

한국소음진동공학회논문집

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

ISSN 1598-2785(Print)
ISSN 2287-5476(Online)

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 title : 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 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.

창간 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.kr>이며 논문집의 전자화된 논문 역시 같은 주소를 통해 일반에게 자유롭게 별도의 구독비용 없이 제공되고 있다.

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.

Volume 30 Number 4

August 2020

Published by The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Published on August 20, 2020(Bi-monthly)

Publisher Moon Kyu Kwak (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.

© 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.

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

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

Prof.
Jong Kwan Ryu
Department of Architecture,
Chonnam Univ.
jkryu@jnu.ac.kr
Tel : +82-62-530-163

Prof.
Jung Woo Sohn
Department of Mechanical
Design Engineering,
Kumoh National Institute of Tech.
jwsohn@kumoh.ac.kr
Tel : +82-54-478-7378

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, KAIST
wonju.jeon@kaist.ac.kr
Tel : +82-42-350-3219

Field Leaders

Prof.
Chan Jung Kim
(Pukyong National Univ.)

Prof.
Jae Eun Kim
(Catholic Univ. of Daegu)

Prof.
Cheol Ung Cheong
(Pusan National Univ.)

Prof.
Jae Young Kang
(Inha Univ.)

Dr.
Deuk Sung Kim
(NVT)

Prof.
Jin Woo Lee
(Ajou Univ.)

Dr.
Hong Seok Yang
(LHI)

Dr.
Young Cheol Huh
(KIMM)

Board Members

Byung Chang Jung
(KIMM)

Byung Kwon Lee
(KEI)

Chang Yull Lee
(Chosun Univ.)

Do Young Ko
(KHNP)

Eun Rim Baek
(Seismic Simulation Test Center)

Han Shin Seol
(KRISO)

Hyeong Ill Lee
(Kyungpook National Univ.)

Hyo In Ko
(KRRI)

Hyu Sang Kwon
(KRISS)

Hyun Ung Oh
(Chosun Univ.)

Hyun Woo Park
(Dong-A Univ.)

Hyun Wook Lee
(KRRI)

In Hyung Yang
(LG Electronics)

In Soo Son
(Dong-eui Univ.)

Jae Sung Bae
(Korea Aerospace Univ.)

Jae Won Lee
(NIER)

Je Heon Han
(KPU)

Jeong Ho Jeong
(FILK)

Ji Woo Yoo
(Hyundai Motor Group)

Jin Gyun Kim
(Kyung Hee Univ.)

Jin You
(Samsung Electronics)

Jong Hak Lee
(LG Nex1)

Jong Jae Lee
(Sejong Univ.)

Jong Seok Oh
(Kongju National Univ.)

Joo Hwan Oh
(UNIST)

Jung Bin Im
(Daewoo E&C)

Jung Soo Ryue
(Ulsan Univ.)

Kuk Su Kim
(DSME)

Kwan Woo Hong
(Samsung Electronics)

Kyoung Woo Kim
(KICT)

Kyu Sik Kim
(KATECH)

Kyung Taek Lee
(KNUE)

Lae Hyong Kang
(Chonbuk National Univ.)

Nam Cheol Kang
(Kyungpook National Univ.)

Pyoung Jik Lee
(Liverpool Univ.)

Pyung Sik Ma
(KIMM)

Sang Jin Oh
(Jeonnam Provincial College)

Se Jin Ahn
(Uiduk Univ.)

Seon Jun Jang
(Hoseo Univ.)

Seung Chul Lee
(POSTECH)

Seung Yup Yoo
(LG Electronics)

Soo Hong Jeon
(DTaQ)

Sung Chan Lee
(Yongsan Univ.)

Tae Ho Park
(UOS)

Won Hyun Kim
(Hyundai Heavy Industries)

Won Seok Yang
(KNUT)

Yeon Jun Oh
(KOMERI)

Yong Hee Kim
(KCL)

Yong Hwa Park
(KAIST)

Young Soo Seo
(ADD)

Yun Ho Seo
(KIMM)

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

한국소음진동공학회논문집

2020년 8월

제 30 권 제 4 호 통권 255호

목 차

- 이중 선형 감쇠특성을 갖는 새로운 형태의
MR 댐퍼 설계 및 해석 김보규 · 윤달성 · 김기우 · 최승복 ... 321
- 압축센싱 기법을 이용한 날개 끝 보텍스 캐비테이션 발생위치
및 강도 추정 연구 김용현 · 설한신 · 이정훈 · 정홍석 ... 329
- 기존 표준 충격원의 개선 필요성 및 신 연발성 충격원 개발 방향에 대한
전문가 대상 설문조사 김수홍 · 송민정 · 류종관 ... 340
- 중량충격음 레벨의 주관적 인지 변화에 대한 연구:
동일한 단일수치 평가량을 갖는 충격음을 대상으로 조현민 · 김신태 · 김명준 ... 348
- 호모토피법을 이용한 압축센싱 기반 음원위치추정 알고리즘의 개선 김용현 · 이정훈 ... 357
- 차량 프런트 도어 윈도우의 작동 소음 저감 권성민 · 심우정 · 윤신 · 최재홍 · 박강일
이승철 · 정진태 ... 366
- 통과소음도를 이용한 차종 분류 기계학습 모형 이재관 · 김보경 · 노유진 · 장서일 ... 373
- 북한산국립공원 탐방로 소리등급도 제작 연구 유지수 · 장서일 · 기경석 ... 380
- 주행측정을 이용한 온 마운트 장비 추적 차량의
진동 프로파일 개발 서성원 · 이은호 · 이승한 · 광도혁 · 김창남 · 박노철 ... 389
- 차량용 초음파 센서에서 파동유도관에 의한 최소 탐지거리 단축 임성구 · 안재혁 · 김진오 ... 396
- 함정탐재장비용 대용량 마운트의 성능검증시험방안 문석준 · 김의영 · 김홍섭 · 박진우 · 김원 ... 406

C · O · N · T · E · N · T · S

- Design and Analysis of a Novel MR Damper
with Bilinear Damping Characteristics Kim, B.-G., Yoon, D. S., Kim, G.-W.
and Choi, B. K. ... 321
- Localization and Source-strength Estimation of Tip Vortex Cavitation Noise
Using Compressive Sensing Kim, Y.-H., Seol, H. S., Lee, J.-H.
and Jeong, H. S. ... 329
- 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 Kim, S. H.,
Song, M. J. and Ryu, J. K. ... 340
- Changes in Subjective Perceptions of Heavyweight Impact Sound Levels
with the Same Single-number Quantity of Floor Impact Sound Insulation Cho, H.-M.,
Kim, S.-T. and Kim, M.-J. ... 348
- Improvement of Compressive-sensing Based Sound Source Localization
by Using Homotopy Method Kim, Y.-H. and Lee, J.-H. ... 357
- Reduction in Operating Noise in Front-door Window of a Vehicle Kwon, S. M.,
Sim, W. J., Yun, S., Choi, J. H., Park, K.-I., Lee, S. C. and Chung, J. T. ... 366
- Machine Learning Model for Classification of Vehicles
Using Pass-by Noise Level Lee, J. K., Kim, B. K., Noh, Y. J. and Chang, S. I. ... 373
- Sound Grade Classification of Bukhansan National Park Trails Yoo, J. S.,
Chang, S. I. and Ki, K. S. ... 380
- Development of Vibration Profiles of Tracked Vehicle
with On-mount Equipment Using Driving Characteristics Suh, S. W., Lee, E. H.,
Lee, S.-H., Kwak, D.-H., Kim, C.-N. and Park, N.-C. ... 389
- Shortening the Minimum Detectable Distance in an Ultrasonic Sensor
for Automobiles by a Waveguide Lim, S. G., An, J. H. and Kim, J. O. ... 396
- Performance Test Specification for Large-capacity Mounts
of Naval Shipboard Machinery Moon, S.-J., Kim, E.-Y., Kim, H.-S., Park, J.-W.
and Kim, W. ... 406

이중 선형 감쇠특성을 갖는 새로운 형태의 MR 댐퍼 설계 및 해석

Design and Analysis of a Novel MR Damper with Bilinear Damping Characteristics

김보규*·윤달성*·김기우†·최승복**

Bo-Gyu Kim*, Dal Seong Yoon*, Gi-Woo Kim†, and Seung-Bok Choi**

(Received February 3, 2020 ; Revised March 24, 2020 ; Accepted July 6, 2020)

Key Words : Magnetorheological(MR) Fluid(자기유변유체), MR Damper(MR 댐퍼), Pole Shape Function(극 형상 함수), Bilinear Damping(이중 선형 댐핑), Damping Force(감쇠력)

ABSTRACT

In this study, we propose a novel MR damper with bilinear damping characteristics realized through open-loop control alone. The bilinear damping characteristics are a high damping coefficient at low stroke speed and a low damping coefficient at high stroke speed. This is possible since the damping coefficient is drastically changed by the slope breaking point. The proposed MR damper consists of a main orifice and a bypass orifice, which are activated independently. Unlike conventional MR dampers, the proposed MR damper retains a specific pole shape in the main orifice. Therefore, the effective area of the orifice is controllable through the manipulation of the magnetic field to the main orifice, resulting in control of the damping coefficient. In addition, by controlling the opening or closing of the bypass orifice, drastic changes in the damping coefficient are realized. For validation, mathematical modeling of the proposed MR damper is performed considering the pole shape function and slope breaking point. Subsequently, the damping force controllability with bilinear damping characteristics is analyzed as a function of magnetic field intensity.

1. 서론

자동차 서스펜션 시스템의 주 역할은 차량의 무게를 지탱만 아니라, 도로 주행 시 바닥으로부터 전달되는 진동을 흡수하여 주행 성능을 향상시키는 것이다. 일반적으로 서스펜션 시스템은 탄성 요소인 스프링과 감쇠 요소인 댐퍼로 이루어진다. 이 때, 댐퍼는 차량의

주행 성능인 승차감과 조종 안정성에 결정적인 역할을 한다. 댐퍼의 종류로는 수동형 타입, 반능동형 타입, 그리고 능동형 타입이 있다. 수동형 댐퍼의 경우, 유체의 점성에 의해 발생하는 감쇠력을 이용하여 차체의 진동을 흡수한다. 주행 성능을 위하여 시행착오를 통해 수동형 댐퍼의 감쇠특성을 최적화하며, 시험적으로 얻은 최적의 감쇠 특성은 이중 선형 감쇠 특성을 가진다⁽¹⁾. 이 때, Fig. 1에 나타나 있듯이 이중 선형 감쇠

† Corresponding Authors; Member, Mechanical Engineering, Inha University, Professor
E-mail: gwkim@inha.ac.kr

* Mechanical Engineering of Inha University, Student

** Fellow Member, Mechanical Engineering, Inha University, Professor

A part of this paper was presented at the KSNVE 2019 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jae Young Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

특성은 낮은 스트로크(stroke) 속도에서 높은 감쇠계수, 높은 스트로크 속도에서 낮은 감쇠계수를 갖는 감쇠 특성을 뜻한다. 그러나 수동형 댐퍼는 주행 환경에 따라 성능이 급격하게 감소하며, 잘 알려진 승차감과 조종 안정성 간의 트레이드 오프(trade-off) 관계를 충족시키는데 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 능동형 댐퍼와 반능동형 댐퍼가 연구되었다. 하지만 능동형 댐퍼의 경우 추가적인 하드웨어 및 복잡한 제어 로직이 요구되어 보편화에 어려움이 있다. 이러한 이유로 스마트 재료 중에 하나인 ER(electrorheological) 또는 MR(magnetorheological) 유체를 이용한 반 능동형 댐퍼가 많이 연구되었다⁽²⁻⁶⁾. 하지만, 일반적인 MR 댐퍼의 경우 불연속적이고 비선형적인 감쇠 특성을 가지며 스카이훅 제어, 피지 신경망 제어 등 피드백 기반의 제어 로직이 요구되는 한계가 있었다.

이 연구에서는 오직 개루프 제어만을 통해 최적의 감쇠 특성 구현이 가능한 이중 선형 감쇠 특성을 갖는 극 형상 함수 기반의 새로운 형태의 MR 댐퍼를 제안한다. 제안된 MR 댐퍼는 이중 선형 감쇠 특성을 가지므로써, 감쇠 특성의 불연속성과 비선형성을 보완한다. 또한, 구조적 특이성(극 형상)으로 인해 오직 개루프 제어만으로 이중 선형 감쇠 특성을 구현할 수 있다. 이어, 제안된 MR 댐퍼의 특징인 극 형상 함수를 고려하여 주 오리피스와 바이패스(bypass) 오리피스에 의해 발생하는 감쇠력을 수학적으로 모델링하였다. 최종적으로 감쇠력 해석을 통하여 제안된 댐퍼의 자기장 세기에 따른 이중 선형감쇠 특성을 분석하였다.

어 부분의 형상을 나타낸다. MR 댐퍼는 피스톤 로드, 피스톤, 하우징 그리고 플로팅(floating) 피스톤으로 구성된다. 이는 일반적인 단일 튜브 타입 댐퍼로써 상부 챔버, 하부 챔버 그리고 공기 챔버로 이루어진다. 코어 부분은 감쇠계수 변화를 위한 환 형상의 주 오리피스와 기울기 변곡점 변화를 위한 직사각형의 세 개의 바이패스 오리피스를 가진다. MR 유체의 유동은 크게 주 오리피스 부분과 바이패스 부분으로 나누고, 각각은 제어를 위한 독립적인 코일을 가진다. 기존의 MR 댐퍼와 달리, 주 오리피스의 경우는 MR 효과가 발생하는 극 부분의 형상을 자기장 형성이 용이한 상자성체와 자기장 형성을 억제하는 상자성체를 혼합하여 설계하였다. 이로 인해, 유효 극은 원주 방향을 따라 다른 길이를 가지게 된다. 바이패스 오리피스의 경우는 일반적인 정사각형 형태의 MR 밸브 형상이며, 세 개의 바이패스 오리피스는 형상이 같다. 주 오리피스 부분과 바이패스 오리피스 부분의 독립적인 제어를 위해 상자성체를 이용하였으며, 두 제어부의 자기장 경로가 분리되도록 자기 회로를 설계하였다.

2. MR 댐퍼 구조 및 작동원리

2.1 댐퍼 형상

Fig. 2는 제안된 MR 댐퍼의 전체적인 개략도와 코

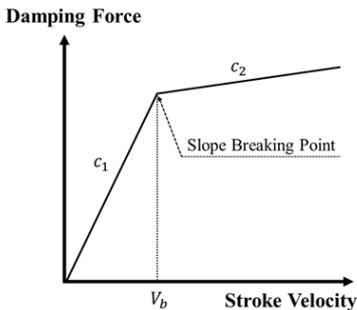
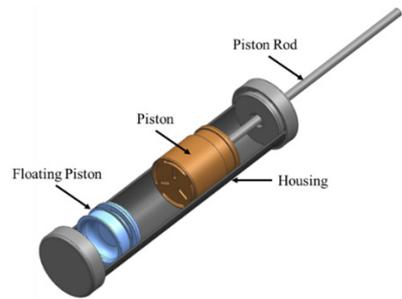
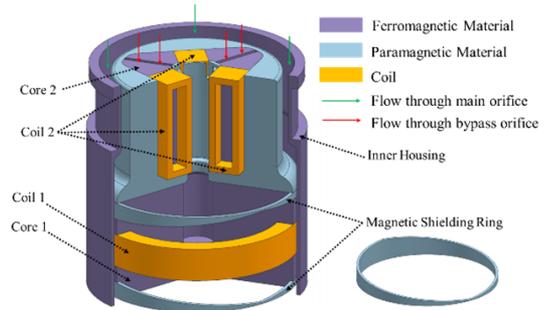


Fig. 1 Bilinear damping characteristic



(a) Overall schematic



(b) Core part

Fig. 2 Configuration of MR damper

의 압력 차에 의해 생성된다. 댐퍼 스트로크로 인해 좁은 유로를 통해 MR 유체가 흐르게 되며, 유체 점성과 자기장 인가에 따른 유체 항복 응력에 의한 압력 강하가 발생한다. 일반적인 MR 댐퍼의 경우에 자기장 인가 시 블락업(block-up)현상이 발생된다. 이 현상은 자기장에 의해 형성된 MR 유체의 철 입자 사슬이 유체의 유동을 막아 일어나는 현상으로, 피스톤의 왕복 운동 시 불연속적인 감쇠 특성을 유발하고 이는 댐퍼가 사용되는 시스템에 부정적인 영향을 끼치게 된다. 제안된 댐퍼의 경우 독립으로 제어되는 주 오리피스와 바이패스 오리피스를 가지므로, 두 오리피스에서 블락업 현상이 각각 일어날 수 있다. 하지만, 이중선형 감쇠특성을 가지게 되어, 피스톤 왕복 운동 시 연속적인 감쇠특성을 띄게 된다. 이중선형 감쇠특성의 경우 낮은 스트로크 속도에서의 높은 감쇠계수와 특정 스트로크 속도에서의 급격한 감쇠계수 변화를 특징으로 한다.

(1) 감쇠계수 변화

낮은 스트로크 속도 구간에서의 감쇠계수 변화는 주 오리피스의 제어를 통해 구현된다. 주 오리피스의 특정 극 형상으로 인해, 자기장 인가에 따라 주 오리피스의 부분적인 블락업이 발생한다. 이를 통해, 주 오리피스의 유효 면적을 조절할 수 있고 결과적으로 감

쇠계수 변화를 구현할 수 있다. Fig. 3은 자기장 세기에 따른 주 오리피스의 유량 분포를 나타낸다. 자기장 세기가 증가함에 따라 극 길이가 긴 부분에서부터 블락업 현상이 일어나며 부분적으로 유체가 흐름을 확인할 수 있다.

(2) 기울기 변곡점 변화

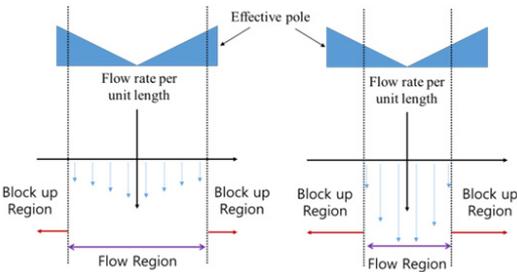
특정 스트로크 속도에서의 급격하게 감쇠계수가 변화하는 지점(기울기 변곡점)의 변화는 바이패스 오리피스의 개폐 제어를 통해 구현된다. 즉, 바이패스 오리피스가 열리는 시점을 기울기 변곡점으로 정의한다. 저속 구간에서는 바이패스 오리피스 부분에 자기장을 인가하여 블락업 현상을 일으켜 주 오리피스만을 통해 유체가 흐르게 한다. 기울기 변곡점 이후에서는 주 오리피스 뿐만 아니라 바이패스 오리피스로도 유체가 흐르게 되며 전체적인 오리피스 유효면적이 넓어져 감쇠계수가 급격히 낮아지게 된다.

3. 수학적 모델링

스트로크 속도와 감쇠력 사이의 관계를 도출하기 위해, 각 오리피스에 흐르는 MR 유체의 거동을 분석하였다. 일반적으로 MR 유체는 빙햄(Bingham) 유체로 모델링 된다⁽⁷⁾. 이 연구에서는 평판 유동 모델을 이용하여 유체 흐름 방향의 압력 강하만을 고려한 1차원 해석을 하였다⁽⁸⁻¹¹⁾.

3.1 주 오리피스에서의 유체 흐름

Fig. 4는 평판 유동 모델의 개략도와 좌표계를 나타낸다. 유체의 유동을 완전 발달 및 층류 유동으로 가정하였으며, 오리피스 내의 유동을 자기장의 영향이 없는 뉴토니안 유체 유동 구간과 자기장의 영향이 있는 빙햄 유체 유동 구간으로 나누어 해석하였다. Fig. 5는



(a) In low magnetic field (b) In high magnetic field
 Fig. 3 Flow rate per unit length along the circumferential direction

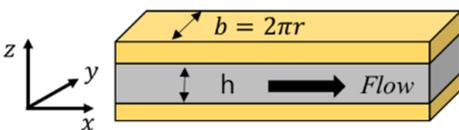


Fig. 4 Schematic configuration of parallel plate model and a coordinate system

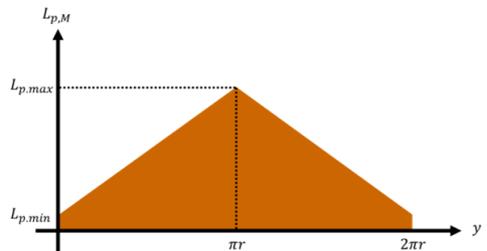


Fig. 5 Pole shape function

제한된 댐퍼의 극 형상을 나타낸다. 극 형상을 수학적 방정식으로 나타낸 것을 극 형상 함수라 정의하고, 이 연구에서의 극 형상 함수는 식 (1)과 같다.

$$L_{P,M}(y) = \begin{cases} \frac{L_{p,max} - L_{p,min}}{\pi r} y + L_{p,min}, & (0 \leq y \leq \pi r) \\ -\frac{L_{p,max} - L_{p,min}}{\pi r} y + (2L_{p,max} - L_{p,min}), & (\pi r < y \leq 2\pi r). \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $L_{p,max}$ 는 유효 극의 최대 길이, $L_{p,min}$ 은 유효 극의 최소 길이, r 은 오리피스의 평균 반경이다. 이 때, 단위 단면에 대한 유효 극의 길이는 제한된 댐퍼의 특징인 극 형상에 따라 결정된다. Fig. 6은 주 오리피스의 단위 단면에서의 MR 유체의 거동을 나타내며, 주 오리피스에서의 압력강하 $\Delta P_{t,M}$ 은 식 (2)와 같다.

$$\Delta P_{t,M} = p'_{N,M}(L_{t,M} - 2L_{P,M}) + 2p'_{y,M}L_{P,M} \quad (2)$$

여기서 $p'_{N,M}$ 은 뉴토니안 유체 유동에 의한 압력 강하 구배, $p'_{y,M}$ 는 빙햄 유체 유동에 의한 압력 강하 구배, $L_{t,M}$ 는 오리피스의 총 길이, $L_{P,M}$ 는 유효 극의 길이이다. 이 때, 문제를 간단히 하고 파라미터화 하기 위하여, 식 (3)과 같은 무차원수를 사용하였다.

$$N_M \triangleq \frac{p'_{N,M}}{p'_{C,M}}, \quad p'_{N,M} = \frac{12\eta}{h_M^3} q, \quad p'_{C,M} = \frac{2\tau_{y,M}}{h_M}, \quad (3)$$

$$L_M = \frac{L_{P,M}}{L_{t,M}}, \quad P_{t,M} = \frac{\Delta P_{t,M}}{L_{t,M} p'_{C,M}}$$

여기서 η 는 MR 유체의 점성 계수, q 는 단위 길이에 따른 유량, h_M 는 주 오리피스의 간극 크기, $\tau_{y,M}$ 는 주 오리피스에서의 자기장에 따른 MR 유체의 항복응력, $p'_{C,M}$ 는 빙햄 유체의 플러그(plug) 구간에서 발생하는

압력강하 구배, L_M 은 유효 극의 길이에 대한 무차원수, $P_{t,M}$ 은 주 오리피스에서의 압력 강하 구배에 대한 무차원수이다. 이 때, 빙햄 유체 유동에 의한 압력강하 구배 $p'_{y,M}$ 는 수치적 근사해를 사용하였다⁽¹²⁾. 식 (2)를 무차원수를 이용하여 나타내면 식 (4)와 같다.

$$P_{t,M} = N_M(1 - 2L_M) + 2\left(N_M + 1.035 + \frac{N_M}{2N_M + 0.4}\right)L_M \quad (4)$$

위 식의 해는 다음과 같다.

$$N_M = \frac{-(0.4 - 2P_{t,M} + 6.14L_M)}{4} \pm \frac{\sqrt{(0.4 - 2P_{t,M} + 6.14L_M)^2 + 3.2(P_{t,M} - 2.07)L_M}}{4} \quad (5)$$

주 오리피스를 통한 전체 유량 Q_M 은 유체가 흐르는 구간에 대하여 단위 길이에 대한 유량을 적분하여 얻을 수 있다. 블락업이 시작되는 지점 (y_b)은 전체 압력 강하가 빙햄유체 유동 구간에서의 압력강하와 같아 지는 지점이며, 따라서 블락업을 고려하였을 때의 전체 유량은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$Q_M = \begin{cases} \frac{\pi r h_M^2 \tau_{y,M} L_{t,M}}{3\eta(L_{p,max} - L_{p,min})} \int_{\frac{L_{t,M}}{L_{t,M}}}^{\frac{L_b}{L_{t,M}}} N_M(L_M) dL_M, & (L_{p,min} \leq L_b < L_{p,max}) \\ \frac{\pi r h_M^2 \tau_{y,M} L_{t,M}}{3\eta(L_{p,max} - L_{p,min})} \int_{\frac{L_{t,M}}{L_{t,M}}}^{\frac{L_{p,max}}{L_{t,M}}} N_M(L_M) dL_M, & (L_b = L_{p,max}) \end{cases} \quad (6)$$

여기서 L_b 는 블락업이 발생하는 단면에서의 유효 극의 길이이다

3.2 바이패스에서의 유체흐름

제한된 댐퍼에는 세 개의 동일한 직사각형의 바이패스 오리피스가 있으며, 일반적인 유동모드 형태로 작동한다. 다시 말해, 바이패스 오리피스에서의 MR 유체의 거동은 오직 빙햄 유체 유동으로 모델링된다. 바이패스 오리피스에서의 유량 Q_B 과 압력 강하 P_B 의 관계는 식 (7)과 같다⁽¹²⁾.

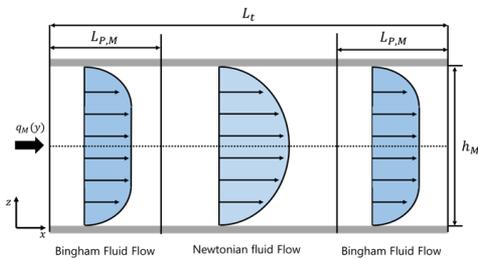


Fig. 6 Behaviors of MR fluid in main orifice

$$\Delta P_B = \frac{12\eta}{b_B h_B^3} Q_B L_{P,B} + \left(2.07 + \frac{12\eta Q_B}{12\eta Q_B + 0.4h_B^2 \tau_{y,B}} \right) \frac{\tau_{y,B}}{h_B} L_{P,B} \quad (7)$$

여기서 b_B 는 바이패스 오리피스의 너비, h_B 는 바이패스 오리피스의 간극 크기, $L_{P,B}$ 는 바이패스 오리피스의 유효 극의 길이, $\tau_{y,B}$ 는 바이패스 오리피스에서의 자기장에 따른 MR 유체의 항복응력이다.

3.3 두 오리피스를 통한 전체 유체흐름

지금까지 각 오리피스를 통한 유체의 거동을 독립적으로 분석하였다. 하지만, 주 오리피스와 바이패스 오리피스에 인가되는 자기장의 세기에 따라 여러 형태의 유동 모드가 발생한다. 유동 모드는 세 개의 임계 압력 강하 값에 따라 결정된다. 임계 압력 강하는 오리피스의 개폐를 판단하는 기준이 되며, 식 (4)와 식 (7)에서 유량이 0인 경우로써 오직 MR 유체의 항복응력에 의해 발생하는 압력 강하를 의미한다.

$$\Delta P_{c,M} = 2.07 \cdot \frac{2\tau_{y,M} x_m}{h_M} \quad (8)$$

$$\Delta P_{c,M2} = 2.07 \cdot \frac{2\tau_{y,M} L_{p,max}}{h_M} \quad (9)$$

$$\Delta P_{c,B} = 2.07 \cdot \frac{\tau_{y,B} L_{P,B}}{h_B} \quad (10)$$

여기서 $\Delta P_{c,M}$ 는 주 오리피스가 부분적으로 열리게 되는 압력 강하, $\Delta P_{c,M2}$ 는 주 오리피스가 완전히 열리게 되는 압력 강하, $\Delta P_{c,B}$ 는 바이패스 오리피스가 열리게 되는 압력강하이다. Table 1은 임계 압력 강하

Table 1 Several types of flow mode

	Main orifice	Bypass orifice	Conditions
Mode 1-1	Partially open	Close	$\Delta P_{c,M1} < \Delta P < \Delta P_{c,B}$
Mode 1-2	Fully open	Close	$\Delta P_{c,M2} < \Delta P < \Delta P_{c,B}$
Mode 2-1	Partially open	Open	$\Delta P_{c,B}, \Delta P_{c,M1} < \Delta P < \Delta P_{c,M2}$
Mode 2-2	Fully open	Open	$\Delta P_{c,B}, \Delta P_{c,M2} < \Delta P$
Mode 3	Close	Open	$\Delta P_{c,B} < \Delta P < \Delta P_{c,M1}$
Mode 4	Close	Close	$\Delta P < \Delta P_{c,M1}, \Delta P_{c,B}$

값에 따른 유동 모드들을 나타낸다. 유체의 질량 보존에 의거한 연속방정식을 토대로 총 유량 Q_{total} 과 총 압력강하 ΔP_{total} 사이의 구성방정식은 식 (11)과 식 (12)와 같다.

$$Q_{total} = Q_M + Q_B \quad (11)$$

$$\Delta P_{total} = \Delta P_M = \Delta P_B \quad (12)$$

4. 감쇠력 해석

MR 댐퍼의 감쇠력은 상·하부 챔버의 압력 차이로 생성된다. 댐퍼가 준 정적 거동을 하고 기계적 마찰력을 무시한다고 가정할 때, MR 댐퍼가 받는 힘 F_{total} 은 식 (13)과 식 (14)와 같다.

$$F_{total} = P_1 A_p - P_2 (A_p - A_r) = \Delta P A_p + P_2 A_r \quad (13)$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P, \quad P_2 = P_a + \Delta P_a \cong P_a \quad (14)$$

여기서 P_1 은 상부 챔버의 압력, P_2 는 하부 챔버의 압력, A_p 는 피스톤 면적, A_r 은 피스톤 로드 면적, P_a 는 공기 챔버의 압력이다. MR 댐퍼가 받는 힘 F_{total} 은 감쇠력 F_d 과 공기 스프링력 F_{air} 으로 이루어진다.

$$F_{total} = F_d + F_{air} \quad (15)$$

$$F_d = \Delta P A_p, \quad F_{air} = P_a A_r$$

Table 2 Design parameters of MR damper

Parameter	Symbol	Value
Piston area	A_p	$12.5663 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Rod area	A_r	$7.8540 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Total orifice length of the main orifice	$L_{t,M}$	40 mm
Maximum effective pole length of the main orifice	$L_{p,max}$	10 mm
Minimum effective pole length of the main orifice	$L_{p,min}$	0.1 mm
Gap size of the main orifice	h_M	0.7 mm
Effective pole length of the bypass orifice	$L_{p,B}$	20 mm
Width of the bypass orifice	b_B	3×5 mm
Gap size of the bypass orifice	h_B	0.6 mm

해석에 사용된 설계 파라미터는 Table 2와 같다. Fig. 7은 코어부의 자기장 해석 결과를 나타낸다. 자기장 해석에 따르면, 두 제어부를 독립적으로 제어할 수 있으며, 주 오리피스 제어부에 전류 인가 시 주 오리피스의 극 길이에 상관없이 유효 극에는 일정한 자기장이 형성됨을 알 수 있다.

4.1 감쇠계수 제어

감쇠계수 변화는 주 오리피스 제어부에 전류를 인가하여 유효 면적을 조절함으로써 구현할 수 있다. Fig. 8은 주 오리피스의 제어부에 인가 전류 I_M 을 1 A 간격으로 증가시켰을 때의 감쇠특성을 나타내며, 이때, 바이패스 제어부에 인가된 전류 I_B 는 일정하다. I_M 이 증가할수록 기울기 변곡점 이전의 기울기가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 감쇠특성은 디그레시브(degressive) 감쇠 형태를 보임을 알 수 있다. 이때, 선형 감쇠 특성을 평가하기 위하여, 등가 감쇠계수를 기울기 변곡점까지의 선형 기울기라고 정의하였다. 기

울기 변곡점 이전 구간에서의 등가 감쇠계수는 I_B 가 0.75A로 일정하고 I_M 가 0 A, 1 A, 2 A, 그리고 3 A 일 때, 각각 1600 N·s/m, 4232 N·s/m, 8701 N·s/m, 12 846 N·s/m이다. 넓은 범위의 감쇠계수 구현이 가능하지만, 높은 감쇠계수를 구현할수록 구현 가능한 스트로크 속도범위가 감소하는 것을 알 수 있다.

4.2 기울기 변곡점 제어

기울기 변곡점 변화는 바이패스 오리피스 제어부에 전류를 제어하여 유로 개폐를 조절함으로써 구현할 수 있다. Fig. 9은 바이패스 오리피스의 제어부에 인가 전류 I_B 를 0.5 A 간격으로 증가시켰을 때의 감쇠특성을 나타내며, 이 때의 I_M 은 3 A로 일정하다. I_B 가 0.5 A, 1 A, 1.5 A, 그리고 2 A일 때, 각각의 기울기 변곡점에서의 감쇠력 크기는 863 N, 1722 N, 2486 N, 3100 N이다. 전류가 증가함에 따라 기울기 변곡점이 상승함을 알 수 있고, 이를 통해 감쇠계수 제어를 통해 결정된 저속에서의 높은 감쇠계수의 구현 스트로크 구간을 조절할 수 있음을 알 수 있다.

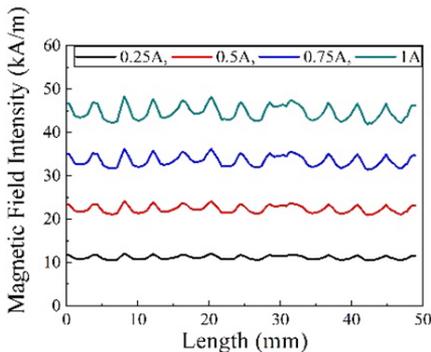
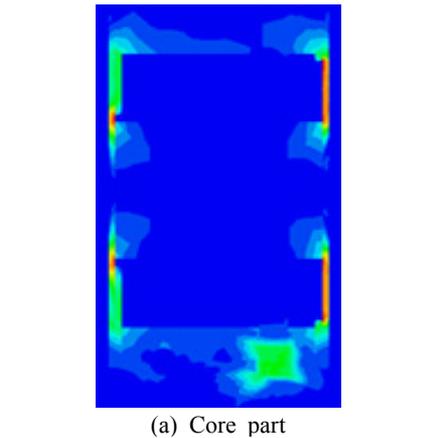


Fig. 7 Magnetic field analysis

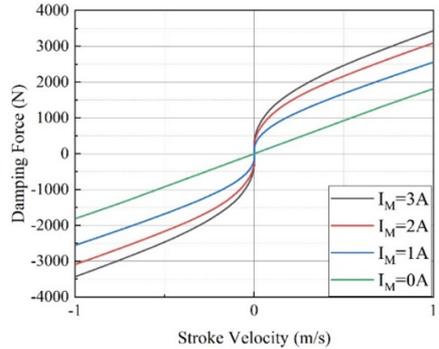


Fig. 8 Damping coefficient control

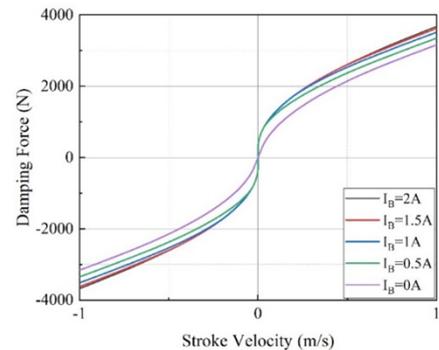


Fig. 9 Slope breaking point control

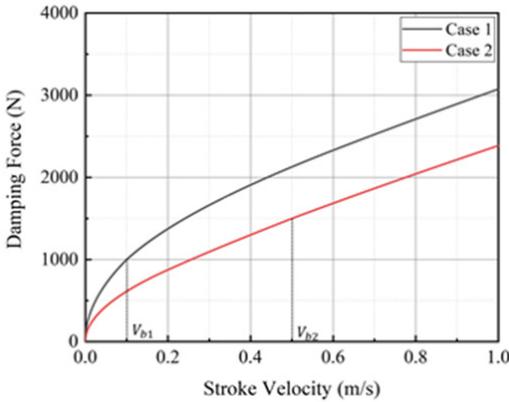


Fig. 10 Desired damping characteristic

Table 3 Required input current I_M and I_B for implementing some desired c_1 and V_b

Type	Parameter			
	c_1 (N·s/m)	V_b (s/m)	I_M (A)	I_B (A)
Case 1	10 000	0.1	2.42	0.58
Case 2	3000	0.5	0.78	0.87

4.3 요구 감쇠 특성 제어

앞에서의 감쇠계수 제어와 기울기 변곡점 제어를 기반으로 제안된 MR 댐퍼는 제어 영역 내의 어떠한 요구 이중 선형 감쇠 특성도 개루프 제어만을 통해 구현 가능하다. Fig. 1의 이중 선형 감쇠 특성에서 c_1 은 기울기 변곡점 이전의 높은 감쇠계수, c_2 는 기울기 변곡점 이후의 낮은 감쇠계수, 그리고 V_b 는 기울기 변곡점에서의 스트로크 속도를 나타낸다. 이 연구에서는 임의의 요구 감쇠특성을 정하여 주 오리피스와 바이패스 오리피스 제어부의 개루프 제어만을 통해 요구하는 댐핑력을 구현하였다. Table 3은 두 경우의 요구 감쇠 특성 파라미터 값 c_1 , V_b 과 요구 인가 전류 I_M , I_B 를 나타낸다. Case 1의 경우, c_1 과 V_{b1} 가 각각 10 000 N·s/m, 0.1 s/m이며, 요구 인가 전류 I_M 과 I_B 가 각각 2.42 A, 0.58 A이다. Case 2의 경우, c_1 과 V_{b2} 가 각각 3000 N·s/m, 0.5 s/m이며, 요구 인가 전류 I_M 과 I_B 가 각각 0.78 A, 0.87 A이다. 제안된 MR 댐퍼를 이용하여 요구 감쇠 특성을 구현한 결과는 Fig. 10과 같다. 이를 통해, 제안된 MR 댐퍼는 오직 개루프 제어만으로 요구 이중 감쇠특성을 구현함을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구는 이중 선형 감쇠 특성을 갖는 극형상 함수 기반의 새로운 형태의 MR 댐퍼를 제안한다. 제안된 댐퍼의 특징인 극형상 함수를 고려하여, 수학적 모델링을 수행하였다. 이어 감쇠력 해석이 진행되었다. 해석 결과에 따르면, 이중 선형 감쇠 특성을 결정짓는 감쇠계수와 기울기 변곡점을 오직 개루프 제어를 통해 구현 가능함을 확인하였다. 감쇠계수의 경우 주 오리피스 제어부의 인가 전류를 증가함에 따라 증가 감쇠계수가 1600 N·s/m에서 12 846 N·s/m까지 변화하였다. 또, 기울기 변곡점 제어의 경우 바이패스 오리피스 제어부의 인가 전류를 증가함에 따라 기울기 변곡점에서의 감쇠력 크기가 863 N에서 3100 N까지 증가하였다. 제안된 MR 댐퍼는 구조적 특이성(극형상)으로 인해 이중 선형 감쇠 특성을 가짐으로써 기존의 MR 댐퍼의 불연속적인 감쇠력을 보완하였다. 또, 주 오리피스와 바이패스 오리피스를 각각 독립적으로 제어하여 감쇠계수 및 기울기 변곡점을 조절함으로써 제어 영역 내의 어떠한 이중 선형 감쇠 특성도 구현 가능함을 확인하였다.

References

- (1) Fukushima, N., Hidaka, K. and Iwata, K., 1983, Optimum Characteristics of Automotive Shock Absorbers under Various Driving Conditions and Road Surfaces, International Journal of Vehicle Design, Vol. 4, No. 5, pp. 463~472.
- (2) Kim, W. H., Hwang, Y. H., Park, J. H., Shin, C. S. and Choi, S. B., 2017, Performance Evaluation of a Quarter Car Suspension System Installed with MR Damper Featuring Bypass Flow Holes in Piston, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27, No. 1, pp. 65~71.
- (3) Yao, G. Z., Yap, F. F., Chen, G., Li, W. and Yeo, S. H., 2002, MR Damper and Its Application for Semi-active Control of Vehicle Suspension System, Mechatronics, Vol. 12, No. 7, pp. 963~973.
- (4) Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2009, Optimal Design of MR Shock Absorber and Application to Vehicle Suspension, Smart Materials and Structures, Vol.

