 체인 전동 장치를 Fig. 2에서 보여준다. Fig. 2의 체인 전동 장치는 구동 모터 와 감속기를 포함한 기어 박스와 연결된 스프라켓, 체인 으로 구성되어 있다. 기어박스에는 4개의 베어링과 각각 2개의 기어와 피니언이 포함되어 있다. 특히 Fig. 2의 우 측 그림에 도시한 5번, 6번, 7번 부품은 실험을 위해 인 위적으로 결함을 가한 부품이다. 5번 부품은 베어링으로, 호칭번호는 6203Z이며, 볼 개수는 7개인 볼베어링이다. 6번 부품은 감속기 기어로, 잇수가 82개인 헬리컬 (helical) 기어이다. 7번 부품은 로터 축에 해당한다. 이 실 험은 모터의 회전 속도를 정속으로 유지하였으며, 입력 축



Fig. 2 Chain transmission system for testing and components of gear box. (1) gear box (2) sprocket (3) chain (4) accelerometer (5) bearing (6) gear (7) rotor shaft

Table 1 Fault types of chain transmission system

Condition	Name	Fault type
Normal	Good	-
	Fault01	3 damaged teeth of gear
	Fault02	Rotor shaft eccentricity
	Fault03	1 hole on the bearing surface Rotor shaft eccentricity
	Fault04	Alien substance in the bearing Rotor shaft eccentricity
Abnormal	Fault05	Rotor shaft eccentricity 1 broken tooth of gear
	Fault06	1 hole on the bearing surface Rotor shaft eccentricity 1 broken tooth of gear
	Fault07	Alien substance in the bearing Rotor shaft eccentricity 1 broken tooth of gear

회전 속도는 1800 r/min, 스프라켓과 연결된 출력축 회전 속도는 60 r/min으로 실험 운전하였다.

고장 검출을 위한 신호는 설비의 기어 박스 부분에 부 착된 Analog devices사의 3축 가속도계(ADXL337)로부 터 취득된 진동 신호를 이용하였다. 진동 신호 방향은 모터 샤프트의 축 방향과 수직한 방향의 진동 신호가 이 연구에서 이용되었다. 샘플링 주파수는 2000 Hz로 정상과 고장 상태에 대한 진동 신호를 수집하였다.

3.2 실험 결함 종류

이 연구는 체인 전동 장치의 고장 결함을 감지를 목표로 하였으므로, 고장 상태에 대한 신호가 필요하 다. 결함신호를 확보하기 위해서 Table 1과 같은 7가 지 결함 상태를 인위적으로 만들어주었다. 또한 각 결함에 대해 Fig. 3에 그림으로 도시하였다. 각 결함 의 자세한 설명은 다음과 같다.

(1) Fault01 (Fig. 3(a))

Fault01은 Fig. 2의 6번에 나타낸 기어의 결함이다. 실험을 위해 해당 기어의 서로 이웃한 이 3개에 크랙 을 가하였다. 헬리컬 기어의 이끝 높이의 약 5% 정 도에 해당하는 높이를 공구(file)를 이용하여 인위적 으로 손상시켜주었다.

(2) Fault02 (Fig. 3(e))

Fault02는 Fig. 2의 7번에 나타낸 로터 축의 편심 결함이다. 로터 축의 편심 결함은 원주 방향으로 약 10 mm 정도가 편심 될 수 있도록 제작한 회전자를 이용하였다. Fig. 3(e)의 파란 원은 본래의 로터 축이 며, 빨간 원은 편심된 로터의 축이다.

(3) Fault03 (Fig. 3(d) + Fig. 3(e))

Fault03은 Fig. 2의 5번에 나타낸 베어링 외륜 표면 에 구멍을 낸 결함과 fault02의 로터 축 편심 결함을 조합한 것이다. 베어링 외륜 표면의 구멍은 직경 이 약 3 mm이며, 드릴을 이용하여 결함을 가하였다.

(4) Fault04 (Fig. 3(c) + Fig. 3(e))

Fault04는 Fig. 2의 5번 베어링 내륜 안쪽 볼에 이 물질을 삽입한 것과 fault02의 로터 축 편심 결함을 조합한 것이다. 이물의 종류는 철가루와 고운 모래의



(a) 3 damaged teeth of gear







(c) Alien substance in the bearing

(d) 1 hole on the bearing surface

(e) Rotor shaft eccentricity

Fig. 3 Details of fault types in the parts used in the experiment

혼합물이며 약 5g을 볼 사이에 삽입하였다.

(5) Fault05 (Fig. 3(b) + Fig. 3(e))

Fault05는 fault02의 로터 축 편심 결함과 Fig. 2 의 6번 기어의 이에 파손 결함을 조합한 것이다. 기어 파손 결함은 실험을 위해 1개의 이에 가하였 다. 헬리컬 기어의 이끝 높이의 약 50 %에 해당하 는 높이를 공구(file)를 이용하여 인위적으로 제거 해주었다.

(6) Fault06 (Fig. 3(b) + Fig. 3(d) + Fig. 3(e))

Fault06은 베어링 외륜 구멍 결함, 로터 편심 결함, 기어 이 파손 결함을 조합한 3중 결함이다.

(7) Fault07 (Fig. 3(b) + Fig. 3(c) + Fig. 3(e))

Fault07은 베어링 내륜 이물질 유입 결함, 로터 편 심 결함, 기어 이 파손 결함을 조합한 3중 결함 형태 이다.

4. 고장 결함 감지 알고리즘

4.1 신호의 처리 및 변환

체인 전통 장치의 정상 상태와 고장 상태에 대한 알고리즘을 합성곱 오토 인코더에 적용하기 위해서는 1차원 시계열데이터인 진동 신호를 이미지로 변환하 여야 한다. 그 방법으로 short time Fourier transform (이하 STFT)을 이용하였다. STFT는 신호의 특성을 시간-주파수 도메인에서 이미지로 잘 나타내며, 결함 기인 충격 특성, 주파수 특성 등을 이미지로 나타내 기 좋기 때문이다. 2000 Hz의 샘플링 주파수로 취득 된 진동 신호를 0.5초 단위(1000개의 데이터)로 잘 라 STFT를 취하였으며, window는 hamming window 를 이용하였다. STFT된 이미지는 각각의 이미지에 대해 min-max 정규화를 시켜주었다. 또한 장치와 부품 의 회전, 구동과 관련된 주파수를 제외하기 위해 0 Hz 에서 90 Hz의 범위에 해당하는 부분을 잘라주었다. 분할된 이미지는 112×112×3 사이즈의 RGB 8비트 이미지로 resize하여 변환하였다. Fig. 4을 보면 normal 상태의 이미지에 비해 fault(이하 abnormal) 상 태의 이미지는 충격 특성이나 주파수 특성이 강하게 반영 되어있다. 따라서 normal 상태의 이미지만 합성 곱 오토인코더에 학습시키면, abnormal 상태 이미지

의 특성(결함 충격과 진동에 의한 성분, Fig. 4의 주 황, 빨간 부분)들은 복원시키지 못하고 normal 상태 이미지의 특성들(구동과 축 회전에 의한 잔 진동, Fig. 4의 옅은 하늘색 부분)만 잘 복원할 것을 기대 할 수 있다.

4.2 합성곱 오토인코더 기반 결함 감지

(1) 학습(train) 과정

이 연구에서 실험을 통해 변환한 정상 상태의 이미



Fig. 4 STFT images of normal and fault types



Fig. 5 Structure of convolutional auto-encoder

지는 총 1191장(595.5초 분량)이다. 1191장의 정상 상 태의 이미지 중 약 80 %에 해당하는 941장이 합성곱 오토인코더의 훈련 데이터로 사용되었고 나머지 250 장은 합성곱 오토인코더의 테스트 데이터로 사용하기 위해 학습을 시키지 않았다. 각 fault 타입에 대해 1191장씩의 이미지를 합성곱 오토인코더의 불량 검 출 성능 테스트를 위해 변환하였다. 이 연구에서 제 안하는 합성곱 오토인코더의 구조는 각 레이어의 출 력 사이즈와 함께 Fig. 5에 도시하였다. 합성곱 오토 인코더의 구조의 내용은 인코더 부분에서는 이미지가 압축될 수 있도록 하고, 디코더 부분에서는 압축된 이미지를 다시 복원할 수 있도록 하였다. 또한 학습 을 위해 회귀 출력 계층의 손실함수는 식 (5)와 같은 평균 자승오차(mean square error)로 하였다. 각 과정 은 기본적으로 CNN의 특징 추출기능을 활용하여 압 축 이미지를 형성하고 복원한다.

식(5)의 t_i 는 목표 출력 값이며, y_i 는 신경망에 의 한 예측값(신경망의 출력값)을 뜻한다.

$$Loss(MSE) = \sum_{i=1}^{N} \frac{(t_i - y_i)^2}{N}$$
(5)

N은 변수의 개수이다. Fig. 5의 구조의 경우, 신경 망 출력이 112×112×3 사이즈의 이미지이므로, t_i 와 y_i 는 이미지를 구성하고 있는 픽셀값들을 뜻한다. Table 2에는 이 논문에서 제안하는 합성곱 오토인코 더의 상세 파라미터들과 출력 사이즈를 정리하였다. 24번째 계층(Table 2 참조)인 clipped ReLu의 상한은 255로 하였는데, 이는 출력 값이 8비트 이미지로 나 올 수 있도록 조정한 것이다. 또한 합성곱 오토인코 더의 학습 알고리즘으로는 ADAM⁽¹²⁾을 사용하였다. 그 외 훈련 옵션으로 최대 반복 횟수의 경우 100회, 초기 학습률은 0.1, 미니 배치 크기는 32로 하였다. 또한 learning rate drop period는 20회로 하여 20회 의 epoch마다 학습률이 0.1배씩 되도록 설정하고 훈 련을 진행하였다.