18, No. 3, p. 035012.

(5) Lu, S. B., Li, Y. N., Choi, S. B., Zheng, L. and Seong, M. S., 2011, Integrated Control on MR Vehicle Suspension System Associated with Braking and Steering Control, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 49, No. 1-2, pp. 361~380.

(6) Yu, M., Choi, S. B., Dong, X. M. and Liao, C. R., 2009, Fuzzy Neural Network Control for Vehicle Stability Utilizing Magnetorheological Suspension System, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, No. 4, pp. 457~466.

(7) Carlson, J. D. and Jolly, M. R., 2000, MR Fluid, Foam and Elastomer Devices, *Mechatronics*, Vol. 10, No. 4-5, pp. 555~569.

(8) Phillips, R. W., 1969, *Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress*, Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley.

(9) Gavin, H. P., Hanson, R. D. and Filisko, F. E., 1996, Electrorheological Dampers, Part I: Analysis and Design, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 63, No. 3, pp. 669~675.

(10) Stanway, R., Sproston, J. L. and El-Wahed, A. K., 1996, Applications of Electro-rheological Fluids in Vibration Control: A Survey, *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 4, p. 464.

(11) Wereley, N. M. and Pang, L., 1998, Nondimensional Analysis of Semi-active Electrorheological and Magnetorheological Dampers Using Approximate

Parallel Plate Models, *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 5, p. 732.

(12) Yang, G., Spencer Jr, B. F., Carlson, J. D. and Sain, M. K., 2002, Large-scale MR Fluid Dampers: Modeling and Dynamic Performance Considerations, *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 3, pp. 309~323.



Gi-Woo Kim received his Ph.D. degree from the Mechanical Engineering Department at the Pennsylvania State University (USA) in 2009. He worked for the Hyundai Motor Company Powertrain R&D Center from 1996 to 2004 and in the Mechanical Engineering Department at the University of Michigan from 2009 to 2011. He has worked as an assistant professor at the Kyungpook National University from 2011 to August 31 2015. He is currently working at the Inha University as an associate professor since Aug. 2015. His research topics include an advanced control systems and mechatronics, a smart-material-based sensor and actuator such as opto-mechanical sensors based on mechano-luminescence, bio-inspired biomimetic design, vehicular electronic and machine vision, torsional vibration control, flexoelectricity-based energy harvesting and so on.

압축센싱 기법을 이용한 날개끝 보텍스 캐비테이션 발생위치 및 강도 추정 연구

Localization and Source-strength Estimation of Tip Vortex Cavitation Noise Using Compressive Sensing

김 용 현* · 설 한 신** · 이 정 훈† · 정 홍 석***

Yong-Hyun Kim*, HanShin Seol**, Jeung-Hoon Lee† and HongSeok Jeong***

(Received March 3, 2020 ; Revised July 14, 2020 ; Accepted July 14, 2020)

Key Words : Cavitation(캐비테이션), Compressive Sensing(압축센싱), Source Localization(음원 위치 추정), Source Strength Estimation(음원 강도 추정)

ABSTRACT

Currently, in propeller performance evaluation, localization and source-strength estimation of propeller cavitation are emphasized. To change this, in the current investigation, a practical estimation method using a compressive sensing framework with a hydrophone array was established. Since the signal produced by the propeller cavitation can be regarded as cyclostationary, we use the spectral kurtosis for the provision of an appropriate frequency band where the minimization problem in CS is resolved. The proposed scheme is verified through a model-scale test conducted in the large cavitation tunnel at Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. For an incipient case, the localization of cavitation exhibited fairly good correlation with high-speed images. In addition, consistent increments in the estimated strength were observed with the development of cavitation.

1. 서 론

최근 선박의 대형화, 고속화, 정숙화 추세와 더불어 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션은 수중방사소음(underwater radiated noise), 침식(erosion) 등 다양한 문제점을 야기하여 상선뿐만 아니라 함정 분야에서도 큰 관심을 받고 있다. 기존에는 육안 관찰을 통한 캐

비테이션 발생 양상의 정성적 평가 혹은 단수의 청음 센서를 이용한 스펙트럼 측정이 평가의 주를 이루었다. 그러나 캐비테이션의 발생위치 및 그것의 강도 추정치를 추가로 제공할 수 있다면, 평가의 객관화 및 정량화에 대한 최근의 수요를 만족할 수 있을 것으로 기대되며, 이에 따라 이 연구에서는 다수의 청음센서, 즉 배열센서를 이용한 위치와 강도 추정에 대해 다루고자 한다.

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Professor
E-mail : jhoonlee@changwon.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Student

** Advanced Ship Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Principal Researcher

*** Advanced Ship Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Researcher

‡ Recommended by Editor Chan Jung Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

빔형성(**beamforming**) 방법 등 다양한 음향신호처리 방법이 문헌에 소개되어 있다. Kim, D. et al.⁽¹⁾은 초생 캐비테이션의 발생위치 추정을 위해서 광대역 주파수에 대해 정합장 역산(**matched field inversion**) 기법을 적용한 탐지법을 제안하였다. 자유음장에 대한 그린함수(**green function**)⁽²⁾를 이용하여 음원을 모형화하였고, 이에 기초한 목적함수의 최소화를 통해 위치를 추정하였는데, 기본적으로 관측치와 복제음장(**replica field**) 간의 유사도 결정을 통해 음원 위치를 추정하는 점에서 빔형성 방법과 크게 다르지 않다. Foeth, E. J. et al.⁽³⁾ 역시 빔형성 기법을 이용한 추정법을 제안하였다. 많은 개수의 청음센서를 요구하는 빔형성 방법의 한계를 해결하고자 소수의 청음센서로 구성된 하위배열(**sub array**)을 도입하였고, 에일리어싱(**aliasing**) 기준을 부분적으로 만족하는 위치에 하위배열을 배치한 희소배열(**sparse array**)의 적용을 통해 캐비테이션의 발생위치 및 강도를 추정하였다. 그러나 빔형성 방법의 근본적인 제약사항인 저해상도의 한계로부터는 벗어날 수 없었다.

압축센싱(**compressive sensing**)⁽⁴⁾은 최근 음원위치 추정 분야에서 주목받는 기법으로, 역문제 $\mathbf{y}=\mathbf{A}\mathbf{x}$ 에서 만약 \mathbf{x} 가 희소벡터(**sparse vector**)이고 선형변환행렬 \mathbf{A} 가 제한등방성(**restricted isometry property**, **RIP**)이라는 기준을 만족하면, 최적화 기법을 통해 관측치 \mathbf{y} 로부터 \mathbf{x} 를 구할 수 있는 방법이다. 종래의 빔형성 기법보다 적은 개수의 청음센서만으로 고해상도의 음원 위치 및 강도 추정 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으며, 다수의 센서를 사용하기 어려운 선체 환경에 적합한 기법으로 전망된다.

Choo, Y. et al.⁽⁵⁾은 압축센싱 기법을 이용한 초생 단계의 날개끝 보텍스 캐비테이션(**tip vortex cavitation**) 위치 추정을 시도하였다. 압축센싱에서 취급하는 최적화 문제의 제약조건을 희소치(**sparsity**)가 더욱 부각되게 수정 제안하였는데, 여러 곳에 산재해 있는 발생위치 가운데 가장 우세한, 다시 말해서 대표적인 위치값을 추정하기 위함이었다. 이를 통해 고속카메라 관찰영상과 비교적 일치하는 추정 결과를 얻을 수 있었다.

캐비테이션의 발생이 비교적 특정 영역에 국한되어 있다고 볼 때, 그것의 위치 및 강도 추정 문제는 주파수 영역에서 정의할 수 있으며, 관심 주파수 대역 내 각각의 주파수에 대해 얻은 해를 평균하여 최종해, 즉 캐비테이션 발생위치 및 강도를 얻는다. 당

연히 관심 주파수 대역의 선정이 선행되어야 하며, 일반적으로는 파워 스펙트럼의 증가 추이에 대한 관찰을 통해 결정한다. 그러나 잡음의 영향이 큰 환경에서는 부적합하고, 캐비테이션 발달에 따른 이력 데이터를 요구하는 단점이 있다. 이에 이 연구에서는 캐비테이션 소음이 충격성 신호가 주기적으로 반복되는 순환정상성(**cyclostationary**)으로 나타나는 것에 착안하여 스펙트럴 커토시스(**spectral kurtosis**)⁽⁶⁾ 해석을 통해 최적 주파수 대역을 선정하고자 하였다.

이 연구는 총 4장으로 구성되어 있다. 2장에서는 캐비테이션 위치 및 강도 추정법을 위한 관련 이론을 설명하였고, 3장에서는 모형선 실험을 통해 얻은 캐비테이션 소음 실측치에 적용한 예에 대해 기술하였다. 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

2. 캐비테이션 위치 및 강도 추정법을 위한 관련 이론

2.1 압축센싱

음원의 위치 및 강도 추정을 위한 압축센싱 기법은 등가음원법(**equivalent source method**)을 이용한 정식화에서 출발한다. 즉, Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 어떤 관심 공간 내에 존재하는 음원을 N 개의 격자로 이산화, 혹은 N 개의 잠재적인 단극음원으로 분포시켜 이들의 조합으로 표현할 수 있다고 가정하자. 이때 M 개의 배열 센서(마이크로폰 혹은 하이드로폰)를 이용하여 음장을 계측할 경우, m 번째 센서에서 계측된 압력값 y_m 은 그린함수를 통해 주파수 영역에서 식 (1)

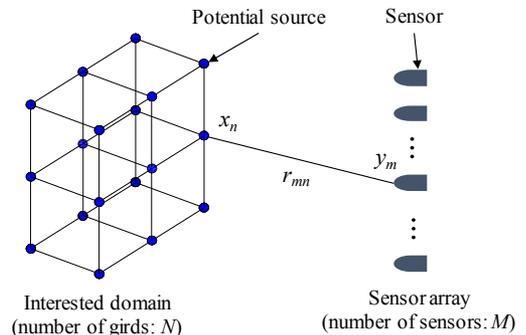


Fig. 1 Distribution of N equivalent monopole sources in the interested domain (n -th equivalent source with strength x_n is located at each grid point, m -th sensor in the array receives the signal y_m)

과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_m = \sum_{n=1}^N \frac{e^{-jkr_{mn}}}{4\pi r_{mn}} x_n \tag{1}$$

여기서 x_n [Pa · m]은 n 번째 잠재적 단극음원의 강도이고, r_{mn} [m]은 n 번째 잠재적 단극음원과 m 번째 센서의 거리이며, k ($=2\pi f/c$) [1/m]는 주파수 f [Hz]에 해당하는 파수를 나타낸다(단, c (=1500) [m/s]는 음속을 의미함). 식 (1)을 M 개 센서에 대하여 확장하면 관측벡터(measurement vector) $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^M$ 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \frac{1}{4\pi} \begin{bmatrix} \frac{e^{-jkr_{11}}}{r_{11}} & \dots & \frac{e^{-jkr_{1N}}}{r_{1N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{e^{-jkr_{M1}}}{r_{M1}} & \dots & \frac{e^{-jkr_{MN}}}{r_{MN}} \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 은 관측행렬(measurement matrix)이라고 한다.

대부분의 경우, 관심 공간 내 잠재적 단극음원의 개수 N 은 센서 개수 M 보다 크다($M < N$). 따라서 식 (2)의 관측행렬 \mathbf{A} 는 미지수의 개수(= N)가 식의 개수(= M)보다 많은 부족결정 시스템(underdetermined system)을 구성하며 무한개의 해를 가지게 된다. 그러나 실 음원의 개수 s 가 잠재적 단극음원의 개수 N

보다 매우 작다면($s \ll N$), 구하고자 하는 해 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^N$ 은 대부분의 원소가 0 또는 0에 가까운 값을 가지는 희소벡터(sparse vector)가 되고, 식 (3)과 같은 l_0 -norm 최소화 문제를 풀어 해를 구할(또는 복구할) 수 있다.

$$\min \|\mathbf{x}\|_0 \quad \text{subject to } \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{y} \tag{3}$$

여기서 l_0 -norm $\|\mathbf{x}\|_0$ 은 0이 아닌 원소의 개수를 나타낸다. 그러나 식 (3)은 다항 시간(polynomial-time) 내에 해를 구할 수 없는 NP-hard 문제이기에 사실상 계산이 불가능함이 알려져 있다⁽⁷⁾. 따라서 식 (4)와 같이 볼록 완화(convex relaxation)을 통한 l_1 -norm 최소화 문제로 근사하여 해를 추정하게 되며, 이를 기저 추적(basis pursuit)이라고도 한다⁽⁸⁾.

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{subject to } \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{y} \tag{4}$$

여기서 l_1 -norm은 $\|\mathbf{x}\|_1 = \sum |x_n|$ 으로, 원소의 절대값 합을 나타낸다.

식 (4)로 주어지는 l_1 -norm 최소화 문제의 의미를 살피기 위해 다음과 같이 통상적으로 사용되는 l_2 -norm 최소화 문제와 비교해 보자.

$$\min \|\mathbf{x}\|_2 \quad \text{subject to } \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{y} \tag{5}$$

여기서 l_2 -norm은 $\|\mathbf{x}\|_2 = (\sum x_n^2)^{1/2}$ 이다.

$N = 2, M = 1$ 인 $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ 문제에 대한 l_1 -norm 최소화 문제(식 (4))와 l_2 -norm 최소화 문제(식 (5))의 예를 Fig. 2에 나타내었다. 식 (4), (5)는 목적함수 정

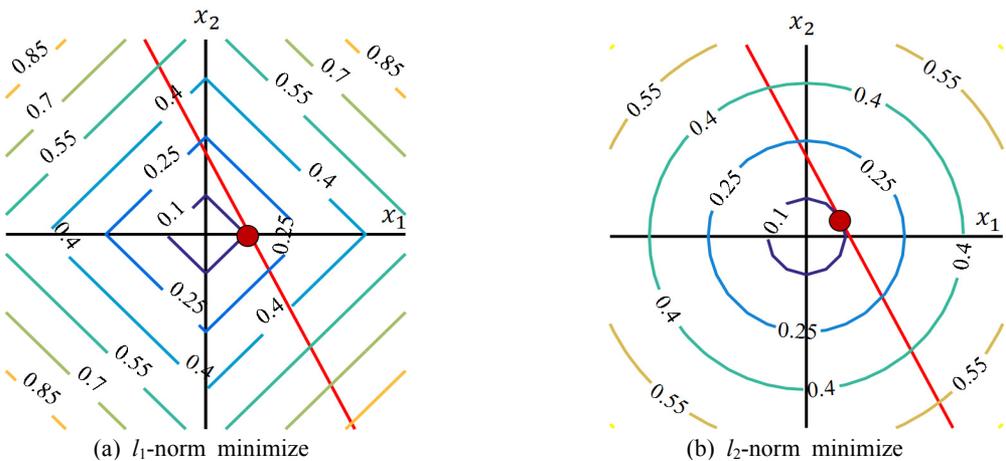


Fig. 2 Comparison of $N = 2$ and $M = 1$

의에 사용된 norm에 따라 각각 마름모꼴의 등고선 (Fig. 2(a))과 원형의 등고선(Fig. 2(b))으로 나타나며, 제약조건은 빨간색 직선으로 표시된다. 만약 제약조건이 없다면 각각의 최소화 문제는 원점을 해로 가질 것이다. 그러나 식 (4), (5)는 제약조건이 존재하므로, 이를 만족하면서 목적함수가 최소값을 가지는 지점, 즉 가장 작은 값을 가지는 등고선과 제약조건 of 접점 이 해 \mathbf{x} 가 된다.

각 최소화 문제의 해를 살펴보자. 식 (5)의 해는 x_1, x_2 모두 0이 아닌 값을 가졌으며, 이는 l_2 -norm 최소화 문제의 해가 희소치가 '2'임을 나타낸다. 반면, 식 (4)의 해는 x_1 축 위에 존재하므로, l_1 -norm 최소화 문제의 해는 희소치 s 가 '1'이고, l_2 -norm 최소화를 통해 얻은 희소치보다 작음을 알 수 있다. 따라서 식 (4)의 l_1 -norm 최소화 문제를 이용하면 희소치 s 의 최소화가 가능함을 설명할 수 있다.

단, l_1 -norm 최소화 문제(식 (4))의 해와 l_0 -norm 최소화 문제(식 (3))의 해가 일치하는가 하는 유일성 문제가 발생한다. 이 일치성을 보증하는 방법은 두 가지가 있다. 하나는 잠재적 단극음원의 개수 N 과 센서의 개수 M 이 식 (6)의 관계식을 만족하는 것이다.

$$M \sim O(s \log(N/s)) \tag{6}$$

식 (6)의 조건을 충족하면 l_1 -norm 최소화 문제의 해와 l_0 -norm 최소화 문제의 해가 높은 확률로 일치함이 알려져 있다⁽⁹⁾. 다른 하나는 제한등방성이라는 조건을 만족하는 것으로, 관련 내용은 다음 절에서 설명하겠다.

실제 환경에서의 계측은 잡음을 포함하므로, 이를 고려한 식은 식 (7)과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{Ax} + \mathbf{e} \tag{7}$$

여기서 $\mathbf{e}=[e_1, \dots, e_n]^T \in \mathbb{C}^N$ 은 서로 상관관계가 없는 원소로 구성된 가우시안(gaussian) 잡음벡터이며, 위첨자 T 는 전치(transpose)를 의미한다. 이에 따라 식 (3), (4) 또한 각각 식 (8), (9)로 수정된다.

$$\min \|\mathbf{x}\|_0 \quad \text{subject to } \|\mathbf{Ax} - \mathbf{y}\|_2 \leq \varepsilon \tag{8}$$

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{subject to } \|\mathbf{Ax} - \mathbf{y}\|_2 \leq \varepsilon \tag{9}$$

여기서 ε 은 잡음벡터 \mathbf{e} 의 l_2 -norm 크기를 나타낸다.

따라서 식 (4), (9)의 해를 선형계획법(linear programming)이나 이차계획법(quadratic programming) 등을 통해 구하거나, Matlab CVX toolbox⁽¹⁰⁾와 같은 공개된 코드를 이용하여 구할 수 있다. 그러나 식 (9)의 해는 ε 값에 민감하게 반응하기에 과적합(overfitting)과 같은 문제가 발생할 수 있으며, 이 연구에서는 Choo, Y. et al.⁽⁵⁾이 제안한 식 (10)의 제약조건을 가지는 l_1 -norm 최소화 문제를 사용함으로써 이 문제를 해결하고자 하였다.

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{subject to } \|\mathbf{1} - \mathbf{y}^T \mathbf{Ax}\|_2 \leq \varepsilon' \tag{10}$$

여기서 $\varepsilon' (= \mathbf{y}^T \mathbf{e})$ 은 잡음벡터 \mathbf{e} 와 관측벡터 \mathbf{y} 의 내적(inner product) 절대값이다.

식 (10)은 관측벡터 \mathbf{y} 와 상관관계가 가장 큰 원소 하나를 가지는 해, 다시 말해서 희소치 s 가 '1'인 \mathbf{x} 를 구하는 특징이 있으며, ε' 값 변화에 추정치가 크게 달라지지 않는 강인성을 가지고 있다.

단, 식 (10)을 비롯하여 앞에서 나타난 최소화 문제들은 주파수 영역에서 정의되었음을 강조하며, 이에 따라 해석 주파수 대역 선정에 대한 문제가 남는다. 이 연구에서는 파워 스펙트럼 밀도의 변화 관찰 및 스펙트럴 커토시스 해석을 통해 최적 주파수 대역을 선정하였다. 그 후, 선정된 주파수 대역에 대한 식 (10)의 반복 적용 및 비상관 평균화(incoherent averaging)를 통해 최종해, 즉 위치와 강도를 얻는다.

2.2 제한등방성

관측행렬 \mathbf{A} 는 가정된 음원 모형에서 도출되며, 해 \mathbf{x} 는 \mathbf{A} 와 밀접한 관련이 있다. RIP 조건은 관측행렬 \mathbf{A} 가 얼마나 직교행렬에 가까운지 판단하는 척도로, 제한등방상수(restricted isometry constant, RIC) $\delta_s(0 \leq \delta_s \leq 1)$ 를 통해 추정할 수 있다^(11,12). δ_s 는 s 개의 0이 아닌 원소를 가지는 모든 s -희소벡터 \mathbf{x} 에 대하여 식 (11)을 만족하는 값 가운데 가장 작은 것을 가리킨다.

$$(1 - \delta_s) \|\mathbf{x}\|_2^2 \leq \|\mathbf{Ax}\|_2^2 \leq (1 + \delta_s) \|\mathbf{x}\|_2^2 \tag{11}$$

여기서 \mathbf{A} 는 각각의 열(column)이 l_2 -norm으로 정규화(normalized)되어 있다고 가정한다. 만약 δ_s 가 특정한 기준보다 낮으면 \mathbf{A} 는 s -차수(s -th order)의 RIP 조건을 만족한다고 할 수 있다.

RIP의 핵심 개념은 s 개의 열로 구성된 \mathbf{A} 의 부분집합이 에너지의 손실 또는 이득 없이 정규직교변환(orthogonal transformation)처럼 기능함⁽¹³⁾에 있으며, 일반적으로 Candes⁽¹²⁾가 제시한 $\delta_{2s} \leq 0.414$ 를 RIP 충족을 위한 필요조건으로 본다. 여기서 RIC의 아래 첨자가 $2s$ 로 바뀐 것에 주의해야 하며, s -최소벡터 \mathbf{x} 를 구하기 위해서는 δ_s 가 아닌 $2s$ 차수에 대한 δ_{2s} 가 Candes criteria를 만족하는지 확인해야 함을 강조한다. 이때 δ_{2s} 는 식 (12)의 δ 를 이용하여 통계적으로 추정이 가능하다.

$$\delta = \frac{\|\mathbf{Ax}\|_2^2}{\|\mathbf{x}\|_2^2} - 1 \tag{12}$$

식 (12)는 식 (11)에 δ_s 에 대하여 정리한 후, 부등식을 등식으로 수정함으로써 얻을 수 있으며, δ 는 몬테카를로법(monte carlo method)⁽¹⁴⁾을 통해 분포를 구할 수 있다. 이때 식 (12)의 \mathbf{x} 는 s -최소벡터가 아닌 $2s$ -최소벡터이다.

Fig. 3에 δ 의 분포 예시를 나타내었으며, 그 분포는 특정한 확률밀도함수 $P(\delta)$ 로 근사할 수 있다. 만약 근사된 $P(\delta)$ 가 식 (13)의 정규분포를 따른다면, 식 (14)를 이용하여 제한등방상수 δ_{2s} 를 추정할 수 있다⁽¹⁵⁾.

$$P(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta - E(\delta))^2}{2\sigma^2}\right) \tag{13}$$

$$\delta_{2s} = 3\sigma \tag{14}$$

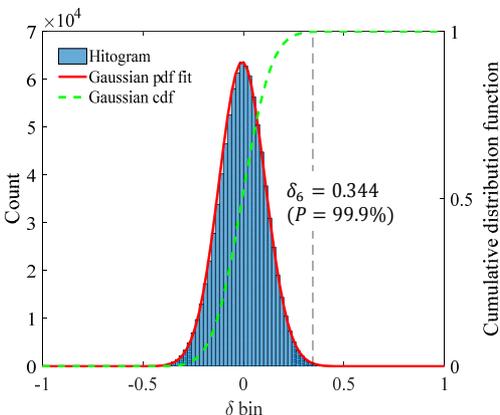


Fig. 3 Histogram using 100 000 random draws for the estimation of $\delta_{2s}(s=3)$ ($M=24$, $N=441$ and $f=8$ kHz)

여기서 $E(\delta)$ 는 δ 의 평균이며, σ 는 표준편차를 나타낸다. 정리하자면 식 (14)를 통한 δ_{2s} 의 추정치는 근사된 확률밀도함수의 누적분포가 99.9%에 해당하는 값을 알 수 있다. 따라서 식 (13)의 $P(\delta)$ 가 정규분포로 근사되지 않더라도 그것의 누적분포를 통해 δ_{2s} 를 추정할 수 있다.

3. 캐비테이션 소음 실측 결과에의 적용

3.1 실험 환경 및 추정 조건 선정

제한된 추정법을 캐비테이션 소음 실측 결과에 적용하고자, 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 캐비테이션 터널에서 KVLCC2 모형선(Fig. 4(a))을 이용한 초생 캐비테이션 발생 실험을 수행하였다. 날개 수가 4개인 프로펠러가 장착된 모형선을 사용하였으며, 실선 KVLCC2와의 비율 λ 는 1:39.44이다.

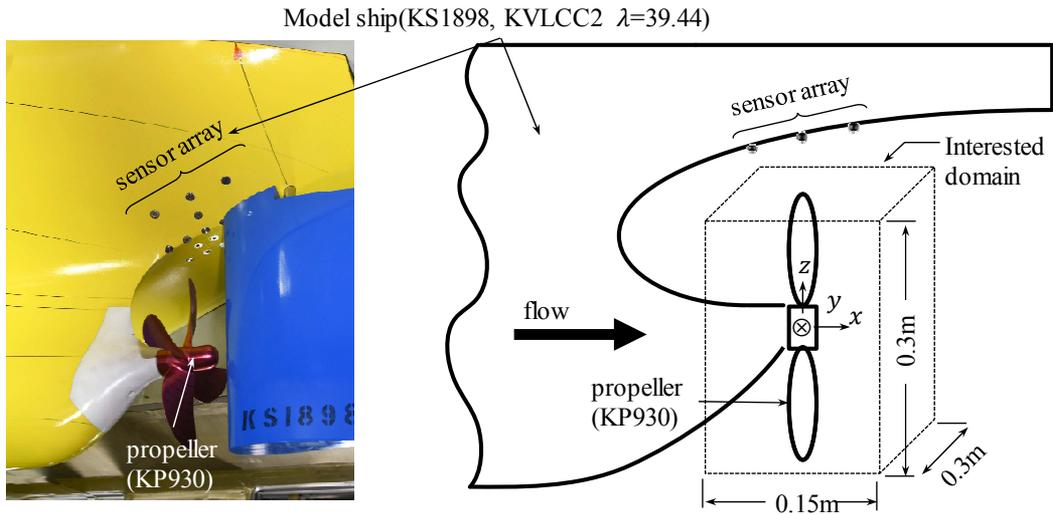
캐비테이션 소음신호 계측에는 9개의 청음센서를 사용하였으며, 설치공간의 제약으로 Fig. 4(a)와 같이 프로펠러 상부 선체 표면에 센서를 매립하였다. Fig. 4(b)에는 RIP 조건 분석(Fig. 4(c))을 통하여 도출한 센서 배열의 좌표를 도시하였다. 프로펠러 중심을 원점으로 한 주변 $0.15 \times 0.3 \times 0.3 \text{ m}^3$ 의 영역을 가로, 세로, 높이 10 mm 간격의 15 376개 격자로 분할하여 관측 공간(Fig. 4(a))으로 선정하였고, 이를 바탕으로 $M=9$, $N=15\ 376$ 의 크기(size)를 가지는 관측행렬 \mathbf{A} 를 RIP 조건 분석에 사용하였다. 캐비테이션의 광대역 특성⁽¹⁶⁾ 및 샘플링 주파수를 고려하여 0 kHz ~ 120 kHz의 주파수 대역에서 수행하였으며, 분석 결과로부터 20 kHz ~ 120 kHz 주파수 범위에서 센서 배열이 추정 가능한 캐비테이션 소음원의 개수는 최대 2개임을 알 수 있었다.

터널 내 압력 조건에 따라 4개의 실험조건(condition 1 ~ 4)을 선정하였고, 각각의 압력 조건은 Table 1과 같다. 각 조건에 해당하는 캐비테이션 수(cavitation number, σ_n)는 식 (15)로 정의된다.

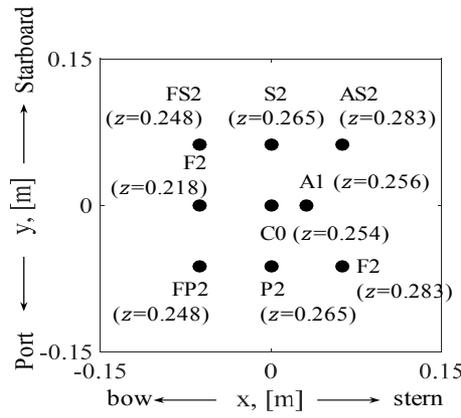
$$\sigma_n = \frac{P - P_n}{0.5 \rho n^2 D^2} \tag{15}$$

여기서 n [Hz]은 프로펠러의 초당 회전수, D [m]은 프로펠러의 직경, P [Pa]는 터널 내 압력, P_n [Pa]은 포화증기압을 나타낸다.

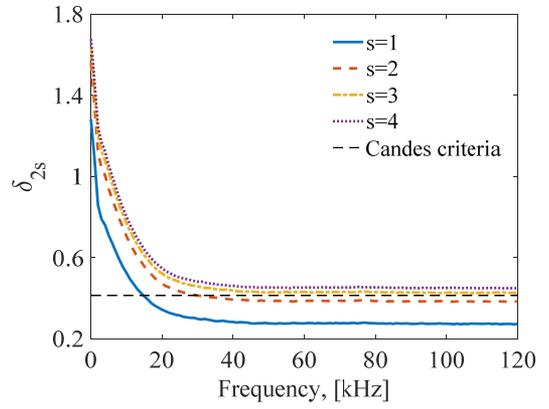
Fig. 5는 고속카메라를 이용한 실험조건별 캐비테



(a) Model ship of KVLCC2 mounted sensor array in Fig. 4(b) and schematic drawing for test environment



(b) Configuration of sensor array



(c) RIC evaluation of $\delta_{2s}(s = 1 \sim 4)$

Fig. 4 Respect to the frequency 0 kHz ~ 120 kHz

Table 1 Test conditions and cavitation observed by high-speed camera

Condition	1	2	3	4
Cavitation number, σ_n	7.17	6.81	6.09	5.37
Flow speed, [m/s]	7			
Propeller rps, [Hz]	30			
Tunnel pressure, [bar]	2.1	2.0	1.8	1.6
Observed cavitation	No cavity	Blade tip	Blade tip and sheet	

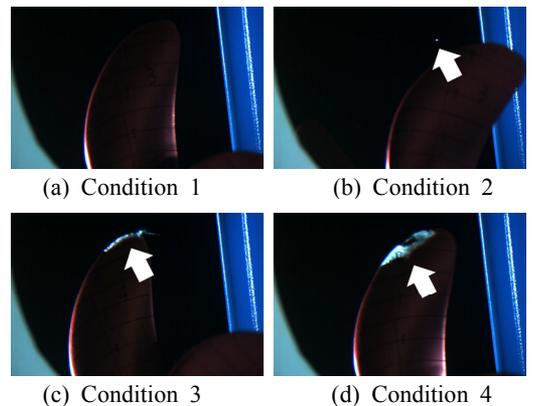
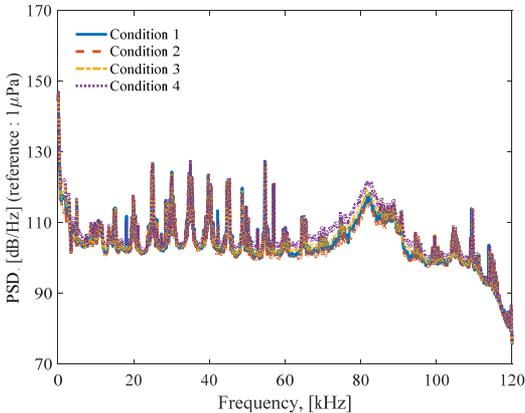


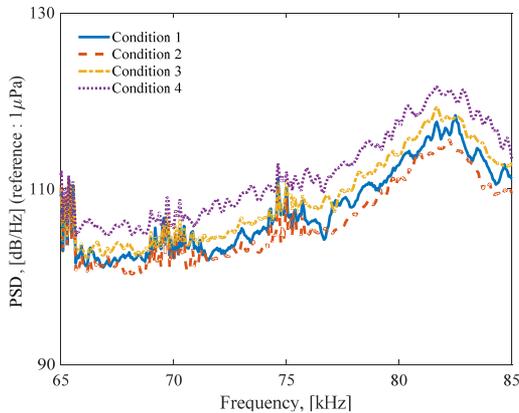
Fig. 5 Cavitation pattern for different test conditions (captured using high-speed camera)

이선 관찰 결과로, 선수에서 선미를 본 방향으로 촬영하였다. Condition 1은 육안으로 거의 관찰되지 않을 만큼 캐비테이션이 없는 비공동 상황을 나타내며 (Fig. 5(a)), condition 2에서는 Fig. 5(b)와 같이 프로펠러 날개끝 부근에서 보텍스 캐비테이션이 나타났으나 간헐적 관찰만 가능하였다. 이때 보텍스 캐비테이션은 날개 끝단에서 생성되지 않고 프로펠러 날개가 12시 방향을 통과한 후 반시계방향으로 20°~30° 회전했을 때 불규칙하게 발생하였으며, 길게 늘어지지 않고 짧게 나타났다가 바로 사라지는 경향을 띠었다. Condition 3, 4에서는 공통적으로 날개끝에서 길게 늘어진 형태의 보텍스 캐비테이션과 날개 끝단을 덮는 형태의 시트 캐비테이션(sheet cavitation)이 관측되었다(Fig. 5(c), (d)).

Fig. 6에는 계측된 소음신호 중 음압 레벨이 비교적



(a) Power spectral density for different test conditions



(b) Expansion of Fig. 6(a) for 65 kHz ~ 85 kHz

Fig. 6 Power spectral density of cavitation noise for different test conditions (channel: F2)

양호한 F2 채널의 실험 조건별 파워 스펙트럼 밀도를 도시하였으며, 주파수 분해능 64 Hz 및 해닝 창문함수 (hanning window function)을 적용하여 75 %의 오버랩(overlapping)으로 641회의 앙상블 평균(ensemble average)을 취해 계산하였다.

Fig. 5에서 터널 내 압력이 감소할수록 더 많은 캐비테이션 관측이 가능했던 점을 미루어, Fig. 6의 파워 스펙트럼 밀도 역시 눈에 띄는 차이가 있을 것으로 예상하였다. 그러나 condition 1에서 4로 터널 내 압력이 감소해도 음압 레벨(sound pressure level)의 미세한 증가만 있을 뿐이었고, 20 kHz~60 kHz 대역과 100 kHz~120 kHz 대역에서 변조 및 고조파 성분이 발생하여 낮은 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)의 신호가 나타났다. 즉, 2장에서 언급한 것처럼 주파수 대역의 선정이 필요하나, 파워 스펙트럼 밀도의 변화 관찰만으로는 판단하기 어려움을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 서론에서 언급한 바와 같이, 날개끝 보텍스 캐비테이션 소음이 순환정상성 신호로 분류될 수 있음에 주목하여 스펙트럴 커토시스 해석을 수행하였고, Fig. 7에 결과를 도시하였다. 초생 캐비테이션을 간헐적으로 관측할 수 있었던 condition 2의 시계열 자료를 사용하였으며, 해석 결과로부터 64 kHz~81 kHz를 최적 주파수 대역으로 선정하였다.

캐비테이션은 일반적으로 생성과 소멸을 거치면서 짧은 시간 동안 큰 압력을 발생시키므로, 이때 수반되는 충격 신호를 캐비테이션 사건으로 볼 수 있다. 이에 이 연구에서는 Fig. 8과 같이 파워 스펙트럼 밀도 해석에 사용된 시계열 자료에서 캐비테이션 사건이

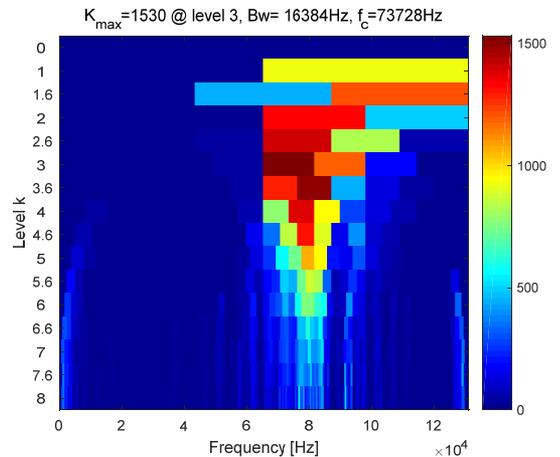


Fig. 7 Spectral kurtosis analysis of condition 2

극히 일부분을 차지하는 점을 미루어, 개별 캐비테이션 사건의 시계열 자료를 사용하면 분석에 불필요한 잡음 성분이 억제 또는 제거되어 SNR 향상이 가능할 것으로 판단하였다. 캐비테이션 대부분이 프로펠러 날개가 전면 기준 반시계방향으로 약 20°~30° (단, 12시 방향을 0°로 시작) 지점을 통과할 때 관측되었음(Fig. 5)을 바탕으로 캐비테이션 사건의 시작-종료 사이의 지속 시간을 약 3 ms로 간주하였다. 이 지속 시간에 대하여 충격 신호를 포함하는 시계열 자료를 Fig. 9(a)와 같이 임의의 선택하여 Fig. 9(b)에 도시하였고, Table 2에 시

험 조건별 선택한 캐비테이션 사건 개수를 나타내었다. Fig. 5의 관찰 결과에서 알 수 있듯, condition 1에서 4로 터널 내 압력이 감소할수록 개별 캐비테이션 사건 개수는 증가하는 추세를 보였다.

Fig. 10에는 Fig. 9(b)에 도시한 캐비테이션 사건에 대한 파워 스펙트럼 밀도를 나타내었으며, 시계열 자료의 과도 신호(transient signal) 특성과 길이를 고려하여 주파수 분해능 333.3 Hz 및 사각 창문함수(rectangular window function)를 적용하였다. SNR은 전 주파수 대역에서 Fig. 6 대비 약 10 dB 정도 상승하였음을 알 수 있는데, 이는 광범위하게 나타나던 변조 및 고조파 성분이 캐비테이션 소음신호에 대부분 가려졌기(masking) 때문으로 판단된다.