(2) 테스트(test) 과정

학습이 완료된 합성곱 오토인코더에 대해서 성능 을 테스트하기 위해 학습되지 않은 정상상태의 이미 지 250장과 비정상상태의 이미지가 결함 종류당 각각 1191장이 사용되었다.

Fig. 6은 각 결함 종류에 대한 STFT의 원래 이미지

(original image)와 복원된 이미지(reconstructed image) 그리고 두 이미지의 오차에 절대값을 나타내는 오차 이미지(error image)에 대한 그림이다. 이 결과에 따르 면 정상상태의 이미지는 복원이 잘되어 에러 이미지가 깨끗한 반면, 비정상 상태의 이미지는 복원이 잘되지 않아 오차 이미지가 명확하지 않음을 알 수 있다. 이는 원래 이미지와 복원 이미지의 오차를 이용하여 결함 및 고장 상태의 비 정상신호와 정상상태의 정상신호를 구 분할 수 있음을 의미한다. 이 논문에서 식(6)과 같이 각각의 이미지에 대해 평균 자승오차를 계산한 threshold 값과 비교하여 threshold 값보다 평균 자승오차가 높으면 결함, threshold 값보다 평균 자승오차가 낮으 면 정상으로 판단하도록 하였다.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{112} \sum_{j=1}^{112} \sum_{k=1}^{3} P_{i,j,k}^2}{N_p}$$
(6)

이때 $P_{i,j,k}$ 는 에러 이미지의 i행, j열, k채널의 픽셀

Table 2 Structure architecture of convolutional auto-encoder lay

No	Name	Output size	Filter size/stride/number of channels
1	Image input layer	(112,112,3)	-
2	Conv layer	(112×112×24)	(3,3)/1/24
3	BN layer	(112×112×24)	-
4	Leaky ReLu layer	(112×112×24)	-
5	Max pooling layer	(56×56×24)	(2,2)/2/24
6	Conv layer	(56×56×12)	(3,3)/1/12
7	BN layer	(56×56×12)	-
8	Leaky ReLu layer	(56×56×12)	-
9	Max pooling layer	(28×28×12)	(2,2)/2/12
10	Conv layer	(28×28×12)	(3,3)/1/12
11	BN layer	(28×28×12)	-
12	Leaky ReLu layer	(28×28×12)	-
13	Max pooling layer	(14×14×12)	(2,2)/2/12
14	T'Conv layer	(28×28×12)	(4,4)/2/12
15	BN layer	(28×28×12)	-
16	Leaky ReLu layer	(28×28×12)	-
17	T'Conv layer	(56×56×12)	(4,4)/2/12
18	BN layer	(56×56×12)	-
19	Leaky ReLu layer	(56×56×12)	-
20	T'Conv layer	(112×112×24)	(4,4)/2/24
21	BN layer	(112×112×24)	-
22	Leaky ReLu layer	(112×112×24)	-
23	Conv layer	(112×112×3)	(3,3)/1/3
24	Clipped ReLu layer	(112×112×3)	Upperlimit: 255
25	Regression layer	(112×112×3)	-



Fig. 6 Original images(left, input images of CAE), reconstructed images(middle, output images of CAE), error images(right, difference of original images and reconstructed images)

이 가지고 있는 값이고 N_p 는 에러 이미지의 총 픽셀 개수이다. 이미지 사이즈가 112×112×3이므로 이 경 우 N_p 는 37 632이다. 따라서 는 입력 이미지와 복원 이미지의 평균 자승오차이다.

정상과 결함을 판단하기 위한 평균 자승오차 threshold 값은 Fig. 7과 같이 결함 검출률(fault detect rate, fault accuracy)과 정상 판단율(normal detect rate, normal accuracy)가 교차하는 부분인 318로 하 였다. 합성곱 오토인코더의 결함에 대한 평균 결함 검출률은 93.5%이며, 정상 판단율은 94%의 성능을 보였다. 결함 검출률과 정상 판단율에 대한 식은 식 (7), 식 (8)과 같다.

Fault detect rate =

The	total	number	of	detec	ted	fault	sample	(7))
The	total	number	of	fault	sam	nples	fortest		

Normal detect rate =

The to	otal number	of detecte	d fault sample	(8)
The tot	al number	of number	samples fortest	

또한 각각의 결함에 따른 평균 자승오차 값의 분포 는 수염상자(boxplot)을 이용하여 Fig. 8에 도시하였 으며, Fig. 8에는 정상 상태에 따른 normal detect rate 와 각각의 결함 상태에 따른 fault detect rate를 개별 도시하였다. Fig. 8을 보면 정상상태 신호의 평균 자 승오차의 분포와 fault01 상태의 평균 자승오차의 분 포가 상당수 겹치는 것을 알 수 있다. 이는 fault01(기 어 이 크랙)에 의한 진동 신호 특성이 normal 상태 신호와 큰 차이가 없다는 뜻이다. 따라서 fault01 상 태와 normal 상태의 신호를 STFT한 이미지 특성이 서로 유사하고, 합성곱 오토인코더에 의해 fault01의 이미지 복원이 어느 정도 잘 될 수 있었기 때문이다. Fig. 8을 보면 다른 결함 종류의 평균 자승오차 분포 는 normal 상태의 평균 자승오차 분포와 차이가 명확 하다. 이로 인해 fault01 상태의 결함 감지 정확도는 63.22 %로 다른 결함의 감지 정확도에 비해 낮은 것 을 알 수 있다(fault02: 95.72 %, fault03: 99.24%, fault04: 100%, fault05: 97.40%, fault06: 100%, fault07: 100 %, Fig. 9 참조). 하지만 이 결과는 진동 신호를 0.5초당 한 개의 이미지로 변환하여 각각의 이미지에 대한 정확도이다. 제안된 알고리즘을 실제 적용할 시, 충분한 시간동안 지속적인 감시를 하면 충분히 fault01 결함 또한 안정적으로 감지할 수 있을 것이라고 판단할 수 있다. 예를 들어 50초(100장)의 시간동안 설비를 감시한다고 생각해볼 수 있다. 설비 가 fault01 상태일 경우는 과반수가 넘는 63장(63 %, 31.5초)이 결함으로 판별될 것이고, normal 상태의 경 우는 약 6장(6 %, 3초)가 결함으로 판별될 것이다. 즉, fault01의 경우 결함감지에 대한 빈도 수가 normal 상 태에 비해 훨씬 빈번하다. 이를 이용하여, 데이터를 50초씩 누적하여 fault detect rate가 20 %가 넘으면 결함상태로 감지하여 설비의 정비 필요성을 알려주는 조건을 추가하는 방법 등으로 fault01과 normal을 구 분할 수 있다. 따라서 일정시간 동안의 결함감지 빈 도수를 이용하여 결함상태를 안정적으로 감지할 수 있을 것이다.





Fig. 7 Detect accuracy for threshold values



Fig. 8 Boxplot for mean square error of fault types



Fig. 9 Bar graph of normal detect rate and fault detect rate



Fig. 10 Visualizing of test data on two dimensions using t-SNE

하나는 특징 추출이다. Fig. 10는 훈련에 사용되지 않 은 정상 상태 데이터와 각 비 정상 상태의 고장 결함 데이터에 대해 합성곱 오토인코더의 인코더 출력 (Table 2의 13번째 계층 Max Pooling Layer의 출력) 을 t-SNE⁽¹³⁾를 통해 2차원화하여 시각화 한 것이다. Fig. 10를 보면 정상 상태의 데이터(941개)만으로 훈 련시킨 합성곱 오토인코더의 인코더 출력이 훈련되지 않은 정상 상태의 데이터(250개)와 각 고장 결함 데 이터(각 1191개)를 분류할 수 있음을 나타낸다. 이 논 문에서는 이러한 인코더의 특징 추출 기능을 이용하 여 고장을 감지 및 분류하는 알고리즘을 제안한다. 그 알고리즘은 Fig. 11에 순서도로 나타냈다.

Fig. 11의 좌측은 합성곱 오토 인코더를 활용한 비 지도학습 기반의 고장 결함 검출에 대한 알고리즘이 며, 우측그림은 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN)을 이용한 지도학습 기반 고장 진단에 대한 알고리즘이다. 합성곱 오토인코더의 인코더 부 분을 떼어내 fully connected layer와 연결한 후 미세 조정하면 높은 성능의 합성곱 신경망을 얻을 수 있다⁽⁵⁾. 또한 이러한 방식의 fine tuning은 학습 효율면에서도 우수하다. 이미 인코더 쪽에서 어느정도 특징 추출에 대한 기능을 가지고 있기 때문에 인코더의 가중치를 고정한 후, 적은 횟수의 epoch으로 합성곱 신경망의 학습을 마칠 수 있다. Fig. 12는 이 논문의 이런 과정 을 간단히 도시한 것이다.

이 연구에서 제안하는 고장 진단 방법 알고리즘의 흐름도를 나타내는 Fig. 11의 오른쪽 CNN부분의 절 차는 다음과 같다.

(1) CAE에 의해 불량 감지

(2) 불량 감지된 데이터 수집

(3) 기존에 인코더를 미세 조정하여 만든 CNN이 있는지 확인(훈련된 CNN이 없으면 (4)로 진행, 있으 면 (4-2)로 진행)

(4) 관측된 결함에 Label부여, CAE의 인코더 부분을 미세 조정하여 CNN을 생성

(5) 만들어진 CNN을 이용하여 정상데이터와 새로운 결함 데이터 분류 이미 기존에 확인되어 Label을 부 여한 결함인지 확인,

(4-2) 분류하고자 하는 결함이 확인되지 않은 결함 이면 (4)로 진행하여 인코더를 미세 조정하여 CNN을 만들고 이미 알고 있는 결함이라면 (5)로 진행하여 고장 진단



Fig. 11 Flow chart of fault detect algorithm and fault diagnosis (classification) algorithm



Fig. 12 Process for fine-tuning of encoder to training convolutional neural network

위와 같은 알고리즘을 통하면 새로운 종류 결함이 발견될 때마다 CNN을 통한 결함 분류기를 지속적으 로 업데이트 할 수 있다. 또한 이미 학습된 결함 종류 라면 고장 결함 발생 즉시, 어떤 고장인지 알 수 있 다. 이 논문에서는 훈련된 합성곱 인코더의 인코더부 분과 fully connected layer와 연결한 후 합성곱 신경 망을 학습시켰다. Table 3은 이 논문에서 학습시킨 합 성곱 신경망의 구조이다. 미세조정을 위해 Table 3의 1번째 계층부터 9번째 계층까지 가중치를 고정시키 고, 15회 학습하였다. 또한 학습데이터로 normal 상 태와 7가지 fault 상태에 대해 STFT 변환된 이미지 데이터를 각각 700씩(총 5600장) 학습 데이터로 활용 하였다. 학습 모니터링을 위한 검증 데이터는 각각

				Conf	usion N	Natrix			
Fault01	250	0	0	0	0	0	0	0	100%
	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Fault02	0	248	2	0	0	0	0	0	99.2%
	0.0%	12.4%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%
Fault03	0	0	250	0	0	0	0	0	100%
	0.0%	0.0%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
s	0	0	0	250	0	0	0	0	100%
S	0.0%	0.0%	0.0%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Fault05	0	0	0	0	250	0	0	0	100%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Fault06	0	1	0	0	1	248	0	0	99.2%
	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	12.4%	0.0%	0.0%	0.8%
Fault07	0	0	0	0	0	0	250	0	100%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	12.5%	0.0%	0.0%
Normal	0	0	0	0	0	0	0	250	100%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	12.5%	0.0%
	100%	99.6%	99.2%	100%	99.6%	100%	100%	100%	99.8%
	0.0%	0.4%	0.8%	0.0%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%
	Faulton	Faulto2	Faunos	Faulton	Fautos	Fautos	FaunoT	Normal	
	Target Class								



241장씩(총 1928장)을 활용하였다. 또한, 성능 평가 를 위한 테스트 데이터는 각각 250장씩(총 2000장)을 활용하였다.

Table 3과 같은 구조의 합성곱 신경망을 학습시킨

No	Name	Output size	Filter size/stride/number of channels
1	Image input layer	(112,112,3)	-
2	Conv layer	(112×112×24)	(3,3)/1/24
3	BN layer	(112×112×24)	-
4	Leaky ReLu layer	(112×112×24)	-
5	Max pooling layer	(56×56×24)	(2,2)/2/24
6	Conv layer	(56×56×12)	(3,3)/1/12
7	BN layer	(56×56×12)	-
8	Leaky ReLu layer	(56×56×12)	-
9	Max pooling layer	(28×28×12)	(2,2)/2/12
10	Conv layer	(28×28×12)	(3,3)/1/12
11	BN layer	(28×28×12)	-
12	Leaky ReLu layer	(28×28×12)	-
13	Max pooling layer	(14×14×12)	(2,2)/2/12
14	T'Conv layer	(28×28×12)	(4,4)/2/12
15	BN layer	(28×28×12)	-
16	Leaky ReLu layer	(28×28×12)	-

Table 3 Structure architecture of fine-tuned CNN

후, 테스트 데이터를 이용하여 성능을 평가하였고, 이 에 대한 confusion matrix는 Fig. 13과 같다. 8가지 클 레스에 대해서 Accuracy는 99.8 %로 상당히 높은 결 과가 나왔음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서 체인 전통 장치의 결함을 감지하기 위 한 수단으로 합성곱 오토인코더를 제안하였다. 제안 한 합성곱 오토인코더는 체인 전동 장치의 기어 박스 에 부착된 가속도계로부터 진동 신호를 STFT한 이미 지를 입력으로 한다. 입력된 STFT 이미지를 합성곱 오토인코더를 이용하여 복원하여 입력 이미지와의 mean square error를 구한 후, 미리 정하여 놓은 threshold를 기준으로 입력 신호가 결함 상태인지, 정 상 상태인지를 판단한다. 7가지 종류의 결함 상태를 이용하여 제안한 알고리즘을 테스트한 결과, 7가지 결함에 대해 평균 93.5 %의 정확도로 결함을 감지하였 다(각 고장에 대해 63.22 % 95.72 %, 99.24 %, 100 %, 97.40 %, 100 %, 100 %의 정확도로 결함을 감지하였 다.). 또한 94 %의 정확도로 정상 상태의 신호를 정상 상태로 판단하였다. 이러한 합성곱 오토인코더를 이 용한 비지도 학습 기반의 결함 감지 기법은 결함 데 이터를 수집한 후, label을 부여하여 학습시켜야만 결 함을 감지할 수 있는 지도 학습의 단점을 극복할 수 있는 장점이 있다.

이 논문에서 제안된 합성곱 오토인코더를 이용한 비지도학습 기반 결함 감지 기법은 입력 신호에 대해 서 설비가 정상 상태인지, 결함 상태인지만 판단할 수 있다. 따라서 설비의 결함 종류를 파악한 후, label을 부여하여 지도학습 기반의 결함 분류 알고리즘을 고 려해 볼 필요가 있다. 따라서, 이 논문에서 고장 진단 을 위한 결함 진단(분류) 알고리즘을 제안하였다. 훈 련된 합성곱 오토인코더의 인코더부분의 특징 추출 기능을 이용하여, 인코더 부분과 fully connected layer를 연결한 후, fine-tuning하여 합성곱 신경망을 이용한 지도학습 기반의 결함 진단 알고리즘을 제안 하였다. 인코더의 특성을 이용하여 fine tuning하면, 적은 횟수의 학습으로도 높은 정확도의 합성곱 신경 망을 얻을 수 있으므로, 학습 효율에 있어 장점이 있 다. 해당 방법의 합성곱 신경망의 결함 진단 정확도는 99.8 %의 높은 성능을 보였다.

제안된 비지도 학습 기반의 합성곱 오토인코더 와 지도 학습 기반의 합성곱 신경망을 설비에 활용 한다면 결함을 감지하고 감지된 결함에 label을 부 여하여 지속적으로 고장 진단에 대한 합성곱 신경 망 기반 고장 분류기를 발전시킬 수 있을 것이라고 기대한다.

후 기

이 성과는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의

재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1A2B5B02069400)과 2020년도 중소기 업청 스마트센서 선도 프로젝트 기술개발사업의 산업 용 체인 인공지능형 자가진단 키트 개발 과제의 지원 을 받아 수행된 과제임.

References

(1) Back, J. S., Kim, S. W., Lee, S. K. and Lee, C. H., 2020, Conditioning Monitoring in Chain Sprocket Drive Unit System Based on Artificial Neural Network, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 286–293.

(2) Kankar, P. K., Sharma, S. C., Harsha., S. P., 2011, Fault Diagnosis of Ball Bearings Using Machine Learning Methods, Expert Systems with Applications, Vol. 38, No. 3, pp. 1876~1886.

(3) Hu, Q., He, Z., Zhang, Z. and Zi, Y., 2007, Fault Diagnosis of Rotating Machinery Based on Improved Wavelet Package Transform and SVMs Ensemble, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, No. 2, pp. 688~705.

(4) Saravanan, N., Kumar Siddabattuni, V. N. S. and Ramachandran, K. I., 2010, Fault Diagnosis of Spur Bevel Gear Box Using Artificial Neural Network(ANN) and Proximal Support Vector Machine(PSVM), Applied Soft Computing, Vol. 10, No. 1, pp. 344~360.

(5) Masci, J., Meier, U., Ciresan, D., Schmidhuber, J., 2011, Stacked Convolutional Auto-encoders for Hierarchical Feature Extraction, International Conference on Artificial Neural Networks, pp. 52~59

(6) David, O. E., Netanyahu, N. S., 2016, Deep Painter:Painter Classification Using Deep Convo lutional Autoencoders, International Conference on Artificial Neural Networks, pp. 20~28.