3.2 캐비테이션 위치 및 강도 추정 결과

개별 캐비테이션 소음의 발생위치 및 강도 추정을 위해 스펙트럴 커토시스 해석을 통해 선정된 65 kHz ~ 81 kHz의 관심 주파수 대역(Fig. 10의 흑색 점선)을 적용하였고, 333.3 Hz의 해상도로 분할하여 관측 벡터 y 를 추출하였다. 앞서 결정된 관측행렬 A 와 함

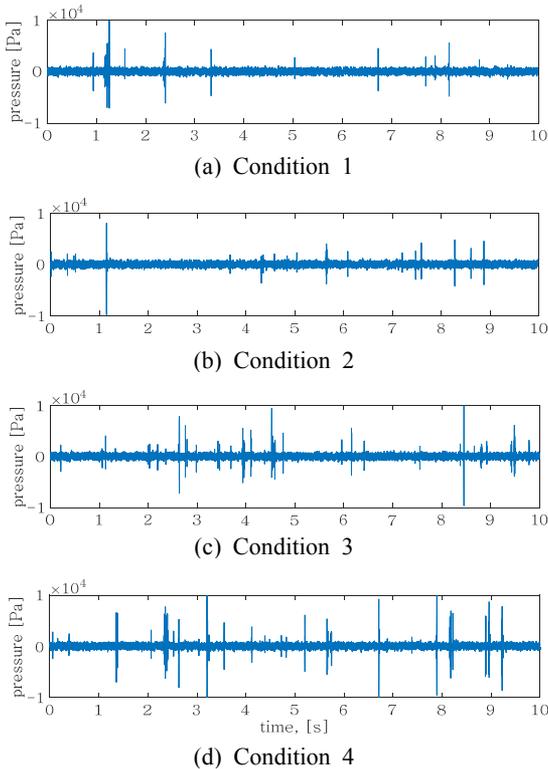
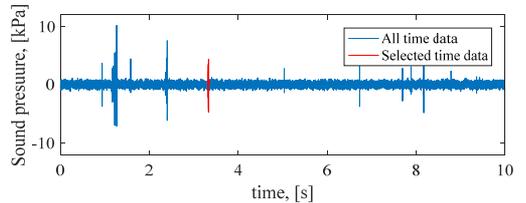


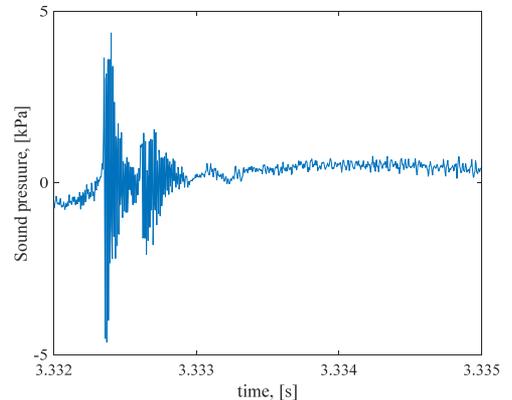
Fig. 8 Time series data of cavitation noise for different test conditions (channel: F2)

Table 2 Operating conditions according to combination condition and driving condition

Condition	Number of selected cavitation events
1	24
2	36
3	48
4	52



(a) All- and selected measured cavitation noise signal (condition 2)



(b) Expansion of Fig. 9(a) for individual cavitation event

Fig. 9 Example of selected individual cavitation event

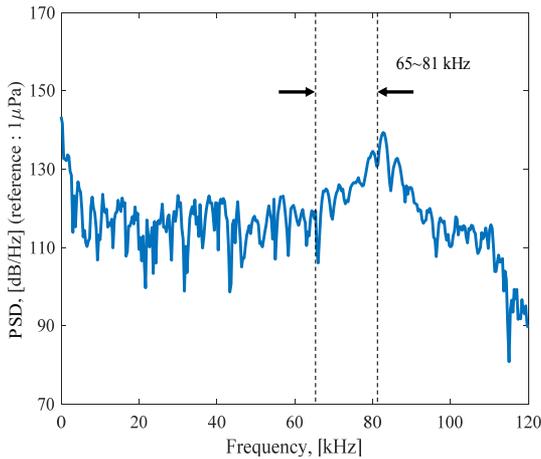


Fig. 10 Power spectral density of individual cavitation of Fig. 9(b)

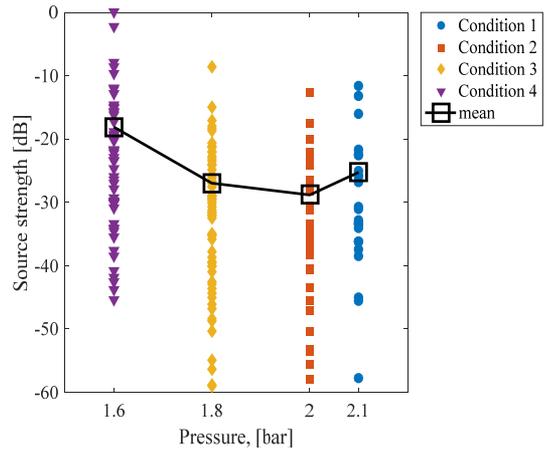


Fig. 12 The dB distribution and mean value of the source-strength of individual cavitations for different test conditions

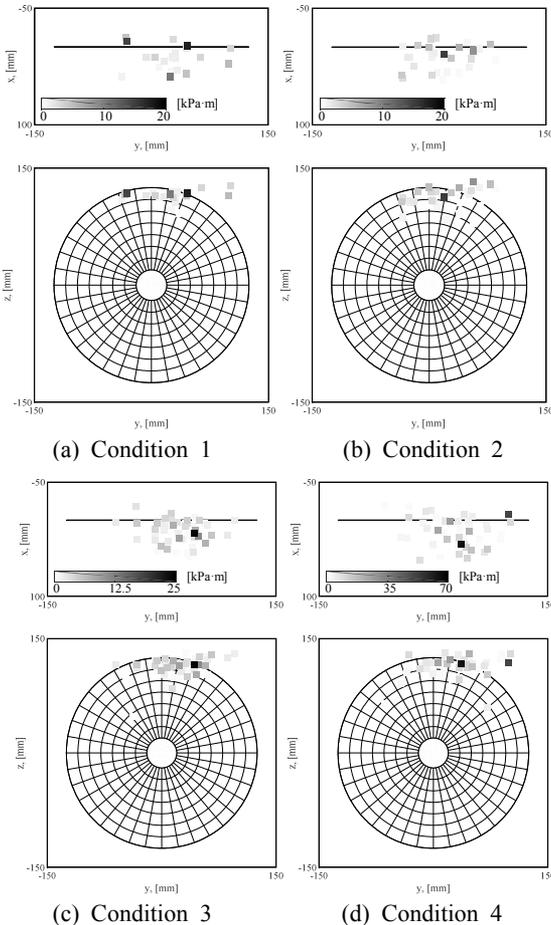


Fig. 11 The results of localization- and source strength estimation of individual cavitations for different test conditions

계 식 (10)을 관심 주파수 대역에 대해 반복 적용하였으며, 추정에는 CVX toolbox⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 이때 식 (10)의 ϵ '는 주파수와 무관하게 0.01로 일정한 값을 설정하였다. 잡음의 성질을 정의할 수 없기 때문에 오차가 존재할 가능성이 다분하나 여러 ϵ 값에 대한 계산을 반복하였고, 0.01 이하의 ϵ 에서 추정치에 대한 오차는 최대 0.5% 미만으로 큰 변화가 없음을 사전에 확인하였다.

Fig. 11에는 개별 캐비테이션 사건에 대한 시험 조건별 추정 결과를 나타내었다. 각각 위에서 아래를 바라본 방향(x - y 평면)과 선수에서 선미를 바라본 방향(y - z 평면)의 그림을 도시하였고, 각 그림 내부의 흑색 선과 원은 프로펠러 디스크를 나타낸다. 또한, 회색조의 점으로 캐비테이션 소음의 강도를 나타내었으며, 시험 조건별 강도의 최대값을 범위로 각각 지정하였다. 추정 위치는 프로펠러의 상부, 다시 말해서 12시 방향에 집중적으로 나타났고, 시험 조건과 상관없이 일정한 영역에서 군집을 이루었으며, 그 범위는 고속 카메라 관찰 결과(Fig. 5)와 큰 상관관계를 띠고 있었다. 추정 강도는 Fig. 8의 음압 수준을 거리 역산한 추정 강도와 유사하게 나타났다. 여기서 Fig. 11(a), (b)의 추정 강도 범위가 약 20 kPa·m로 유사하였는데, 이를 통해 육안 관찰에서는 비공동 상황이었던 condition 1의 터널 내 압력에서도 condition 2와 같은 날개 끝 보텍스 캐비테이션이 발생하였음을 알 수 있었다.

Fig. 12는 개별 캐비테이션 사건에 대한 추정 강도를 dB 단위로 나타낸 결과이다(단, dB의 기준값은 추

정 강도의 최대치를 이용하였음). 추정 강도는 각 시험 조건별로 대략 40 dB ~ 50 dB 정도의 산포를 가지나, 평균값의 추이는 터널 내 압력 감소에 따라, 다시 말해서 캐비테이션 양이 증가함에 따라 비례하는 특성을 보였다. 따라서 이 연구에서 제안하는 기법을 통해 캐비테이션 위치 및 강도의 정량적 추정이 가능할 것으로 기대한다.

4. 결 론

이 연구는 압축센싱 기법을 적용한 캐비테이션 발생위치 및 강도 추정법을 제안하였고, 모형선 실험을 통해 제안 추정법을 검증하였다. 스펙트럴 커토시스 해석을 통해 추정에 사용할 최적 주파수 대역을 선정하였으며, 개별 캐비테이션 사건을 선택해 SNR이 향상된 관측벡터를 추출하여 분석에 적용하였다. 추정 위치는 고속카메라 관찰 결과와 유사하게 나타났으며, 비공동 상황으로 여겨지는 압력 조건에서도 추정이 가능함을 알 수 있었다. 추정 강도는 계측된 캐비테이션 소음신호의 진폭 크기와 큰 상관관계를 가졌고, 터널 내 압력이 감소함에 따라, 다시 말해서 캐비테이션의 강도 및 수준이 증가함에 따라 추정된 강도도 이와 동조하여 함께 증가하는 특성 관찰을 통해 제안된 기법의 타당성을 검증할 수 있었다.

압축센싱을 이용한 캐비테이션 특성을 분석함에 있어 스펙트럴 커토시스 해석을 효과적으로 적용한 측면에서 이 연구의 의미를 강조할 수 있다. 그러나 이 연구에서는 특정 모형선 및 실험 조건에 대해서만 검증이 이루어졌기에, 여러 선종에 대해 압력면 캐비테이션(face cavitation)과 같은 다양한 부하 조건에서의 실험이 추가 수행되어야 하겠으며, 이를 통해 제안 추정법의 타당성을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

이 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 주요사업 ‘추진기소음기술을 응용한 추진기침식 모형시험법 개발과 추진기 소음저감 기술 고도화’ 과제(PES3020)의 지원을 받아 수행되었으며, 상기 과제 연구 결과의 일부입니다.

References

- (1) Kim, D., Seong, W., Choo, Y. and Lee, J., 2015, Localization of Incipient Tip Vortex Cavitation using Ray based Matched Field Inversion Method, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 354, No. 13, pp. 34~46.
- (2) Pierce, A. D., 2019, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, 3rd Ed., Springer.
- (3) Foeth, E. J. and Bosschers, J., 2016, Localization and Source-strength Estimation of Propeller Cavitation Noise Using Hull-mounted Pressure Transducers, 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, California, USA.
- (4) Donoho, D. L., 2006, Compressed Sensing, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 52, No. 4, pp. 1289~1306.
- (5) Choo, Y. and Seong, W., 2016, Compressive Spherical Beamforming for Localization of Incipient Tip Vortex Cavitation, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 140 No. 6, pp. 4085~4090.
- (6) Antoni, J. and Randall, R. B., 2006, The Spectral Kurtosis: Application to the Vibratory Surveillance and Diagnostics of Rotating Machines, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, No. 2, pp. 308~311.
- (7) Donoho, D. L., 2006, For Most Large Underdetermined Systems of Linear Equations the Minimal l_1 -norm Solution is also the Sparsest Solution, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 59, No. 6, pp. 797~829.
- (8) Chen, S. S., Donoho, D. L. and Saunders, M. A., 1998, Atomic Decomposition by Basis Pursuit, *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 20, No. 1, pp. 33~61.
- (9) Donoho, D. L., Tsaig, Y., Drori, I. and Starck, J.-L., 2012, Sparse Solution of Underdetermined Systems of Linear Equations by Stagewise Orthogonal Matching Pursuit, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 58, No. 2, pp. 1094~1121.
- (10) Grant, M. and Boyd, S., 2018, CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming, <http://cvxr.com/cvx/> (accessed January 8, 2020).
- (11) Candes, E. J., Romberg, J. and Tao, T., 2006,

Robust Uncertainty Principles: Exact Signal Reconstruction from Highly Incomplete Frequency Information, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 52, No. 2, pp. 489~509.

(12) Candes, E. J., 2008, The Restricted Isometry Property and Its Implications for Compressed Sensing, Comptes Rendus Mathematique, Vol. 346, No. 9-10, pp. 589~592.

(13) Lee, J.-H., Kim, Y.-H. and Shin, Y.-H., 2019, Optimal Sensor Arrangement in Random Array for Compressive-sensing Based Sound Source Identification, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 133, No. 1, pp. 106296.

(14) Metropolis, N. and Ulam, S., 1949, The Monte Carlo Method, Journal of the American Statistical Association, Vol. 44, No. 247, pp. 335~341.

(15) Simard, P. and Antoni, J., 2013, Acoustic Source Identification: Experimenting the l_1 Minimization Approach, Applied Acoustics, Vol. 74, pp. 974~986.

(16) Lee, J.-H., Lee, K.-J. and Park, H.-G., 2017, Exploiting Air-bubble Reflection for Reducing Propeller Cavitation Induced Hull Excitation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 730~739.



Yong-Hyun Kim received B.S. degree in Mechanical Engineering in 2018 and is currently studying for Master Degree at Changwon National University. He especially is interested in Source localization and Source strength estimation.



Jeung-Hoon Lee received B.S. degree in Mechanical Engineering from Hanyang Univ. in 2001, MS and Ph.D. degrees from KAIST in 2002 and 2007, respectively. After industrial experiences in SSMB of Samsung Heavy Industries Co. Ltd. for 9 years, he in 2016 joined the school of mechanical engineering of Changwon National Univ. as associate professor. His major interests cover signal processing, acoustic cavitation and Etc.



Hanshin Seol received his B.S. in Aerospace Engineering from Pusan National University in 1998. He received his M.S. and Ph.D. degree in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University in 2001 and 2005. He is now a principal researcher and the head of Naval Ship Engineering Research Center at Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering in Daejeon, Korea. Dr. Seol's current research interests include hydroacoustics, propeller noise and development of propeller noise reduction technology.



Hongseok Jeong received his B.S. and M.S. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University in 2012 and 2014. He received his Ph.D. degree in Engineering and Physical Sciences at the University of Southampton in 2019. He is currently working at Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. His research interest is identification and mitigation of propeller noise.

기존 표준 충격원의 개선 필요성 및 신 연발성 충격원 개발 방향에 대한 전문가 대상 설문조사

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

김수홍* · 송민정† · 류종관**

Suhong Kim*, Minjeong Song† and Jongkwan Ryu**

(Received April 29, 2020 ; Revised June 15, 2020 ; Accepted July 17, 2020)

Key Words : New Continuous Impact Source(신 연발성 충격원), Survey(설문조사), Expert(전문가)

ABSTRACT

Apartments are a suitable type of housing for a densely populated nation like Korea. Most of the complaints in apartment buildings are about the noise between floors. While children running are the main cause of inter-floor noise and have a moving point of continuity, the standardized impact source currently in use has a standing impact point. Before developing a new impact sound source model for simulations of children running, a survey was conducted to obtain expert opinions. A total of 50 respondents were surveyed in person, and their responses were analyzed. The experts agreed on the need for new continuous impact source models. They also preferred to study the influence of children running, continuity, and the movement of the impact point. The A-weighted sound pressure level was assessed to be the best-suited evaluation index.

1. 서 론

공동주택은 인구밀도가 높은 우리나라의 실정에서 경제성과 효율성이 높다는 장점을 토대로 대표적 주거 형태로 자리를 잡았다. 벽과 바닥을 공유하는 구조인 우리나라의 공동주택에서 발생하는 민원의 대부분은 층간소음이 차지하여 거주자의 생활에 많은 피해를 주고 있는 것이 현실이다. 이와 관련하여 층간소음에 대한 바닥구조의 성능 측정 및 평가가 행해지

고 있는데, 현재 우리나라는 소음·진동관리법 제 21조의 2제 3항 및 주택법 제 49조 4항에 의거하여 공동주택 층간소음의 범위와 기준을 규정하고, KS F 2810-1,2^(1,2)에 근거하여 층간소음 측정을 실시하고 있다. KS F 2810 - 1,2의 규정에 따라 바닥성능 측정을 경량충격원은 태핑머신이, 중량충격원에는 뱅머신과 고무공이 각각 사용되고 있다. 시험방법은 정확도 등급과 시험환경에 따라 3가지로 구분되는데 시험실 측정방법(accuracy grade 1 - precision method), 현장측정방법(accuracy grade 2 - engineering), 간이측

† Corresponding Author; Member, Chonnam National University, Professor

E-mail : minjeongsong@hanmail.net

* Member, Graduate School of Chonnam National University, Student

** Member, School of Architecture, Chonnam National University, Professor

‡ Recommended by Editor Hong Seok Yang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

정방법(accuracy grade 3 - survey method)이 있다³⁾.

현재 위의 규정을 토대로 측정하여 평가를 하고 있지만 층간소음 관련 민원이 증가하고 있어 충격원의 보완이 필요하다고 판단하였다. 실제 충격원인 어린이 땀의 경우 충격원이 연속적으로 이동을 하며 가진을 하는데 반해, 평가 충격원인 뽕머신은 단발성 가진을, 태핑머신은 연발성 가진을 하지만 하이힐 소리를 재현한다. 실제 충격원과 충격원들의 차이는 Table 1에서처럼 충격력과 가진방식에서 나타났다. 이러한 차이로 인하여 기존의 많은 연구⁴⁻⁸⁾에도 불구하고, 실제 충격원의 충격력과 충격형태 재현에 미흡한 점이 있을 수 있다고 판단된다. 일본에서도 이러한 사실을 반영한 시뮬레이터 개발을 시도했고⁹⁾, 스

위스 연방재료 시험소에서도 자동으로 중량충격음을 발생시키는 충격원을 개발했다¹⁰⁾. 이러한 사례들을 참고하여 우리나라의 특수성을 반영한 연발성 충격 모델이 필요하다고 판단하였다. 여기서 연발성이란 주택에서 어린이가 발생시키는 충격형태를 재현할 수 있도록 연속적으로 이동하며 가진하는 방식의 충격원을 말한다. 이 논문에서는 신 연발성 충격음원 모델 개발을 위한 예비 단계로써, 바닥충격음 전문가들의 현행 충격원 및 측정·평가 방법에 대한 의견 수렴이 필요하다고 판단하여 전문가 대상 설문조사를 실시하였다. 이 설문조사를 통해 전문가들의 기존 충격원과 현재 상황에 대한 의견 및 신 연발성 충격음원 모델의 필요성에 대한 의견을 취합했고, 신 연발성 충격음원 모델을 개발한다면 어떤 요소들이 반영되어야 할 것인지에 대해서도 조사하였다. 이 설문조사는 향후 신 연발성 충격음원 모델의 개발 등의 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1 Comparing children's running with current standard impact source

Source	Content
Children's running	<ul style="list-style-type: none"> • Children source (running) : 600 N~1000 N (5 years~11 years, 15 kg~50 kg) • Children source (jumping) : 1000 N~3000 N (5 years~11 years, 15 kg~50 kg) • Continuousness • Adult : less than 700 N
Tapping machine	<p>Tapping machine (light weighted impact source, KS F 2810-1, JIS A 1418-1:2000, ISO 140)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Not suitable for domestic conditions as it is made based on the impact sound of high heels • Modified tapping machine (ISO 10140) : Complementing the reproducibility of real impact sounds on the tapping machine
Bang machine	<p>Bang machine (heavy weighted impact source KS F 2810-2, JIS A 1418-2 : 2019)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Impact magnitude : 4 500 N • No Continuousness • Impact sound generation at low frequency band 2 to 4 times higher than actual impact source • Obstruction in the development of technology to reduce the actual impact sound generated • Difficult to use as a standard weight shock source due to lack of subjective responses
Rubber ball	<p>Heavy weighted impact source, JIS A 1418-2 :2019, ISO 140)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Impact magnitude : 1 600 N • Its impact sound is similar to real impact sound generated in apartments • A number of hearing experiments are very similar to the actual source of impact • Single-shot weight shock source does not properly reflect the reality of continuous impact

2. 설문조사 개요

설문조사의 내용은 크게 3개의 파트로 분류하였다.

첫 번째 파트에서는 응답자의 기본정보인 연령과 성별, 보유 자격증, 바닥충격음 관련업무 경험 등을 조사하였다. 이는 경력, 소속, 학위에 따라 응답 변화의 발생 여부와 변화가 나타나면 어떠한 분포 차이를 보이는지를 조사하고자 함이다. 최종학위, 소속, 직위나 직급, 근무경력에 대해서도 조사하였다.

두 번째 파트에서는 전문가들이 현재 사용되고 있는 충격원들에 대해 어떠한 생각을 가지고 있는지 알아보기 위해 기존 표준충격원인 태핑머신, 뽕머신, 고무공이 실제 충격원인 어린이의 땀을 잘 모사하는지에 대한 여부와 경량(태핑머신)과 중량(뽕머신, 고무공)을 따로 측정하고 있는 현행에 대한 인식조사를 실시하였다. 각 충격원에 대해 적절한 충격원인지에 대한 의견과 재현의 충실성 여부를 각각 5점 척도로 구성했다. 재현의 충실성에 대해 세분화하여 충격음의 발생크기, 주파수, 음색을 각각 5점 척도로 조사하였고, 마지막으로 경량과 중량에 대해 각각 별개의 기기인 태핑머신과 뽕머신을 통해 측정 및 평가하는 현행 시스템에 대한 의견을 묻는 문항으로 구성했다.

세 번째 파트에서는 신 연발성 표준충격원의 필요 여부와 전문가들이 생각하는 반영요소를 알아보기

위해 신 연발성 표준충격음원 모델의 개발에 요구되는 사항을 조사하는 문항으로 구성하였다. 우선 신 연발성 충격음원 모델의 필요성에 대해 5점 척도로 구성했고, 재현시 요구되는 사항을 우선순위에 따라 3가지를 선택하도록 했다. 또 현재 사용하고 있는 충격원에서는 반영되지 않는 연발성의 필요성 여부와 타격위치가 이동하며 가진하는 방식에 대한 의견을 묻고, 그 다음 문항으로 신 연발성 충격음원 모델의 개발 시 반영되어야 할 적절한 충격력의 크기에 대해서 묻는 문항으로 구성했다. 마지막으로 새로운 충격원이 만들어진다면 해당 충격원 사용을 통해 평가 척도가 바뀔 수도 있기 때문에 어떤 단일 평가지수로 평가하는 것이 적절한가에 대한 문항으로 구성했다.

설문조사는 2019년 7월 25일부터 2019년 10월 25일 까지 층간소음 분야에 종사하고 있는 50인을 대상으로 하였다. 신뢰성을 높이기 위해 설문은 대면 조사 방식으로 실시하였고, 응답자에게는 소정의 기념품을 지급하였다.

3. 설문조사 결과 및 분석

3.1 피설문자 인적현황

피설문자의 일반사항은 Table 2와 같다. 응답자의 성별은 남성은 92%, 여성은 8%이었고, 연령분포는 20대가 10%, 30대가 30%, 40대가 24%, 50대 이상이 22%, 무응답이 4%인 것으로 나타났다. 학위 분포의 경우 고등학교 졸업이 2%, 학사 학위자가 18%,

Table 2 General details

	Classification	No. of respondent	Percentage(%)
Sex	Man	46	92
	Woman	4	8
Age	20s	5	10
	30s	17	34
	40s	15	30
	50s	8	16
	60s	3	6
	None	2	4
Diploma	Bachelor's degree	10	20
	Master's degree	16	32
	Ph.D	24	48
Affiliation	University	13	26
	Laboratory	18	36
	Enterprise	19	38
Career	0~9 years	23	46
	10~19 years	16	32
	More than 20 years	11	22

석사 학위자가 32%, 박사 학위자가 48%로 나타났다. 소속의 경우 학교가 26%로 가장 적은 분포를 보였고, 연구소가 36%, 기업체가 38%로 나타났다. 경력의 경우 10년 미만이 46%, 10년~19년이 32%, 20년 이상이 22%인 것으로 나타났다.

3.2 기존 충격원 인식 조사

기존 충격원들에 대한 전문가들의 인식조사에서 현재 표준 충격원이 적절한가를 묻는 문항에 Fig. 1과 같은 결과를 보였다. 경량 충격원에 대해서는 “매우 그렇다(18%)”, “그렇다(48%)”로 조사되어 긍정적인 답변이 66%로 나타났고, 고무공에 대해서도 긍정 답변이 50%로 나타났다. 반면, 뱅머신에 대해서는 “그렇지 않다(32%)”, “매우 그렇지 않다(16%)”로 긍정적인 의견에 비하여 부정적 의견이 많았다.

경량충격원의 경우는 충격원 이동의 용이성, 충격음의 연발성(안정성) 등 차단성능 시험실시에 있어 적당하다고 평가하는 것으로 보인다. 이는 고무공의 경우도 마찬가지인 것으로 판단된다. 그러나 뱅머신

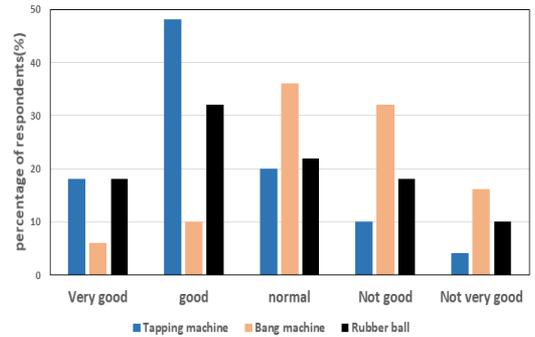


Fig. 1 Adequacy of standard impact sources

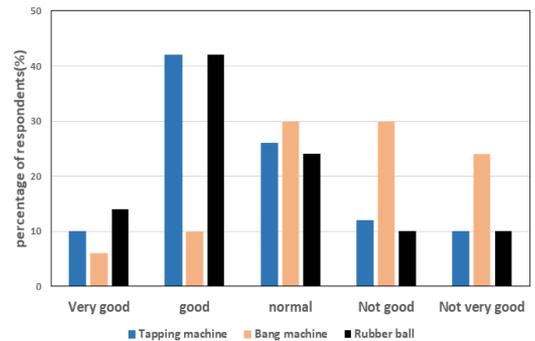


Fig. 2 Adequacy of impact reproduction

은 기기의 조립과 이동에 있어 불편함이 있기 때문에 차음성능 시험에 있어서는 다른 기기에 비해 긍정적인 평가가 크지 않은 것으로 판단된다.

다음으로 표준 충격원의 충격재현의 적절성을 묻는 문항에 Fig. 2와 같이 나타났다. 태핑머신과 고무공은 긍정적인 답변(“매우 그렇다”, “그렇다”)이 52% 및 56%로서 적절하게 재현한다고 응답한 반면, 뱅머신의 경우는 부정적인 답변(“그렇지 않다”, “매우 그렇지 않다”)이 54%로 나타나 적절하게 충격을 재현하지 못한다는 응답이 비교적 높았다. 경량 충격원의 경우는 위층에서 물건 떨어지는 소리, 바닥 끄는 소리 등을 보통 수준으로 재현하고 있다고 판단하고 있으나, 뱅머신의 경우는 그 소리가 실제 소음원에 비해 커, 위층에서 발생하는 소리의 재현에는 문제가 있는 것으로 판단하고 있는 것으로 분석된다. 다만, 고무공의 경우는 충격력이 실제의 경우와 크게 다르지 않고 충격원을 다루기에 용이하기 때문에 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다. 충격음 재현의 충실도 정도를 묻는 문항은 Table 3과 같은 결과가 나왔다. 경량 충격원인 태핑머신과 중량충격원인 고무공의 경우, 잘함 이상의 비율이 높아 대체로 재현을 잘하는 편으로 분석된다. 하지만 뱅머신은 재현을 못한다는 응답이 높은 것으로 나타났다. 기존의 뱅머신에 대한 보완이 필요하다고 생각하는 것으로 판단된다. 이는 서론의 Table 1에서 밝힌 것처럼 충격력, 발생빈도, 지속시간 등의 차이 등에 근거한 것으로 판단된다. 다만, 경량의 경우는 어린이의 뽀뽀를 모사한 것이 아니라 생활상에

서 발생하는 물건의 낙하음 등에 대한 것으로 인식하여 불만족 비율이 높지 않은 것으로 판단된다.

마지막으로 현행 측정 평가시스템을 어떻게 생각하느냐는 문항에 대해서는 Table 4에서와 같이 경량과 중량 충격원의 통합된 방안이 46%로 가장 많은 응답을 보였고, 현행 유지(26%), 고무공만 사용(10%), 기타(10%), 태핑머신만 사용(6%), 뱅머신만 사용(2%) 순으로 나타났다.

이상의 결과를 살펴보았을 때, 경량과 중량충격음에 대해 각각 다른 충격원으로 측정 및 평가를 시행하는 것보다 통합된 방안이 필요한 것으로 전문가들은 판단하고 있으며, 통합된 방안 다음으로는 현행을 유지하는 것을 선호하는 것으로 나타났다.

따라서, 관련 연구를 통하여 새로운 측정 및 평가 방안에 대한 연구가 필요하다고 전문가들은 판단하고 있는 것으로 파악된다.

Table 4 Opinions about measurement & evaluation system

Category	No. of respondent	(%)
Current maintenance	13	26
Only tapping machine	3	6
Only bang machine	1	2
Only impact ball	5	10
Integrated plan	23	46
Unknowingness	5	10
And so on	0	0

Table 3 Degree of impact reproduction

	Tapping machine		Bang machine		Impact ball	
	Category	(%)	Category	(%)	Category	(%)
Magnitude	-very good	8	-very good	4	-very good	6
	-good	30	-good	10	-good	40
	-normal	30	-normal	32	-normal	30
	-not good	22	-not good	36	-not good	22
	-not very good	10	-not very good	18	-not good	0
Frequency	-very good	4	-very good	4	-very good	4
	-good	40	-good	16	-good	34
	-normal	30	-normal	42	-normal	40
	-not good	24	-not good	32	-not good	18
	-not very good	2	-not very good	6	-not very good	2
Tone	-very good	6	-very good	4	-very good	6
	-good	34	-good	12	-good	26
	-normal	36	-normal	48	-normal	54
	-not good	22	-not good	28	-not good	10
	-not very good	2	-not very good	8	-not very good	2
				-not very good	2	
				-none	2	

3.3 신 표준충격원 필요성 및 반영요소 조사

설문의 마지막 파트에서는 신 표준충격원의 필요성 및 충격원에 요구되는 사항을 조사하였다. 먼저 신 충격원의 필요성에 대한 문항은 Fig. 3에서와 같이 매우 필요하다(20%)와 필요하다(58%)를 차지하여 전문가들은 실제 충격원의 이동하는 특성이나 충격특성을 더 충실히 재현할 충격원이 필요하다고 생각하는 것으로 분석된다. 두 번째로는 신 충격원이 개발된다면 재현했으면 하는 사항으로 제시된 항목을 우선순위에 따라 3가지를 고르도록 했다.

설문의 결과, Table 5와 같이, 각 순위에서 상위 3가지 항목만 보자면 1순위에서는 어린이가 연속적으로 뛰어다니는 소리가 68%로 가장 높았고, 어린이가

연속적으로 걸어다니는 소리(10%), 성인이 걷는 소리(10%)순의 결과를 보였으며, 2순위에서는 물건 떨어지는 소리가 24%로 가장 높았고, 성인이 걷는 소리(20%), 어린이가 연속적으로 뛰어다니는 소리(18%)순으로 나타났다. 3순위에서는 성인이 걷는 소리가 40%로 가장 높았고, 성인이 뛰어다니는소리(18%), 물건 떨어지는 소리(10%) 순이었다. 항목들의 순위별 가중을 두기 위해 가중점수(1순위 3점, 2순위 2점, 3순위 1점)를 임의로 주어 합산한 결과, “어린이가 뛰어다니는 소리”가 244점으로 다른 소리에 비해 높게 평가되고 있음을 알 수 있다. 뒤이어 “성인이 걷는 소리”가 점수가 높게 나타나고 있다. 바닥충격음 전문가들은 신 충격원이 재현해야 할 요소로 기존 연구에서 층간소음에 원인이라고 파악되고 있는 어린이가 뛰는 소리를 재현해야 한다고 생각하고 있고, 기존의 충격원에서는 반영되어 있지 않은 연속적으로 가진할 수 있는 방식을 가장 선호하는 것으로 분석된다.

신 연발성 충격모델의 가진방식과 재현할 대상 및 평가요소에 대해서는 Table 6과 같이 단발성과 연발

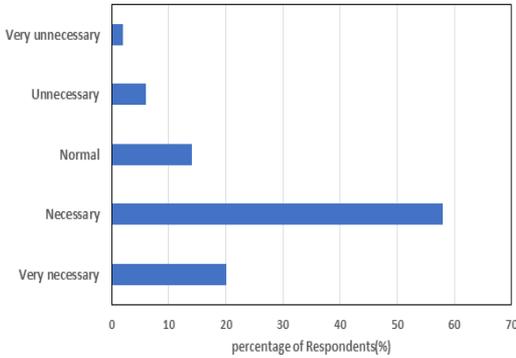


Fig. 3 Necessity of new impact source

Table 5 New impact source reflection factor

Category	1st (%)	2nd (%)	3rd (%)	Weighted score*
Children's continuous walking sound	10	12	6	60
Children's continuous running sound	68	18	4	244
Children's one-time walking	0	0	4	4
Children's one-time jumping	4	16	8	52
Sound of falling thing	0	24	10	58
Sound of spattering thing	0	4	2	10
Adult's walking sound	10	20	40	110
Adult's running sound	6	0	18	36
And so on	0	2	4	8
None	2	4	4	

*Weighted score : 1st×3+2nd×2+3rd×2

Table 6 Survey result (part 3, 3~7)

Question	Classification	(%)
3	One-time impact source	20
	Continuous impact source	76
	Unknowingness	2
4	Stationary point	22
	Movable point	74
	Unknowingness	4
5	Children's continuous running sound	60
	Children's continuous walking sound	4
	Adult's running sound	16
	Adult's walking sound	18
	Tapping machine	0
	Bang machine	2
	Impact ball	0
	And so on	0
6	Inverse A weighted value	8
	dBA	33
	Measurement frequency band level	27
	arithmetic mean	
	Leq	12
	Sound pressure exposure level	4
7	And so on	4
	Unknowingness	12
	Very necessary	54
	Necessary	44
	Normal	2
	Unnecessary	0
	Never unnecessary	0

성 충격원 중 선호하는 방식을 묻는 문항에서 응답자의 76%가 연발성의 충격음을 선호하였다.

타격위치의 고정 혹은 이동의 선호도를 조사에서는 이동하는 타격점이 74%로 이동이 가능한 충격원을 선호하는 것으로 나타났다. 방안의 이곳 저곳을 한번에 가진할 수 있어 구조의 성능을 제대로 측정 및 평가할 수 있는 충격원에 대한 기대가 있는 것으로 판단한다.

충격력의 크기가 어느 정도 되어야 하는지에 대한 문항에서는 어린이의 뽀(60%), 성인의 걸음(18%), 성인의 뽀(16%), 어린이의 걸음(4%), 기존 뽀머신(2%) 순으로 나타났다. 이는 위에서 재현의 우선순위 문항에서 보인 1순위 응답과 일치하는 응답으로, 전문가들은 신 충격원의 충격력을 어린이의 뽀의 크기 정도를 선호하는 것으로 나타났다.

바닥충격음 단일평가 지수에 대한 응답은 A특성 음압레벨이 33%로 가장 많았고, 그 다음으로 측정주파수대역 레벨 산술평균이 27%였다. L_{eq} 와 모름이 각각 12%로 나타났고, 역 A특성값(8%), 음압노출레벨(sound exposure level)과 기타가 각각 4%로 나타났다. 전문가의 경우 A특성 음압레벨이 단일평가지표로 가장 적절하다고 생각하는 것으로 나타났고, 측정주파수대역 레벨 산술평균(27%) 또한 유의미하다고 보는 것으로 나타났다. 기존의 평가방법인 “역 A특성 값”이 8%로 매우 낮게 나왔는데 이는 산출과정이 복잡

하고 다른 평가지표와 호환성 등의 문제가 있어 이를 회피하고 있는 것으로 판단된다. 간단하게 측정기기에서 바로 읽을 수 있고 다른 측정평가치와도 비교가 용이한 A특성 음압레벨을 선호하는 것으로 판단한다.

마지막으로 신 충격원에 대한 국가적 연구지원의 필요성은 매우 필요하다고 54%, 필요하다 44%, 보통이 2%로 인식하는 것으로 나타났다. 개발은 국가적 연구지원을 통해 체계적인 단계를 밟는 것이 적절하다고 보는 것으로 분석된다.

3.4 학위별, 경력별, 소속별 응답분포 및 분석

일반사항 조사를 통해 얻어진 데이터를 토대로 학위와 경력, 소속에 따라 응답의 차이를 보이는지 알아보기 위하여 분석을 실시하였다. 분석에 앞서 학위의 경우 학사 학위자, 석사 학위자, 박사 학위자로 응답자를 분류하였다. 경력의 경우 10년 미만, 10년 이상 20년 미만, 20년 이상의 세 집단으로 분류하였고, 소속은 대학, 기업체, 연구소의 세 집단으로 분류를 하여 각 문항에 대해 분석을 실시했다.

분석에 앞서 각 분류한 집단별 문항의 응답차이가 나타난다고 파악된 문항은 Table 7과 같다. 각 집단별 응답의 산술 평균값이 유의미한 차이가 있다고 파악하여 통계적 분석을 위해 IBM SPSS Statistics 25의 ANOVA를 사용하여 유의수준은 0.05 수준에서 실시하였다. 분석한 결과 학위, 경력, 소속별 응답의 차이는 유의하지 않는 것으로 나타났다. 학위의 경우 위와 같이 분류한 집단 간의 차이가 명확히 드러나지 않았다. 경력의 경우도 학위와 마찬가지로 분류 집단 간 차이가 나타나지 않았다. 소속별 분석 또한 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이는 학위나 경력, 소속이 응답에 미치는 영향이 미미한 것으로 분석된다.

4. 결 론

신 연발성 표준충격음원 모델 개발에 앞서 전문가들의 의견을 알아보기 위해 설문조사를 실시하였다. 설문은 총 50인을 직접 대면하는 방식으로 진행되었으며 주요 설문조사의 결과는 다음과 같다.

(1) 전문가들은 현재 사용되고 있는 태핑머신(경량 충격원), 뽀머신(중량 충격원), 고무공(중량 충격원) 중 태핑머신과 고무공은 비교적 실제 충격원으로 비교적 적절하지만, 뽀머신은 ‘적절하지 못하다’라고 판단하고

Table 7 Categorizing analysis (a question thought to show a difference in response)

	Categorization	Q.2.1	Q.3.2-1st
Diploma	Bachelor	2.6	2.5
	Master	3.9	4.0
	Ph.D.	3.8	3.7
	Categorization	Q.3-5	
Career	Less than 10 years	2.7	
	10 years~19 years	1.2	
	More than 20 years	1.8	
	Categorization	Q.2.1	Q.3.1-1st
Affiliation	University	3.5	3.9
	Laboratory	3.8	4.0
	Company	3.0	2.9

있는 것으로 나타났다.

(2) 측정 및 평가 방법에 대해서는 새로운 통합된 방안이 필요하다는 의견이 가장 많았고, 기존의 방식을 그대로 유지하자는 의견이 두 번째로 많은 응답을 보였다. 새로운 충격원 개발의 필요성 측면에서는 전문가들 대부분 개발의 필요성에 공감을 하는 것으로 나타났다.

(3) 신 연발성 충격음원 모델에 반영되어야 할 요소로는 먼저 충격력의 경우 어린이의 뛰는 소리 정도의 크기를 선호하고, 다음으로 가진 방식에 있어서는 기존의 단발성인 중량 충격원과는 다르게 연속적인 가진이 가능한 방식을 선호했으며, 마지막으로 타격점은 기존의 고정타격 후 다음 지점으로 사람이 옮기는 방식보다는 자동으로 이동하면서 타격이 가능한 방식을 선호하는 것으로 나타났다.

(4) 신 연발성 충격음원 모델이 개발된다면 이에 대한 평가 요소로는 A특성 음압레벨이 가장 적절하다고 생각하는 것으로 나타났고, 그다음으로 측정 주파수대역 레벨 산술평균이 적절하다고 나타났다.

(5) 단발성과 연발성 여부에서는 76%의 응답자가 연발성을 선택한 것으로 보아 전문가들은 소리 재현 측면에서 어린이의 단발성 걸음과 더불어 연발성도 고려하고 있다고 분석된다.

(6) 경력, 학위, 소속을 분류하여 집단 간의 응답차이 분석에서는 유의미한 차이를 보이지 않았다.

이 연구를 통해 현재 바닥성능을 측정하는 충격원들의 실태와 신 연발성 충격음원 모델의 필요성 및 반영요소에 대해 전문가들의 의견을 파악할 수 있었다. 설문조사 결과를 통해 현재 사용되고 있는 중량충격원의 경우, 실제 충격원인 어린이의 땀에 대해 재현정도가 떨어진다고 생각하고 있고, 신 연발성 충격음원 모델이 필요하다고 공감하고 있음을 알 수 있었다.

이후 연구에서는 이러한 의견들을 바탕으로 하여 모델의 개발에 필요한 실제 어린이의 땀의 충격력을 조사하고, 키와 몸무게에 따른 속도, 보폭을 조사하여 신 연발성 충격음원 모델의 가진부 설계에 필요한 데이터를 확보하고 이를 통해 설계가 진행되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국

연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2019R111A1A01054176).