(7) Chen, M., Shi, X., Zhang, Y., Wu, D. and Guizani, M., 2021, Deep Feature Learning for Medical Image Analysis with Convolutional Autoencoder Neural Network, IEEE Transaction on Big Data, Vol. 7, No. 4, pp. 750~758.

(8) Cheng, Z., Sun, H., Takeuchi, M. and Katto, J., 2018, Deep Convolutional AutoEncoder-based Lossy Image Compression, 2018 Picture Coding Symposium, pp. 253~257.

(9) Géron, A., 2019, Hands-on Machine Learning with Scikit-learn, Keras and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems, O'Reilly Media, Inc., Canada.

(10) Loffe, S. and Szegedy, C., 2015, Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift, Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (PMLR), Vol. 37, pp. 448~456.

(11) Dumoulin, V. and Visin, F., 2016, A Guide to Convolution Arithmetic for Deep Learning, arXiv preprint, arXiv:1603.07285, http://arxiv.org/abs/1603.07285.

(12) Kingma, D. P. and Ba, J., 2014, Adam: A Method for Stochastic Optimization, arXiv preprint, arXi v:1412.6980, http://arxiv.org/abs/1412.6980.

(13) Maaten, L. V. D. and Hinton, G., 2008, Visualizing Data Using t-SNE, Journal of Machine Learning Research, Vol. 9, No. 11, pp. 2579~2605.



Chang-Hun Lee is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for the application of signal processing and deep learning to mechanical system and vehicle system.



Sang-Kwon Lee studied in the Department of Mechanical Engineering at the Pusan National University, Pusan, Korea for B.S. In 1998, he received a Ph.D. degree in signal processing at the ISVR (Institute of Sound and Vibration

Research) of the University of Southampton in U.K. He has continued the sound and vibration research in the department of mechanical engineering inha University since 1999. He worked in Hyundai Motor Company between 1984 and 1994 and researched Samsung Motor Company on 1998.

고무공 충격음의 우회전달에 의한 공동주택 상하층 세대에서의 바닥충격음레벨 분포

Floor Impact Sound Level Distribution in Upper and Lower Units of an Apartment Based on Flanking Transmission by the Impact of a Rubber Ball

이 송 미*·김 정 훈*·김 수 홍*·송 한 솔*·류 종 관*

Songmi Lee*, Jeonghun Kim*, Suhong Kim*, Hansol Song* and Jongkwan Ryu*

(Received September 14, 2021 ; Revised October 07, 2021 ; Accepted October 08, 2021)

Key Words: Floor Impact Sound(바닥충격음), Flanking Transmission(우회전달), Level Distribution(레벨분포), Upper & Lower Unit(상하층세대)

ABSTRACT

This study investigated the distribution of floor impact sound levels in the upper and lower floors of an apartment house by the flanking transmission of the sound caused by the impact of a rubber ball. The rubber ball floor impact sound was measured in 10 units (five units on the upper and lower floors based on the excitation floor) of an apartment prior to completion. The measurements indicated that the single number quantity (L'_{iAFmax}) of the rubber ball impact sound on the fifth upper and lower floors based on the excitation floor was reduced by 18 dB to 28 dB compared to the floor directly below the excitation floor. It was also found that as the sound-receiving floor was further away from the excitation floor, the decrease was greater at the corner sound-receiving point than at the center and at the lower floor than at the upper floor. In addition, it was observed that the lower the frequency band, the greater was the decrease in the floor impact sound level. These results and further investigations would be helpful in resolving conflicts between residents due to misidentification of the location of the floor impact sound in apartments.

1. 서 론

최근 코로나19로 인해 주거공간에서 머무는 시간이 길어지면서 층간소음으로 인한 민원이 급증하고 있다. 현재, 국내의 공동주택 바닥충격음은 직상층 바닥의 바 닥충격음 차단성능을 규제하고 있다. 하지만, 환경부 이 웃사이센터⁽¹⁾와 국토부 층간소음 예방관리 가이드북⁽²⁾ 에 의하면 직상층이 아닌 상하층 세대 등 인근 다른 세 대로 인한 층간소음 민원이 발생되었다. 이러한 층간 소음 발생 위치의 오인으로 인해 주민들 간의 불필요 한 갈등이 점점 고조화 되고 있다. 또한, 민원을 해결 하기 위한 과정(측정 및 원인과악)에서 층간소음의 발 생 위치를 찾는 것에 어려움이 있다. 한편, 국가에서는 2020년 '도전, 한국이 해결해야할 후보 과제' 중 층간 소음의 정확한 원인지 파악 등이 주요 과제로 선정되었

[†] Corresponding Author; Member, Professor, School of Architecture, Chonnam National University, Professor E-mail: jkryu@jnu.ac.kr

^{*} Member, Dept. of Architectural and Civil Engineering, Graduate School, Chonnam National University, Student

[#] A part of this paper is presented at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference

[‡] Recommended by Editor Jun Yun Chung

 $[\]bigodot$ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

으며, 층간소음을 저감하고 이웃 간의 분쟁을 줄일 수 있는 기술적 방안이 필요하다고 언급하였다⁽³⁾. 이는 층 간소음은 더 이상 직상층에서 만의 문제가 아닌 상하층 세대 및 모서리 세대 등 모든 세대로 부터의 바닥충격 음도 고려해야 할 필요가 있음을 시사한다.

국내 공동주택의 주요 구조형식인 벽식구조에서 벽 체는 상하층으로 구조적인 연결이 되어 있기 때문에 바닥충격 진동 및 소음 전파의 주요 경로가 된다. 충격 가진층이 직상층인 경우 천장면(가진층 기준 바닥면) 대비 벽체의 진동 레벨^(4,5) 및 음의 세기⁽⁶⁾는 상대적으 로 크지 않으나, 상부층 또는 하부층 세대의 벽체 및 바닥으로 진동에너지가 전달되어 일정 레벨 이상의 바 닥충격음이 전달될 것으로 판단된다. 벽체 보강에 따 른 바닥충격음 차단성능 조사 결과 유의미한 저감효과 나타나, 벽체 부위의 바닥충격음의 영향을 간접적으로 보여준 바 있다⁽⁷⁾. Lee 등⁽⁸⁾은 직상층 바닥충격의 진동 이 수음층 벽체 및 바닥으로 전달되어 진동과 음향에 서 인접하는 2개의 공진주파수가 발생되며, 이 공진주 파수는 벽체의 강성에 의해 영향을 받는다고 제시하였 다. Kwak 등⁽⁹⁾은 벽식구조 아파트의 동일한 가진층에 서 고무공을 가진 후 각 층별 소음과 진동을 측정한 그 결과, 벽체가 갖는 정적하중이 증가할수록 바닥의 공진주파수가 증가하여 상대적으로 아래층의 바닥의 공진주파수가 상층보다 높은 것으로 나타났다. 또한, 가진층 기준 5개 상층과 하층세대의 바닥충격음 레벨 (LiFmax)은 모두 직하층 대비 약 23 dB의 낮은 레벨을 나타내는 것으로 나타났다. 하지만, 공동주택에서 바닥 충격음의 우회 전달특성을 좀 더 명확히 규명하고 대 처하기 위한 주파수 대역별 전달특성과 수음위치의 영 향에 대한 연구는 부족한 상황이다.

따라서 이 연구에서는 벽식구조 공동주택에서 고 무공 충격원을 대상으로 가진층으로부터 상하부층세 대로 우회 전달되는 바닥충격음의 레벨 분포를 조사 하였다. 현장 측정은 가진층을 기준(가진위치: 거실 중앙)으로 상하층 5개 세대에서 거실의 중앙과 모서 리 지점에서 측정하였고, 각 수음위치별로 단일평가 지수와 주파수대역별 바닥충격음 레벨을 분석하였다.

2. 현장 측정

2.1 현장 개요

공동주택에서 바닥충격음 전파 특성을 알아보기

위해 광주광역시 동구에 위치한 준공 전 아파트 1개 동 1호 라인을 대상으로 측정하였다. 측정 현장의공 급 유형은 105.3 m²이고 전용 면적은 76.0 m², 거실의 천장높이는 2.5 m이었다. 또한, 아파트는 전반적으로 벽식구조 형식이나, 거실의 한쪽 벽은 건식벽체로 시 공되어 일부 층의 경우 거실과 침실을 합친 확장형이 었다(Fig. 1에서 거실과 침실2의 경계벽이 없음). 바 닥은 콘크리트 210 mm, 완충재(EPS) 30 mm, 경량기 포콘크리트 40 mm, 시멘트 몰탈 50 mm이며, 지정 마감은 강마루로 구성되었다. 해당 현장의 바닥충격 음 차단성능은 KS F 2810-2⁽¹⁰⁾과 KS F 2863-2⁽¹¹⁾에 따라 측정 및 분석한 결과, 중량충격음(고무공)의 바 닥충격음레벨(*L*'_{i,Fmax,Aw})은 47 dB인 것으로 나타났다.

2.2 측정 및 분석 방법

충별에 따른 바닥충격음 전파 특성을 알아보기 위 해 ISO 10052⁽¹²⁾ 간편법을 참고하여 가진 지점과 수 음 지점을 선정하였다. 가진 지점은 거실의 바닥의 중앙 지점으로 설정하였다. 충격원은 고무공을 사용 하여 바닥에서부터 높이 100 cm에서 자유낙하 하였 다. 수음 지점은 Fig. 1과 같이, 복도를 제외한 거실 바닥의 중앙 지점과 벽에서 75 cm 이격거리의 모서 리 지점으로 총 2개의 수음 지점을 설정하였다. 확장 형 평면의 경우, 일반형 평면과 동일한 크기로 경계 를 두고 동일한 방식으로 진행하였다. 바닥충격음의 측정 및 분석은 현장에서 녹음 후 사후 분석하는 방



Fig. 1 Positions of excitation of rubber ball and sound receiver (\circ : receiver, \triangle : excitation)

법으로 진행되었다. 현장에서 바닥충격음 녹음은 소 음계(RION NL-42) 2대를 바닥에서 1.2 m 높이로 설 치하여, 총 4번의 충격음이 포함되도록 하여 10초 동 안 진행하였다. 또한, Fig. 2와 같이, 가진층을 기준으 로 상부 5개, 하부 5개 세대에서 녹음하였다. 각 층에 서의 녹음은 동시측정이 아니라, 각각의 층에서 녹음 시 가진층에서 반복 가진되는 고무공충격음을 녹음하 였다. 바닥충격음의 음압레벨 분석은 AS-70(RION)을 사용하여 1/3 옥타브밴드로 분석한 후 ISO 717-2⁽¹³⁾ 를 통해 제시된 63 Hz~500 Hz대역의 단일평가지수 (*L*'_{iAFmax}, SNQ: single number quantity)로 평가하였다.



Fig. 2 Microphone position for each floor (*: expended living room)

3. 결 과

3.1 층수에 따른 고무공 충격음 레벨

(1) 단일평가지수(SNQ)

Fig. 3은 각 층별 고무공 충격음의 단일평가지수 (L'iAFmax)를 나타내고 있다. 먼저, 모서리 수음이 중앙 지점보다 전반적으로 높은 단일평가지수를 나타냈다. 중앙 지점의 경우, 가진층을 기준으로 직하층이 48 dB, 5개 상층(U5F)과 하층세대(L5F)는 모두 30 dB로 나타 나 18 dB의 바닥충격음 레벨 감쇠가 발생한 것으로 나 타났다. 한편, 모서리 지점의 경우에는 가진층을 기준 으로 직하층이 57 dB로 가장 높게 나타났으며, 5개 상 층세대(U5F)의 경우 36 dB, 5개 하층세대(L5F)는 29 dB 로 나타나 상하층 각각 21 dB, 28 dB 감쇠 현상이 나 타났다. 상하층 5개 지점의 바닥충격음레벨 분석 결 과 모서리 지점이 중앙 지점 보다 바닥충격음 감쇠가 크게 나타나며, 상층과 하층의 비교결과 중앙 지점의 경우 차이는 미미하였으나 모서리 지점의 경우 하층 세대가 좀 더 큰 레벨감쇠현상을 나타냈다. 한편, 가 진층에서 멀어질수록 바닥충격음 레벨이 감쇠하다가 증가하고 다시 감쇠하는 경향을 나타냈다. 특히, 모서 리 지점의 충격음 감쇠량의 변화가 중앙 수음보다 비 교적 높은 것으로 나타났다. 이러한 특성으로 모서리 지점의 경우 가진층의 직하층(L1F)로부터 두 개층 상 층(U2F), 하층(L3F)에서의 바닥충격음 레벨이 각각 46 dB, 47 dB로 직하층 중앙 지점에서의 레벨인 48 dB 과 유사한 수치를 나타냈다.



Fig. 3 Floor impact sound level (SNQ: L'_{iAFmax}) at each floor and receiving position (U: upper unit, L: lower unit, EX: excitation floor, *: expended living room)
(2) 주파수 대역별 바닥충격음 레벨

Fig. 4는 각 주파수 대역별 중앙 지점과 모서리 지 점에서의 충격음 음압레벨을 나타낸 것이다. Fig. 4(a) 의 63 Hz 대역에서는 모서리 지점이 중앙 지점보다 음압레벨이 높게 나타났지만, 나머지 주파수 대역에 서는 중앙 지점의 음압레벨이 비교적 높게 나타났다. 전반적으로 모든 주파수 대역에서 기준층에서 멀어질 수록 음압레벨이 감소하는 것으로 나타났고 주파수가 낮을수록 음압레벨 감쇠량이 큰 것으로 나타났다. 한 편, 63 Hz 대역에서는 가진층에서 멀어질 때 바닥층 격음 레벨이 증가하는 경우가 발생하였으며, 이러한 경향은 모서리 지점에서 보다 명확히 나타났다.

Table 1은 중앙 지점과 모서리 지점에서 각 단일평 가지수와 주파수 대역별 충격음 레벨과의 상관관계를 나타낸 것이다. Table 1과 같이, 전반적으로 중앙과 모서리 지점 모두 단일평가지수와 유의한 상관관계를 나타냈고, 중앙 지점의 경우에는 모든 주파수 대역에 서 0.93 이상의 높은 상관계수가 나타났지만, 모서리



지점에서는 63 Hz를 제외한 주파수 대역에서 상대적 으로 낮은 상관계수가 나타났다. 특히, 중앙 지점의 경우 125 Hz, 모서리 지점의 경우 63 Hz가 가장 높은 상관계수를 나타냈다. 이는 모서리 지점의 경우 63 Hz 에서의 음압레벨이 단일평가지수 결정에 가장 크게 영향을 미친다는 점을 보여준다.

Fig. 5는 수음 지점별 상하층 세대에서의 바닥충격 음 레벨의 주파수 특성과 배경소음레벨을 나타낸 것

 Table 1 Correlation coefficient in floor impact sound level between SNQ and octave band for each receiving position

Frequency	Center			
SNQ	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz
Center	0.967**	0.986**	0.936**	0.956**
Conner	0.998**	0.862**	0.841**	0.794**

** : *p*<0.01







Fig. 4 Floor impact sound level at each floor and sound receiving position for each octave band (U: upper unit, L: lower unit, EX: excitation floor, *: expended living room)

이다. 먼저, 배경소음은 중앙과 모서리 수음점 각각 모든 층의 평균 배경소음은 29.0 dB(A)와 24.6 dB(A) 로 나타났으며 표준편차는 중앙과 모서리 수음점 모 두 0.9 dB(A)이었다. 중앙 지점과 모서리 지점에서 가 진층의 직하층(L1F)을 기준으로 주파수 대역별 감쇠 량을 살펴보았을 때, 전반적으로 두 개의 지점 모두 상하층 세대가 유사한 경향으로 주파수 대역별 바닥 충격음 레벨이 감쇠하는 것으로 나타났다. Fig. 5(a)에 서와 같이 중앙 지점의 경우, 상하층 세대의 63 Hz 대 역 감쇠량이 다른 주파수 대역에 비해 크게 나타난 반 면, 500 Hz대역의 감쇠량은 미미한 것으로 나타났다. 모서리 지점의 경우, Fig. 5(b)에서와 같이 모든 주 파수 대역에서 감쇠량이 전반적으로 중앙 지점보다





Fig. 5 Frequency response of floor impact sound level at each floor and sound receiving position (U: upper unit, L: lower unit, EX: excitation floor, *: expended living room, BGN: background noise)

컸으며, 특히 아래층 세대의 63 Hz 대역의 감쇠량이 중앙 지점보다 더욱 큰 것으로 나타났다. 한편, 63 Hz 의 모서리 지점의 경우 가진층의 직하층(L1F)로부터 두 개층 상(U2F) 또는 하층(L3F)에서의 바닥충격음 레벨이 한 개층 상(U1F) 또는 하층(L2F) 보다 높은 값을 나타냈다. 이러한 경향은 중앙 지점 하층세대에 서도 동일하게 나타났다.

3.2 우회 전달 최단거리에 따른 고무공 충격음 레벨 감쇠 예측

(1) 단일평가지수(SNQ)

Fig. 6은 수음 지점별 가진 지점과 수음 지점간의 거리(우회전달 최단거리)에 따른 단일평가지수를 나타 낸 것이다. 바닥충격음은 고체 및 공기를 통해 전달되 는 음이므로 가진 지점으로부터 각 층의 수음 지점까 지 우회전달 최단거리(고체+공기전달 경로, Fig. 2에 서 녹색부분)는 가장 가까운 내력벽(거실과 침실 1의 경계벽)을 기준으로 하였다. 다만, 직하층의 경우 우 회전달음의 영향이 천장(직상층 바닥) 대비 미미할 것으로 판단되어 제외하였다. Fig. 6과 같이, 가진층 을 기준으로 최단거리가 멀어질수록 역로그함수 형태 로 감쇠하는 것으로 나타났으며, 중앙 수음에서의 역 로그함수 추세선을 기준으로 R²값이 모서리 수음 지 점에 비해 높게 나타났다. 이는 중앙 수음 지점에 비



Fig. 6 SNQ of floor impact sound as a function of source-receiver flanking transmisson distance and R² (U: upper unit, L: lower unit)

역로그함수 형태로 바닥충격음 레벨이 감쇠하는 것으

로 나타났다. 63 Hz의 경우 Fig. 6의 단일평가지수와 유사한 결과를 나타냈으나, 역로그함수 추세선 기준

R²값이 다른 주파수 대역의 값보다 낮은 것으로 나타

나 감쇠경향이 상대적으로 불규칙한 것으로 판단된다.