References

- (1) Korean Agency for Technology and Standards, 2015, Field Measurements of Impact Sound Insulation of Floors—Part 1: Method Using Standard Light Impact Source, KS F 2810-1.
- (2) Korean Agency for Technology and Standards, 2017, Field Measurements of Floor Impact Sound Insulation of Buildings—Part 2: Method Using Standard Heavy Impact Sources, KS F 2810-2.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (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) Jeon, J. Y. and Jeong, J. H., 2003, Measurements of Floor Impact Noise Using a New Impact Ball. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Vol. 2003, No. 1, pp. 562~568.
- (9) Nakamori, S. and Yoshimura, J., 2013, Footstep Impact Noise Simulator for Evaluation of Floor Impact Sounds. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings of Institute of Noise Control

Engineering, Vol. 247, No. 2, pp. 5399~5405.

(10) Eggenschwiler, K., Sperdin, V., Hof, C. and Schoenwald, S., 2019, New Investigations into Measurement Techniques Using the Pendulous Hammer to Assess Acoustic Insulation in Relation to User-generated Noise in Residential Buildings, Acta Acustica United with Acustica, Vol. 105, No. 5, pp. 784~795.

부 록

Table A1 Composition of questionnaire

Part1. 일반사항
1) 귀하의 성명, 연령과 성별 성명
2) 최종학위
3) 보유 자격증
4) 소속
5) 직위, 직급
6) 근무경력
7) 바닥충격을 관련 업무를 수행한 경험이 있습니까?
8) 바닥충격음 표준충격원을 사용하여 바닥충격음 실험을 한 경험이 있습니까?
9) 바닥충격음 실험 등에 관여하였다면 그 횟수는 몇 회 정도입니까?
Part 2. 기존 표준충격원에 대한 인식조사
1) 표준충격원이 우리나라 공동주택 바닥충격음 차단성능 시험에 적절한 충격원이라고 생각하십니까?
2) 표준충격원이 실제 우리나라 공동주택에서 발생하고 있는 충격음의 재현을 잘하고 있다고 생각하십니까?
3) 우리나라 공동주택에서 실제 발생하고 있는 바닥충격음과 비교할 경우, 충격원의 재현정도를 표시해 주십시오.
4) 경량충격원, 중량충격원에 대하여 바닥충격음을 따로 각각 측정 및 평가하는 현행 시스템에 대해 어떻게 생각하십니까?
Part 3. 신 표준충격원에 요구되는 사항조사
1) 우리나라 공동주택에서 실제로 발생하고 있는 바닥충격음을 재현할 수 있는 새로운 충격원이 필요하다고 생각하십니까?
2) 새로운 충격원이 만들어진다면, 다음 보기 중 재현되었으면 하는 사항을 우선순위로 3개만 골라주세요.
3) 새로운 충격원이 만들어진다면, 단발성 혹은 연발성 충격원 중 어떤 것을 선호하십니까?
4) 새로운 충격원이 만들어진다면, 타격위치 고정 혹은 타격위치 이동이 가능한 연발성 충격원 중 어떤 것을 선호하십니까?
5) 새로운 충격원이 만들어진다면, 충격력의 크기는 어느 정도 되어야 한다고 생각하십니까?
6) 새로운 충격원이 만들어진다면, 위 3번과 관련하여 바닥충격음 단일평가 지수는 어떤 것이 되어야 한다고 생각하십니까?
7) 새로운 충격원 모델개발 및 측정기기의 개발에 국가의 연구 지원이 필요하다고 생각하십니까?



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 architectural 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 conducting 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 architectural acoustics, psycho-acoustics, and acoustic barrier-free

중량충격음 레벨의 주관적 인지 변화에 대한 연구: 동일한 단일수치 평가량을 갖는 충격음을 대상으로

Changes in Subjective Perceptions of Heavyweight Impact Sound Levels with the Same Single-number Quantity of Floor Impact Sound Insulation

조 현 민* · 김 신 태* · 김 명 준†

Hyun-Min Cho*, Sin-Tae Kim* and Myung-Jun Kim†

(Received April 29, 2020 ; Revised June 15, 2020 ; Accepted June 17, 2020)

Key Words : Subjective Evaluation(주관적 평가), Psycho-acoustic Experiment(청감 실험), Floor Impact Noise(바닥충격음), Single-number Quantity(단일수치 평가량), Perception Rate(인지 비율)

ABSTRACT

In this study, the noise perception rate was evaluated using subjective auditory experiments. Changes in the noise levels in various frequency band conditions with the same single-number quantity of floor impact noise insulation performance were evaluated. A difference in the impact sound level was perceived when a change occurred in the frequency band, except for the bands exceeding the inverse A-weighting reference curve. When the sum of the changes in the impact noise level in the frequency band below the inverse A-weighting reference curve was 5 dB, about 50 % of the subjects perceived the difference, and when it was 10 dB, about 75 % perceived the difference. In addition, the perception rate differed depending on the frequency bands (63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz).

1. 서 론

일반적으로 뜬바닥 구조를 갖는 공동주택 바닥구조에서 중량충격음은 63 Hz의 과도한 충격력으로 인해 해당 주파수 대역의 음압레벨 변화에 따라 단일수치 평가량이 주로 정해지게 된다⁽¹⁾. 그 결과 결정 주파수 대역 이외의 주파수 대역에서 소음레벨 저감이 크게 발생하는 경우에도 단일수치 상으로는 변화

가 나타나지 않아 개발 기술의 충격음 차단성능 변별성이 부족하고 63 Hz 저감을 위한 기술개발에 치중되어 있는 실정이다⁽²⁾. 63 Hz를 제외한 125 Hz ~ 500 Hz 대역이 실생활 소음에서 주로 나타나는 주파수 대역이고, 해당 주파수 대역에 대한 저감성능 향상이 재실자가 인지하는 충격음 저감에 기여할 수 있는 영향이 충분히 있음에도 불구하고 이를 반영하지 못하고 있다^(3,4). 일례로 중량충격음 개선을 위한 연구⁽⁵⁻⁷⁾에서는 천장구조의 개선(흡음재, 방진달대

† Corresponding Author ; Member, Dpt. of Architectural Engineering, University of Seoul, Professor
E-mail : mjunkim@uos.ac.kr

* Member, Dpt. of Architectural Engineering, University of Seoul, Post-doctorate researcher

** Member, Dpt. of Architectural Engineering, University of Seoul, Doctorate student

‡ Recommended by Editor Hong Seok Yang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

등의 설치)을 통해 125 Hz 주파수 대역 이상에서 충격음레벨 저감량의 합이 5 dB 이상으로 나타났고 현재 평가방법인 KS F 2863-1, 2^(8,9)에 의거한 역 A특성가중 지표에 의해 평가 시 단일수치 평가량의 변화가 미미하거나 없는 것으로 분석되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 주파수 대역별로 다양한 범위에서 저감 성능을 지닌 측정 데이터가 필요하며 이를 바탕으로 재실자 청감실험을 통해 실질적으로 재실자가 느끼는 저감 정도에 대한 주관적 분석과 이를 변별할 수 있는 현행 평가방법의 개선이 필요하다고 판단된다.

청감실험을 통한 중량충격음의 주관적 평가 연구는 국내외에서 꾸준히 진행되어 왔다. 바닥충격음을 평가하기 위한 한국어 어휘로는 어노이언스(annoyance; 성가심)가 가장 높은 득점을 하여 바닥충격음 평가어휘로 연구된 바 있으며⁽¹⁰⁾, 소음의 어노이언스와 온습도 환경과의 관계에 대한 연구도 수행된 바 있다⁽¹¹⁾. 또한 충격음이 수음되는 실의 잔향특성에 따른 decay rate도 어노이언스에 큰 영향력을 가지는 것으로 조사되었으며⁽¹²⁾, Jo, H. I. et al.⁽¹³⁾의 연구에서는 청감실험 구성방법에 HMD(head mounted display), HRTF(head related transfer function), HMD+HRTF를 적용 시 소음에 좀 더 민감하게 반응하는 청감방법에 대한 연구를 진행하였다. 바닥충격음 각 주파수 대역별 소음레벨 차이 인지에 대한 연구는 현재 초기 단계로서, 실충격원의 종류(jumping, running)와 주파수별 소음레벨 변화에 따른 재실자 어노이언스 경향성에 대한 연구가 수행되었다⁽¹⁴⁾. Jung, J. H.⁽¹⁵⁾는 고무공충격원의 충격음에 대하여 단일수치 평가방법에 따른 성가심 반응 분석을 연구하였으며 125 Hz와 250 Hz의 저감을 좀 더 재실자가 민감하게 받아들이는 것으로 분석하였다. 기존 연구를 정리해보면 평가방법 간 단일수치 평가량의 차이와 소음레벨 변화에 따른 주관적 분석이 주로 진행되어 왔다. 그러나 이 연구에서 진행하고자 하는 단일수치 평가량에 영향을 주지 않는 주파수 대역에의 충격음 레벨 변화에 대한 재실자의 인지 영향 분석과 관련한 연구는 아직 미진한 것으로 판단된다.

이에 이 연구에서는 동일한 단일수치 평가량을 갖는 다양한 주파수 대역별 충격음레벨 변화 조건의 음원(116개 case)을 대상으로 재실자의 인지반응 변화를 주관적 청감실험에 의해 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 대상 음원

실험에 사용된 reference 음원은 중량 표준충격원 중 실생활 충격음과 좀 더 유사한 고무공충격원(표준중량 충격원2)을 사용하였으며⁽¹⁶⁾, Table 2에서 나타난 현장에서 측정장비(dB4-4ch.; 01 dB)를 통해 레코딩한 음원을 사용하였다. 이 연구에서 사용되는 동일 단일수치 평가량은 63 Hz에서 주로 과도한 충격을 레벨이 나타나는 노후 공동주택 조건을 기준으로 설정하였으며, 노후 공동주택 실태조사 결과(N=214)의 고무공충격원 단일수치 평가량 중위값인 54 dB로 설정하였다⁽¹⁷⁾.

결정주파수(main contribution frequency) 대역은 기준곡선을 8 dB 이상 상회하여 단일수치 값을 결정하는데 주로 기여한 주파수 대역을 의미하며 이 연구에서는 1개의 결정주파수 대역을 갖는 경우를 대상으로 하였다(63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz). 동일한 단일수치 평가량을 지니지만 주파수 대역 특성이 다른 음원 case를 분류하였으며, Table 1에 4개의 결정주파수 대역 중 63 Hz인 경우의 case 분류를 예시로 나타내었다. 변화주파수 대역은 결정주파수 대역을 제외한 나머지 주파수 대역 중 역 A특성 기준곡선의 충격음 레벨보다 낮게 변화시킨 주파수 대역을 의미하며, 1개 혹은 다수의 주파수 대역에서 역 A특성 기준곡선 충격음 레벨 보다 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB 낮게 변화시킨 case로 분류하였다. 변화주파수 대역 변수는 먼저 개수에 따라 분류되며, 개수가 1개인 경우 결정주파수 대역을 제외한 나머지 주파수 대역에서 3개 case가 분류되고(ex. 결정주파수 대역이 63 Hz인 경우 각각 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz가 변화주파수 대역 case), 2개인 경우 3개 case(ex. 결정주파수 대역이 125 Hz인 경우 각각 63 Hz ~ 250 Hz, 63 Hz ~ 500 Hz, 250 Hz ~ 500 Hz가 변화 주파수 대역 case), 3개인 경우는 결정주파수 대역을 제외한 나머지 주파수 대역 모두이기 때문에 1개 case로 분류된다. 이때 결정 또는 변화주파수 대역에 포함되지 않는 주파수 대역은 역 A특성 기준곡선의 충격음 레벨과 동일하게 설정되었다. 이를 취합하면 결정주파수 대역 변수 4개, 변화주파수 대역 변수 7개, 변화량 변수에 의한 4개 분류에 변화주파수 대역이 없는 4개 case를 포함해 총 음원 case는 116개로 분류된다.

Table 1 Example cases of experimental source (main contribution frequency: 63 Hz)

No.	Main contribution frequency [Hz]	Changing frequency [Hz]	Changing value [dB]	Frequency band of sound source [Hz]			
				63	125	250	500
1	63	-	-	85	67	60	54
2		125	3	85	64	60	54
3			5	85	62	60	54
4			7	85	60	60	54
5			9	85	58	60	54
6		250	3	85	67	57	54
7			5	85	67	55	54
8			7	85	67	53	54
9			9	85	67	51	54
10		500	3	85	67	60	51
11			5	85	67	60	49
12			7	85	67	60	47
13			9	85	67	60	45
14		125, 250	3	85	64	57	54
15			5	85	62	55	54
16			7	85	60	53	54
17			9	85	58	51	54
18		125, 500	3	85	64	60	51
19			5	85	62	60	49
20			7	85	60	60	47
21			9	85	58	60	45
22		250, 500	3	85	67	57	51
23			5	85	67	55	49
24			7	85	67	53	47
25			9	85	67	51	45
26		125, 250, 500	3	85	64	57	51
27			5	85	62	55	49
28			7	85	60	53	47
29			9	85	58	51	45

Table 2 Overview of room measuring the sound source

Building type	Apartment
Location	Living room
Floor area	11.23 m ²
Slab thickness	120 mm
Floor finishing	PVC 2 mm
Floor structure	Mortar 45 mm + EPS mixture cement mortar 95 mm
Ceiling	None

2.2 실험방법

(1) 청감실험 개요

주관적 청감실험 평가방법으로는 쌍대비교법 (paired comparison, PC), 강도추정법(magnitude estimation, MD), 7점척도법(semantic differential, SD) 이 사용되었다. 또한 청감실험 구현방법으로 주관적 반응이 최대한 민감하게 나타날 수 있도록 HMD를 활용한 청감실험을 진행하였다. 앞서 설정된 총 116 개 case 음원을 대상으로 문항을 제시하였다. 음원 간 30초 간격을 두어 앞서 음원 case가 영향을 주지 않도록 실험 시나리오를 작성하였으며 무작위(random) 순서로 case를 배치하였다. 실험 구성은 동일한 단일 수치 평가량을 갖는 음원 2개를 paired하여 각각 5회 가진하여 들려주고, 크기 차이 인지에 대한 문항과 어느 음원이 더 큰지 선택하도록 하는 문항을 구성하였다. 피험자의 피로도도 인한 평가결과 영향을 최소화하기 위해 20분 실험 수행 후 10분 휴식의 계획으로 실험이 수행되었다.

실험은 민감도가 기존 방법에 비해서 높다고 연구된 HMD기기를 활용한 실험방법이 사용되었으며, 가상현실 주관적 청감평가의 구성체계 및 실험 프로세스는 Fig. 1과 같다. 사용된 HMD는 무선포립형 6-DOF standalone (oculus quest) HMD이며 실험 환경과 시나리오 및 가상현실 구현을 위해 Unity(ver. 2018)가 사용되었다. 이를 통해 일반 아파트 평면의 거실형태의 가상현실 공간에서 자연스러운 이동과 상부층의 층간소음 음원 재생 및 설문지 작성이 가능하도록 청감 환경을 구축하였으며, oculus quest를 통해 구현 가능하도록 어플리케이션을 제작하였다. HRTF의 설정에는 앞서 Unity 프로그램과 dummy head, HEAD audio-recorder가 사용되었다. 중량충격음 단일수치 평가 시 고려되는 주파수 대역의 충격음레벨

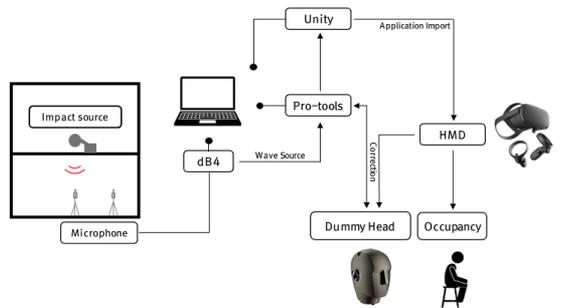


Fig. 1 Auditory experiment method overview

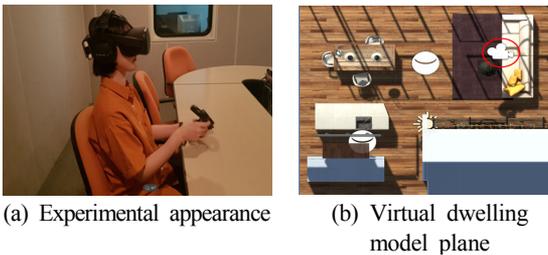
에 대하여 결정주파수 대역 등과 같은 음압레벨 편집에는 Pro-tools (ver. 12)가 활용되었다.

(2) 실험장소

실험장소는 Fig. 2(a)의실에서 진행되었으며, 해당실의 바닥면적은 19.7 m², 체적은 약 63.4 m³이다. 실 표면의 등가흡음계수는 0.84이며 배경소음은 22.6 dBA로 측정되었다. 가상현실 환경은 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 일반적인 거실평면 모델을 구현하여 적용되었으며 어플 실행 시 피험자는 소파의 중앙에서 시작하게 된다. 상부층 음원은 시작지점의 수직방향 위쪽 천장에 고정되어 재생되며, 피험자는 거실 전체를 자유롭게 움직일 수 있다. 실험 시작 전 피험자는 거실을 자유롭게 움직이며 환경에 적응 시간을 가진 이후 다시 시작지점으로 돌아가 청감실험을 시작하게 된다. 청감실험 중 설문 체크는 가상현실 내부에서 oculus quest의 핸드 모듈을 통해 이루어지며 가이드 포인팅을 이용해 체크하는 방식으로 구성되어 있다. Fig. 2(c)는 가상현실 내에서 피험자가 실험 중 마주하게 되는 시야를 보여주고 있다.

2.3 피험대상

청감실험을 진행하기 앞서 청감자에게 기본 설문



(c) Subject vision in virtual reality

Fig. 2 Auditory experiment progress

사항에 대한 조사를 진행하였다. 설문 내용은 각각 성별, 연령, 소음 피해 관련 경험과 본인이 느끼는 청력 민감도 등을 조사하여 Table 3에 나타내었다. 피험 대상은 정상청력을 지닌 만 30세 이하 총 50명을 대상으로 하였으며 만 20세~만 30세 사이에 분포(평균 25.1세)하는 것으로 나타났다. 나이 구간별(20대, 30대, 40대 등)로 성가심 반응에 대한 민감도 차이가 일부 나타나기 때문에 피험 대상을 최대한 동일 나이 구간으로 모집하여 실험을 진행하였다. 성별은 남자가 33명, 여자가 17명으로 구성되었다. 피험자 본인의 청취 민감도는 평균 약 4.5로 “보통이다”와 “약간 그렇다” 사이인 것으로 나타났다. 피험자들의 음악/소음/음향 관련한 경험 여부에서 33명이 경험이 있다고 확인되었으며, 1년 이상~5년 미만의 경험기간 인원

Table 3 Basic survey results

1. Gender						
Men			Women			
33			17			
2. Age						
Younger than 25		25 or older		Average		
21		29		25		
3. How sensitive you are to your listening? (7-point scale)						
Not at all	Slightly	Mildly	Modera-ly	Severely	Very severely	Extreme-ly
0	2	5	18	15	9	1
4. Music or noise related experience (profession, major, etc.)						
Experience			No experience			
33			17			
5. Music or noise related experience period (year)						
Less than 1 year	1 ~ 5		6 ~ 10		More than 10 years	
7	15		6		5	
6. Floor noise or other noise experience						
Experience			No experience			
35			15			
7. Floor noise or other noise experience period (year)						
Less than 1 year	1 ~ 5		6 ~ 10		More than 10 years	
22	8		2		2	
8. Period of wearing headset and earphones (average per day)						
Less than 1 hour		2 ~ 5			More than 5 hours	
30		16			4	

이 15명으로 가장 높았고 1년 미만이 7명, 6년 이상은 11명으로 나타났다. 층간소음 또는 기타소음에 대한 피해 여부는 35명이 경험이 있다고 확인되었으며, 평균 피해기간은 약 1.5년으로 나타났다. 1년 미만의 피해기간이 22명으로 가장 많았고, 1년 이상~5년 미만이 8명, 6년 이상이 4명으로 나타났다. 헤드셋 또는 이어폰의 착용 여부에 대한 설문 결과 50명 모두 경험이 있었으며 하루 평균 2시간 미만의 사용인원은 30명으로 나타났으며 2시간 이상~5시간 미만인 인원은 16명, 5시간 이상 사용 인원은 4명으로 나타났다.

3. 실험 결과 및 고찰

동일한 바닥충격을 차단성능 평가량에서 결정주파수 대역을 제외한 주파수 대역의 충격음레벨 변화 시 재실자의 인지 여부를 분석하였다. 분석방법은 크게 변화주파수 충격음레벨 변화에 따른 인지 비율 분석, 변화주파수 대역 및 개수에 따른 인지 비율 변화, 결정주파수 대역에 따른 인지 비율 변화 세 가지로 구성되었다. 아울러 각각의 분석방법은 적용 개수에 대한 분석을 포함하여 진행되었으며, 인지 비율은 피험 대상 50명 중 크기 차이를 인지한 비율을 의미한다.

3.1 충격음레벨 변화에 따른 인지 비율 분석

전체 case에 대하여 변화주파수 대역의 충격음 레벨 변화량에 따른 인지 비율 결과를 분석하여 Fig. 3에 나타내었다. 해당 case들은 모두 동일한 역 A특성 가중바닥충격음레벨($L'_{i,Fmax,AW}$) 54 dB의 단일수치 평

가량 case이다.

변화주파수 대역의 충격음 레벨 변화량이 증가할수록 피험자의 인지 비율은 증가하는 것으로 나타났으며(결정계수 $R^2 = 0.51$) 변화량의 총합이 10 dB 이하인 경우가 10 dB 이상인 경우보다 변화량 증가에 따른 인지 비율 변화가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 변화량의 합 5 dB 차이만으로도 약 50%가 인지하는 것으로 나타났으며 10 dB인 경우 약 75%가 인지하는 것으로 확인되었다. 결과적으로 동일한 단일수치 평가량에서도 결정주파수 대역 이외의 주파수 대역의 저감 정도에 따라서 재실자가 저감성능에 차이를 인지할 수 있는 것으로 판단된다. 이는 현행 평가방법의 경우 역 A특성곡선을 통해 A가중을 보정하게 되는데, 이때 A가중 시 적용되는 보정수치는 순음을 기준으로 한 청감보정이며 바닥충격음 특성은 단순한 순음형태가 아닌 다양한 주파수 대역의 충격성 복합소음이기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 한편 동일한 충격음 레벨 변화량에 대해서도 인지 비율의 편차가 매우 큰 것으로 나타나, 변화량 변수 이외에도 결정주파수 대역과 변화주파수 대역에 따른 인지 비율 경향에 대한 추가적인 분석이 필요한 것으로 판단된다.

3.2 변화주파수 대역에 따른 인지 비율 변화

63 Hz 결정주파수 대역을 기준으로 변화주파수 대역에 따른 변화량별 인지 비율 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

결정주파수 대역이 63 Hz일 때 변화주파수 대역에서 충격음레벨이 변화되는 경우 변화주파수 대역에 따라

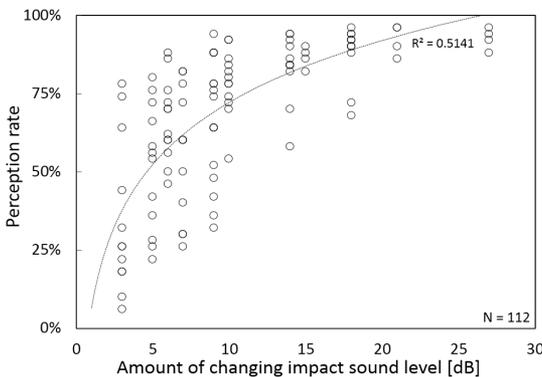


Fig. 3 Perception rate according to the amount of changing impact sound level in the frequency band excluding the main contribution frequency

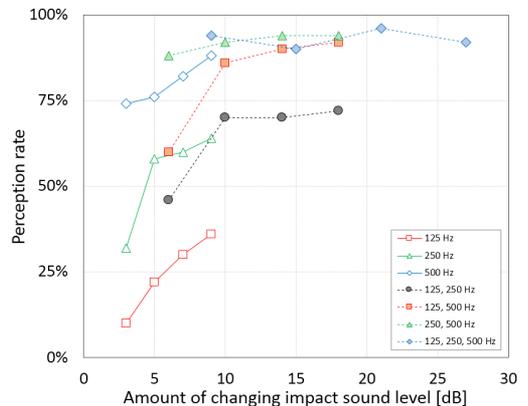


Fig. 4 Perception rate according to the changing frequency band and amount of changing impact sound level (main contribution frequency: 63 Hz)

인지 비율이 다르게 나타났다. 변화주파수 대역이 1개 인 경우 인지 비율은 500 Hz > 250 Hz > 125 Hz 순으로 높았으며 500 Hz에서 5 dB 이상 변화 시 약 75.0% 이상의 높은 인지 비율을 보였다. 반면 125 Hz를 저감할 경우 9 dB를 변화 시 36%의 인지 비율을 보여 변화주파수 대역에 따라 상대적으로 인지 비율의 차이가 나타났다. 변화주파수 대역이 2개인 경우 250 Hz와 500 Hz를 같이 변화시키는 case가 가장 높은 인지 비율을 보였으며 각각 3 dB(총 6 dB)의 변화량 기준으로 인지 비율이 88.0%로 나타났다. 또한 전체 case를 기준으로 각각 5 dB(총 10 dB) 이상 변화 시 최소 70.0% 이상의 인지 비율을 보였다. 3개 변화주파수 대역(125 Hz ~ 250 Hz ~ 500 Hz)을 최소 각각 3 dB(총 9 dB) 변화 시 90.0% 이상의 인지 비율이 나타났다.

전체 결정주파수 대역을 기준으로, 변화주파수 대역에 따른 인지 비율 결과를 주파수 대역 개수별로 분류하여 Fig. 5에 나타내었다. 그래프에서 박스플롯은 각각 중앙값(*m*), 제1사분위수(*Q1*)와 제3사분위수(*Q3*)를 의미하며 극단(최대, 최소) 및 평균을 추가로 나타내었다.

변화주파수 대역 개수가 1개인 경우 주파수 대역은 각각 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz로 분류된다. 500 Hz 대역에서 변화하였을 때 인지 비율이 평균 74.9%로 가장 높게 나타났으며 변화량 및 결정주파수 대역에 따라 64.0% ~ 88.0%로 분포하였다. 63 Hz에서 변화된 경우가 그 다음으로 인지 비율이 높게 나타났으며 변화량 및 결정주파수 대역에 따라 22.0% ~ 54.7%로 분포하였다. 250 Hz에서 변화되는 경우 평균

인지 비율은 45.3%로 나타났고 125 Hz에서 변화되는 경우 25.5%로 가장 낮은 평균 인지 비율을 보였다.

변화주파수 대역이 2개인 경우 주파수 대역 case는 63 Hz ~ 125 Hz, 63 Hz ~ 250 Hz, 63 Hz ~ 500 Hz, 125 Hz ~ 250 Hz, 125 Hz ~ 500 Hz, 250 Hz ~ 500 Hz, 총 6개 case로 나뉜다. 앞서 단일 변화주파수 대역 결과와 비슷한 경향성을 보였으며, 500 Hz가 포함된 63 Hz ~ 500 Hz, 125 Hz ~ 500 Hz, 250 Hz ~ 500 Hz의 변화주파수 대역 case가 각각 평균 인지 비율 88.5%, 81.3%, 87.5%로 다른 case와 대비해 상대적으로 높게 나타났다. 63 Hz가 포함된 63 Hz ~ 125 Hz, 63 Hz ~ 250 Hz의 case는 77.8%, 78.8%로 나타나 다음으로 높은 평균 인지 비율을 보였으며 125 Hz ~ 500 Hz 변화주파수 대역 case의 경우 가장 낮은 61.0%의 평균 인지 비율이 나타났다.

변화주파수 대역이 3개인 경우 전체적으로 앞서 단일 및 2개 변화주파수 대역에서의 인지 비율보다 평균적으로 높은 인지 비율을 보이는 것으로 분석되었으며 4개 case의 변화주파수 대역에서 모두 평균 80.0% 이상의 인지 비율을 보였다. 125 Hz ~ 250 Hz 대역에서 변화되는 경우 인지 비율이 가장 높게 나타났으며 이때 인지 비율 평균은 약 93.0%로 분석되었다. 63 Hz ~ 125 Hz ~ 250 Hz 주파수 대역이 변화되는 경우 가장 인지 비율이 낮게 나타났으며 평균 약 81.0%로 나타났다.

결과적으로 변화되는 주파수 대역에 따라 충격음 레벨 변화를 인지하는 비율에 차이가 나타났고 특히 500 Hz 대역과 63 Hz 대역에서의 변화에 대한 인지

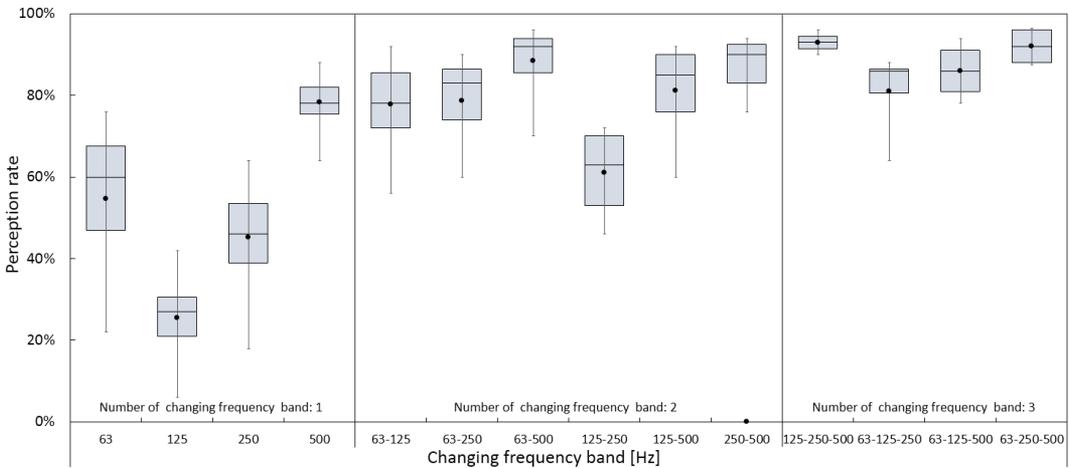


Fig. 5 Perception rate according to the number of changing frequency bands

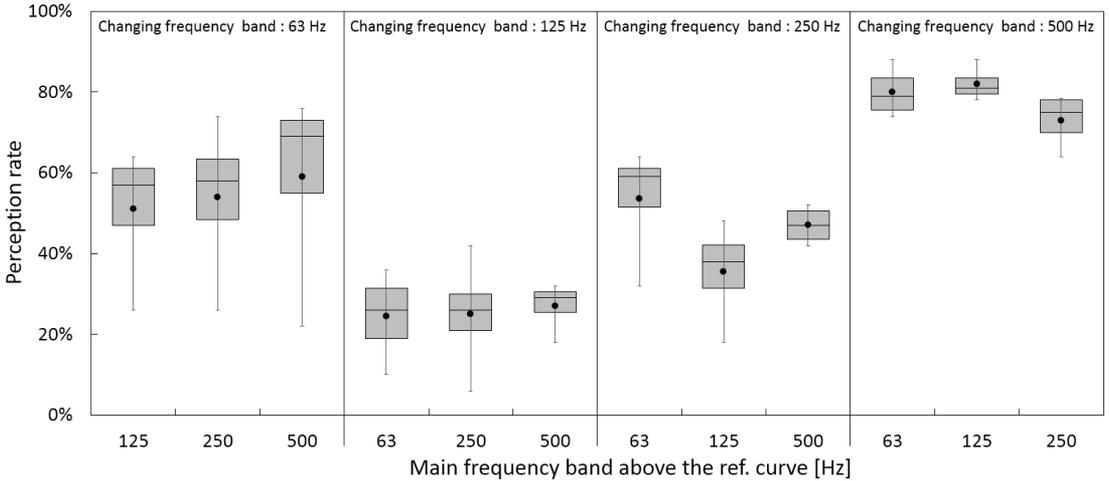


Fig. 6 Perception rate according to the main contribution frequency band

비율이 높게 나타났다. 이는 500 Hz의 경우 실생활에서 가장 빈번하게 들리는 주파수대역이기 때문으로 사료되며 63 Hz는 진동체감이 가장 높게 나타나는 저주파수 대역 범위에 속하기 때문으로 판단된다.

3.3 결정주파수 대역에 따른 인지 비율 변화

결정주파수 대역에 따른 인지 비율 변화를 단일 변화주파수 대역을 기준으로 Fig. 6에 나타내었다. 변화주파수 대역은 63 Hz로 동일하지만 결정주파수 대역 (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz)이 각각 다른 경우 결정주파수 대역에 따른 인지 비율은 각각 평균 51.0%, 54.0%, 59.0%로 나타났다. 변화주파수 대역이 125 Hz인 경우 결정주파수 대역(63 Hz, 250 Hz, 500 Hz)에 따라 인지 비율이 24.5%, 25.0%, 27.0%로 나타났으며 250 Hz인 경우 53.5%, 35.5%, 47.0%, 500 Hz의 경우 80.0%, 82.0%, 73.0%로 분포하였다. 변화주파수 대역이 250 Hz로 동일한 경우 결정주파수에 따른 인지 비율 차이의 범위가 약 18%로 나타났으나 이를 제외한 63 Hz, 125 Hz, 500 Hz의 변화주파수 대역에서는 결정주파수 대역에 따른 인지 비율 차이의 범위가 약 10% 이내로 나타났다. 결과적으로 결정주파수 대역 변수에 따른 인지 비율 영향은 변화주파수 대역의 변화보다 상대적으로 미미한 것으로 분석되었다.

4. 결 론

동일한 단일수치 평가량을 갖지만 역 A특성 기준곡

선을 결정주파수 대역 외의 주파수 대역에서 차이를 갖는 중량충격음원에 대하여 채실자의 충격음 레벨 변화 인지 여부를 주관적 청감실험을 통해 평가하였다.

연구의 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 동일한 단일수치 평가량에서도 결정주파수 대역 이외의 주파수 대역에서 변화가 있는 경우 채실자가 충격음 레벨 차이를 인지하는 것으로 나타났다. 변화량의 총합이 5 dB인 경우 피험자 중 약 50%의 인원이 차이를 인지하였으며 10 dB인 경우 약 75% 이상이 차이를 인지하였다. 이러한 결과는 바닥충격음이 단순한 순음형태가 아닌 다양한 주파수 대역의 충격성 복합소음의 특성을 지니기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

(2) 변화되는 주파수 대역에 따라 충격음 레벨 변화를 인지하는 비율에 차이가 나타났고(500 Hz > 63 Hz > 250 Hz > 125 Hz) 특히 500 Hz 대역과 63 Hz 대역에서 민감하게 나타났다.

(3) 결정주파수 대역에 따른 인지 비율 차이는 약 10% 이내로 나타나 변화주파수 대역에 따른 차이보다 상대적으로 영향이 적은 것으로 나타났다.

튼바닥 시공 시 발생하는 바닥충격음 레벨 특성과 천장구조 등의 소수선에 의한 저감 주파수 대역을 고려할 때 63 Hz 대역의 충격음 레벨에 의존적인 현행 평가방법의 개선 방향이 향후 면밀하게 검토될 필요가 있다. 향후 낮은 단일수치를 갖지만 125 Hz 이상의 충격음 레벨은 역 A특성 기준곡선에 가까운 음원과 높은

단일수치를 갖지만 125 Hz 이상의 충격음 레벨은 기준곡선보다 저감된 주파수 특성의 음원간의 추가적인 평가심 비교 청감연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2019년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었음.

References

(1) Shin, H. and Kook, C., 2010, A Study on the Current Status Analysis of Insulation Performance of Heavy-weight Floor Impact Sound based on the Field Test Data in Apartment houses, Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea, Vol. 12, No. 3, pp. 237~244.

(2) Kang, M. W., Lee, K. W., Song, M. J., Lee, N. S. and Oh, Y. K., 2015, Effects of Specific Frequency Bands of Heavy Weight Floor Impact sound on the Single Number Rating Value, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 157~162.

(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) Kim, K. W. et. al., 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.

(5) Jung, H. W. et. al., 2002, A Study on the Reduction Characteristics of Floor Impact Sound Insulation Due to the Ceiling Frame Structures in Apartment Houses, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 8, pp. 573~580.

(6) Kim, S. T., Cho, H. M. and Kim, M. J., 2019, Study on Improvement of Floor Impact Sound Insulation Performance in Repairing Floor Layers of Aged Apartment, Transactions of the Korean Society for Noise

and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 206~215.

(7) Ryu, J., Song, H. and Kim, Y., 2018, Effect of the Suspended Ceiling with Low-frequency Resonant Panel Absorber on Heavyweight Floor Impact Sound in the Building, Building and Environment, Vol. 139, pp. 1~7.

(8) Korean Agency for Technology and Standards, 2017, Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and of Buildings Elements - Part 1: Floor Impact Insulation against Standard Light Impact Source, KS F 2863-1.

(9) Korean Agency for Technology and Standards, 2017, Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and of Buildings Elements - Part 2: Floor Impact Insulation against Standard Heavy Impact Source. KS F 2863-2.

(10) Song, M. J. Song, H., Lee, T. K., Gi, N. G., Park, H. G. and Kim, S. W., 2004, Survey on the Proper Vocabularies for Evaluating Floor Impact Sound in Apartment Houses, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 20, No. 5, pp. 179~184.

(11) Yang, W. Y. and Moon, H. J., Combined Effects of Acoustic, Thermal, and Illumination Conditions on the Comfort of Discrete Senses and Overall Indoor Environment, Building and Environment, Vol. 148, pp. 623~633.

(12) Kim, J. H., Ryu, J. K. and Jeon, J. Y., 2013, Effect of Temporal Decay on Perception of Heavy-weight Floor Impact Sounds, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 134, No. 4, pp. 2730~2738.

(13) Jo, H. I. and Jeon, J. Y., 2019, Downstairs Resident Classification Characteristics for Upstairs Walking Vibration Noise in an Apartment Building under Virtual Reality Environment, Building and Environment, Vol. 150, pp. 21~32.

(14) Jung, J. H. and Lee, S. C., 2017, A Study on the Subjective Loudness Responses on Octave-band Level Varied Floor Impact Sound, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 107~112.

(15) Jung, J. H., 2017, Comparison between Subjective Evaluation Results of Frequency Component

Varied Rubber Impact Sound and Single Numerical Quantities, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 11, No. 6, pp. 517~526.

(16) Yeon, J. O., Kim, M. J. and Lee, S. C., 2018, Evaluation Methods of Transmitted Impact Sound Reduction by Floor Covering Materials Using Real Impact Source and Heavy-weight Impact Sound, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 361~372.

(17) Kim, Y. H., 2018, Current Status of Floor Impact Noise for Aged Apartment Houses, *Journal of KSNVE*, Vol. 28, No. 2, pp. 7~10.



Hyun-Min Cho received the B.S., M.S. and Ph.D. in Dept. of architectural engineering from University of Seoul, Seoul, Korea in 2013, 2015, and 2020, respectively. He is currently a postdoctoral researcher in the Dept. of Architectural Engineering at University of Seoul. His research interests are in the area floor impact noise and sound insulation in buildings.



Sin-Tae Kim received M.S. from Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul in 2020. He is a Ph.D. student at the Dept. of Architecture Engineering, University of Seoul. His research interests are in the area of acoustic performance in classroom and floor impact sound in buildings.



Myung-Jun Kim received the B.S., M.S. and Ph.D. in Dept. of architectural engineering from Hanyang University, Seoul, Korea in 1987, 1989, and 1999, respectively. He is currently a professor in the Dept. of Architectural Engineering at University of Seoul. His research interests are in the area of architectural acoustics and sound insulation in buildings.

호모토피법을 이용한 압축센싱 기반 음원위치추정 알고리즘의 개선

Improvement of Compressive-sensing Based Sound Source Localization by Using Homotopy Method

김 용 현* · 이 정 훈†
Yong-Hyun Kim and Jeung-Hoon Lee†

(Received May 11, 2020 ; Revised June 10, 2020 ; Accepted July 20, 2020)

Key Words : Compressive Sensing(압축센싱), Source Localization(음원위치추정), Iterative Hard Thresholding(IHT 알고리즘), Homotopy Method(호모토피법)

ABSTRACT

The iterative hard thresholding (IHT) algorithm is a popular approach for solving compressive-sensing based sound source localization. However, IHT has major drawbacks, such as excessive iterations, or failure to converge if the algorithm step size is inappropriate. In this study, a simple yet effective counteraction is proposed by employing the homotopy method, which adaptively calculates the step size with guaranteed convergence. This leads to the enhancing of the speed of the IHT with stable convergence. The proposed method is verified through simulation and experiment, and demonstrates 24 % reduction in computation time.