또한, 중앙과 모서리 지점 간 차이도 다른 주파수대역

대비 상당히 큰 것으로 나타났다. 125 Hz와 250 Hz 대

역의 경우 가진 지점과 수음 지점 거리에 따른 거리

해 모서리 수음 지점의 경우, 거리에 따른 충격음 감 쇠량이 불규칙한 것으로 판단된다.

(2) 주파수 대역별 바닥충격음 레벨

Fig. 7은 수음 지점별 가진 지점과 수음 지점간의 최단거리에 따른 주파수 대역별 바닥충격음 음압 레 벨을 나타내고 있다. 전반적으로 모든 주파수 대역에 서 가진 지점과 수음 지점간 거리가 증가함에 따라

90 90 Center-U Center-U (R²=0.725) $(R^2=0.571)$ 0 Center-L 0 Center-L 80 Corner-U Corner-U 80 $(R^2=0.374)$ $(R^2=0.658)$ △ Conner-L Conner-L Δ 70 70 C'_{i,Fmax} [dB] 60 60 [dB] C L'_{i,Fmax} [Δ 50 50 40 40 <u>ک</u> 30 30 20 20 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 Minimum flanking Minimum flanking transmission distance [m] transmission distance [m] (a) 63 Hz (b) 125 Hz 90 90 Center-U (R²=0.839) Center-U $(R^2=0.571)$ 0 Center-L O Center-L 80 Corner-U 80 ▲ Corner-U (R²=0.848) $(R^2=0.482)$ △ Conner-L △ Conner-L 70 70 Ui, Fmax [dB] 60 60 Ui,Fmax [dB] 50 50 €.A. 8.A. 8.A. 8. 40 40 30 30 20 20 18 20 22 24 6 8 10 12 14 16 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 Minimum flanking Minimum flanking transmission distance [m] transmission distance [m] (c) 250 Hz (d) 500 Hz

Fig. 7 Floor impact sound level as a function of source-receiver flanking transmission distance for each octave band and R² (U: upper unit, L: lower unit)

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 31(5): 574~581, 2021 579

감쇠 경향이 뚜렷하며, 중앙과 모서리 지점간 차이도 미미하였다. 500 Hz 대역의 경우 다른 주파수 대역 대비 감쇠량이 적은 것으로 나타났다.

4. 토의 및 결론

이 연구는 공동주택에서 바닥충격음의 우회 전달 특성을 알아보기 위해 고무공 충격음을 대상으로 준 공 전 아파트에서 가진층을 기준으로 상하층 5개 세 대에서 바닥충격음 측정을 실시하였다. 측정결과, 고 무공 충격음의 단일평가지수 기준으로 가진층의 직하 층 대비 5개층 상하층 세대에서의 바닥충격음의 레벨 은 18 dB~28 dB 감소하였다. 가진층으로부터 수음 층이 멀어질수록 중앙 보다는 모서리 지점에서, 상층 보다는 하층에서의 감소량이 더욱 큰 것으로 나타났 다. 또한, 주파수 대역별 바닥충격음 레벨을 조사한 결과 주파수 대역이 낮을수록 바닥충격음 레벨 감소 가 큰 것으로 나타났다.

가진 지점과 수음 지점의 거리 증가에 따라 고무공 충격음 레벨이 전반적으로 역로그함수 형태로 감쇠하 나, 특정 층에서는 오히려 바닥충격음 레벨이 증가하 는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 모서리 지점의 63 Hz 대역에서 보다 명확히 발견되었는데, 벽식구조 아파트의 경우 가진층 바닥과 수음층 벽체 및 바닥이 구조적으로 연결됨에 따라 각 요소간의 복합적인 구 조적 진동특성 관계^(8,9)에 의해 기인한 것으로 사료되 며, 이에 대한 면밀한 추가 연구가 필요하다. 앞의 결 과에 따라, 가진층의 직하층에서의 바닥충격음 레벨 (중앙 지점, SNQ: 48 dB)과 유사한 값이 가진층의 직 하층으로부터 2개층 상층 및 하층 세대 모서리 지점 에서 나타났고, 이러한 결과는 벽식구조 공동주택에 서 층간소음은 가진 지점에서 거리가 멀어짐에도 불 구하고 직하층과 동일한 에너지가 전달될 수 있음을 시사하다.

이 연구는 아파트 1개동을 대상으로 조사하였기 때 문에 보다 다양한 유형의 공동주택에서의 전달 특성 과 충격력을 달리하였을 때의 전파특성 등 추가적인 조사가 필요하다. 또한, 소음뿐만 아니라 바닥과 벽에 서의 진동 측정 및 앰비소닉 마이크로폰 등을 사용하 여 충별로 동시 특정을 통해 바닥충격음 전파 특성에 대한 조사가 필요하다. 측정 시, 창측 모서리뿐만 아 니라 복도측에서의 모서리 부분에서도 측정 및 분석 을 통해 바닥충격음 전달 특성을 비교함으로써 바닥 충격음의 전과특성을 파악하는 데 도움이 될 것이라 고 판단된다. 향후, 충격력의 크기 및 가진 위치에 따 른 차이의 비교와 머신러닝의 방법론을 활용하여 수 집한 데이터들을 통해 발생 위치를 예측하는 추가적 인 연구가 필요하다. 이를 통해 공동주택에서의 바닥 충격음 발생 위치의 오인으로 인한 주민들 간의 갈등 을 해소하는데 도움이 될 것이라고 판단된다.

후 기

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지 원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C163631-01).

References

(1) Korea Environment Corporation, 2018, Casebook of Complaints from Neighboring.

(2) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020, Central Committee for Management Dispute Mediation of Multi-unit Dwelling: Guidebook of Noise Prevention and Management.

(3) Ministry of the Interior and Safety, Gwanghwamun ilbunga, 2020, https://www.gwanghwa-moon1st.go.kr/.

(4) Park, H. G., Baek, G. O. and Moon, D. H., 2015, Modal Parameter of Floor and Walls in Residual Building, Proceedings of the KSNVE Annual Autum Conference, pp. 682~685.

(5) Ryu, J. K., Kim, I. H. and Go, J. C., 2015, Heavy-weight Floor Impact Sound and Vibration with Structure Types in Apartment Building, Proceedings of Acoustical Society of Korea, p. 212.

(6) Kim, M. J., Sohn, J. Y. and Kim, H. S., 1998, Contribution Ratio of Each Surface of Receiving Room for Floor Impact Sound Transmission by Using Sound Intensity Method, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 14, No. 4, pp. 217~225.

(7) Kim, K. W., Kang, J. S., Lee, S. E. and Yang, K. S., 2005, Floor Impact Sound Isolation Performance by Composition of Ceiling and Wall, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering,

Vol. 15, No. 3, pp. 465~473.

(8) Lee, S., Hwang, D., Park, J. and Jeon, J. Y., 2015, Cause and Perception of Amplitude Modulation of Heavy-weight Impact Sound in Concrete Wall Structure, Building and Environment, Vol. 94, pp. 785~792.

(9) Kwak, Y., Lee, S., Park, J., Hwang, D., Jeon, J. Y. and Park, J., 2017, Effect of the Static Compressive Load on Vibration Propagation in Multistory Buildings and Resulting Heavyweight Floor Impact Sounds, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 142, No. 1, pp. 308~316.

(10) Korean Agency for Technology and Standard, 2017, KS F 2810-2 Field Measurements of Floor Impact Sound Insulation of Buildings — Part 2: Method using Standard Heavy Impact Sources.

(11) Korean Agency for Technology and Standard, 2020, KS F 2863-2 Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and Building Elements — Part 2: Floor Impact Sound Insulation against Standard Heavy Impact Source.

(12) International Organization for Standardization, 2021, ISO 10052 Acoustics — Field Measurements of Airborne and Impact Sound Insulation and of Service Equipment Sound — Survey method.

(13) International Organization for Standardization, 2020, ISO 717-2 Acoustics — Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements — Part 2: Impact Sound Insulation.



Songmi Lee received the M.S. in the Dept. of architectural engineering from Chonnam National University, Gwangju, Korea in 2021. She is currently a Ph.D. candidate in the School of architecture at Chonnam National University. Her

research interests are in the area of architectural acoustics, psycho-acoustics, and machine learning.



Jeonghun Kim received the M.S. in the Dept. of architectural engineering from Chonnam National University, Gwangju, Korea in 2021. He is currently a Ph.D. candidate in the School of architecture at Chonnam National University. His

research interests are in the area of architectural acoustics, soundscape, and machine learning.



Suhong Kim graduated from Chonnam National University, Gwangju, Korea in 2020. He is currently a M.S. candidate in the school of architecture at Chonnam National University. His research interests are in the area of architec-

tural acoustics, psycho-acoustics, computational analysis and machine learning.



Hansol Song received the M.S. in the Dept. of architectural engineering from Chonnam National University, Gwangju, Korea in 2019. He is currently a Ph.D. candidate in Chonnam University. His research interests are in the area of architec-

tural acoustics, floor impact sound, environmental noise, and psycho-acoustics.