1. 서 론

음향지도(acoustic map)를 이용하여 음원의 위치를 특정하고 가시화하는 기법은 기계진단을 포함한 다양한 분야에서 효과적으로 활용되고 있다⁽¹⁻³⁾. 청음센서 배열을 통해 비교적 빠른 속도로 구현 가능한 빔형성 (beamforming) 기법을 고려할 수 있으나, 낮은 공간 해상도, 허상음원(ghost source) 출현 등의 제한 사항이 있으며^(4,5), 이를 보완할 수 있는 여러 기법이 활발히 개발 중에 있다.

최근 음원위치추정 분야에서 주목받는 압축센싱 (compressive sensing)⁽⁶⁾ 기법은, 역문제 $y=Ax$ 에서

만약 해 x 가 희소벡터(sparse vector)이고 선형변환행렬 A 가 제한등방성(restricted isometry property, RIP)⁽⁷⁾이라는 기준을 만족하면, 최적화 기법을 통해 관측치 y 로부터 x 를 구할 수 있는 방법이다. 종래의 빔형성 기법보다 소수의 청음센서만으로 고해상도의 음원위치추정 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으며, 초음파 영상⁽⁸⁾, 레이더 탐지⁽⁹⁾ 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

압축센싱 기반 음원위치추정 알고리즘은 크게 3가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 선형계획법 또는 이차계획법 등을 통해 다항시간(polynomial time) 내에 해를 구할 수 있는 기저추적(basis pursuit)⁽¹⁰⁾이다. 볼록 최적화(convex optimization) 기법을 이용하기 때문에 해가 국소적으로 수렴하지 않고 항상 전역해

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Professor
E-mail : jhoonlee@changwon.ac.kr

* Member, Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Student

A part of this paper was presented at the KSNVE 2019 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jae Young Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

(global solution)를 찾는 장점이 있지만, 계산속도가 상대적으로 느린 단점이 있다.

두 번째는 탐욕 알고리즘(greedy algorithm)이며, 각 단계별 임기응변적인 최적해를 선택함으로써 결국에는 전역 최적해에 이르기 기대하는 방법을 사용 하기에 ‘탐욕’이라는 용어가 사용된다. 대표적으로는 orthogonal matching pursuit (OMP)나 호모토피법 (homotopy method) 등이 있다⁽¹¹⁾. 역행렬 계산을 포함 하므로 계산비용이 큰 단점이 있지만, 잔차상관 (residual correlation)의 값이 가장 큰 요소부터 순차적 으로 최적화하기에 반복계산 횟수가 적은 장점이 있다.

세 번째는 threshoding based method (TBM)이다. TBM은 고정점 반복법(fixed point iteration)을 기본 으로 해를 근사하며, 대표적인 알고리즘으로는 iterative hard threshoding (IHT)⁽¹²⁾이 있다. 사전 설정 한 종료조건을 만족할 때까지 \mathbf{x} 의 지지집합(support set)을 반복 갱신하여 해를 추정하는 점에서 탐욕 알고리즘과 유사하나, 역행렬과 같이 복잡한 계산과정이 없어 상대적으로 계산비용이 낮다. 그러나 많은 반복계산을 요구하는 단점이 존재하며, 알고리즘의 수렴성을 결정짓는 스텝크기(step size)에 그 원인이 있다. 이를 해결하고자 스텝크기를 자동 결정하는 선행연구⁽¹³⁾가 있었으나, 여전히 많은 반복계산 횟수를 요구하였다.

이 연구에서는 비교적 구현이 간편하며 계산량 측면에서도 이득이 있는 IHT를 음원추정의 기본 알고리즘으로 사용하되, 스텝크기 결정과 관련한 기존의 문제점을 호모토피법으로부터 착안하여 개선하고자 하였다. 언급한 바와 같이 탐욕 알고리즘의 일종인 호모토피법⁽¹⁴⁾은 l_1 -norm 최소화 문제에 라그랑주 승수법(lagrange multiplier method)⁽¹⁵⁾을 적용한 목적함수를 통해 해를 추정한다. 라그랑주 승수가 0으로 수렴하면 이에 대응하는 해가 l_1 -norm 최소화 문제의 해와 같아지는 점이 핵심이며, 호모토피법은 보장된 수렴성을 바탕으로 스텝크기를 자동 결정하는 장점을 가지고 있다. 이를 기존 IHT 알고리즘에 적용한 결과 계산시간을 24% 가량 저감할 수 있었고, 이후 내용을 통해 상술하도록 한다.

이 연구는 총 4장으로 구성되어 있다. 2장에서는 압축센싱 및 제안 알고리즘에 대해 설명하였고, 3장에서는 모사 및 실제 실험을 통해 제안 알고리즘을 검증하였다. 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

2. 관련 이론

2.1 압축센싱

압축센싱의 정식화는 단극음원을 기반으로 한 등가음원법(equivalent source method)으로부터 출발한다. 즉, 음장(sound field)을 여러 개의 단극음원에서 방사되는 파(wave)의 조합으로 근사한다. Fig. 1과 같이, 어떤 관심공간 내 음장이 N 개의 등가음원으로 구성되어 있다고 가정하자. 이때 $m(=1, 2, \dots, M)$ 번째 센서에서 측정되는 음압값 y_m 은 그린 함수(green function)⁽¹⁶⁾를 통해 주파수 영역에서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_m = \sum_{n=1}^N \frac{e^{-jkr_{mn}}}{4\pi r_{mn}} x_n \tag{1}$$

여기서 x_n [Pa · m]은 n 번째 등가 음원의 강도를 나타 내고, r_{mn} [m]은 n 번째 등가 음원과 m 번째 센서 사이의 거리이며, $k(=2\pi f/c)$ [1/m]는 주파수 f [Hz]에 해당하는 파수를 나타낸다. 단, $c=343$ [m/s]는 음속을 의미한다. 식 (1)을 M 개의 배열 센서에 대하여 확장하면, 관측벡터(measurement vector) $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^M$ 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \frac{1}{4\pi} \begin{bmatrix} e^{-jkr_{11}} & \dots & e^{-jkr_{1N}} \\ r_{11} & \ddots & r_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-jkr_{M1}} & \dots & e^{-jkr_{MN}} \\ r_{M1} & \dots & r_{MN} \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \tag{2}$$

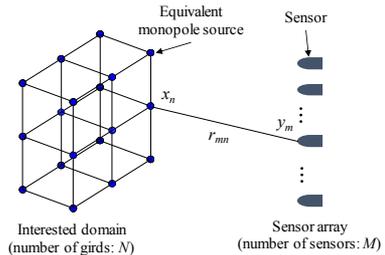


Fig. 1 Distribution of N equivalent monopole sources in the interested domain. n -th equivalent source with strength x_n is located at each grid point. m -th sensor in the array receives the signal y_m

여기서 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 은 관측행렬(measurement matrix)이라고 한다.

그러나 실제 환경에서의 계측은 다양한 원인으로 유발된 잡음의 영향을 포함하기 때문에, 식 (2)를 일변화하면 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{e} \tag{3}$$

여기서 $\mathbf{e} = [e_1, \dots, e_n]^T \in \mathbb{C}^M$ 은 서로 상관관계가 없는 요소로 구성된 가우시안(gaussian) 잡음벡터이며, 위 첨자 T 는 전치(transpose)를 의미한다.

일반적으로 관심 공간 내 등가 음원의 개수 N 은 배열 센서의 개수 M 보다 크기($M < N$) 때문에, 식 (3)의 관측행렬 \mathbf{A} 는 미지수의 개수(N)가 식의 개수(M)보다 많은 부족결정 시스템(underdetermined system)을 구성하게 된다. 따라서 무한가지 경우의 해를 가지게 되나, 만약 실 음원의 개수 s 가 등가 음원의 개수 N 보다 매우 작다면($s \ll N$), 해 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^N$ 는 대부분의 요소가 0 또는 0에 가까운 값을 가지는 희소벡터(sparse vector)로 볼 수 있으며, 식 (4)와 같은 l_0 -norm 최소화 문제를 통해 해를 구할 수 있다.

$$\min \|\mathbf{x}\|_0 \quad \text{subject to } \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2 \leq \varepsilon \tag{4}$$

여기서 l_0 -norm $\|\mathbf{x}\|_0$ 은 0이 아닌 요소의 개수를 나타내며, l_2 -norm은 $\|\mathbf{x}\|_2 = (\sum x_n^2)^{1/2}$ 이고, ε 는 잡음벡터 \mathbf{e} 의 l_2 -norm을 나타낸다.

그러나 식 (4)의 최소화 문제는 NP-hard(Non-deterministic Polynomial-time hard) 문제에 해당하기에 사실상 계산이 불가능함이 알려져 있다⁽¹⁷⁾. 따라서 서론에서 언급한 바와 같이 볼록완화(convex relaxation)를 이용한 l_1 -norm 최소화 문제(또는 기저추적이라고도 한다.)로 식 (4)를 근사하거나, OMP나 IHT 등을 통해 \mathbf{x} 의 지지집합을 반복 갱신하여 해를 추정하게 된다.

2.2 알고리즘

(1) Iterative Hard Thresholding

탐욕 알고리즘과 달리 IHT는 역행렬 계산이 불필요하여 상대적으로 적은 계산비용으로 해를 구할 수 있는 알고리즘으로, $\mathbf{x}^{[0]} = \mathbf{0}$ 에서 시작하여 식 (5)와 같은 갱신 과정을 통해 해를 구한다.

$$\mathbf{x}^{[i+1]} = H_s(\mathbf{x}^{[i]} + \mu \mathbf{A}^T(\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}^{[i]})) \tag{5}$$

여기서 H_s 는 hard thresholding operator로, 요소의 절댓값이 가장 큰 s 개의 요소를 제외한 나머지를 0으로 치환하는 연산자, $\mathbf{x}^{[i]}$ 는 i 번째 반복(혹은 갱신)에서 얻은 해, 그리고 μ 는 스텝크기를 나타낸다.

식 (5)의 갱신은 종료조건을 만족할 때까지 반복되며, 식 (3)과 같이 잡음이 포함된 환경에서는 일반적으로 $\|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2 \leq \varepsilon(\varepsilon > 0)$ 을 사용한다.

이때 μ 는 통상적으로 사용자가 직접 설정하나, 적절한 값이 지정되지 않을 경우 해가 발산하거나, 혹은 수렴을 위한 반복 횟수가 급격히 증가할 수 있다. 이를 해결하고자 Blumensath, T. et al.⁽¹³⁾은 식 (6)과 같이 해가 발산하지 않는 μ 의 자동 결정법을 제안하였으나, 여전히 많은 반복계산 횟수가 필요하였다. 이 연구에서는 식 (6)을 사용하는 IHT를 기존 알고리즘으로써 고려하기로 한다.

$$\mu = \frac{\mathbf{c}_s^T \mathbf{c}_s}{\mathbf{c}_s^T \mathbf{A}_s^T \mathbf{A}_s \mathbf{c}_s} \tag{6}$$

여기서 $\mathbf{c} (= \mathbf{A}^T(\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}))$ 는 잔차상관이며, 아래 첨자 S 는 지지집합을 나타낸다.

(2) 호모토피법을 이용한 스텝크기 μ 의 결정

호모토피법⁽¹⁵⁾은 l_1 -norm 최소화 문제에 라그랑주 승수법을 적용한 목적함수를 이용하며, 목적함수의 미분항을 반복 갱신함으로써 해를 추정한다. 호모토피법의 갱신 과정은 크게 방향벡터의 계산, 스텝크기의 결정, 지지집합의 갱신, 해 벡터의 갱신 및 종료조건 확인의 4가지 단계로 구분할 수 있으며, 알고리즘의 자세한 구조는 Qi, C. et al.⁽¹⁴⁾을 참조하기 바란다.

이 연구에서 제안하는 알고리즘은 IHT 및 호모토피법의 갱신 과정이 경사 하강법(gradient descent)과 같은 전형적인 최적화 기법의 방법과 유사한 점을 미루어, 식 (7)을 이용하여 IHT 알고리즘의 스텝크기 μ 를 자동으로 결정하고자 하였다.

$$\mu = \min \{ \gamma \mathbf{d}^{[i]} \otimes \mathbf{A}^T(\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}^{[i]}) \} \tag{7}$$

여기서 \otimes 은 요소별 나눗셈(Hadamard division)⁽¹⁸⁾을 수행하는 연산자이다. 또한, γ 와 \mathbf{d} 는 각각 호모토피법에서의 스텝크기와 방향 벡터를 나타내며, 부록에 그 산출법을 다루었다.

기존 IHT⁽¹³⁾와 제안 알고리즘의 반복계산 횟수를

비교하기 위해 $M=3$, $N=6$ 의 관측행렬 \mathbf{A} 와 $s=2$ 의 해 벡터 $\mathbf{x}=[1, -1, 0, 0, 0, 0]^T$ 을 예로 고려하자. \mathbf{A} 의 요소는 가우시안 정규분포(gaussian distribution)를 통해 생성하였고, 종료조건은 ϵ 는 잡음벡터 \mathbf{e} 의 l_2 -norm을 고려하여 10^{-6} 으로 설정하였다.

Fig. 2에는 반복에 따른 알고리즘별 스텝크기를 비

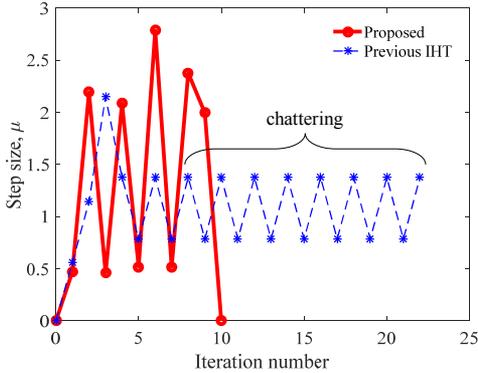
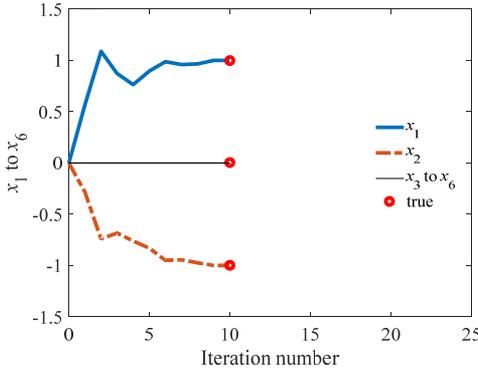
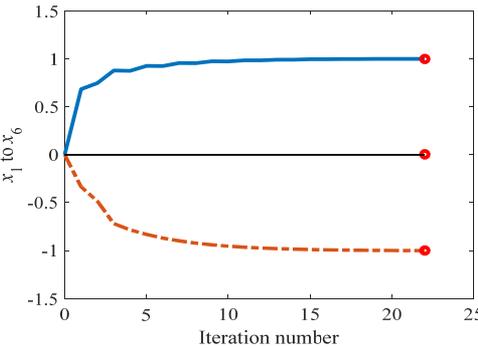


Fig. 2 Comparison of the step size between the proposed- and previous algorithm in simulation



(a) Proposed algorithm



(b) Previous algorithm

Fig. 3 Solution path of the algorithm

교하였다. 기존 IHT는 해가 수렴할 때까지, 다시 말해서 종료조건을 만족할 때까지 22회의 반복계산 횟수가 필요하였고, 제안 알고리즘은 10회 만에 수렴한 것을 알 수 있다. 구체적으로, 기존 IHT의 경우(점선) 일정한 스텝크기의 증감이 반복되는 채터링(chattering) 현상이 나타난 반면, 제안 알고리즘(실선)에서는 비교적 큰 폭의 스텝크기 변화가 나타났으며 채터링 현상이 발생하지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 3에는 추정된 해의 경로(solution path)를 도시하였고, 좌측에는 제안 알고리즘, 우측에는 기존 알고리즘의 결과를 나타내었다. 앞서의 이유로 기존 알고리즘의 경우 수렴이 더딘 편이나, 제안 알고리즘의 해는 상대적으로 크게 변화하여 빠르게 수렴하였음을 알 수 있다.

기존 IHT 알고리즘에서 발생하는 채터링의 제거를 통해 해의 수렴성을 촉진함을 강조할 수 있으며, 더 나아가 계산시간의 저감이 가능함을 기대할 수 있다. 단, IHT에서의 채터링 발생 원인 규명에 대해서는 추가 연구를 수행하고 있다.

3. 모사 및 실제 실험

3.1 모사실험 환경 및 결과

음원의 형태는 크게 3가지로 구분할 수 있으며, 모든 방향으로 균일한 음을 방사하는 점음원(point source), 무한개의 점음원이 직선의 형태로 분포하는 선음원(line source), 그리고 2차원 평면의 형태를 가지는 면음원(surface source) 등이 있다. 이 연구에서는 하나의 음원을 관심공간 내 하나의 격자점으로 표

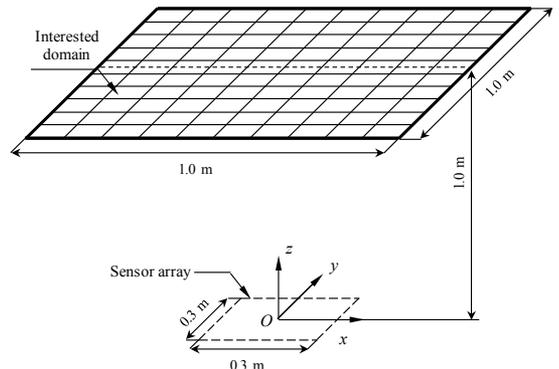


Fig. 4 Schematic drawing for the arrangement of interested domain and the sensor array

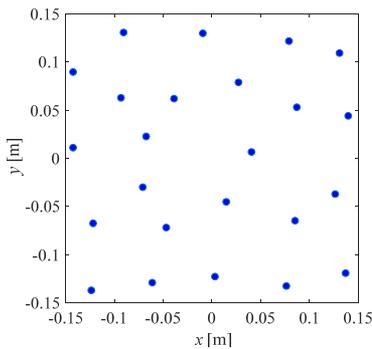
현 가능한 점음원에 대해서만 고려하기로 한다.

Fig. 4에는 제안 알고리즘의 검증을 위한 모사실험의 조건을 나타내었다. 센서 배열의 중심을 좌표계의 원점으로 설정하였고, 원점에서 z-축 방향으로 1.0 m 떨어진 1.0×1.0 m²의 영역을 5 mm 간격의 441개 격자로 분할하여 관측공간으로 지정하였다. 센서 배열에는 Fig. 5(a)와 같이 24개의 센서를 사용하여 랜덤한 배열을 구성하였고, 이로부터 M=24, N=441인 관측행렬 A를 생성하였다. 관측행렬 A의 RIP 조건 부합⁽⁷⁾에 대한 분석을 0 kHz ~ 12 kHz 주파수 대역에 사진 수행하였고, 분석 결과로부터 candes criteria⁽⁷⁾를 만족하는 주파수 대역은 5 kHz ~ 12 kHz로 나타났다. 이는 생성된 관측행렬 A, 다시 말해 현 실험조건에서 추정 가능한 음원의 주파수 대역이 5 kHz ~ 12 kHz임을 의미하며, 음원의 하나 또는 여러 주파수 성분이 해당 대역에 속하면 제안 알고리즘을 주파수 별로 반복 적용함으로써 음원위치추정이 가능함을 나타낸다. 여기서는 8 kHz의 순음(pure tone)을 음원의 주파수로 선정하였다.

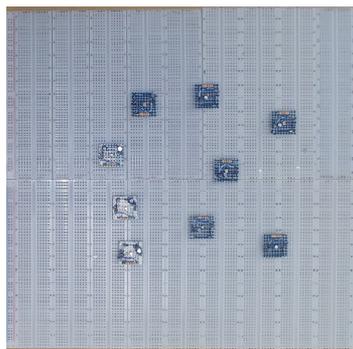
Table 1에는 기존 IHT와 제안 알고리즘의 성능 비교를 위한 실험조건을 나타내었다. 음원 개수 s를 1에서 8까지 증가시키며 위치추정을 1000회씩 반복

Table 1 Conditions of simulation

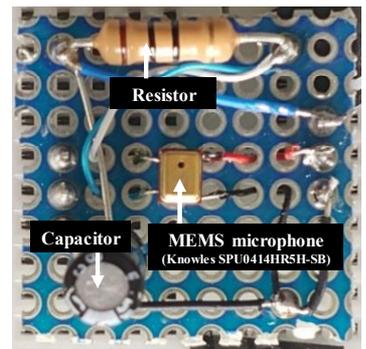
Number of sources	1 to 8
Source position	Random
Source strength	Identical
Frequency of source	8 kHz
Number of simulation	1000 (in each case)



(a) Simulation



(b) Experiment



(c) The microphone

Fig. 5 The random sensor array used in anti-aliasing low pass filter

수행하였으며, 이때 음원 위치는 각 시행마다 무작위로 지정하였고, 음원의 강도는 모든 시행에 걸쳐 동일하게 유지하였다.

Fig. 6에는 모사실험 결과를 나타내었다. 각 그림의 x-축은 음원 개수 s를 센서 개수 M으로 정규화한 상대 음원수를 뜻하며, 제안 알고리즘(실선)과 기존 IHT⁽¹³⁾(점선)의 결과를 동시에 비교하였다. 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)가 10 dB로 비교적 높은 환경(Fig. 6(a))과 0 dB로 낮은 환경(Fig. 6(b))에 대해, 그림의 좌측에는 반복계산 횟수의 평균을, 우측에는 복구 오차율 ψ의 평균을 도시하였다. 단, 복구 오차율 ψ는 식 (8)과 같다.

$$\psi = \sqrt{\frac{\left(\frac{\|x_i - x_e\|_2^2}{4\|x_i\|_2^2} \right)}{}} \tag{8}$$

여기서 아래 첨자 i와 e는 각각 참값과 추정치를 의미한다.

제안 및 기존 알고리즘의 반복계산 횟수와 복구 오차율 ψ는 음원 개수 s가 증가할수록 비례하는 경향을 띠었다. 이는 음원이 많아질수록 음원위치추정에 필요한 반복계산 횟수, 즉 계산시간(혹은 계산비용)이 증가하며 해가 수렴하였어도 실제와는 다른 위치를 추정했을 가능성이 크음을 의미한다. 그러나 제안 알고리즘의 결과(실선)는 높은 SNR 환경(Fig. 6(a))에서 반복계산 횟수가 기존 IHT(점선) 대비 약 50% 감소한 것을 알 수 있다. SNR과 무관하게 복구 오차율 ψ가 유사한 점을 미루어 동일 환경에서 제안 알고리즘은 기존보다 2배 빠르게 수렴한다고 볼 수 있으며, IHT 알고리즘의 계산시간 단축이 가능함을 다시 확

인하였다. SNR이 상대적으로 열악한 환경(Fig. 6(b))에서는 알고리즘의 개선 효과가 반감되기는 하나, 여전히 기존 대비 성능 우위에 있음을 알 수 있다.

3.2 실제실험 환경 및 결과

알고리즘 개선 효과는 상대 음원수(s/M)가 0.2 이상에서 급격하게 확대됨을 모사실험을 통해 볼 수 있었다. 이를 실제실험을 통해 검증하기 위해, 3(= s)개의 스피커 (SONY SRS-XB10)를 음원으로 사용하였고, 9(= M)개의 마이크로폰 유닛으로 구성된 센서 배열(Fig. 5(b))을 구성하였다. 각 유닛은 MEMS 마이크로폰(Knowles SPU0414HR5H-SB)과 고주파 잡음의 영향 억제를 위한 아날로그 안티 에일리어싱 필터(analogue anti-aliasing filter)의 조합으로 구성되어 있다(Fig. 5(c)).

모사실험의 경우와 마찬가지로 관측행렬 A의 RIP 조건에 대한 만족 여부를 사전 검토하였으며, candes criteria를 만족하는 주파수 대역 7 kHz ~ 12 kHz 중 8 kHz의 순음을 음원의 주파수로 선정하였다. Fig. 7에는 스피커 3개를 배치했을 때 각 배열 센서에서 계측된 신호의 평균 파워 스펙트럼을 도시하였고, 주파수 분해능 25 Hz, 해닝 창문함수(hanning window function),

75 %의 오버랩(overlapping)을 적용하여 계산하였다. 안티 에일리어싱 필터를 통해 고조파(harmonic) 성분이 어느 정도 억제된 것을 알 수 있으며, 8 kHz 부근에서 약 63 dB의 피크가 나타났다.

Table 2에는 실제실험의 조건을 나타내었다. 스피커의 음량을 조절하여 음원의 강도를 가급적 동일하게 유지하였으며, 모든 실험에 대해 샘플링 주파수 25.6 kHz로 신호를 수집하였다. 음원의 개수가 2개, 그리고 3개인 경우로 나누어 각각 30회씩 위치 추정을 반복하였으며, 이때 음원의 위치는 각 시행마다 임의로 배치하였다.

중요조건과 관련한 ϵ 은 정규화 요소(regularization parameter)의 역할을 하며 그 값에 따라 추정결과가

Table 2 Conditions of experiment

Number of sources	2 and 3
Source position	Random
Frequency of source	8 kHz
Sampling frequency	25.6 kHz
Number of experiment	30 (in each case)

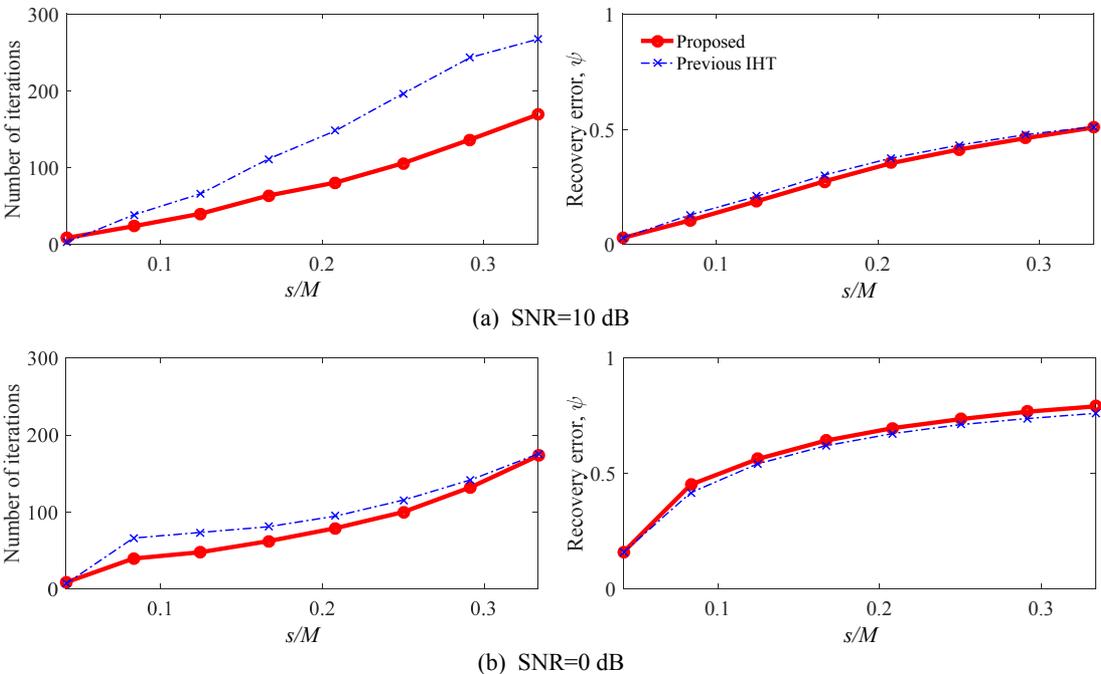


Fig. 6 Comparison of the number of iterations (left) and recovery error (right) between the proposed- and previous algorithm

Table 3 Comparison of the number of iterations and computing time between the proposed- and previous algorithm

Number of sources	Algorithm	Number of iterations		Computing time [s]	
		Mean	Reduction rate [%]	Mean	Reduction rate [%]
2	Proposed	61	35.8	0.061	24.7
	Previous	95		0.081	
3	Proposed	220	27.6	0.092	23.3
	Previous	304		0.120	

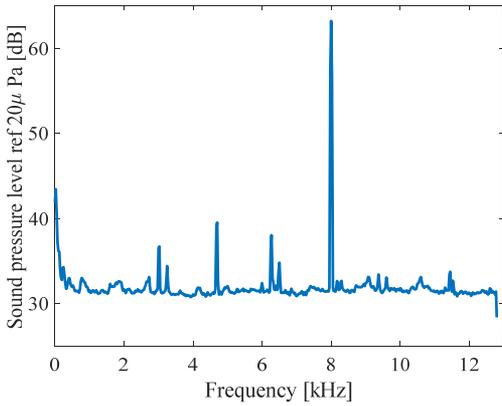


Fig. 7 Averaged power spectrum of measurement signal

크게 달라질 수 있다. 잡음의 l_2 -norm으로부터 적절한 값을 선정함이 바람직하나, 모사실험과 달리 실제 환경에서는 잡음의 특성을 알 수 없다. 여기서는 시행착오적으로 여러 ϵ 값을 시도한 결과 10^{-6} 으로 결정하였다. 참고로, 제시된 값에서 상당 정도의 변화가 있더라도 추정결과에는 큰 변화가 없었다.

Table 3에는 음원 개수별로 두 성능지표에 대한 결과를 정리하였다. 제안 알고리즘의 평균 반복계산 횟수와 평균 계산시간은 기존 IHT 대비 음원의 개수가 2개일 때 각각 35.8%, 24.7%, 음원의 개수가 3개일 때 각각 27.6%, 23.3% 감소하였고, 모사실험의 결과로부터 예상할 수 있었던 호모토피법의 스텝크기 결정방식을 이용한 제안법을 통해 IHT 알고리즘의 성능이 향상되었음을 알 수 있었다. 이때 평균 반복계산 횟수와 평균 계산시간의 감소율이 동일하지 않은 이유는 알고리즘이 한 번 반복될 때 소요되는 시

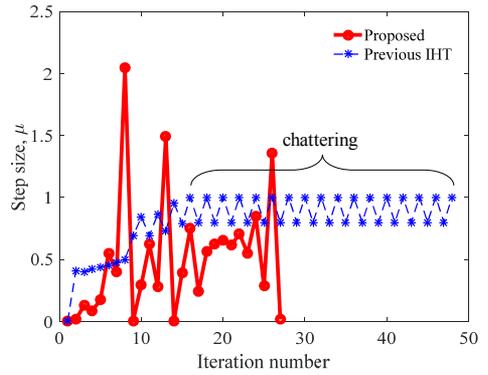
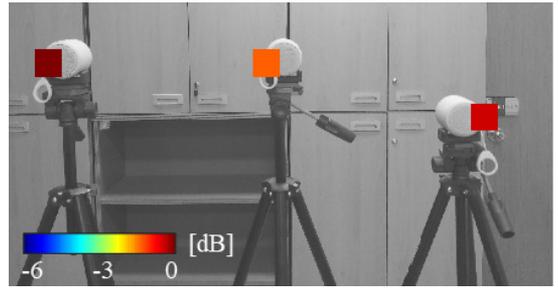


Fig. 8 Comparison of the step size between the proposed- and previous algorithm in experiment



(a) Proposed algorithm



(b) Previous algorithm

Fig. 9 Acoustic source map for algorithm

간이 다르기 때문으로 추측된다.

Fig. 8에는 스피커 3개를 배치한 경우의 계측 신호를 바탕으로 계산된 반복계산 횟수의 비교 예시를 나타내었다. Fig. 2와 같이, 제안 알고리즘은 스텝크기를 큰 폭으로 변화시켜 해의 수렴을 촉진하는 반면, 기존 알고리즘에서는 도중부터 발생한 채터링 현상으로 해가 더디게 수렴함을 알 수 있다. 이를 통해 채터링 현상의 제거가 계산시간 저감에 직접적인 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다.

Fig. 9에는 Fig. 8에서의 위치추정결과를 나타내었

다. 제안(Fig. 9(a)) 및 기존(Fig. 9(b)) 알고리즘 모두 음원의 위치, 다시 말해서 스피커의 위치를 잘 추정할 것을 알 수 있다. 음원의 추정 강도는 제안 알고리즘이 기존 대비 최대 2 dB 정도의 차이를 보였는데, 스피커의 음량을 가급적 동일하게 설정하였음을 고려하면 제안 알고리즘의 강도 추정 정확도가 상대적으로 뛰어나다고 할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 압축센싱 기반 IHT 알고리즘의 계산시간 저감을 위한 수정 알고리즘을 제안하였고, 모사 및 실제 실험을 통해 검증하였다. 보장된 수렴성을 바탕으로 스텝크기를 자동 결정하는 호모토피법을 적용함으로써 기존 IHT 알고리즘에 발생하던 채터링 현상을 제거하였고, 이를 통해 반복계산 횟수를 줄여 알고리즘의 계산 소요시간을 저감할 수 있었다. 제안 알고리즘은 기존 IHT 대비 반복계산 횟수가 32 %, 계산시간이 24 % 가량 감소하였으며, 동일한 복구율을 가졌다.

호모토피법과 IHT 알고리즘의 결합을 시도한 측면에서, 아울러 계산속도 저감을 통해 압축센싱 기반 위치추정 알고리즘의 실시간 구현 가능성을 높인 측면에서도 이 연구의 의미를 찾을 수 있다. 현재 단계에서 원인을 규명하지 못한 현상(예: IHT의 채터링 현상) 등을 향후 연구의 주제로 남겨두며, 또한 실시간 구현과 관련한 여러 문제를 다루어 연구의 완성도를 높이고자 한다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2018R1A5A6075959).

References

- (1) Cabada, E. C., Leclear, Q., Antoni, J. and Hamzaoui, N., 2017, Fault Detection in Rotating Machines with Beamforming: Spatial Visualization of Diagnosis Features, *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 97, No. 1, pp. 33-43.
- (2) Foeth, E. J. and Bosschers, J., 2016, Localization and Source-strength Estimation of Propeller Cavitation Noise Using Hull-mounted Pressure Transducers, 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, California, USA.
- (3) Lee, G. S., Shin, S. H., Cheong, C. and Jung, S. S., 2009, Localization of Acoustic Sources on Wind Turbine by Using Beam-forming Techniques, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 809-815.
- (4) Haddad, K. and Hald, J., 2008, 3D Localization of Acoustic Sources with a Spherical Array, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 123, No. 5, p. 3311.
- (5) Cigada, A., Lurati, M., Ripamonti, F. and Vanail, M., 2008, Moving Microphone Arrays to Reduce Spatial Aliasing in the Beamforming Technique: Theoretical Background and Numerical Investigation, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 124, No. 6, pp. 3648-3658.
- (6) Donoho, D. L., 2006, Compressed Sensing, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Information Theory*, Vol. 52, No. 4, pp. 1289-1306.
- (7) Lee, J. H., Kim, Y. H. and Shin, Y. H., 2019, Optimal Sensor Arrangement in Random Array for Compressive-sensing Based Sound Source Identification, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 133, No. 1, p. 106296.
- (8) Wagner, N., Eldar, Y. C. and Friedman, Z., 2012, Compressed Beamforming in Ultrasound Imaging, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 60, No. 9, pp. 4643-4657.
- (9) Ender, J. H., 2010, On Compressive Sensing Applied to Radar, *Signal Processing*, Vol. 90, No. 5, pp. 1402-1414.
- (10) Chen, S. S., Donoho, D. L. and Saunders, M. A., 2001, Atomic Decomposition by Basis Pursuit, *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 20, No. 1, pp. 33-61.
- (11) Foucart, S. and Rauhut, H., 2013, *A Mathematical Introduction to Compressive Sensing*, Springer, New York.
- (12) Blumensath, T. and Davies, M. E., 2009, Iterative Hard Thresholding for Compressed Sensing, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol. 27, No. 3, pp.

265~274.

(13) Blumensath, T. and Davies, M. E., 2010, Normalized Iterative Hard Thresholding: Guaranteed Stability and Performance, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 298, No. 2, pp. 298~309.

(14) Qi, C., Wnag, X. and Wu, L., 2011, Underwater Acoustic Channel Estimation Based on Sparse Recovery Algorithms, IET Signal Processing, Vol. 5, No. 8, pp. 739~747.

(15) Strang, G., 2006, Linear Algebra and Its Applications, 4th Ed., Thomson Brooks/Cole, Belmont, CA.

(16) Pierce, A. D., 2019, Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, 3rd Ed., Springer, New York.

(17) Donoho, D. L., 2006, For Most Large Underdetermined Systems of Linear Equations the Minimal ℓ_1 -norm Solution is also the Sparsest Solution, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 59, No. 6, pp. 797~829.

(18) Cyganek, B., 2013, Object Detection and Recognition in Digital Images: Theory and Practice, John Wiley & Sons, New York.

부 록

제안 알고리즘의 구조는 다음과 같다.

- 입력 : 관측벡터 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^M$, 관측행렬 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, 음원 개수 s
- 초기화 : 지지집합 $\mathcal{S}^{[0]} = \emptyset$, $\mathbf{x}^{[0]} = \mathbf{0}$, $\lambda^{[0]} = \|\mathbf{A}^T \mathbf{y}\|_\infty$.
- 반복 : $\|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}\|_2 \leq \varepsilon$ 을 만족할 때까지 이하를 반복한다.
- 잔차상관 $\mathbf{c}^{[i]}$ 를 구한다.

$$\mathbf{c}^{[i]} = \mathbf{A}^T (\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}^{[i-1]}) \tag{A.1}$$

- 라그랑주 승수 $\lambda^{[i]}$ 를 계산한다.

$$\lambda^{[i]} = \|\mathbf{c}^{[i]}\|_\infty \tag{A.2}$$

여기서 $\|\mathbf{x}\|_\infty$ 는 절대값이 가장 큰 \mathbf{x} 의 요소를 가리킨다.

- 지지집합 $\mathcal{S}^{[i]}$ 를 갱신한다.

$$\mathcal{S}^{[i]} = L_s(\mathbf{c}^{[i]}) \tag{A.3}$$

여기서 $L_s(\mathbf{x})$ 는 \mathbf{x} 의 요소의 크기가 가장 큰 s 개 요소에 대한 첨자집합(index set)이다.

- 방향벡터 $\mathbf{d}^{[i]}$ 를 계산한다.

$$\begin{cases} d_{\mathcal{S}^{[i]}}^{[i]} = (\mathbf{A}_{\mathcal{S}^{[i]}}^T \mathbf{A}_{\mathcal{S}^{[i]}})^{-1} \mathbf{c}_{\mathcal{S}^{[i]}}^{[i]} / \lambda^{[i]} \\ d_{\mathcal{S}^{c[i]}}^{[i]} = 0 \end{cases} \tag{A.4}$$

여기서 아래 첨자 j 는 j 번째 요소를 나타내며, 위 첨자 \mathbf{c} 는 여집합(complement)을 나타낸다.

- 호모토피법에서의 스텝크기 γ 를 결정한다.

$$\gamma^{[i]} = \min \{\gamma_+^{[i]}, \gamma_-^{[i]}\} \tag{A.5}$$

여기서 식 (A.5)의 계산은 참고문헌⁽¹⁴⁾을 참조하기 바란다.

- 제안 알고리즘의 스텝크기 μ 를 결정한다.

$$\mu^{[i]} = \operatorname{argmin} \{\gamma^{[i]} \mathbf{d}^{[i]} \otimes \mathbf{c}^{[i]}\} \tag{A.6}$$

- 식 (A.6)을 이용하여 해 벡터 $\mathbf{x}^{[i]}$ 를 갱신하고 종료조건을 확인한다.

- 출력 : $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{[i]}$



Yong-Hyun Kim received B.S. degree in Mechanical Engineering in 2018 and is currently studying for Master Degree at Changwon National University. He especially is interested in Source localization and Source strength estimation.



Jeung-Hoon Lee received B.S. degree in Mechanical Engineering from Hanyang Univ. in 2001, MS and Ph.D. degrees from KAIST in 2002 and 2007, respectively. After industrial experiences in SSMB of Samsung Heavy Industries Co. Ltd. for 9 years, he in 2016 joined the school of mechanical engineering of Changwon National Univ. as associate professor. His major interests cover signal processing, acoustic cavitation and Etc.

차량 프런트 도어 윈도우의 작동 소음 저감

Reduction in Operating Noise in Front-door Window of a Vehicle

권성민* · 심우정* · 윤신* · 최재홍** · 박강일** · 이승철*** · 정진태†
Seongmin Kwon*, Woojeong Sim*, Seen Yun*, Jaehong Choi**, Kang-il Park**,
Seungchul Lee*** and Jintai Chung†

(Received May 11, 2020 ; Revised July 6, 2020 ; Accepted July 16, 2020)

Key Words : Door Window(도어 윈도우), Window Operating Noise(윈도우 작동 소음), Module Plate(모듈 플레이트), Operating Deflection Shape(작동 중 변형 형상)

ABSTRACT

In this study, the operating noise of a front-door window of a vehicle was studied. The time response and frequency spectrum of this noise were measured through experiments and analyzed. To investigate the mechanism of the operating noise, the sound pressure level and frequency according to the operating state of the door window were analyzed. The noise increased greatly when the window regulator motor was mounted on the module plate. To find the cause of the increase in noise, the operating deflection shape of the door module was measured. It was found that the noise increase was caused by the torsional behavior of the motor exciting the module plate. To reduce this noise, a finite element model of the door module with a window was established, and a method to reduce the vibration was proposed by changing the shape of the module plate.

1. 서 론

현대 차량의 성능은 기술적 진보로 인해 과거로부터 비약적인 향상을 거두어져 왔으며 소비자들의 만족감을 채워주었다. 하지만 제품에 대한 소비자들의 요구수준이 점점 높아짐에 따라 제품의 고급감을 위한 감성적 품질 향상이 필요시 되며, 향후 더욱 강조될 것이다. 이에 차량 내부의 정숙성은 감성적 품질과 연관되며 차체, 의장, 전장 부품들의 작동 소음이 두드러지고 있다. 차량 의장부품 중 하나인 프런트 도어 윈도우는 상승 및 하강 구조식으로, 차량 외부

환경으로부터 운전자와 승객의 시야를 확보하고 보호하며 차량 내부를 환기시켜 쾌적한 공간을 만들어 주는 역할을 한다. 한편, 도어 윈도우는 차량의 운전자 및 승객과 가까이 위치해 있기 때문에 작동 시 발생하는 소음이 운전자와 승객에게 직접적으로 불편함을 줄 수 있으며, 소비자의 품질 평가에 민감하게 반응될 수 있는 주요한 요소로 문제되고 있다.

현재까지 차량의 도어 윈도우에 관한 연구는 윈도우 상승 및 하강 성능 및 메커니즘에 대한 기능적인 측면에 관한 연구가 다수이다. Moon, H. I. et al.⁽¹⁾은 유한요소 해석을 통해 차량 윈도우의 승강시간을 예측에 관한 연구를 수행하였으며, Lee, K. W. et al.⁽²⁾은 윈도

† Corresponding Author ; Member, Hanyang University, Professor
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr

* Hanyang University, Student

** Hyundai Motor Company, Researcher

*** Daedong Hi-Rex, Researcher

‡ Recommended by Editor Sang Wook Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

우 시스템의 부품인 와이어에서 발생하는 인장력에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Jeon, S. G. et al.⁽³⁾은 윈도우의 상승 및 하강에 영향을 미치는 인자들을 실험적으로 파악하여 이를 고려한 차량 프런트 도어 윈도우의 해석모델 개발에 대한 연구를 수행하였다.

한편, 차량 도어 윈도우의 소음/진동에 대한 연구는 그 수가 적을 뿐만 아니라 실제 소음 수준을 평가하고 소음이 발생하는 원인에 관한 연구는 미진한 실정이다. 차량 도어 윈도우의 소음/진동 문제를 개선하기 위해 Bae, C. Y. et al.⁽⁴⁾은 공진 현상 및 전달경로 분석을 통해 가진원을 규명하고, 공진 회피 방안을 제시하였다. 하지만 모듈 플레이트의 종류가 다양하므로 공진의 위치가 다르게 나타날 수 있으며, 공진이 발생하지 않을 수도 있다. 따라서 여러 모듈 플레이트에서 발생할 수 있는 일반적인 소음 원인을 찾고 이에 따른 개선 방안이 필요하다. Kim, S. H. et al.⁽⁵⁾은 윈도우 작동 소음의 음질 특성을 분석하였으며, 모터 방사음 및 윈도우 마찰/충격 소음을 개선하기 위한 방안을 제시하였다. 그러나 모터의 소음/진동이 직접적으로 전달되고 증폭되는 위치인 모듈 플레이트의 개선 방안의 대한 내용은 포함되지 않았다.

따라서 이 연구에서는 이전 연구들과 달리 ODS 분석을 통해 다양한 모듈 플레이트에서 나타날 수 있는 일반적인 소음 발생 메커니즘을 규명하였으며, 구조 해석을 이용하여 일반적인 모듈 플레이트에 적용시킬 수 있는 소음 저감 방안을 제시하였다. 먼저 실험을 통해 도어 윈도우의 작동 소음 수준을 평가하고 도어 모듈의 조립 조건에 따라 작동 상태를 구분하여 소음 및 주파수 분석을 통해 소음 발생 원인을 규명하였다. 다음으로 도어 윈도우의 작동 중 변형 형상을 확인하여 소음 발생 메커니즘을 규명하였으며, 도어 모듈의 유한요소 해석모델을 구축하여 구조개선을 통한 소음 저감 방안을 제시하였다.

2. 소음 측정 및 분석

차량 프런트 도어는 윈도우, 도어 판넬, 모듈 플레이트, 도어 트림으로 구성되어 있으며 도어 판넬과 도어 트림 사이에 모듈 플레이트가 위치해 있다. 모듈 플레이트에는 차량의 윈도우 및 윈도우 레귤레이터, 스피커 등의 부품들이 조립되어 있다. 이 중 윈도우 레귤레이터는 모터, 드럼, 와이어, 폴리, 윈도우 홀

더 등의 차량의 윈도우를 상승 및 하강 시키기 위한 부품들로 구성되어 있다. 윈도우 레귤레이터에 사용되는 모터는 DC모터와 웜기어가 결합되어 있는 형태이며 드럼과 연결되어 있다. 와이어는 드럼, 폴리, 윈도우 홀더와 모두 연결되어 있으며, 모터 회전 방향에 따라 드럼에 연결된 와이어가 감기고 풀리면서 폴리와 윈도우 홀더가 작동하게 된다. 또한, 윈도우 홀더는 윈도우를 지지하는 역할을 하는 동시에 모듈 플레이트의 레일을 따라 움직임으로써 윈도우가 상승 및 하강을 하게 된다.

윈도우 작동 시 발생하는 소음의 현수준 평가를 위해 소음 측정 및 주파수 분석을 수행하였다. 소음 측정을 위한 실험장치 구성은 Fig. 1과 같다. 운전자가 차량에 탑승하여 도어 윈도우를 작동시킬 때, 소음을 듣는 귀의 위치를 도어 판넬과 윈도우로부터 측정하고, 이와 동일한 위치에 마이크로폰(PCB 378B02)을 설치하였다. 즉, 도어 윈도우로부터 운전자의 귀 위치에 해당하는 거리와 높이에서 소음을 측정하였다. 측정된 소음 신호에 대한 분석은 스펙트럼 분석기(B&K 3050-B-060)를 이용하여 수행하였다. 윈도우 상승 및 하강 시 소음 신호의 시간 응답은 Fig. 2와 같이 윈도우 작동 시작과 끝에서 충격음이 발생하는 과도구간과 윈도우 이동음이 발생하는 정상상태 구간으로 나타난다. 윈도우 작동 소음의 현 수준 평가는 정상상태 구간 2초 간의 전대역(overall) 값을 기준으로 하였다. 윈도우 상승 및 하강 시 발생하는 소음 레벨은 각각 53.5 dB(A), 54.5 dB(A)로 측정되었다.

다음으로 윈도우 작동 소음의 가진원을 파악하기 위해 Fig. 2의 소음 신호를 푸리에 변환하여 주파수

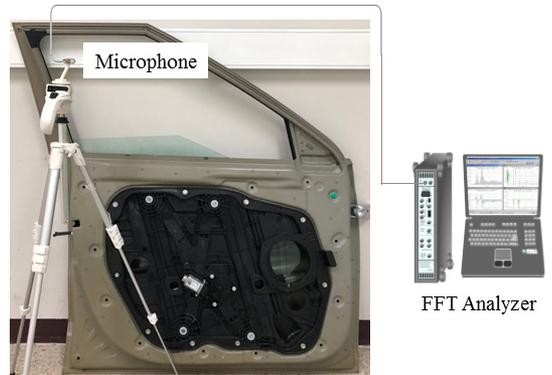


Fig. 1 Experimental setup for measuring the operating noise of the door window

스펙트럼을 획득하고 분석하였다. Fig. 3은 윈도우 상승 및 하강 시 발생하는 소음 신호의 주파수 스펙트럼이다. 윈도우 상승 시 707 Hz, 1414 Hz, 하강 시 927 Hz, 1854 Hz에서 피크가 관찰되었으며, 상승 및 하강 시에 공통적으로 전대역에 걸쳐 기저 성분이 관찰되었다. 피크 성분은 모터 회전에 의한 성분으로 모터 회전속도를 1X라고 하면 회전자 수(10개)에 의해 나타나는 10X의 가진 주파수이다. Fig. 3에서 볼

수 있듯이 상승 및 하강 시 가진 주파수가 차이 나는 이유는 동일한 전압에서 모터를 구동하여도 윈도우 하중의 영향으로 윈도우 하강 시에 모터 회전속도가 더 빠르기 때문이다.

3. 소음 발생 메커니즘 분석

윈도우 작동 소음의 발생 메커니즘 규명을 위해 도어 모듈의 조립 조건에 따라 작동 상태를 구분하여 소음을 측정하였다. 각 작동 상태는 Fig. 4와 같이 모터 단품 상태, 윈도우 레귤레이터 미작동 상태, 윈도우 레귤레이터 작동 상태로 구분되도록 조립하였다. 모터 단품 상태는 모터 단품만을 자유 경계조건에서 모터만

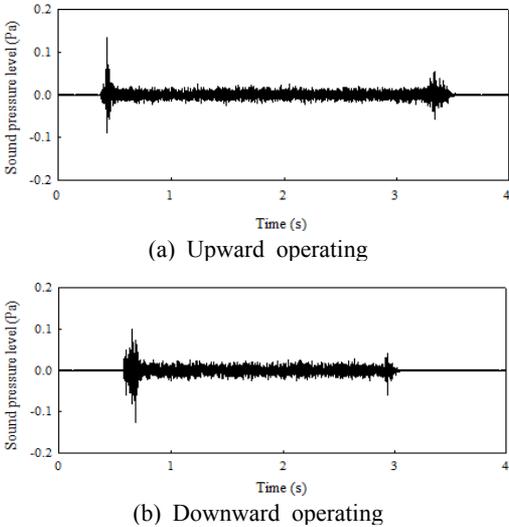


Fig. 2 Time response of the door window operating noise

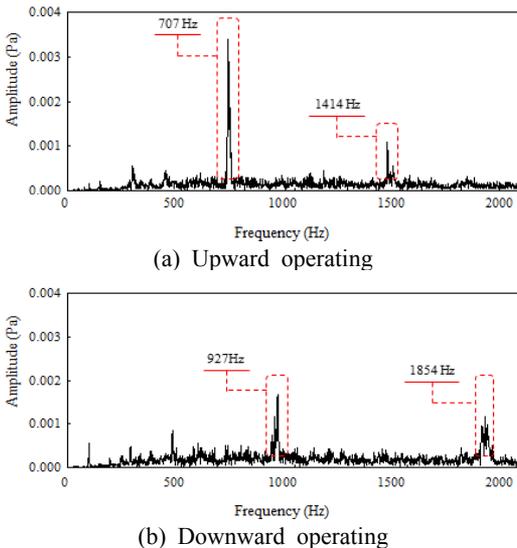
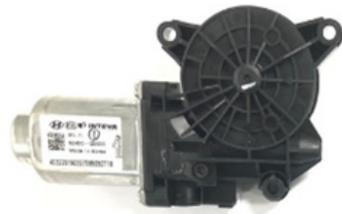
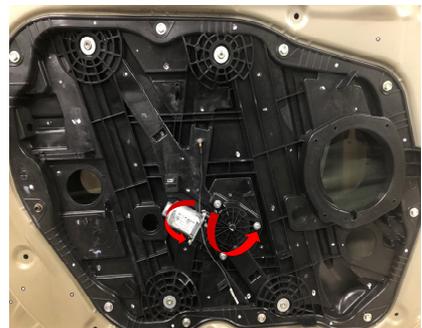


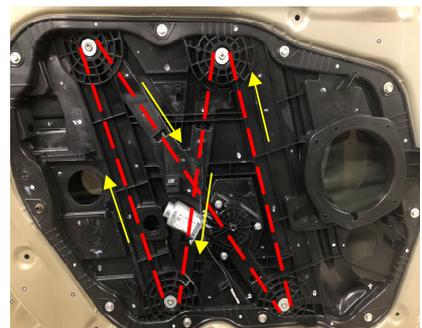
Fig. 3 Frequency spectra of the door window operating noise



(a) State of motor only working



(b) State of regulator not working



(c) State of regulator working

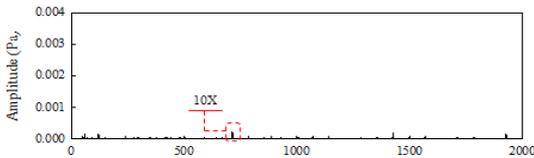
Fig. 4 Operating conditions of the door module

작동되는 상태이다. 윈도우 레귤레이터 미작동 상태는 모터 및 윈도우 레귤레이터 부품들이 모듈 플레이트 및 도어 판넬에 조립된 조건에서 모터만 작동되는 상태이다. 윈도우 레귤레이터 작동 상태는 위와 같은 결합 조건에서 모터, 윈도우 레귤레이터 부품 및 윈도우가 모두 작동되는 상태로 실제 차량에서 스위치에 의해 윈도우가 상승 및 하강하는 상태와 같다. 각 작동 상태에 따른 결합 조건 및 구동 상태에 대하여 간략하게 Table 1에 정리하였다. 각 작동 상태의 소음 측정은 2장의 현수준 평가와 동일하게 수행하였다.

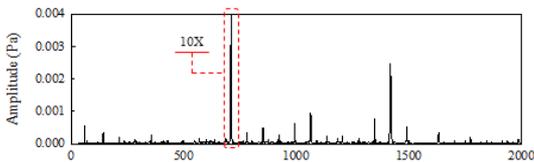
다음으로 각 작동 상태의 소음 수준을 확인하고 소

Table 1 Operating conditions according to combination condition and driving condition

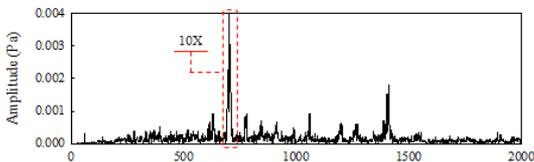
Experiment case	Combination condition	Driving condition
State of motor only working	Only motor	Only motor
State of regulator not working	Motor, window regulator, module plate and door panel	Only motor
State of regulator working	Motor, window regulator, module plate and door panel	Motor, window regulator and window



(a) State of motor only working



(b) State of regulator not working

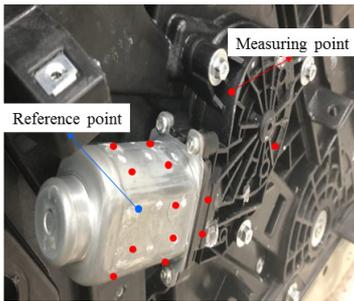


(c) State of regulator working

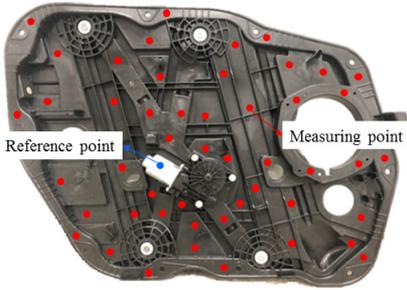
Fig. 5 Frequency spectra of the operating noise for operating conditions

음 신호에 대해 주파수 분석을 수행하였다. 모터 단품 상태, 윈도우 레귤레이터 미작동 상태, 윈도우 레귤레이터 작동 상태에서 측정된 소음 수준은 각각 41.8 dB(A), 49.8 dB(A), 53.4 dB(A)이다. 모터 단품 상태와 윈도우 레귤레이터 미작동 상태를 비교했을 때 8 dB(A) 가량의 소음이 증가하였으며, 윈도우 레귤레이터 작동 상태는 미작동 상태와 비교했을 때 3.6 dB(A) 가량의 소음이 증가하였다. 이와 같이 작동 상태에 따라 소음 레벨이 크게 증가하는 원인을 규명하기 위해 주파수 분석을 수행하였다. 각 작동 상태별 소음 신호의 주파수 스펙트럼은 Fig. 5와 같다. 먼저 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)를 비교했을 때 모터 회전에 의한 가진 주파수인 10X 성분이 크게 증가하였다. 이를 통해 모터의 가진에 의해 모듈 플레이트에서도 소음이 발생하여 가진 주파수 성분이 크게 증가함을 알 수 있다. 다음으로 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)를 비교했을 때 전 대역에 걸쳐 기저 대역이 증가한 것을 확인할 수 있다. 윈도우 레귤레이터 부품들이 작동함에 따라 모듈 플레이트와 윈도우 레귤레이터 부품 간의 영향과 윈도우와 웨더스트립 간의 영향으로 기저 대역이 증가함으로써 소음 레벨이 증가한 것으로 볼 수 있다. 이와 같이 부품들이 조립되고 작동함에 따라 소음이 크게 증가하며, 특히 모터가 모듈 플레이트에 장착되면서 모터 자체의 소음뿐만 아니라 모듈 플레이트에서도 소음이 발생하여 윈도우 작동 소음에 지배적인 영향을 주는 것을 확인하였다.

모터 및 모듈 플레이트에서의 ODS(operating deflection shape) 평가를 통해 모듈 플레이트에 모터 장착 시 소음 증가 현상의 원인을 분석하였다. ODS는 시스템의 작동 중 변형 형상을 확인하기 위한 방법으로 관심 주파수 대역에서의 시스템의 변형 형상을 확인할 수 있다. ODS 평가는 소음이 크게 증가되는 윈도우 레귤레이터 미작동 상태에서 수행하였으며, Fig. 6과 같이 모터와 모듈 플레이트에서 총 62개의 진동 측정 위치와 모터에서 측정 위치 중 한 점을 기준점(reference point)으로 선정하였다. 변형 형상은 윈도우 작동 소음에 가장 영향을 미치는 10X의 가진 주파수에서 확인하였다. 먼저 모터에서의 변형 형상은 Fig. 7(a)에서와 같이 모터 축을 기준으로 비틀림 거동이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 모듈 플레이트의 변형 형상도 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 모듈 플레이트 상의 모터가 위치한 주변부에서 모터 축을

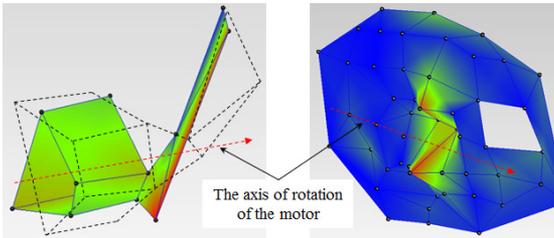


(a) The window regulator motor



(b) The module plate

Fig. 6 ODS measurement points



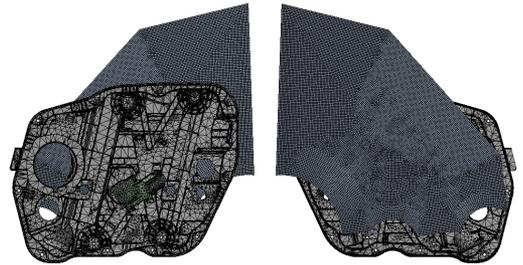
(a) The window regulator motor (b) The module plate

Fig. 7 ODS

기준으로 비틀림 거동이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 모터 회전 시에 발생하는 비틀림 거동으로 인해 모듈 플레이트에서 진동이 크게 발생하며, 모듈 플레이트에 모터 장착 시 소음이 크게 증가하는 원인임을 알 수 있다.

4. 소음 저감 방안 도출

모터의 비틀림 거동으로 인해 모듈 플레이트에서 발생하는 소음 저감을 위해 도어 모듈의 유한요소 해석모델을 구축하였다. Fig. 8은 모터, 윈도우 및 모듈 플레이트의 유한요소 모델이며, 유한요소 해석을 위해



(a) Front view (b) Rear view

Fig. 8 FE model of the door module

Table 2 Properties of the door module components

Components	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)
Motor	4769	100
Window	2272	80
Module plate	1323.6	3.6

사면체(tetrahedron) 요소를 사용하였다. 이때 사용된 요소는 245 152개, 노드는 503 317개이다. 모터, 윈도우 및 모듈 플레이트의 밀도, 질량 관성 모멘트 등의 관성 제원 및 영률은 사측에서 제공받은 데이터를 유한요소 모델에 적용하였으며 각 데이터는 Table 2에 나타내었다. 다음으로 모터, 윈도우 및 모듈 플레이트 간의 조립조건 및 경계조건을 Fig. 9와 같이 부여하였다. 모터는 모듈 플레이트에 조립되는 세 점의 볼트 체결부에 고정 조건을 부여하였으며 윈도우는 홀더가 위치한 모듈 플레이트의 레일 면에 고정 조건을 부여하였다. 마지막으로 모듈 플레이트의 경계조건으로 판넬에 조립되기 위한 볼트 체결부와 그라운드 간의 스프링 조건을 부여하였다. 이는 모듈 플레이트가 고정되는 판넬 끝단의 두께가 얇아서 변형이 발생하기 때문이며 변형을 고려한 상당강성 값을 부여하였다.

다음은 ANSYS 조화 해석 결과와 ODS 실험 결과를 비교하여 앞서 구축한 해석모델의 신뢰성을 검증하였다. 모터 회전에 의한 가진 주파수 10X에서의 가속도 크기를 비교하였으며, 실험 결과는 이전 3장에서 ODS 평가를 위해 측정된 진동 신호를 이용하였다. 조화 해석을 위해 모듈 플레이트에 가해지는 모터의 토크를 모듈 플레이트에 조립되는 세 점의 수직 방향 힘으로 변환하여 10X에 해당하는 주파수를 갖는 가진력을 부여하였다. 해석 결과는 Fig. 6(b)에 표시된 ODS 측정 위치와 동일한 위치인 50개의 지점

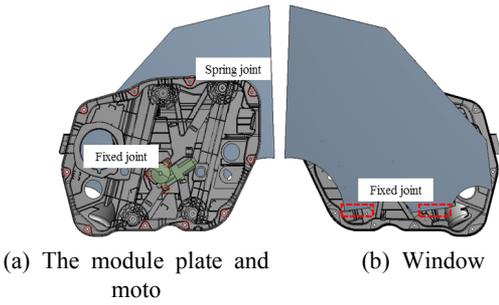


Fig. 9 Assembly and boundary conditions

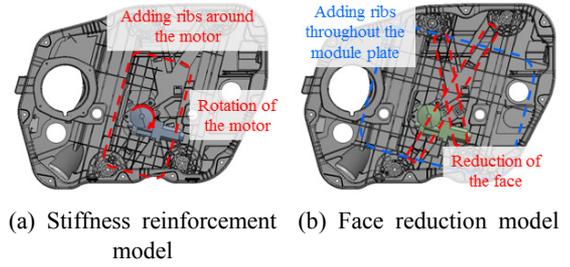
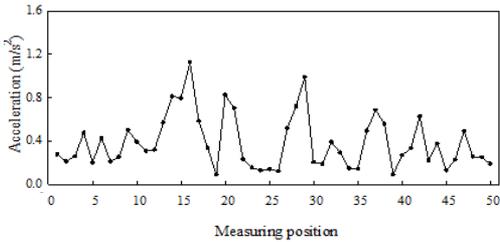
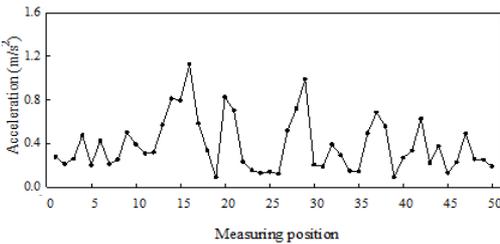


Fig. 11 Modified model of the module plate



(a) The simulation result

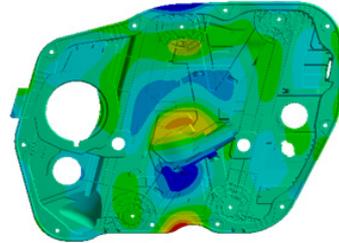


(b) The experiment result

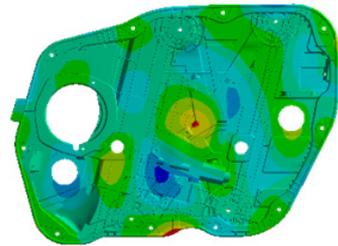
Fig. 10 Acceleration magnitude according to vibration measurement points

에서 10X의 가속도 크기를 획득하였다. Fig. 10은 각각 조화 해석과 ODS 실험을 통해 획득한 진동 측정 위치별 10X의 가속도 크기를 나타낸 그래프이다. 가속도 크기 비교결과, 전체적으로 측정 위치별 가속도 크기의 경향성이 유사하고 특히 진동이 크게 발생하는 모터 주변부에서 가속도 크기도 유사하게 나타난다. 따라서 구축한 유한요소 해석모델의 타당성을 확보할 수 있었다.

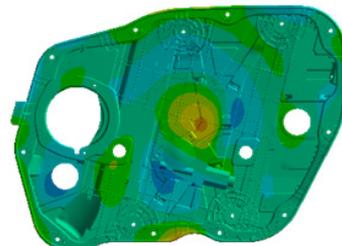
앞서 구축한 유한요소 모델을 이용하여 모듈 플레이트에서 발생하는 진동을 저감시키는 방안을 제시하였다. 윈도우 작동 시에는 윈도우와 웨더스트립 간의 영향과 모듈 플레이트와 윈도우 레귤레이터 부품 간의 영향으로 인한 소음도 발생하지만 모터가 장착됨에 따라 모듈 플레이트의 구조적 문제로 인한 소음이



(a) Existing module plate



(b) Stiffness reinforcement model



(c) Face reduction model

Fig. 12 Deflection shape of modified model

크게 발생하는 상태에서 다른 부품들로 인한 소음 발생에 대한 저감 방안으로 큰 효과를 기대하기 어렵다. 기존 모듈 플레이트의 구조적 문제는 모듈 플레이트의 경계 위치에서만 도어 판넬과 조립되어 고정되고, 내부는 모터를 포함한 다른 부품들과의 조립으로 인해 도어 판넬과 고정되지 않기 때문에 모터의 비틀림

거동에 취약한 구조라는 점이다. 따라서 모터의 비틀림 거동으로 인해 모듈 플레이트에서 발생하는 진동을 저감시키기 위해 Fig. 11과 같이 모듈 플레이트의 형상을 변경하였다. Fig. 11(a)에서 볼 수 있듯이 기존 모듈 플레이트의 레일 형상이 모터의 비틀림 거동에 대한 리브 역할을 할 수 있도록 모터의 조립각도를 변경하였으며, 모터의 비틀림 거동으로 인한 진동을 방해할 수 있도록 모터 주변부에 리브를 추가하여 모듈 플레이트의 강성을 보강하였다. 또한 추가적으로 Fig. 11(b)와 같이 Fig. 11(a)의 방안에 와이어가 위치한 면의 폭을 축소하였으며, 전체적으로 리브를 추가하여 진동이 크게 발생할 수 있는 면을 최소화하였다.

다음으로 기존 모듈 플레이트와 형상 변경 모델에 대한 조화 해석을 통해 모듈 플레이트에서 발생하는 진동 크기를 확인하였다. Fig. 12는 각각 기존 모듈 플레이트, 강성 보강 모델, 와이어가 위치한 면 축소 모델의 변형 형상을 나타내었다. 변형 형상에서 볼 수 있듯이 모듈 플레이트의 전체적인 면에서 진동이 감소하였으며, 특히 모터 주변부에서의 진동이 크게 저감되었다. 개선 방안의 진동 저감량을 확인하기 위해 모듈 플레이트의 전체 면에서 발생하는 가속도 값을 획득하여 평균값을 산출하였다. 산출한 결과, 기존 모델, 강성 보강 모델, 면 축소 모델에서 획득한 가속도 평균값은 각각 0.35 m/s^2 , 0.19 m/s^2 , 0.07 m/s^2 이다. 즉, 기존 모델 대비 강성 보강 및 면 축소 모델인 Fig. 11(b)의 개선 방안의 가속도 평균값이 80% 감소하였다. 따라서 강성 보강 및 면 축소 모델과 같이 모듈 플레이트의 구조를 개선하면 윈도우 작동 시 발생하는 소음을 저감시킬 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 차량 프런트 도어 윈도우의 작동 소음 발생 메커니즘을 규명하고 소음을 저감하기 위한 구조개선 설계 방안을 제시하였다. 윈도우 작동 소음은 차량 운행 시 운전자 듣는 귀 위치를 기준으로 측정하였으며 조립 상태에 따른 소음 신호의 주파수 스펙트럼 분석을 수행하였다. 분석 결과, 모터 회전에 의한 성분이 소음에 가장 지배적인 영향을 미치며 모터가 모듈 플레이트에 장착됨에 따라 소음이 크게 증가하였다. 또한, 소음이 증가하는 원인을 윈도우가 작동 시 발생하는 변형 형상을 통해 규명하였으며, 모

터 회전 시 발생하는 비틀림 거동으로 인해 모듈 플레이트에서 진동이 크게 발생하여 소음이 증가하는 것으로 확인되었다. 따라서 모듈 플레이트의 형상 및 모터의 조립각도 변경을 통해 모듈 플레이트에서 발생하는 진동을 저감하기 위한 구조개선 설계 방안을 제시하였다.

References

- (1) Moon, H. I., Kim, H. Y., Choi, C., Lee, I. H. and Kim, D. H., 2010, Prediction of Lift Performance of Automotive Glass Using Finite Element Analysis, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 34, No. 11, pp. 1749z~1755.
- (2) Lee, K. W., Park, S. C. and Jung, W. W., 2009, An Experimental Tension Study of the Window Regulator Motor Wire, Proceedings of the KSME Autumn Conference, pp. 1397~1400.
- (3) Jeon, S. G., Hwang, J. H., Na, J. G. and Kim, J. H., 2006, A Study on Vehicle Window Regulator Motion, Proceedings of the KSME Autumn Conference, pp. 1~6.
- (4) Bae, C. Y., Kim, C. J., Kwon, S. J., Lee, B. H., Jang, W. S. and Lee, J. W., 2007, A Study on the Dynamic Characteristics of Door Module for Vehicle, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 1093~1101.
- (5) Kim, S. H., Park, D. C., Jo, H. H., Sung, W. C. and Kang, Y. J., 2014, The Development and Application of Sound Quality Index for the Improving Luxury Sound Quality of Road Vehicle Power Window System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 108~116.



Jintai Chung received his B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University, Seoul, Korea in 1984 and 1986, respectively, and a Ph.D. degree in mechanical engineering from the University of Michigan, Ann Arbor, USA in 1992. He is now a professor in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Korea. His research fields are structural dynamics, vibration and noise.

통과소음도를 이용한 차종 분류 기계학습 모형

Machine Learning Model for Classification of Vehicles Using Pass-by Noise Level

이재관* · 김보경* · 노유진* · 장서일†

Jaekwan Lee*, Bo Kyeong Kim*, Yu jin Noh* and Seo Il Chang†

(Received May 11, 2020 ; Revised July 31, 2020 ; Accepted July 31, 2020)

Key Words : Vehicle Classification(차종 분류), Artificial Neural Network(인공신경망), Road Traffic Noise(도로소음)

ABSTRACT

Artificial neural network model was utilized to classify vehicle types into motorcycle, light and heavy vehicles by using pass-by noise datasets. For the training, three sample datasets were collected from a one-lane and one-way road. These datasets are for 1 s pass-by maximum, 3 s pass-by maximum, and pass-by noise from maximum to below 10dB. The three datasets were analyzed to provide Z- and A-weighted and 1/3 octave band sound levels for the training. It was found that the 1 s pass-by maximum dataset led to the best explanatory power(R-square, 98.5%). The machine learning model with the 1 s pass-by maximum dataset was tested for two different roadsides and it was found that the explanatory power was greater than 90%.

1. 서 론

소음·진동관리법 제4조 2에는 교통기관에서 발생하는 소음을 관리하기 위해 소음지도를 작성할 수 있음을 명시하고 있다⁽¹⁾. 또한, 유럽 연합 환경지침에서는 100 000명 이상의 주민이 사는 지역과 연간 3백만 대 이상의 차량이 지나가는 도로에 소음지도 작성이 필수적이다⁽²⁾. 소음지도는 인구가 밀집되고 교통이 복잡해지는 현시대에 효과적으로 소음을 관리하기 위한 필수적인 절차가 되었다. 소음지도 작성시 예측된 소음도를 실측값과 비교하여 평균 오차가 3 dB 이하일 때 검증이 완료된 소음지도라 할 수 있다⁽³⁾. 소음지도의 검증을 위해서는 도로소음 발생현장에서 실제 측정이 필

요하며 교통량, 차속, 차종 등을 수집하여야 한다. 교통량 정보는 현장에서 사람이 직접 수집하거나 영상촬영 후 수작업으로 구분하는 것이 일반적이다. 대상도로의 차선이 많아지면 구분을 위한 시간이 많이 소요되고 야간에 측정할 경우 정확성이 떨어질 수 있다. 이러한 문제를 해결하고자 도로에서 측정된 소음정보를 기계학습모형에 입력하여 추가적인 작업 없이도 차종을 구분하여 차종별 대수 산정에 사용하고자 한다.

최근 기계학습을 소음 분야에 적용하여 시간과 비용을 절약하고자 하는 연구가 많이 수행되고 있다⁽⁴⁾. 이 연구에서도 기계학습을 활용하여 차량 구분을 위해 소요되는 시간을 최소화하고 정확성을 높이고자 한다. 다양한 기계학습 방법 가운데 대표적인 인공신경망(artificial neural network)을 사용하였다. 소음계

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Environmental Engineering, University of Seoul, Professor
E-mail : schang@uos.ac.kr

* Member, Dept. of Environmental Engineering, University of Seoul, Student

A part of this paper was presented at the KSNVE 2020 Annual Spring E-Conference

‡ Recommended by Editor Chan Jung Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

에서 수집되는 초당 소음도와 1/3 옥타브밴드 소음도를 모형에 입력하여 이륜차, 소형차, 대형차, 비통과로 분류하도록 하였다. 또한, 입력데이터로 사용하려는 통과소음도의 분석방법이 정해져 있지 않아 3가지의 분석방법으로 각각의 데이터셋트를 구축한 후 기계학습 모형에 적합한 통과소음도 데이터셋트 구축방법을 선택하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 통과소음 수집 및 분석

기계학습모형에 사용할 학습데이터는 자동차 통과소음을 도로에서 측정하여 구축하였다. 측정 위치는 서울시립대학교 내이며, 차속 제한 30 km/h 인 일방통행 1차선 직선도로이다. 해당 도로는 과속방지턱 등의 장애물이 없고, 실제 통과하는 차량의 속도는 20 km/h ~ 40 km/h이다. 단, 이륜차의 경우 20 km/h ~ 80 km/h의 넓은 범위의 속도로 운행되었다. 소음과 차종 수집은 소음계(Rion NL-52)와 카메라(GoPro HERO7, Kodak SP360)를 이용하였다. 소음측정은 소음·진동



Fig. 1 Noise and video collection for learning dataset

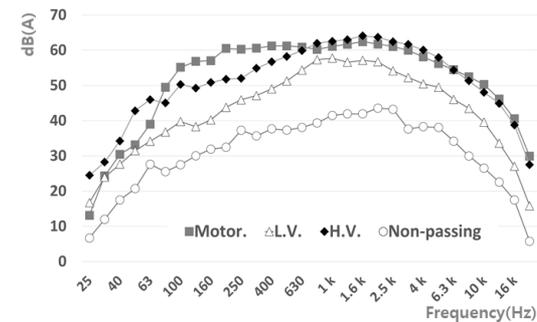


Fig. 2 Average of 1/3 octave band sound levels for each vehicle on the maximum noise dataset

공정시험기준을 참고하여 청감보정회로 A특성, 동특성 fast 모드로 1초당 증가소음도와 1/3 옥타브밴드를 측정하였다⁵⁾. 측정기기는 Fig. 1과 같이 도로 중심선으로부터 2 m, 지면 위 6 m 높이에 설치하였다. 학습데이터 수집 시기는 2020년 1월~2월이며 눈, 비 등이 오지 않았던 10일간 진행하였다. 2일~3일 간격으로 주로 오후 시간대(13시~18시)에 수집하였으며 저녁 이후(19시)부터 오전(10시)까지 심야시간의 데이터도 4일간 수집, 분석하였다.

차량이 1대 통과할 때마다 소음도를 3가지 방법으로 분석해 사용하였다. 첫 번째 방법은 차량이 1대 통과할 때마다 측정된 초당 증가소음도 중 가장 높은 1초의 값과 그때의 1/3 옥타브밴드를 값을 대표 통과소음도로 정한 방법이다(최고소음도 방법). 두 번째 방법은 첫 번째 방법으로 선택된 최고소음도와 앞뒤 1초씩의 소음도를 추가로 선정하여 총 3초간의 소음도 값들을 대표 통과소음도로 정하는 방법이다(최고소음도 ±1초 방법). 세 번째 방법은 첫 번째 방법에서 선택된 소음도에서 10 dB 아래까지 감소하는 범위를 선택하고 그 선택된 시간 동안의 증가소음도를 대표 소음도로 하는 방법이다(증가소음도 방법). 차량통과소음 외에 특별한 소음이 발생하지 않았던 시간대의 소음도를 추출해 ‘비통과’라 명명하여 사용하였으며, 추후 학습이 완료된 모형이 차량 통과소음 외의 소음을 비통과 소음이라고 인식하게 하도록 학습하는 데 이용하였다.

각 방법별로 분석된 통과소음과 비통과 소음을 모아 3개의 데이터셋트를 구축하였다. 데이터셋트에서 한 개의 데이터는 소음도(입력데이터)에 소음원(정답데이터)이 라벨링 된 형태이다. 입력데이터는 1대의 차량이 통과할 때마다 수집된 L_{AFeq} , L_{ZFeq} A 가중 1/3 옥타브밴드 값이고 정답데이터는 각 소음도마다 라벨링되는 ‘소형차’, ‘대형차(2.5톤 이상)’, ‘이륜차’, ‘비통과’이다. 차량이 연속하여 통과하는 경우를 제외하고 총 3685대의 차량의 소음도가 수집되었고 소형차 2623대, 대형차 49대, 이륜차 1013대이다. 대형차의 대수가 소형차와 이륜차보다 상대적으로 적게 수집되어 대형차 통과소음 데이터를 10배로 늘려 학습데이터를 만들었다⁶⁾. 비통과 소음 데이터는 전체 차량 대수와 비슷하게 3471개로 구성하였다. 각 데이터셋트별 데이터 수는 최고소음도와 증가소음도 세트는 각각 7597개(차량 4126개, 비통과 3471개), 최고소음

도 ±1초 세트는 15 849개(차량 12 378개, 비통과 3471개)이다. 3개의 데이터세트 가운데 최고소음도 데이터세트를 구성하는 각 차종별, 비통과 소음의 1/3 옥타브밴드 소음도 평균값을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 차종 분류 기계학습모형 구성

학습데이터를 구축한 후 파이썬을 활용해 차종 분류 기계학습모형을 구현하고 모형의 성능을 검증하였다. 분류모형은 인공신경망을 이용해 구성하였다. 인공신경망 모형은 다수의 노드로 구성된 입력층, 은닉층, 출력층이 유기적으로 연결되도록 구성된다. 특히 은닉층 수, 은닉층의 노드 수, 각 층의 활성화 함수 등에 따라 모형의 성능이 달라지기 때문에 해당 구성요소를 적절히 설정하는 것이 중요하다.