Jongkwan Ryu received his Ph.D. in Dept. of Architectural Engineering from Hanyang University, Seoul. He is currently as a professor in the school of architecture at Chonnam National University. His research interests are in the area of architec-

tural acoustics, psycho-acoustics, acoustic barrier-free, and machine learning.

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Information for Authors/논문원고 집필요강

- Papers should contain new results of original research and academic contribution to noise and vibration engineering, which hasn't been submitted or published in any other journals.
 논문집의 내용은 타 잡지에 투고 또는 발표되지 않은 것으로 소음진동공학과 관련하여 독창적이며 학문적 가치가 높은 것으로 한다.
- (2) Authors who want to submit the paper should be the member of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering. However, exceptional case can be made by the society. 논문집에 원고를 투고하고자 하는 자는 한국소음진동공학회 회원을 원칙으로 한다. 단 본 학회에서 인정 한 경우는 예외로 한다.
- (3) The manuscript should be written in Korean but English can be accepted. 논문집의 원고는 국어를 원칙으로 하나 경우에 따라 영어로 할 수 있다.
- (4) The acceptance date is the date on that the society office receives the paper. The paper can be cancelled if the revised paper hasn't been returned to the office within one month after the paper was sent to authors for revision.

원고의 접수일은 본 학회에서 접수한 날로 한다. 단 내용의 수정·보충 등의 요구된 원고가 본 학회에서 발송한 날로부터 1개월 이내에 회송되지 않을 경우에는 취소 할 수 있다.

(5) Authors are responsible for the content of the paper. The copyright of all papers submitted to the journal is transferred to the Korean Society of Noise and Vibration Engineering and authors should submit the consent form(statement of copyright transfer). And it must comply with the code of ethics, research ethics and committee regulations.

원고내용의 책임은 저자가 지며, 제출된 모든 논문의 저작권양도동의서 제출을 통해 저작권을 한국소음진 동공학회로 양도함을 동의하고, 윤리헌장, 연구윤리 및 위원회 운영 규정을 준수하여야 한다.

(6) The corresponding author should be a senior member among authors. If the corresponding author's affiliation is university, he(she) should be a professor. If the corresponding author's affiliation is research institute, he(she) should be a team leader. 논문의 교신저자는 저자중 선임자로 하며, 저자의 소속이 학교인 경우 교수, 연구소 등은 팀장급 이상을

근순의 교신제사는 제사당 선임사로 하며, 제사의 조곡이 약교인 경우 교구, 연구조 등은 팀장급 이장을 기준으로 한다.

- (7) The decision on the selection of the paper follows the paper review rules.원고의 채택여부는 별도로 정한 논문심사규정에 따른다.
- (8) Authors of the paper should provide the paper processing fee and publication fee. 논문원고의 저자는 논문게재회비 규정에 따라 소정의 논문관리회비 및 게재회비를 납부해야 한다.

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Statement of Copyright Transfer | 저작권양도동의서

Title 논문의 제목 :	
Author(s) 저자(들) :	

I(We) hereby certify that I(We) agreed to submit the manuscript entitled as above to the Korean Society for Noise and Vibration Engineering with the following statements. 저자들은 별첨의 "저작권 양도 동의의 내용 및 조건"에 기술되어 있는 설명을 읽고 본인들의 논문이 한국소음진동공학회논문집에 게재됨과 동시에 위 논문에 대한 저작권을 사단법인 한국소음진동공학회로 양도함을 동의합니다.

Author's signature | 대표저자의 서명 : (the owner of copyright) Author(name) | 성명 : Position | 직위 : Affiliation | 소속 : Date | 서명한 날짜 :

사단법인 한국소음진동공학회 편집위원장 귀하 Editor-in-chief of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

** Please send this form to by fax at +82-2-3474-8004 or a scanned copy of the signed original by e-mail at editor@ksnve.or.kr

Authors are hereby granted the right to/저작권 양도 동의의 내용 및 조건

1. The submitting/corresponding author warrants that

(1) This contribution is original, that he/she has full power to make this grant, that he/she has not granted or assigned any rights in the article to any other person or entity, that the article is copyrightable, and that it does not infringe upon any copyright, trade mark, patent or statutory right.

(2) Authors may reproduce the manuscript for course teaching or private purpose like author's career, research reports or unprofitable advertisement.

(3) To post a copy of the manuscript as accepted for publication after peer review on the author's own web site, or the author's institutional repository, or the author's funding body's archive which is cited on manuscript.

(4) To use a copy of the manuscript for materials of the presentation of research, workshop, author's lecture or book writing.

2. The condition for the author's right

(1) Using a copy of the manuscript for permitted purpose, it must be cited that copyright belongs to The Korean Society for Noise and Vibration Engineering.

(2) To commercialize the manuscript, the author can't transfer copyright to a profit-making organization. Only, it is acceptable in case of 1(1).

3. The authors warrant and certify that

(1) The author who has signed this agreement has full right, power and authority to enter into this agreement on behalf of all of the authors and the organizations they belong to.

(2) Despite this agreement, if the government of the Republic of Korea and the author's funding body want to exercise copyright of the manuscript, there is no restriction.

(3) Signing up this agreement, the author promises that the manuscript wasn't published in other forms except the presentation form at symposium and dosen't include any illegal content which violates copyrights of any authors.

(4) Although all or part of the manuscript is used for commercial purpose be-

fore the publication on KSNVE journal, all or part of the published contents can't be revised after the publication for commercial use.

(5) Signing up this agreement means that the author reads, fully understands and agrees on all contents of statement.

1. 본 양식에 의한 저작권 양도 후에 저자가 가지는 권리

(1) 논문의 내용으로 기술된 특허, 등록상표, 독장적인 신기술, 연구 기법 및 응용에 관한 권리 및 기타 법으로 보장된 권리.

(2) 저자가 저자의 논문을 교육을 위한 교재로 사용하거나 저자의 취직, 진급, 연구계획서 및 연구보고서의 작성, 연구 결과의 비수익성 광고 등 개인적인 목적으로 사용하기 위한 복사, 복제 및 인쇄를 할 권리.

(3) 저자가 소속된 기관 및 단체, 연구비를 지원하고 그 사실이 논문에 표시된 단체, 저자의 개인 WEB SITE에 논문의 전문 혹은 일부를 계재하고 배포할 권리.

(4) 저자가 교과서 등 서적과 종설의 기술, 저자에 의한 강의, 연구발표 및 워 크샵 등을 위한 교재 제작을 위하여 논문의 전부 혹은 일부를 사용할 권리.

2. 본 양식에 의한 저작권 양도 후에 저자가 가지는 권리를 행사하기 위한 조건

(1) 위에 허락된 목적으로 논문의 전부 혹은 일부를 사용할 경우에는 반드시 저작권이 사단법인 한국소음진동공학회에 속함을 표시하여야 한다.
(2) 논문을 상품화하기 위하여 논문에 대한 권리를 영리단체에 양도할 수 없다. 단, 1(1)의 권리를 행사하는 경우에는 그렇지 아니하다.

3. 저작권의 소유 및 서명에 대한 기타 조건

(1) 저자 중 1인(논문에 대한 책임을 질 수 있는 저자)이 모든 저자와 이들 저자가 속한 기관 또는 단체의 저작권 담당자를 대표하여 본 저작권 양도 동의서에 서명하여야 한다.

(2) 본 저작권 양도 동의에도 불구하고 대한민국 정부 또는 연구비를 지원 한 기관 및 단체가 본 논문에 대한 저작권을 행사하고자 하는 경우에는 그 행사를 제한하지 아니한다.

 (3) 본 저작권 양도 동의서에 서명함으로써 저자는 본 논문이 학술대회에 서의 발표를 제외한 다른 형태로 투고 또는 발간되지 않았으며, 타인의 저 작권을 침해하는 불법적인 내용을 포함하지 않았음을 서약한다.
 (4) 논문의 전부 혹은 일부가 학회 논문집에 게재되기 전에 어떠한 형태로 부산되어 문제적 것이 어떠한 경태로 유수되는 것이 어떠한 경태로

(4) 논문의 전부 혹은 일부가 학회 논문집에 개재되기 전에 어떠한 형태로 든 상업적인 목적으로 제작되거나 유포된 경우리도 계재 이후에는 상업적 인 목적을 위하여 발간된 내용의 전부 혹은 일부를 포함하는 새로운 내용 으로 변경하여 제작하거나 유포할 수 없다.

(5) 본 저작권 양도 동의서에 서명하는 것은 저자가 본 저작권 양도 동의 서에 기재된 모든 내용을 읽고, 그 내용을 이해하였으며, 그 내용에 동의하 는 것을 의미한다.

The Charter of Ethics for the KSNVE 한국소음진동공학회 윤리헌장

All members of "The Korean Society for Noise and Vibration Engineering" should perceive that our researches improve the quality of life of human and have a great influence on community. Also we should cherish harmonious and tranquil life, living together with neighbors and nature. Therefore, all members of KSNVE should have higher moral sense and behave honestly and fairly to maintain authority, honor and dignity.

한국소음진동공학회의 모든 회원은 삶의 질을 향상시키며 생활환경에 큰 영향을 주는 것을 인식하고, 우리의 이웃 및 자연과 더불어 사는 조화롭고 정온한 삶을 소중히 여긴다. 이에 모든 회원은 전문가로서의 높은 윤리의식을 가지고 권위, 명예, 위엄을 지킬 수 있도록 정직하고 공정하게 행동한다.