입력층과 출력층의 노드 수는 입력데이터와 정답데이터의 수인 32와 4로 각각 설정하였다. 은닉층 수는 변화가 가능한데, 은닉층 수를 증가시켜 모형을 비교하였으나 정확성에서 큰 차이를 보이지 않았고, 은닉층 수가 늘어날수록 소요되는 학습시간이 증가하

였다. 따라서 시간과 정확성을 비교하였을 때 효율성이 높은 2층의 은닉층을 구성하였다. 은닉층의 수를 결정한 후 은닉층 노드의 개수를 선정하였다. 모형의 성능은 은닉층 노드의 수에 따라 달라지는데 은닉층의 노드 수의 증가에 따른 정확도는 Fig. 3에 나타내었다. 분류 정확성의 오차 범위를 고려하여 최고 정확도와 0.5 % 이내의 차이를 보이는 노드 중 가장 적은 노드의 개수를 선택하였다. 다만 세 개의 모델에서 모두 은닉층 노드 수가 상대적으로 적을 때에도 70 % 이상의 높은 정확도를 보였다. 이를 확인하기 위해 최고소음도의 학습 데이터세트를 사용하여 은닉층의 노드 수가 2개일 때와 최종 선택된 78개일 때의 오분류표를 Table 1에 나타내었다. 노드 수를 2개로 선정하였을 때, 전체적인 정확도는 높았으나 이륜차와 대형차를 구분하지 못하는 것을 확인하였으며, 다른 데이터세트에서도 같은 경향성을 확인하였다. 이는 Fig. 2에서도 확인할 수 있는 주파수 구성이나 소음도에서 비교적 명확한 차이를 보이는 소형차와 비통과 데이터는 적은 수의 노드로도 분류가 가능하다고 판단된다. 최종적으로 연구에서 사용한 인공신경망의 구성은 Fig. 4에 나타내었다.

학습 전 데이터세트를 모형에 입력하기 위해 전처리 작업을 진행하였다. 입력데이터의 범주를 동일하게 해주는 표준화와 정답데이터를 0과 1의 값으로 구성된 벡터로 표시하는 원-핫 인코딩을 진행하였다. 전처리가 끝난 데이터는 2 : 1의 비율로 나누어 학습데이터와 시험 데이터로 사용되었다. 각 층 사이에 존재하는 가중치와 편향은 순전파를 통해 계산되고, 역전파 과정을

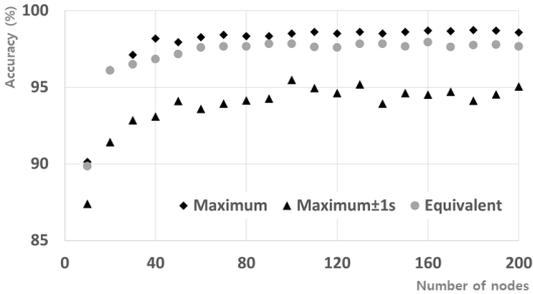


Fig. 3 Comparison of the accuracy of test data according to the number of nodes in the hidden layer for each dataset

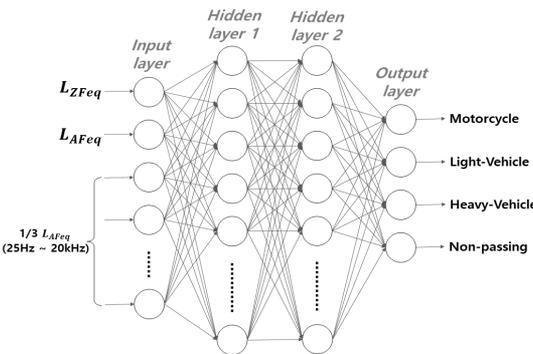


Fig. 4 A neural network used in this study

Table 1 Confusion matrix of test data on the maximum noise dataset with 2, 78 hidden nodes

Number of node	Vehicle -type	Motorcycle	Light	Heavy	Non-passing
2	Motorcycle	0	352	0	2
	Light	0	847	0	11
	Heavy	0	164	0	0
	Non-passing	0	6	0	1,151
78	Motorcycle	338	13	2	1
	Light	9	839	3	7
	Heavy	0	0	164	0
	Non-passing	1	1	0	1,155

통해 수정되며 출력 결과와 실제 값의 오차를 줄이도록 하였다⁽⁷⁾. 기울기 소실 문제를 방지하기 위해 은닉층의 활성화 함수는 ReLU를 사용하였고⁽⁸⁾, 출력층의 활성화 함수는 분류 문제에 적합한 소프트맥스 함수를 사용하였다⁽⁹⁾. 또한, 훈련 데이터가 과도하게 적합되어 새로 입력되는 데이터를 올바르게 추정하지 못하는 과적합 문제를 방지하기 위해 AdaGrad⁽¹⁰⁾와 Drop-out⁽¹¹⁾을 적용하였다. 모형을 학습시킨 후 학습 횟수(epoch)별 학습데이터와 시험 데이터의 오차율을 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 학습 횟수가 일정수준 이상에서부터 정확도에 큰 영향을 미치지 않아 최종적으로는 모형을 2000회 학습시킨 후 정확도를 비교하였다. 다만 최고소음도 ±1초 데이터셋을 사용한 모형에서는 과적합이 나타난 것을 확인하였다.

2.3 통과소음도 분석방법별 모형 비교

Table 2은 통과소음도 분석방법별 기계학습모형의 조건과 정확도를 나타냈다. M1은 최고소음도 데이터

셋트를 사용한 모형, M2는 최고소음도 ±1초 데이터셋을 사용한 모형, M3는 등가소음도 데이터셋을 사용한 모형을 의미한다. 정확도를 통해 모형의 차종 분류성능을 판단하였을 때, 최고소음도와 그 1/3옥타브 밴드를 사용하는 것이 가장 정확도가 높은 것을 확인하였다.

세부적으로 모형의 성능을 평가하기 위해, 분류모형 성능평가 시 이용되는 혼동 행렬을 사용하여 분석하였다^(12,13). 혼동 행렬은 학습된 모형의 예측값과 실제값을 비교하기 위한 행렬이다. 이 행렬을 통해 모형의 예측성능을 파악할 수 있는 지표들을 계산할 수 있다. Precision은 예측한 값 중에 실제 정답과 일치하는 비율을 의미하고 recall은 실제 정답 중에 예측된 값과 일치하는 비율을 말한다. F1-score는 precision과 recall의 조화평균을 계산한 값이고, 앞선 두 개의 지표를 모두 고려하여 모형의 성능을 판단할 수 있다. 단순평균은 각 차종의 성능평가 결과를 평균한 값이고, 가중평균은 각 차종의 성능평가 결과를 표본 개수로 가중 평균한 값을 의미한다.

Table 3에 모형의 성능평가 결과를 나타내었다. 가중평균은 데이터 간의 편차를 고려하여 사용할 수 있는 평균이다. 이 연구에서는 데이터 간의 편차가 존재하더라도 정확하게 분류해낼 수 있도록 하는 것이 필요하므로 단순평균을 통해 모형의 성능을 평가하고자 한다. 세 가지 모형의 precision과 recall의 값을 모두 고려했을 때, M1이 모두 0.98의 값을 가지므로 세 모형 중 가장 높은 분류성능을 보였다. F1-Score

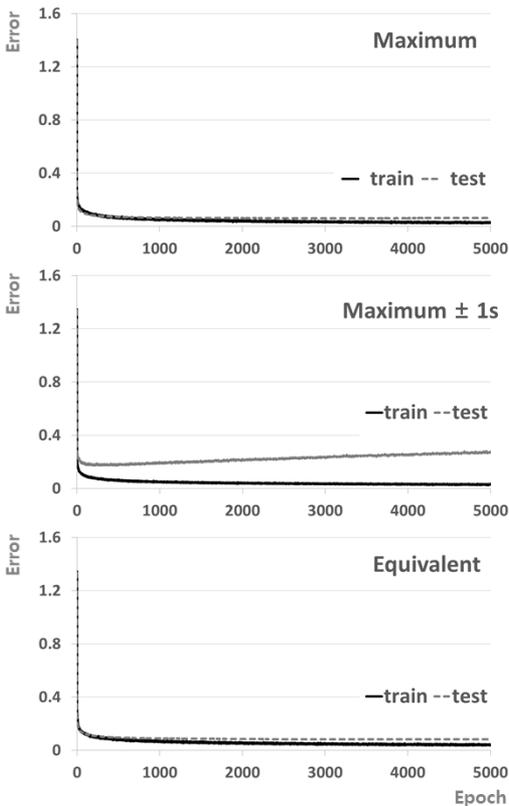


Fig. 5 The error rate of train data and test data over epoch number

Table 2 Training conditions and results of three machine learning models

Training conditions		M1	M2	M3
Input data type	Maximum (of pass-by noise)	Maximum (of pass-by noise)	Maximum ± 1s (of pass-by noise)	Equivalent (of pass-by noise)
	Non-passing			
Number of hidden layers		2	2	2
Number of nodes	Input	32	32	32
	Hidden	78, 78	100, 100	67, 67
	Output	4	4	4
Epoch		2000	2000	2000
Accuracy (%)	Train	98.68	98.74	98.42
	Test	98.54	94.64	97.47

Table 3 Evaluation measures for the models

Model		Precision	Recall	F1-score	Support
M1	Motorcycle	0.97	0.96	0.96	354
	Light	0.99	0.98	0.98	858
	Heavy	0.96	1.00	0.98	164
	Non-passing	0.99	1.00	1.00	1157
	Accuracy	0.98			2533
	Macro avg.	0.98	0.98	0.98	2533
	Weighted avg.	0.99	0.98	0.98	2533
M2	Motorcycle	0.94	0.90	0.92	1013
	Light	0.93	0.98	0.95	2623
	Heavy	0.99	0.76	0.86	490
	Non-passing	0.97	0.99	0.98	1157
	Accuracy	0.95			5283
	Macro avg.	0.96	0.91	0.93	5283
	Weighted avg.	0.95	0.95	0.95	5283
M3	Motorcycle	0.94	0.94	0.94	354
	Light	0.98	0.96	0.97	858
	Heavy	0.94	1.00	0.97	164
	Non-passing	0.99	1.00	0.99	1157
	Accuracy	0.98			2533
	Macro avg.	0.96	0.97	0.97	2533
	Weighted avg.	0.98	0.98	0.98	2533

Table 4 Results of applying M1 on site A, B

		Site A	Site B
Number of test data	Motorcycle	14	55
	Light	66	159
	Heavy	1	2
	Non-passing	73	194
	Total	154	410
Accuracy(%)		94.16	90.00

를 기준으로 각 차종 간 성능 차이가 M1의 경우 최대 0.04, M2의 경우 0.12, M3의 경우 0.05의 차이를 보였다. M1과 M2의 경우 차종 간 분류에서 고른 성능 결과를 가진다고 판단된다. 각 모형을 세부적으로 평가하였을 때, M1의 경우 비통과 소음 분류 정확도

가 가장 높았고, 다른 차량에 비해 이륜차량을 분류하는 성능이 떨어졌다. M1 모형이 이륜차로 오분류한 데이터는 실제로는 대부분 소형차량임을 확인하였다. M2의 경우 대형차의 precision의 값은 0.99이나, recall 값이 0.76으로 낮은 수치를 보이며 이는 모형이 대형차량이라 예측한 것은 대부분 옳았으나, 실제 대형차량을 이륜차, 소형차, 비통과 중 하나의 값으로 분류한 소음도들이 24% 정도 존재하는 것을 의미한다. M3도 M1과 유사하게 비통과 소음의 분류 정확도가 높으며, 이륜차의 분류 정확도가 가장 낮았다. F1-score로 M1과 비교하였을 때, M1이 M2보다 전반적으로 0.01 정도 높은 수치를 보였다. 결론적으로 앞서 모형의 설명력을 비교하였던 정확도와 추가적으로 진행한 모형의 성능평가 지표들에서 모두 M1의 설명력이 가장 높았다.

2.4 최고소음도 모형 활용

2.3절을 통해 세 가지 모형 중 M1의 설명력과 분류 성능이 가장 높은 것을 확인하였다. M1의 활용성을 평가하기 위해, 추가로 시험 데이터를 수집하여 분류 성능을 평가하였다. 이 연구에서 데이터 수집이 일방통행 1차선에서 진행되었다는 한계점을 고려하여, 왕복 2차선으로 구성된 지점 A, B를 선정하여 시험 데이터를 수집하였다. 지점 A는 왕복 2차선으로 차속이 30 km/h로 제한된 구간이며, 방지턱 등의 방해물과 도로구배 변화가 존재하지 않는 지점이었다. 지점 B도 A와 마찬가지로 왕복 2차선의 차속이 30 km/h로 제한된 구간이었으나, 측정지점 50 m 이내에 방지턱과 커브길이 존재하는 지점이었다. 지점 A는 도로 중심선으로부터 5.3 m, 지면 위 1.5 m 높이에서 측정하였고, 지점 B는 도로 중심선으로부터 5.4 m, 높이 1.5 m 위치한 지점에서 측정하였다.

각 지점에서 차량이 통과할 때의 최고소음도를 추출하여 시험 데이터를 생성하였다. 사용된 데이터의 개수는 Table 4에 나타내었다. 비통과 데이터의 경우 통과소음도와 비슷한 개수의 데이터를 추출하여 사용하였다. M1을 사용하여 지점 A, B에서 측정된 차종을 분류하였을 때, 각각 94.16%와 90%의 정확성을 보였다. 두 지점에서 모두 90% 이상의 정확성을 보였으며, 이를 통해 이 연구에서 구현한 M1이 제한적인 상황의 2차선 도로에서도 적용 가능하다는 것을 확인하였다.

3. 결 론

이번 연구에서는 기계학습모형을 활용하여 차량의 통과소음도를 통해 차종을 분류하였다. 통과소음도 분석방법을 세 가지로 나눠 최고소음도, 최고소음도 ± 1 초, 등가소음도 데이터세트를 구성하였다. 각각의 데이터세트를 통해 차종을 분류하는 기계학습 모형을 구현한 후 모형의 설명력을 비교하였다. 기계학습 분류모형의 성능을 평가할 수 있는 혼동 행렬을 사용하여 가장 높은 설명력과 분류성능을 가진 모형을 선정하였다. 3개의 모형 가운데 차량이 통과하는 동안의 최고소음도를 통과소음도로 사용하여 차종을 분류하는 모형의 설명력과 분류성능이 가장 높은 것을 확인하였다.

설명력이 높은 모형을 선정한 후, 추가로 수집된 데이터로 모형의 활용 가능성을 확인하였다. 추가로 데이터를 수집한 두 지점은 일반교통 1차선이 아닌 왕복 2차선으로 구성된 지점이었다. 두 지점 A, B에서 수집된 데이터를 구현된 최고소음도 모형에 대입한 결과, 두 지점에서 모두 90% 이상의 정확성을 보였다. 이 결과를 통해 구현된 모형이 측정지점과 다른 도로상황에서도 차종을 분류할 수 있다는 것을 확인하였다. 다만, 추가로 측정된 지점 또한 모든 도로의 상황을 대변할 수 없다. 따라서 차선, 속도, 도로포장 등의 다양한 도로상황을 반영할 수 있는 모형에 관한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 직접 정답을 추가하지 않더라도 데이터를 군집화하여 분류하도록 하는 비지도 학습이나 sound quality index 등의 추가적인 음향인자를 입력데이터로 사용하는 방법, CNN, RNN 등의 발전된 딥러닝 기술을 사용하면 더 세분화하여 차종을 구분할 것으로 예상된다.

References

- (1) Ministry of Environment Republic Korea, 2018, Noise and Vibration Control Act, Act No. 15834.
- (2) European Parliament and Council of the European Union, 2002, Assessment and Management of Environmental Noise (EU Directive), Official Journal of the European Communities, L 189/12.
- (3) Ministry of Environment, 2016, Methodology for

Making Noise Map, Notice No. 2016-117.

- (4) Kim, P., Ryu, H. J., Jeon, J. J. and Chang, S. I., 2019, Artificial Neural Network Model Development based on Road-traffic Noise and Urban Form Indicators, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 577~583.

- (5) National Institute of Environmental Research, 2019, Notice No. 2019-62, Noise and Vibration Standard Process Test, Measurement Method of Exterior Noise Emitted by Road Vehicle for Management Standards, ES 03304.1c.

- (6) Nakajima, Y., Naito, T., Sunago, N., Ohshima, T. and Ono, N., 2016, DNN-based Environmental Sound Recognition with Real-recorded and Artificially-mixed Training Data, In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Vol. 253, No. 7, pp. 1832~1841.

- (7) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J., 1986, Learning Representations by Back-propagating Errors, Nature, Vol. 323, pp. 533~536.

- (8) Nair, V. and Hinton, G. E., 2010, Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines. In Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning, pp. 807~814.

- (9) Costa, M., 1996, Probabilistic Interpretation of Feedforward Network Outputs, with Relationships to Statistical Prediction of Ordinal Quantities. International Journal of Neural Systems, Vol. 7, No. 5, pp. 627~637.

- (10) Duchi, J., Hazan, E. and Singer, Y., 2011, Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization. Journal of Machine Learning Research, Vol. 12, pp. 2121~2159.

- (11) Hinton, G. E., Srivastava, N., Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Salakhutdinov, R. R., 2012, Improving Neural Networks by Preventing Co-adaptation of Feature Detectors, arXiv Preprint arXiv:1207.0580, <https://arxiv.org/abs/1207.0580>.

- (12) Powers, D. M., 2011, Evaluation: From Precision, Recall and F-measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation, Journal of Machine Learning Technologies, Vol. 2, No. 1, pp. 37~63.

- (13) Stehman, S. V., 1997, Selecting and Interpreting

Measures of Thematic Classification Accuracy, Remote Sensing of Environment, Vol. 62, No. 1, pp. 77~89.



His research interests include annoyance of environmental noise.



Her research interests include Environmental noise.

Jae Kwan Lee received B.S. degree in Environmental Engineering from University of Seoul in 2015. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Environmental Engineering in University of Seoul,

Bo Kyeong Kim received B.S. degree in Environmental Engineering from Kwangwoon in 2018. She is currently a M.S. candidate in the Department of Environmental Engineering in University of Seoul, Korea. Her



Seo Il Chang completed his Ph.D. studies in the Herrick laboratories, Dept. of Mechanical Engineering, Purdue University in 1993 on non-linear problems of mechanical systems including plates and shells.

In 1997, he started his academic professional career in the Dept. of Environmental Engineering, the University of Seoul. His major research interest has been the environmental noise and vibration control and people in his lab have generated noise maps of cities. Recently, he collaborates with researchers from other fields including transportation, GIS, air quality and public health to make environmental pollution maps and to assess health impact. His long-term research plan is to study the relations between environmental noise and urban forms.

북한산국립공원 탐방로 소리등급도 제작 연구

Sound Grade Classification of Bukhansan National Park Trails

유 지 수* · 장 서 일** · 기 경 석†
Jisu Yoo*, Seo Il Chang** and Kyong Seok Ki†

(Received May 11, 2020 ; Revised July 10, 2020 ; Accepted July 14, 2020)

Key Words : Acoustical · Environmental Resources(음향 및 환경인자), Soundscape(음환경), National Park(국립공원), Cluster Analysis(군집 분석)

ABSTRACT

The soundscape of national parks play an important role in preserving habitats and providing relaxation to visitors. However, several national parks in Korea are surrounded by large cities and sound emissions from the road traffic of these adjoining cities. Therefore, in the present study, we analyzed the acoustical-environmental factors and described the sound grade classifications of the Bukhansan National Park Trails, located in Seoul, for managing the soundscape. The acoustical factor measurements were carried out in five sections (15 km) of the national park along with a mobile application (rambler) for collecting trail GIS data. Environmental factors including building coverage ratio, longitudinal distance from the road, and green coverage ratio were obtained from a Seoul biotope map and digital map data. The sound grades of trails were classified using 4 factors, which were extracted from a factor analysis on 13 variables and 757 sites. Moreover, for grouping the sound grades, the K-means method was used to examine the characteristics of the five groups.

1. 서 론

국립공원은 동물, 식물, 지형, 역사문화자원과 같은 유형 자원뿐만 아니라 자연의 소리, 깨끗한 공기, 맑은 물, 아름다운 경관과 같은 무형 자원 또한 중요하다⁽¹⁾. 이 중 자연의 소리는 단순히 인위적 소음이 없는 상태를 나타내는 것이 아니라 바람소리, 물소리, 빗소리 등 환경소리에서부터 새소리, 곤충소리 등 생물소리를 포함하는 다양한 범위를 지닌다⁽²⁾. Haas, G. E. et al.⁽³⁾

의 연구에 의하면 미국 응답자의 72 %는 자연의 소리와 조용함은 국립공원이 존재하는 가장 중요한 이유 중 하나라고 답한바 있으며, Dawson, C. P. et al.⁽⁴⁾은 국립공원에서 탐방객의 경험을 극대화하기 위해서는 음환경(soundscape)의 보전이 필요하다고 주장하였다. 자연의 소리 중 특히 새소리, 물소리, 바람소리, 조용함은 음환경에서 중요한 인자로 나타나고 있다. Liu, J. et al.^(5,6)에 의하면 도시의 소음 조절을 위한 하나의 방법으로 새소리를 비롯한 생물들의 소리가 중요한 역할을 한다고 하였고, Kang, J.⁽⁷⁾은 도시재생

† Corresponding Author ; Member, Department of Environmental Science and Landscape Architecture, Sangji University, Professor
E-mail : ecokks@sangji.ac.kr

* Member, Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Student

** Member, School of Environmental Engineering, University of Seoul, Professor

A part of this paper was presented at the KSNVE 2017 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Deuk Sung Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

지역에서 물소리가 음환경의 가장 중요한 요소라고 하였다. 또한 Tse, M. S. et al.⁽⁸⁾는 도시공원 이용객이 산들바람 소리를 들으면 청각적 편안함을 느낀다고 하였다.

반면 공원을 방문하는 탐방객에게 가장 부정적인 영향을 미치는 소음 유형은 교통 소음, 항공기 소음, 보트 소음, 이용객 소음 등이었다. Cressford, G. R.⁽²⁾은 뉴질랜드의 대표적인 탐방로(great walks)을 대상으로 음환경을 조사한 결과 항공기 소음, 모터보트 소음, 산장(huts) 이용자 소음이 대표적인 이슈라고 하였으며, 관리 필요성이 있다고 하였다. 또한 Tse, M. S. et al.⁽⁸⁾은 홍콩의 도시공원을 대상으로 한 연구에서 대형차, 자전거의 소리는 이용객에게 부정적인 영향을 미친다고 하였다.

우리나라 국립공원은 많은 소음에 노출되어 있다. 대도시와 인접한 북한산국립공원, 무등산국립공원, 계룡산국립공원 등은 경계부에 고밀도 시가지와 도로가 접해있어 외부로부터 유입되는 소음의 영향이 크고, 도시로부터 떨어져 있다고 하더라도 대부분의 국립공원 내부가 고속도로나 지방도로에 의해 관통되고 있어 도로에서 유발되는 소음의 영향을 받을 것으로 예상된다. 이외에도 우리나라는 국립공원 고지대에 군부대나 통신시설 등 대규모 시설지가 입지하고 있는 경우가 많아 소음에 의한 생태계 영향이 클 것으로 예측된다. 또한 치악산국립공원과 같이 공항과 인접한 경우에는 항공기 소음에 의한 영향이 있을 것으로 예상된다.

국립공원에서 소음은 이용관리와 생물다양성 관리 측면에 부정적인 영향을 미친다. 이용관리 측면에서 국립공원 소음은 탐방객 간의 의사소통을 방해하기 때문에 사고 위험을 높일 수 있어 관리가 필요하며, Lynch, E. et al.⁽⁹⁾은 자연 보호를 교육할 수 있는 하나의 장이기 때문에 국립공원 내 소음을 교실과 같은 35 dB(A)이하로 유지할 필요가 있다고 하였다. 생물다양성 관리 측면에서는 국립공원 소음은 소리로 의사소통 하는 야생동물의 유효거리와 면적을 줄인다⁽¹⁰⁾. 즉 소음은 동물의 의사소통에 교란을 일으켜 서식처 질을 악화시키며 이로 인해 해당지역의 생물다양성에 위협을 미친다고 추측된다. 그러나 우리는 아직까지 국립공원 음환경의 중요성을 이해하고, 어떻게 현황을 파악하고, 어떻게 관리방안을 수립할지에 대한 인식 자체가 부족한 실정이다.

따라서 이 연구는 국내 대표적인 국립공원이면서 서울이라는 대도시와 인접해 있는 북한산국립공원을 대상으로 탐방로의 음환경 현황을 파악하고 이에 영향을 미치는 환경 인자를 분석하여 음환경을 고려한 탐방로 유형을 구분해보고자 한다. 나아가 이 자료는 국립공원 탐방로의 음환경을 관리하기 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상지

북한산은 1983년 4월 2일 국립공원으로 지정되었으며 우리나라 서울 외곽에 위치하여 자연 경관이 양호하고, 역사 및 문화 유적이 많이 분포되어 있어 약 2500만 수도권 인구가 즐겨 찾는 세계적으로 사례를 찾기 드문 도시형 국립공원이다⁽¹¹⁾. 북한산국립공원은 연간 약 850만 명이 방문하며 총 21개 구간 64 km의 북한산 탐방로가 있다. 북한산 탐방로는 국립공원관리공단에서 정상정복형 수직 탐방문화를 저지대 수평 탐방문화로 유도하기 위한 목적으로 기존의 셋길을 연결하고 북한산 자락을 완만하게 걸을 수 있도록 2010년 9월에 개통한 탐방로이다.

이 연구는 국내 도시형 국립공원 중 이용객이 가장 많은 북한산국립공원을 연구 대상지로 선정하여 조사를 진행하였다. 조사구간은 북한산국립공원 탐방로 중 서울시내 5개 구간(3구간~7구간)인 솔샘길, 흰구름길, 명상길, 평창마을길, 옛성길이며 약 15 km이다. 조사일시는 2017년 5월 2일(화), 5월 28일(일)이었으며 조사시간대는 09 시 ~ 17 시이었다. 조사일은 바람에 의한 영향이 매우 적은 날이었으며 2개 조사일 모두 징검다리 연휴 및 일요일에 해당했기 때문에 탐방

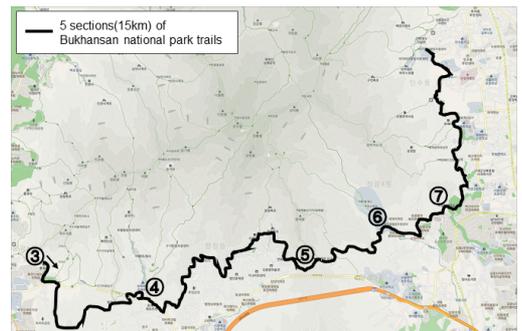


Fig. 1 Study area of Bukhansan national park trails

객 혼잡도는 유사하였다. Fig. 1은 탐방로 내 조사구간을 나타내었다

2.2 변수 설정

탐방로 소리등급도 제작을 위해, 변수는 음향인자와 환경인자로 구분하여 설정하였다. 음향인자는 소음도(dB(A))를 포함한 객관적 음질인자인 loudness, roughness, sharpness, tonality로 설정하였고 환경인자는 2015년 미국 NPS(national park service)에서 진행한 미국 전 지역의 소음지도 구축 시 사용했던 변수 중에서 선정하였다^(12,13). 선정된 환경인자는 해발고, 토지피복비율, 도로로부터의 이격거리, 수계로부터의 거리, 토지이용, 자연성이며, 연구자가 연구에 필요하다고 판단하여 추가한 변수는 식생유형, 층고(building height), 건폐율이다.

2.3 조사 분석방법

탐방로 조사구간의 음환경을 파악하기 위해 조사구간을 일정한 속도로 걸으며 binaural microphone이 장착되어 있는 음향측정 전문 장비 SQuadriga를 활용하여 탐방로의 소리를 측정 및 녹음하였다⁽¹⁴⁾. 또한 GPS 추적 application인 램블러⁽¹⁵⁾를 이용하여 탐방로의 고도(m)나 위경도 좌표 등의 공간 데이터를 확보하고 주변 환경을 촬영하여 분석 보조 자료로 활용하였다.

조사된 탐방로 조사구간의 음향인자는 음향분석 프로그램(ArtemiS 5.01)을 이용하여 분석하였고 환경인자는 주로 서울시 도시생태현황지도(biotope map)와 수치지도를 활용하여 분석하였다^(16,17). 서울시 도시생태현황지도는 2015년에 갱신되어 비교적 최근 자료이며 토지이용, 토지피복, 식생유형, 도로 폭, 건물층고, 건폐율, 자연성(비오톱 등급) 등 다양한 요인 등을 포함하고 있어 분석 자료로 활용하였다⁽¹⁸⁾. 환경인자 중 도로와의 거리, 수계와의 거리는 GIS 분석 프로그램(Arcgis 10.2)을 이용하여 분석하였고 해발고는 서울시 수치지도(1:25 000)를 이용하여 분석하였다.

분석 지점 수는 탐방로 조사 구간을 20 m로 등분한 총 757개이며, 각 지점에서 추출한 음향인자와 환경인자의 데이터는 GIS 분석 프로그램에서 중첩하여 통계분석에 적용하였다.

2.4 통계 분석방법

탐방로 소리등급도 제작을 위해 상관관계분석, 요

인분석, 군집분석을 실시하였다. 상관관계분석은 탐방로 조사구간의 음환경에 영향을 미치는 환경 인자를 파악하고자 음향인자와 환경인자 간 분석을 실시하였다.

요인 분석은 군집분석을 실시하기에 앞서 다양한 변수의 차원을 축소하여 단순화시키기 위해 시행하였으며 관측된 변수들에 영향을 미치고 있는 숨어있는 공통인자를 찾아내는데 목적이 있는 분석방법이다⁽¹⁹⁾. 요인분석을 위한 분석기법은 각 변수들의 분산구조보다 각 요인의 특성을 알고자 하는데 더 유용하게 이용되는 Varimax 회전방식을 이용하였다⁽²⁰⁾.

군집 분석은 K-means 군집분석방법을 사용하였고, 요인분석에서 얻어진 4개의 요인 점수를 기존 관측개체로 설정하여 시행하였다. K-means 군집분석방법은 어떤 군집을 대표하는 한 데이터를 기준으로 유사한 데이터를 묶어 군집을 형성하는 방법이다. 군집의 수는 국립공원의 기존 타 관리 등급과 같이 소리등급도를 제작하기 위해 5개로 설정하였다.

3. 연구 결과

3.1 탐방로 음향인자 및 환경인자 현황

(1) 음향인자 현황

탐방로 조사구간의 음환경 특성을 파악하기 위해 음향인자로 설정된 소음도(dB(A)), 라우드니스(loudness), 러프니스(roughness), 샤프니스(sharpness), 순음도(tonality)를 분석하였다.

조사구간의 소음도(dB(A)) 분석 결과, 도로를 지나 는 정릉계곡의 보국문로와 6차선의 진흥로, 주거지역이 밀집되어 있는 평창동은 도로교통소음이 발생되어 50.0 dB(A) 이상의 높은 소음도를 나타내고 있었다. 조사구간 내 산림지역의 경우 대부분 소음도가 높지는 않았지만 마지막 구간에 해당하는 7구간 옛성길은 주변 도로교통소음의 영향을 받아 소음도가 높게 나타났다. Fig. 2는 탐방로 조사구간의 소음도 분포 현황을 시각화하여 나타내었다.

조사구간의 라우드니스(loudness) 수치는 조사구간의 소음도와 밀접한 관련이 있기 때문에 소음도가 높은 구간은 라우드니스 수치도 높게 나타났다. 라우드니스 수치는 소음도가 높은 구간에서 더 강조되는 경향이 있어 조사구간 중 도로구간(보국문로, 진흥로 등)이 높게 나타나고 있었다.

조사구간의 러프니스(roughness) 수치는 도심으로부터 배경소음이 인지되거나 도로교통소음이 발생하고 있는 구간에서 높게 나타나고 있었다. 이 결과는 탐방로의 음환경을 분석할 때, 러프니스 수치가 높으면 배경소음이 유입된다고 판단할 수 있으며 부정적인 영향을 평가하는 근거가 될 수 있기 때문에 향후 탐방로의 매우 중요한 결과로 판단된다.

조사구간의 샤프니스(sharpness) 수치는 소리의 고주파수 영향을 나타내는 지표로, 소리의 발생비율이 높을수록 수치는 높아지는데 이는 이 연구에서 중요한 의미를 지니고 있는 것으로 판단된다. 조용한 산림지역 중에서 야생조류가 활발히 우는 구간은 고주파 영역의 소리가 많이 발생하여 샤프니스 수치가 높게 나타나며 탐방환경의 긍정적인 영향을 평가하는 근거가 될 수 있기 때문이다.

순음도(tonality)는 음색이라고도 하며, 음조의 조화량을 표시하는 지표이다. 조사구간의 순음도는 조사구간 중 비교적 조용한 산림구간에서 높은 수치로 나타났으며 도로가 통과하는 조사구간은 낮은 수치로 나타났다. 따라서 순음도(tonality)의 수치는 도심지로부터 소음의 영향을 적게 받을수록 높게 나타나는 것으로 판단된다.

(2) 환경인자 현황

탐방로 조사구간의 음향인자와의 상관관계 분석을 위해 탐방로에 영향을 미치는 환경인자 현황을 파악하였다.

조사구간의 해발고는 50 m 이상 400 m 이하의 범위에 분포하였다. 대부분의 구간은 50 m 이상 200 m 이하의 해발고를 유지하며 저지대에 분포하고 있었고, 북악터널 상부 능선부가 200 m ~ 400 m 범위로 가장 높은 구간이었다. 조사구간은 북한산국립공원 외곽의 능선부, 사면부, 계곡부를 넘나들고 있었으며, 현장조사 당시 도심지에서 멀리 떨어지고 해발고가 높아질수록 외부 소음이 줄어들고, 도심지와 가깝다고 하더라도 계곡부로 둘러싸여 외부소음이 차단된 구간은 다소 적막함을 느낄 수 있었다. 따라서 탐방로의 음환경은 지형의 영향을 많이 받고 있는 것으로 판단되었다.

조사구간의 포장률은 도심지역에 녹지지역 또는 투수지역이 거의 없기 때문에 산림지역이 주로 10% 미만, 시가화지역이 70% 이상을 나타내고 있었다. 그러나 도심 지역 내 학교는 운동장이 넓기 때문에 포장률

이 낮았고, 평창동과 같은 단독 주거지가 밀집되어 있는 지역은 다른 도심 지역에 비해 녹지율이 상대적으로 높아 50% ~ 70%의 포장률을 나타내고 있었다.

조사구간의 주변 도로는 국립공원 외부에서 산림계곡부 토지이용지역으로 진입하는 도로와 공원 경계부의 주거지역 내 도로로 대부분 2차선이고 구기터널을 지나가는 진흥로만 6차선의 도로다. 탐방로 조사구간에 영향을 미치는 주 소음원이 주변 도심지의 도로교통소음이기 때문에 조사구간과 도로 간 이격거리를 분석하였다. 분석 결과, 조사구간은 주변 2차선 이상의 도로로부터 900 m 이내에 모두 분포하고 있는 것으로 확인되었는데, 이는 도심지를 지나는 조사구간 이외에 산림지역도 주변 도로교통소음으로부터 노출되어 있을 가능성이 높다는 것을 의미하여 탐방 환경에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되었다. Fig. 3은 탐

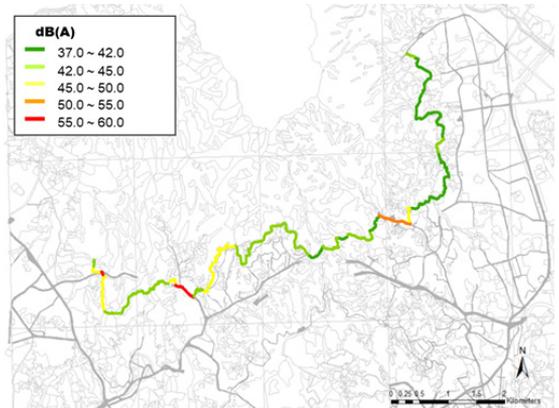


Fig. 2 Spatial distribution of dB(A) on trails

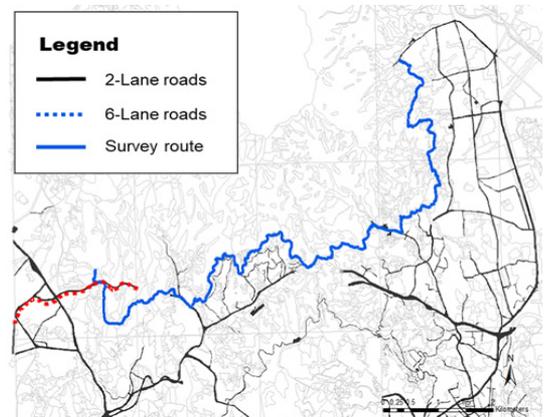


Fig. 3 Spatial distribution of roads around survey spots

방로 조사구간 주변 도로분포 현황을 나타내었고, Fig. 4는 탐방로 조사구간 주변 도로로부터의 거리 현황을 나타내었다.

조사구간의 주변 수계는 주요 계곡부를 중심으로 형성되어 있으며, 계곡의 규모가 크거나 수량이 풍부한 계곡으로부터 들리는 물소리는 탐방로에서 인지할 수 있었다. 국립공원 탐방로에서 물소리는 가장 중요한 소리자원이며 탐방자원 중 하나이다. 조사구간의 수계는 총 3개 지점에서 탐방로와 만나고 있었고, 수계로부터 발생하는 물소리가 탐방로에 미치는 영향을 파악하기 위해 수계 경계선을 기준으로 100 m의 등간격으로 거리를 두어 수계 현황을 파악하였다. 그러나 조사구간 주변 모든 계곡부에 도로가 조성되어 있어 도로교통소음과 수계에서 발생하는 물소리가 중첩되어 탐방로의 음환경에 부정적인 영향을 미치고 있

었다. Fig. 5는 탐방로 조사구간 주변 수계 분포 현황을 나타내었고, Fig. 6은 탐방로 조사구간 주변 수계로부터의 거리 현황을 나타내었다.

3.2 탐방로 음향인자와 환경인자 상관관계

탐방로의 음환경에 영향을 미치는 환경인자를 파악하기 위해 조사구간의 음향인자와 환경인자 간 상관관계를 분석하였다. 분석결과, 음향인자 중 소음도, 라우드니스는 환경인자 중 해발고, 도로거리, 수계거리, 투수포장률, 녹지율, 층위별 식피율(교목, 이교목, 관목, 초본)과는 부의 상관관계($p < 0.01$)를 나타내었고 건폐율, 불투수포장률과는 정의 상관관계($p < 0.01$)를 나타내었다. 즉, 조사구간이 도심으로부터 멀리 떨어져 있어 해발고가 높고, 도로로부터 멀리 떨어져 소음도와 라우드니스 수치는 낮고 도심으로부터 가까울수록 소음도와 라우드니스 수치는 높게 나타났다.

음향인자 중 리프니스 수치는 환경인자 중 평균층수, 건폐율과는 부의 상관관계($p < 0.01$)를 나타내었고, 수계거리, 관목식피율과는 정의 상관관계($p < 0.01$)를 나타내었다. 리프니스의 수치는 상관관계 분석 결과 그 자체로는 일정한 경향을 파악하기가 어려웠는데, 이를 리프니스 수치 분포 현황 및 특성과 결부하여 해석해보면 조사구간이 해발고가 높은 자연 지역을 통과하는 구간이라도 도심지로부터 배경소음이 강하게 들릴 경우 리프니스 수치가 강하게 나타나고 있는 것으로 판단되었다.