- 1. Authors should use their own knowledge and technology to improve the quality of life of human. 우리는 인류의 삶의 질 향상을 위하여 자신의 지식과 기술을 사용하고 기여하여야 한다.
- 2. Through the activities of KSNVE, authors should contribute to the development of Noise and Vibration Engineering and industry and make efforts to promote the public interest for tranquil life. In addition, they should devote themselves to their field and strive to boost competitiveness and the authority as experts on Noise and Vibration Engineering.

우리는 학회활동을 통하여 정온한 삶을 위해 소음진동공학과 산업 발전에 기여하고 공익 증진에 노력하여 야 한다. 또한 소음진동공학 전문가로서 자기분야에 성실히 봉사하고 경쟁력과 권위를 높이기 위해 노력하 여야 한다.

3. Authors should behave honestly and fairly for education, research and real participation according to their scholastic conscience and ethic.

우리는 교육, 연구 활동 및 결과 발표 그리고 현실 참여에 있어 정직하고 공정하게 처신 하며, 윤리성과 학 자적 양심에 충실하여야 한다.

- Authors should not behave against the purpose of the foundation of the society.
 우리는 학회의 설립목적에 반하고 훼손하는 제반활동을 하여서는 아니 된다.
- 5. Authors must not have presented portions of another's work or data as their own under any circumstances. 우리는 타인의 연구나 주장의 일부분을 자신의 연구나 주장인 것처럼 논문이나 저술에 제시해서는 안 되며, 타인의 연구 및 개발실적을 존중하여야 한다.
- 6. Manuscripts submitted for consideration for publication in KSNVE are not to be used as a platform for commercialism or unjust means.
 - 우리는 연구수행과 관련하여 취득한 정보를 이용하여 부당하거나 부적절한 이득을 추구 하여서는 아니된다.
- 7. Every manuscript received is to be reviewed fairly by reviewer's conscience as a scholar. And Ethics Committee deliberate and decide on all matters related to research misconduct.

논문 및 연구관련 심사와 자문을 하는 회원은 오로지 학문적 양심에 따라 공정하게 심사하여야 한다.

(제정 : 2007. 09. 14, 선포 : 2007.11.15)

Research and Publication Ethics | 연구출판윤리 All members of "The Korean Society for Noise and Vibration Engineering" should perceive that our researches improve the quality of life of human and have a great influence on community. Also we should cherish harmonious and tranquil life, living together with neighbors and nature. Therefore, all members of KSNVE should have higher moral sense and behave honestly and fairly to maintain authority, honor and dignity. | 한국소음진동공학회의 모든 회원은 삶의 질을 향상시키며 생활환경에 큰 영향을 주는 것을 인식하고, 우리의 이웃 및 자연과 더불어 사는 조화롭고 정온한 삶을 소중히 여긴다. 이에 모든 회원 은 전문가로서의 높은 윤리의식을 가지고 권위, 명예, 위엄을 지킬 수 있도록 정직하고 공정하게 행동한다.

Authorship | 저자의 자격

It is recommended for every author including the first and corresponding author that authorship be based on the following 4 criteria : 1. Substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; AND 2. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content; AND 3. Final approval of the version to be published; AND 4. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved. | 논문의 저 자가 되기 위해서는 아래 4개의 기준을 모두 충족하여야 한다. 이 기준은 제1저자, 교신저자를 포함한 모든 저자를 대상으로 한다. 1. 연구 논문의 구상, 설계, 데이터의 획득과 분석, 해석에 실제로 기여 한 자, 2. 논문의 초안을 작성하거나 논문의 주요 내용을 학술적으로 개선한 자, 3. 최종 원고의 출판에 동의한 자, 4. 논문 내용의 정확성 과 진실성에 대한 의문이 있을 경우 대응 책임에 동의한 자

Duplicate Publication of Data | 논문 이중 게재

Papers should contain new results of original research and academic contribution to noise and vibration engineering, which hasn't been submitted or published in any other journals. Also the published paper to this journal should not be submitted or published in any other journals. | 논문집의 내용은 타 잡지에 투고 또는 발표되지 않은 것으로 소음진동공학과 관련하여 독창적이며 학 문적 가치가 높은 것으로 한다. 한국소음진동공학회논문집에 게재된 논문은 이후 타 잡지에 투고 또는 발표를 금한다.

Plagiarism | 표절

Authors must not have presented portions of another's work or data as their own under any circumstances. | 타인의 연구나 주장 의 일부분을 자신의 연구나 주장인 것처럼 논문이나 저술에 제시해 서는 안 되며, 타인의 연구 및 개발실적을 존중하여야 한다.

Policy on Commercialism | 부당 이득

Manuscripts submitted for consideration for publication in KSNVE are not to be used as a platform for commercialism or unjust means. | 연구수행과 관련하여 취득한 정보를 이용하여 부 당하거나 부적절한 이득을 추구하여서는 아니된다.

Review | 심사

Every manuscript received is to be reviewed fairly by reviewer's conscience as a scholar. And Ethics Committee deliberate and decide on all matters related to research misconduct. | 논문 및 연구관련 심사와 자문을 하는 회원은 오로지 학문적 양심에 따라 공정하게 심사하여야 한다. 기타 연구 부정행위에 관련된 모든 사항은 윤리위원회가 심의 및 결정한다.

Peer Review 전문가심사 과정

Every manuscript received is reviewed by the writing guidelines and instructions of KSNVE. With editing team's decision, three peer reviewers are selected. The editorial director should ask a review to selected reviewers in 10 days from application date. The editing team takes responsibility for all general matters on peer review. If two reviewers among the selected do agree to accept the journal, review process ends. | 격월간(隔月刊) 한국소음진동공학회논문집에 게재하고자 별도로 정한 집필요강 및 투고요령에 의해 투고된 논문원고에 대하여 심사한다. 접수된 논문 원고는 편집탑[편집위원장, 편집이사)의 판단하에 적정성을 검토하여 채택불가 또는 논문 심사위원 3인을 선정하고, 해당편집이사는 접수 일로부터 10일 이내에 논문 심사위원에게 서류를 갖추어 논문심사를 의뢰한다. 의견교환 등 심사과정에 대한 전반적인 사항은 편집팀의 책임하에 논문 심사에 3인을 의뢰하여 논문 심사위원 중 2인 이상의 의견을 받아 최종판정 한다.

 The reviewer's name should not be disclosed during review process. If reviewers ask for exception, it might be accepted only under the editing team's decision. | 심사위원의 성명은 대외 적으로 비밀로 함을 원칙으로 한다. 단, 심사위원의 양해가 있을시 편집팀의 판단 하에 예외가 있을 수 있다.

If it is necessary during review process, authors and reviewers can exchange opinions on the intervention of the editing team. | 논문 심사 중 필요하면 편집팀의 중재(仲裁)로 심사위원과 저자가 의견을 교환할 수 있다.

• The period of review is two weeks(urgent papers is within 10 days). If it is over two weeks, reviewers get the first reminder. And if review is not finished over four weeks, another reviewer would be selected. | 심사위원에게 송부된 논문의 심사기간은 2주 이내(긴급논문은 10일 이내)로 하며, 이 기간이 지 나면 심사위원에게 1회 독촉을 한다. 심사의뢰 후 4주가 지나도록 심사결과를 받지 못하면 다른 심사위원으로 변경한다.

 The paper can be cancelled if the revised paper hasn't been returned to the office within one month after the paper was sent to authors for revision. | 내용의 수정 보충 등이 요구된 원고 가 편집팀 또는 학회 사무국에서 발송한 날로부터 1개월 이내에 회송 되지 않을 경우에는 취소할 수 있다.

• If the author of the unaccepted manuscript requires review again, it cannot be accepted. | 최종적으로 채택(探澤) 불가(不可)된 논문의 경우 저자의 재심요구는 원칙적으로 받아들일 수 없다.

Content and Publication Type | 출판유형

An original article, review article and errata/revision/addendum/ retraction can be accepted as a publication type of this journal. |본 논문집의 출판 유형으로는 원저(Original article, Review article), 오류/정정/추가/게재철회(Errata/Revision/Addendum/Retraction)와 같은 종류가 있으며 이에 한해 출판을 허가하도록 한다.

Fee for Page Charge | 게재회비

If the manuscript is accepted for publication, authors of the paper should provide the paper processing fee(50,000 Won) and publication fee(General papers : basic 6 pages 100,000 Won, for extra page: 20,000 Won/page, Funding papers : basic 6 pages 150,000 Won, for extra page: 30,000 Won/page, Urgent papers : basic 6 pages 200,000 Won, for extra page: 40,000 Won/page, Conference papers : free). I 논문원고의 저자는 논문게 재 회비 규정에 따라 소정의 논문관리회비(편당 5만원) 및 게재회비 (일반논문 : 기본6면 10만원/초과면당 2만원, 연구비 지원 : 기본 6면 15만원/초과면당 4만원, 학술대회발표논문 무료)를 납부해야 한다.



사당 법의 The Korean Saciety for Noise and Vibration Engineering http://www.ksnve.or.kr