음향인자 중 샤프니스 수치는 환경인자 중 수계거리, 평균층수, 불투수포장율, 투수포장율과는 부의 상관관

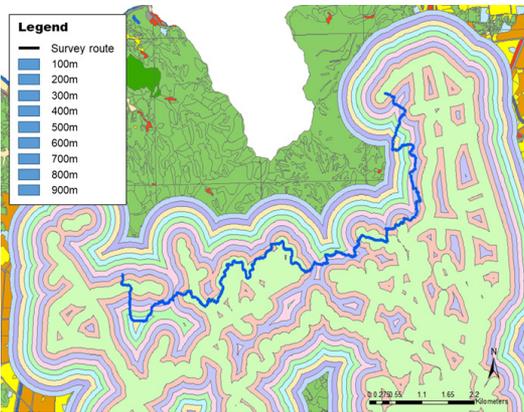


Fig. 4 Distance from the roads around survey spots

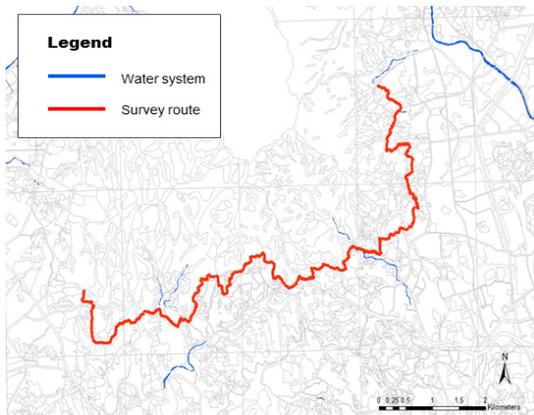


Fig. 5 Spatial distribution of water systems around survey spots

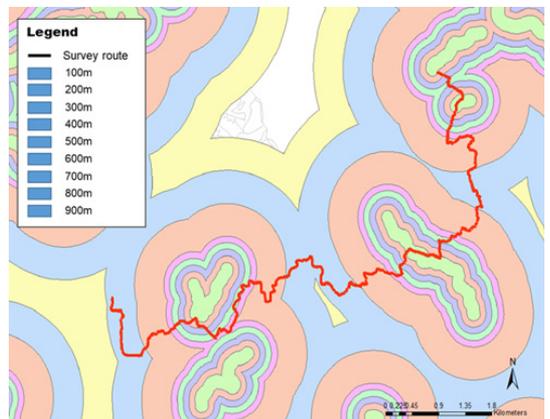


Fig. 6 Distance from the water systems around survey spots

계($p < 0.01$)를 나타내었고, 도로거리, 녹지율, 식피율(교목, 아교목, 관목, 초본)과는 정의 상관관계($p < 0.01$)를 나타내었다. 이는 야생조류가 활발히 우는 산림지역에서 고주파 영역의 소리가 많이 발생하고 있기 때문에 이러한 경향이 나타나는 것으로 판단되었다.

음향인자 중 순음도는 환경인자 중 해발고, 도로거리, 수계거리, 녹지율, 식피율(교목, 아교목, 관목, 초본)과는 부의 상관관계($p < 0.01$)를 나타내었고, 평균층수, 건폐율, 불투수포장율과는 정의 상관관계($p < 0.01$)를 나타내었다. 이는 산림지역의 자연성이 높을수록 순음도가 높아져 순음이 많아지고, 도심지는 복잡함이 많이 발생하고 있어 순음도가 낮게 나타났을 것으로 판단된다.

상관관계 분석결과는 Table 1에 나타내었다.

3.3 탐방로 소리등급도 구분

(1) 요인분석

탐방로 조사구간을 소리 등급으로 구분하여 소리 등급도를 제작하기 위해 요인분석과 군집분석을 실시하였다.

요인분석은 변수 간 상관계수에 근거하여 관계가 높은 변수들을 묶어 설명 가능한 몇 개의 요인으로 요약하는 방법이라고 할 수 있다. 이를 실시할 때는 요인의 수를 결정하기 위해 고유값(eigenvalue)을 참고하는데, 일반적으로 고유값이 1이상일 때 하나의

Table 1 The correlation of acoustic factors with environmental factors of trail

Pearson correlation coefficient	Height above sea level(m)	Longitudinal distance from the road	Longitudinal distance from water system	Average number of floors of the building	Building coverage ratio(%)	Impervious coverage ratio (%)	Permeable coverage ratio (%)	Green coverage ratio(%)
dB(A)	-.169**	-.496**	-.157**	.060	.133**	.633**	-.029	-.636**
Loudness	-.321**	-.257**	-.222**	-.054	-.041	.393**	-.011	-.347**
Roughness	.010	-.048	.115**	-.120**	-.108**	.026	-.035	.028
Sharpness	-.166**	.278**	-.182**	-.173**	-.152**	-.244**	-.097**	.296**
Tonality	-.265**	-.358**	-.279**	.190**	.193**	.351**	.053	-.408**

** . P < 0.01. * . P < 0.05. N = 757

Table 2 Factor loading by Varimax

	Variables	Factor			
		1	2	3	4
Sound factor	dB(A)	0.577	0.737	-0.190	-0.051
	Loudness	0.303	0.806	-0.330	0.153
	Roughness	-0.115	0.851	0.191	-0.196
	Sharpness	-0.270	-0.035	-0.347	0.641
	Tonality	0.380	0.435	-0.416	-0.210
Environmental factor	Longitudinal distance from water system	-0.108	0.035	0.803	-0.059
	Longitudinal distance from road	-0.847	-0.068	-0.058	0.130
	Height above sea level	0.146	-0.169	0.802	0.005
	Building coverage ratio	0.204	-0.246	-0.383	-0.670
	Impervious coverage ratio	0.931	0.187	0.068	0.116
	Green coverage ratio	-0.957	-0.064	0.094	0.148
	Others ratio	0.094	-0.173	-0.010	0.446
Naturality(biotope grade)	0.964	0.063	-0.072	-0.045	

Factoring method : principal axis factoring,
 Lotation method: varimax

a. Rotation converged in 5 iterations

Table 3 Cluster analysis by K-mean clustering

	Cluster				
	1	2	3	4	5
Factor 1	-0.18	1.39	1.48	1.56	-0.78
Factor 2	-0.69	2.18	-2.74	-0.41	0.45
Factor 3	-0.71	-1.33	-0.15	0.94	0.53
Factor 4	-0.40	0.95	7.06	0.30	0.00

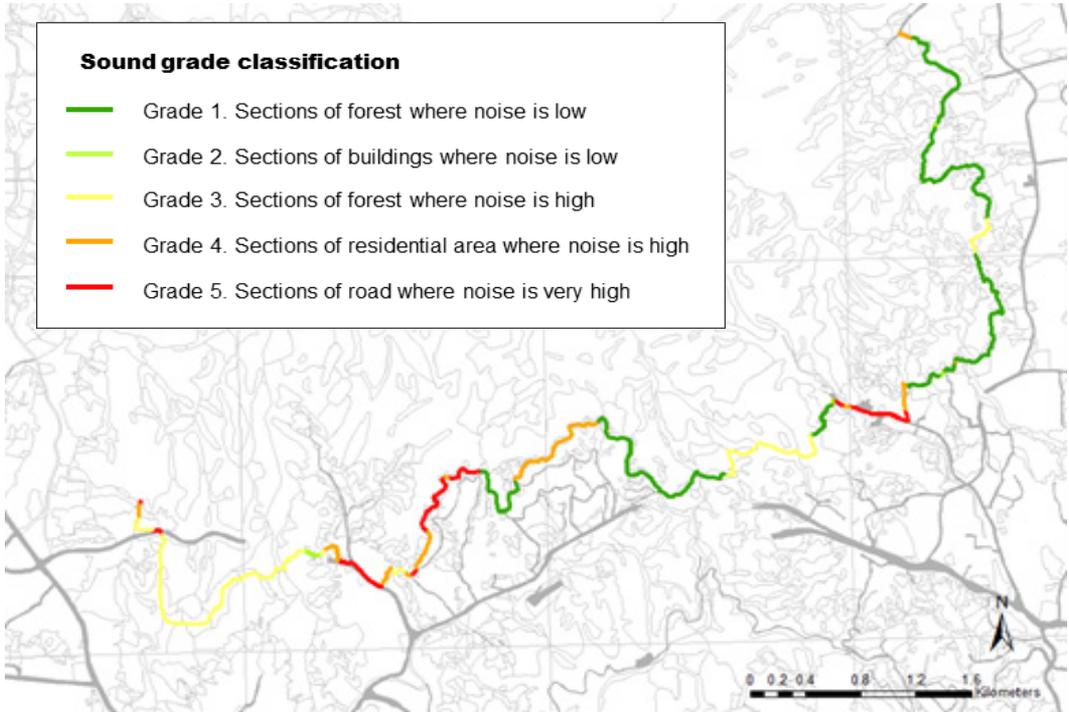


Fig. 7 Sound grade classification of Bukhansan national park trails

요인으로 간주한다. 13개의 변수(음향변수 5개, 환경 변수 8개)와 757개의 조사구간 분석 지점에 대한 요인 분석을 실시한 결과, 고유값(eigenvalue)이 1 이상인 인자는 모두 4개가 추출되었다. 요인분석 해석에 있어서 일반적으로 요인 적재값이 절대값 기준 0.4 이상이면 유의한 변수로, 절대값 기준 0.5 이상이면 중요 변수로 설명한다⁽²¹⁾.

제1인자는 dB(A), 불투수포장율, 자연성(비오톱등급)에서 높은 정(+)의 요인부하값(factor loading)을 보였고, 도로로부터의 거리, 녹지율에서 높은 부(-)의 요인부하값을 보여 ‘소음지요인’으로 명명하였다. 제2인자는 dB(A), 라우드니스(loudness)와 러프니스(roughness)에서 높은 정(+)의 요인부하값을 보였고,

그 외 요인들의 요인부하값은 낮게 나타나 ‘시끄러운 산림지요인’으로 명명하였다. 제3인자는 수계로부터의 거리와 해발고에서 높은 정(+)의 요인부하값을 보였고 그 외 요인들의 요인부하값은 낮게 나타나 ‘조용한 고지대요인’으로 명명하였다. 제4인자는 건폐율에서 높은 정(+)의 요인부하값을 보였고, 그 외 요인들의 요인부하값은 낮게 나타나 ‘조용한 도심지요인’으로 명명하였다. 요인분석 실시한 결과는 Table 2에 나타내었다.

(2) 소리 등급 군집분석

탐방로 조사구간을 소리 등급 5개로 군집분석한 결과, 군집 1은 조용한 산림구간, 군집 2는 조용하고 주변에

건물이 많은 구간, 군집 3은 소음이 들리는 산림구간, 군집 4는 소음이 들리며 주변이 주거지역인 구간, 군집 5는 매우 시끄러우며 주변에 도로가 지나는 구간으로 구분되었다. 군집분석 결과는 Table 3에 나타내었다.

군집 1과 군집 2는 도심으로부터 유입되는 소음이 적고 야생동물의 소리가 많이 들리는 곳으로 비교적 양호한 음환경을 지닌 탐방로 구간에 해당하며 탐방의 만족도가 높을 것으로 판단된다. 군집 3은 산림지역 내 탐방로임에도 불구하고 도심과 인접해 있어 도심으로부터 유입되는 소음이 인지된다. 따라서 음환경의 관점에서는 탐방의 질은 군집 1, 2와 비교하여 낮을 것으로 판단된다. 군집 4는 전반적으로 조용하지만 주변 주거지 내부에 도로가 위치하기 때문에 주기적으로 통행하는 차량에 의한 소음이 발생하는 구간이다. 군집 5는 교통량이 많고 소음이 강한 도로가 지나는 구간에 해당한다. 군집분석 결과 작성된 탐방로 조사구간의 소리등급도 Fig. 7에 나타내었다.

4. 결 론

이 연구는 다음과 같은 중요성을 지니고 있다. 첫째, 국립공원 내 핵심 탐방시설인 탐방로를 대상으로 음환경의 특성을 분석하고 소리등급도를 작성한 초기 연구이다. 두 번째, 기존 음환경 조사는 특정 조사지점에 대한 음환경(soundcape)을 분석하였는데, 이 연구의 경우 조사구간 전체에 대한 음환경 조사를 실시하였다는 측면에서 기존 연구와 차별성이 있다. 세 번째, 탐방로의 음환경은 탐방의 질에 있어 매우 중요한 요인 중 하나임에도 불구하고 그동안 간과해 왔던 부분을 규명함으로써 이 연구의 결과를 바탕으로 탐방로의 소음현황 파악 및 소리탐방자원 발굴에 적용할 수 있는 기초자료로 활용이 가능하다.

반면 이 연구는 한계 또한 지니고 있다. 이 연구는 대도시인 서울특별시와 인접한 북한산국립공원의 외곽부 탐방로를 대상으로 한 것으로 일반적인 국립공원에 비해 도심지와 인접해 있는 특성이 있기 때문에 소음에 노출이 많이 되어 있는 특수한 경우이다. 또한 조사구간은 북한산 탐방로 64 km 구간 중 도심지역과 접해 있는 구간을 선정했기 때문에 상대적으로 개발밀도가 낮은 지역에 대한 조사가 향후 진행되어야 할 것이다.

마지막으로 이 연구에서 환경요인을 분석하기 위

해 활용한 서울시 도시생태현황지도 자료는 서울시에 한정하여 사용할 수 있는 자료이기 때문에 추후 다른 지역에도 적용할 수 있는 일반적인 환경요인을 사용하여 분석해야될 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 기초연구사업(NRF-2015R1D1A1A01060891)입니다.

이 논문은 2019년도 상지대학교 교내연구비, 한국연구재단(NRF-2017R1C1B1008457), 국립공원공단에 지원 하에 진행되었습니다.

References

- (1) Miller, N. P., 2008, US National Parks and Management of Park Soundscapes: A Review, Applied Acoustics, Vol. 69, No. 2, pp. 77~92.
- (2) Cressford, G. R., 2000, Noise Impact Issues on the Great Walks of New Zealand, RMRS-P, Vol. 4, pp. 66~79.
- (3) Haas, G. E. and Wakefield, T. J., 1998, National Parks and the American Public: A National Public Opinion Survey of the National Park System. National Park and Conservation Association and Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- (4) Dawson, C. P., Newman, P. and Watson, A., 1998, Cognitive Dimensions of Recreational User Experiences in Wilderness: An Exploratory Study in Adirondack Wilderness Areas, General Technical Report, pp. 257~260.
- (5) Liu, J., Kang, J., Luo, T. and Behm, H., 2013, Landscape Effects on Soundscape Experience in City Parks, Science of the Total Environment, Vol. 454, pp. 474~481.
- (6) Liu, J., Kang, J., Behm, H. and Luo, T., 2014, Effects of Landscape on Soundscape Perception: Soundwalks in City Parks, Landscape Science, Planning and Design, Vol. 123, pp. 30~40.
- (7) Kang, J., 2012, On the Diversity of Urban Waterscape, Proceedings of the Acoustics 2010 Nantes Conference, France, pp. 3533~3538.

- (8) Tse, M. S., Chau, C. K., Choy, Y. S., Tsui, W. K., Chan, C. N. and Tang, S. K., 2012, Perception of Urban Park Soundscape, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 131, No. 4, pp. 2762~2771.
- (9) Lynch, E., Joyce, D. and Fristrup, K., 2011, Anassessment of Noise Audibility and Sound Levels in US National Parks, *Landscape Ecology*, Vol. 26, No. 9, p. 1297.
- (10) Barber, J. R., Crooks, K. R. and Fristrup, K. M., 2010, The Costs of Chronic Noise Exposure for Terrestrial Organisms, *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 25, No. 3, pp. 180~189.
- (11) Yoo, K. J., Han, B. H., Choi, J. W. and Hur, J. Y., 2012, A Study on Community Memper Perception due to Impacts on Development of the Dulegil in Bukhansan National Park, *Korean Journal of Environment and Ecology*, Vol. 26, No. 1, pp. 113~124.
- (12) Zwicker, E. and Fastl, H., 1990, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer, Berlin; New York.
- (13) National Park Service, 2017, <https://www.nps.gov/subjects/sound/soundmap.htm> (Accessed March 2. 2020).
- (14) Choi, J. S., 2019, Binaural Sound Measurement and NVH Analysis of HEAD Acoustics GmbH, Germany, *Journal of KSNVE*, Vol. 29, No. 4, pp. 34~39.
- (15) Ramblr, 2019, <https://www.ramblr.com/web/main> (Accessed Feb 28. 2020).
- (16) Choi, S., Jho, M. J., Lee, K. H., Min, Y. K., Oh, A. R. and Sohn, J., 1998) EEG and Psychological Responses to the Sound Characteristics of Car Horns, *Proceedings of Korea Society for Emotion and Sensibility Fall Meeting*, pp. 154~157.
- (17) Artemis (Ver. 5.01) Computer Software, Germany: Metier.
- (18) http://115.84.164.44/4DUPIS/sub7/sub7_7_4.jsp
- (19) Huh, M. H. and Yang, K. S., 2013, *SPSS Multivariate Data Analysis*, 2nd Ed., Hannarae Publishing Co., Seoul, Korea
- (20) Noh, H. J., 2008, *From Basis of Multivariate Analysis to Application by SPSS*, Hanol Publishing, Seoul, Korea.
- (21) Koh, S. J., 2012, *Researches of Game Addiction among Teenagers using FA and LCA*, Master's thesis, Ewha Womans University, Seoul, <http://dspace.e-wha.ac.kr/handle/2015.oak/189941>.



Jisu Yoo received her M.S. degree from the Energy and Environmental System Enginnering Department at University of Seoul in 2019. She is currently a Ph.D. candidate in Environmental Engineering at University of Seoul. Her research interests are modeling and mapping of environmental noise impact. Especially, her recent research is focusing on Soundscape and nvironmental noise impact on green spaces.



Kyongseok Ki received his doctorate from the Department of Landscape Architecture at University of Seoul in 2011. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Environmental Engineering at the University of Seoul. He is interested in soundscape ecology. Especially, his recent research is focusing on phenology observation using bioacoustics and sound environment in protected areas.

주행특성을 이용한 온 마운트 장비 추적 차량의 진동 프로파일 개발

Development of Vibration Profiles of Tracked Vehicle with On-mount Equipment Using Driving Characteristics

서 성 원* · 이 은 호* · 이 승 한* · 곽 도 혁** · 김 창 남** · 박 노 철†
SungWon Suh*, EunHo Lee*, Seoung-Han Lee*, Do-Hyuk Kwak**, Chang-Nam Kim**
and No-Cheol Park†

(Received May 26, 2020 ; Revised July 10, 2020 ; Accepted July 24, 2020)

Key Words : Vibration Profile(진동 프로파일), Tracked Vehicle(궤도 차량), FEA(finite element analysis, 유한요소해석)

ABSTRACT

Military products require more product life considerations than civilian products. Equipment mounted on the operating means is continuously exposed to vibrations. Therefore, vibration is an important environmental factor to consider during product development. However, it is common to proceed with product development by applying the vibration profile obtained from the U.S. military standards because securing actual vibration data related to the product is difficult in terms of cost and time. Moreover, the vibration profile of the tracked vehicle is currently unavailable. In this paper, we propose a methodology that considers the characteristics of military products and transport vibrations for generating the vibration profile of a tracked vehicle. We measured the vibration level of the tracked vehicle during transportation. In addition, by building a finite element model of the product, a vibration profile was created using ANSYS Mechanical, which is a commercial finite element analysis program. In this study, the vibration profile of the tracked vehicle was created, and it is expected to be used for future studies and help in the development of products.

1. 서 론

무한궤도차량은 표면적이 넓은 궤도로 차량을 분산시켜 접지면의 하중 밀도가 낮다. 그래서 부드러운 지면에서 가라앉는 현상이 거의 없어서 작전환경인

오프로드에서 주행능력이 탁월한 효과가 있다^(1,2). 최근의 전장 환경은 21세기 정보화 시대에 따라 실시간 네트워크의 중요성이 커지고 있다⁽³⁾. 따라서 통신장비와 전자장비의 중요성이 증대되고 있고, 실시간 네트워크를 위하여 운송수단에 통신위성 단말을 탑재하여 운용하는 사례들이 늘어나고 있다⁽⁴⁾. 하지만 안테

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

* Member, Yonsei University, Department of Mechanical Engineering, Student

** Member, LIG Nex1, Researcher

‡ Recommended by Editor Sang Wook Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

나의 경우 주행환경인 진동환경에 민감한 제품이기 때문에 설계단계에서 충분한 고려가 필요하다⁽⁵⁾.

군용장비는 제품의 운용 환경하에서 요구 성능을 만족하도록 설계, 제작되고 환경시험을 통해 평가하는 과정을 거치는 것이 일반적이다. 환경조건에 대한 규격을 결정할 때 실 운용환경을 실측하거나 군사규격의 진동 프로파일을 적용하는 경우로 나누어 볼 수 있다. 진동 프로파일은 활용성이 좋지만, 다양한 시험 데이터를 하나의 데이터로 일반화하는 작업을 진행하였기 때문에 다소 보수적으로 제시 되어있다⁽⁶⁾. 그래서 MIL-STD-810D부터는 데이터의 정확성을 높이기 위하여 맞춤 작업인 test tailoring의 필요성을 제시하고 있다⁽⁷⁾. 또한, 연구 대상인 무한궤도차량에 대한 진동 프로파일은 현재 부재인 상황이므로 진동 프로파일에 대한 연구가 필요하다.

진동 프로파일의 테일러링에 대한 연구는 설계의 효율성과 확장성, 비용의 절감을 위해 관심이 대두되고 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 그래서 다양한 운송수단별 테일러링 방법에 관한 연구가 진행되고 있고, 일반적인 연구는 미군사규격을 바탕으로 국내 환경에 고려한 시험법과 시험 수준에 관한 연구가 진행되었다⁽¹¹⁾. 국내에서는 군사규격을 이해하는 연구가 주를 이루고 있으며, 테일러링 및 진동규격 생성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 차량용 진동 프로파일은 탑재 장비의 특성은 고려하지 않은 주행특성만 고려하여 생성되고 있다⁽¹²⁾. 그러므로 전자장비와 통신 위성단말과 같은 진동에 취약한 제품의 특성을 반영하여 프로파일을 생성하는 연구가 필요하다.

이 논문에서는 실제 주행시험 진동 데이터를 바탕으로 구축한 탑재 장비의 유한요소해석모델의 특성을 고려한 진동 프로파일을 생성하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 탑재된 장비의 진동 전달수준을 파악하기 위하여 주행시험을 진행하였고, 안테나의 유한요소해석모델을 구축하여 주행진동에 의한 매개변수 연구를 진행하였다. 해석적으로 도출한 프로파일을 통하여 제품의 취약부위와 수명을 파악할 수 있고, 차기 진동 프로파일 연구 및 제품에 활용될 것으로 보인다.

2. 주행시험 및 데이터 처리

이 장에서는 기존에 없는 궤도차량의 진동 프로파일을 생성하기 위하여 주행 시험을 통해 제품에 전달

되는 진동 수준을 측정이 필요하다. 그래서 기존 군용궤도차량의 운용환경에서 중량을 측정하고 탑재된 장비와 인원에 맞는 모래주머니를 추가하여 시험을 진행하였다. 측정된 진동 데이터는 데이터 처리를 진행하여 최종 PSD(power spectral density)를 구하는 작업을 진행하였다. 2장의 프로세스는 Fig. 1과 같이 진행하였다.

2.1 궤도차량 주행시험

궤도차량의 주행시험은 가속도계와 계측기를 사용하였다. Fig. 2와 같이 탑재장비에 3축 가속도계를 사용하여, 제품에 전달되는 진동수준을 측정하였다. 미군 군사규격에서 권장하는 복수의 가속도계를 부착하여 시험을 진행하였다. 그리고 시험의 불확실성을 보

✓ Final PSD data generation process

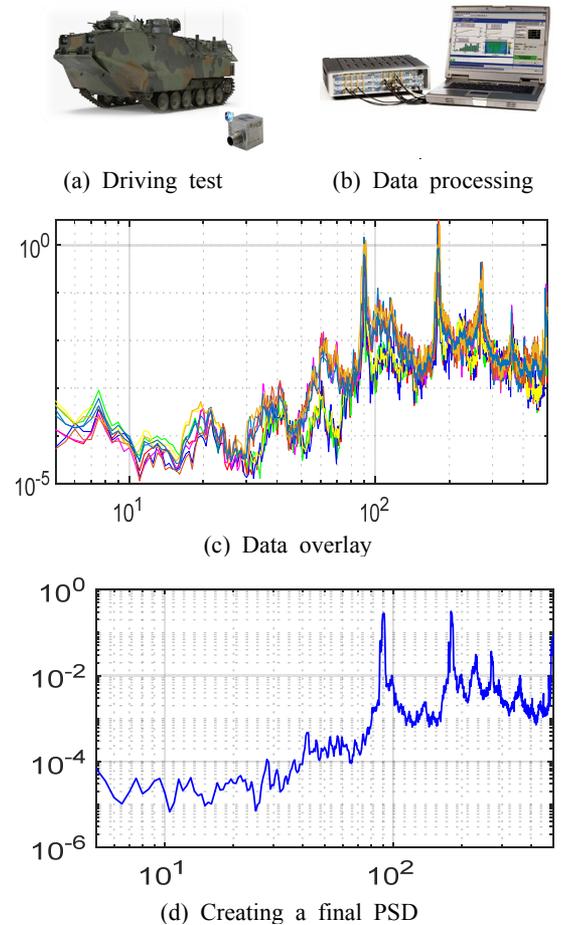


Fig. 1 PSD data generation process

완하기 위하여 4회의 반복시험을 진행하였으며, 위치 별 진동 오차를 고려하기 위하여 2개의 가속도계를 대칭으로 부착하였다. 주행 조건은 제품 수명의 가장 취약한 조건으로 선정하여 미군 군사규격에서 제시하는 궤도차량이 가장 취약한 포장도로에서 시험을 진행하였다. 그리고 주행속도는 해당차량의 최대평균속도인 50 km/h로 등속 주행을 진행하였으며, 자세한 주행시험정보는 Table 1에 정리되었다.

2.2 데이터 처리

시험을 통해 측정된 데이터는 가속 시간 이력 신호이며, raw data만으로 차량 주행 시 발생하는 진동 수준을 정성적으로 파악할 수 있다. 하지만 차량의 정확한 동적 특성을 파악하는 데에는 어려움이 따른다. 따라서 이 연구에서는 PSD 계산을 이용하여 주파수 분석 및 RMS(root mean square) 값 분석을 통하여 차량의 진동수준 및 동특성을 파악하였다. 데이터 처리의 필요한 정보는 Table 2를 참고하여 진행하였다(7).

최종 PSD data는 실측 데이터보다 약간 보수적으로 추정하는 것이 바람직하다. 주행 시험 별 각 주파수 평균값을 이용하는 방법도 있으나, 위치의 차이와 테스트의 불확실성을 고려하기 위하여 표준편차를 활용하여 생성하였다. PSD data 합성방법은 미군 군사

규격에서 권장하는 주파수 별 평균과 표준편차의 합을 사용하였다(7). 최종 PSD data 생성 프로세스는 Fig. 3과 같이 진행하였다.

측별 최종 PSD data는 Fig. 4와 같다. 실측 데이터

Table 2 Data processing parameters setting

Specification	Value	Unit
Sampling rate	4096	Hz
Overlap	66.6	%
Sampling time	2	sec
Frequency resolution	0.5	Hz
Window type	Hanning	None
Start frequency	5	Hz
End frequency	500	Hz
DC component	Remove	None

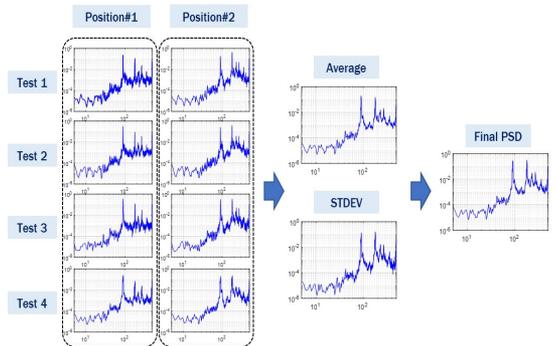


Fig. 3 Data overlay process

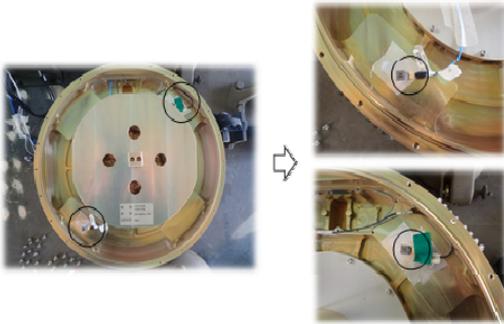


Fig. 2 Accelerometer mounting position

Table 1 Driving test condition

Category	Value	Unit
Test vehicle	Tracked vehicle	None
Road surface	Paved road	None
Distance	1.6	km
Speed	50	km/h
Accelerometers	2	each

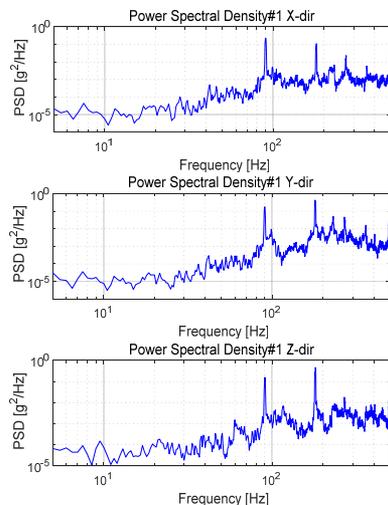


Fig. 4 Final PSD data

를 바탕으로 생성한 PSD data는 4장에서 해석모델의 input data로 사용하였다. 데이터의 자세한 진동 수준은 Table 3에 표기하였다.

3. 유한요소해석모델 구축

3.1 유한요소해석모델

이 연구에서는 주행 진동이 탑재 장비에 미치는 영향을 시뮬레이션 하기 위해 유한요소 해석모델을 구축했다. 전체 FE분석 절차에서는 ANSYS mechanical 19.2를 사용하였으며, Fig. 5와 같이 최종 해석 모델을 구축하였다. ANSYS에서 제공하는 quadratic node로 구성된 solid186요소를 사용하였다. 또한, 구조의 동작을 정확히 구현하기 위하여 주요 부품에 대해 높은 절점 품질을 확보해야 한다. 절점의 품질을 높이기 위하여, 응력을 많이 받는 취약 부품별로 Fig. 5와 같이 응력이 수렴되도록 모델을 구축하였다. 안테나에서 가장 취약한 양각 브레이크 부품은 0.002 m의 격자크기로 재생성하였다. 최종적인 해석 모델은 총 303 922개의 요소와 586 025개의 절점으로 구성되었다.

탑재 장비인 위성통신 단말의 동특성은 해석모델의 모드 해석을 활용하여 Fig. 6과 같이 요약하여 표현하였다. Fig. 6과 같이 유효질량(effective mass)이 큰 모드들은 저주파 대역, 60 Hz수준에 포진되어 있다. 그래서 저 주파대역의 값들이 충분히 반영되어 진동프로파일을 생성해야 한다. 그리고 데이터를 분석할 때 총 유효질량이 실제 질량의 90% 이상이면 충분한 것으로 판단된다⁽¹³⁾.

4. 해석모델을 활용한 진동프로파일 생성

앞서 서론에 기술하였듯이 진동 프로파일을 활용하여 구조 건전성평가를 진행하게 된다. 하지만 미군 군사규격은 사용의 용이성을 위하여 다양한 차량의 데이터를 하나로 일반화하는 작업을 진행하였기 때문

에 다소 보수적인 결과를 가지게 된다. 그래서 이 논문에서는 앞의 2장과 3장에서 진행한 궤차량의 주행 진동 데이터와 탑재 장비의 주요 주파수대역을 고려하여 진동 프로파일 생성하였다. 이 연구는 탑재 장비의 해석모델 활용하여 진동 프로파일을 생성하는 방법을 제시하고자 한다.

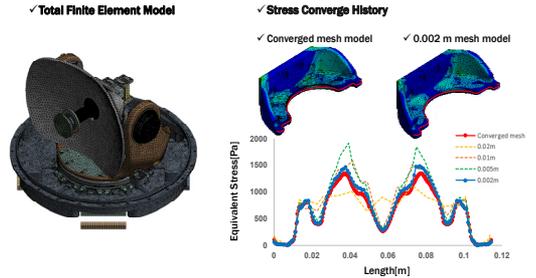
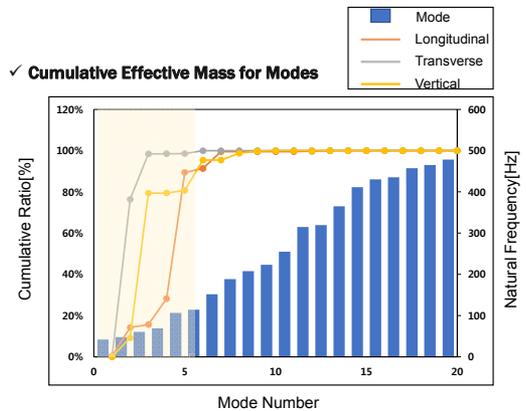


Fig. 5 Whole and mesh determination method



High Effective Mass Modes

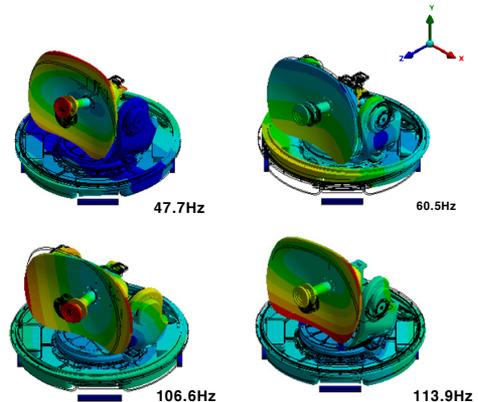


Fig. 6 Dynamic characteristic of the mounting equipment

Table 3 RMS value of final PSD data

Direction	RMS (G ² /Hz)	Peak value (G ² /Hz)
Longitudinal(X)	1.99	0.37
Transverse(Y)	1.93	0.14
Vertical(Z)	4.16	2.82

4.1 플로우 레벨

Final PSD data는 breakpoint의 수가 많음으로 그대로 내구성 테스트에서 사용하는 데에는 무리가 있다. Floor level은 탑재 장비의 미비한 영향을 미치는 영역을 특정 값으로 단순화하여 시험, 해석에서의 효율성을 높여주는 변수이다. 그리고 floor level은 최소한도 값, 전체 진동 수준과 같다. 그러므로 진동의 수준을 나타내는 RMS 값을 전체 주파수 범위로 평균을 낸 값으로 정의하였다.

(1) 피크 제거

무한궤도차량은 협대역과 광대역을 모두 갖는 진동이다. 이러한 진동은 협대역에 의해 전체 RMS 수준이 높아지게 된다. Fig. 7(b)의 floor level 1은 협대역을 포함하여 전체 RMS 수준이 높아지는 문제가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그래서 Fig. 7(a)와 같이

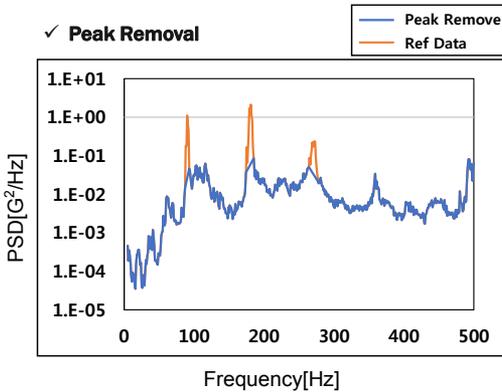
협대역의 피크를 제거하여 기존 진동 수준과 유사한 수준의 floor level을 산정하였다.

(2) 저주파 대역

통신 단말의 동특성은 Fig. 6에서 모드의 누적 유효 질량이 저주파 대역에 포진하는 것을 확인하였다. 저주파의 floor level을 Fig. 7처럼 직선으로 하게 된다면, 실측 데이터보다 다소 보수적인 결과를 갖게 된다. 그래서 5 Hz ~ 60 Hz구간의 파라미터 스테디를 진행하였다. Fig. 8의 test 1, 2는 로그 스케일에서 선

Table 4 Analysis by low frequency range

Value	Stress (Mpa)
Reference	34.2
Test 1	42.2
Test 2	40.8
Test 3	37.2



(a) Narrowband peak removal

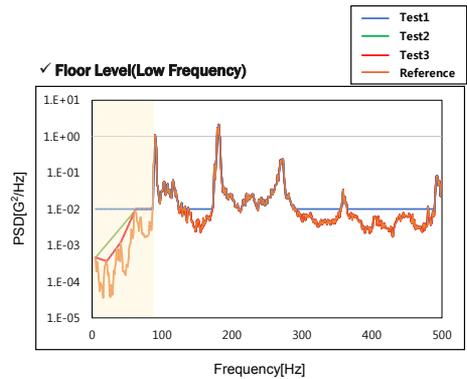
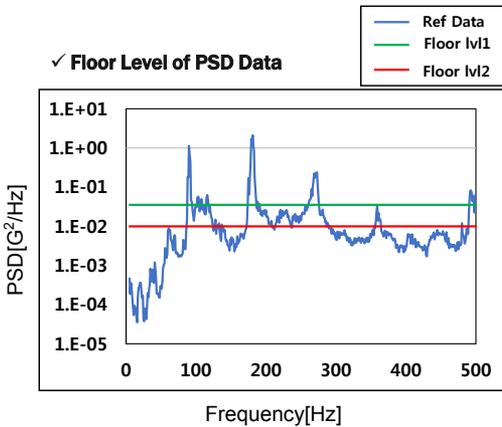


Fig. 8 Parameter study of low frequency



(b) Floor level of PSD data

Fig. 7 Peak processing method for floor level calculation

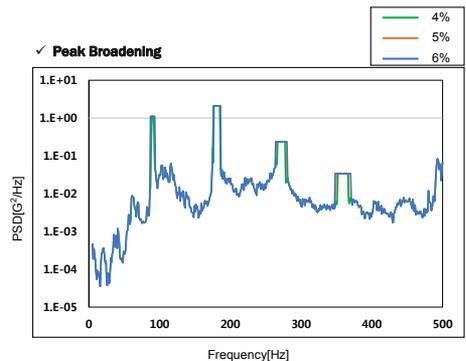


Fig. 9 Peak broadening of PSD data

형으로 계산하여 기존 데이터보다 유사한 결과를 확인하였다. 저주파 영역에 대한 응력결과는 Table 4와 같이 확인하였다. 결과적으로 Fig. 8의 test 3과 같이 누적 유효질량이 높은 주파수 영역의 경우 특정 PSD 점만 연결하여 reference 데이터인 주행 진동 데이터와 유사한 프로파일 생성을 진행하였다.

4.2 협대역

이 장에서는 무한 궤도차량의 피크 값을 Fig. 9와 같이 브로드닝(broadening)작업을 하였다. 협대역은 미군

Table 5 Stress level by peak broadening

Value	Stress (Mpa)
Reference	34.2
4 %	35.6
5 %	36.3
6 %	37.9

군사규격을 참고하여 주요한 5개의 협대역을 생성하였다. 그리고 대역폭이 매우 작은 경우에는 최소값을 4 Hz로 선정하였다⁽¹⁴⁾. 진동 프로파일에 대하여 피크 브로드닝에 대한 구체적인 방법은 제시되어 있지 않음으로 수치를 변경해가며 매개변수 연구를 진행하였다.

피크 브로드닝에 의한 랜덤 진동의 응력 값은 Table 5와 표기하였다. 4%와 같이 작으면 기존 raw data와 응력수준은 유사하지만, 피크 주변의 데이터를 포함하지 못하는 경우가 있으므로 5%를 사용하였다.

4.3 최종 진동프로파일

4.1, 4.2장에서 확인한 최적화된 수치를 통해서 최종 진동프로파일을 Fig. 10과 같이 생성하였다. Fig. 11은 실측 데이터와 생성한 진동프로파일 데이터의 랜덤응력 해석결과이다. 동일한 취약부위 및 기존 데이터의 15%수준의 보수성을 가지는 것을 파악하여 사용에 용이할 것으로 예상된다.

5. 결 론

이 논문에서는 위성 단말과 전자장비와 같이 진동에 매우 취약한 장비에 대하여 탑재 장비의 특성을 고려하여 진동 프로파일을 생성하는 방안에 대하여 제시하였다. 궤도 차량에 관한 주행 진동 실측데이터를 측정하였고, 미군 군사규격에서 제공하는 데이터 처리방법을 참고하여 최종 PSD data를 생성하였다. 진동 프로파일을 시뮬레이션 하기 위하여 탑재 장비의 특성을 고려한 유한요소해석모델을 구축하였다. 그리고 진동 프로파일의 변수인 플로우 레벨과 협대역폭의 파라미터 스티디를 통해서 최종 PSD data와 유사한 진동 프로파일을 생성하였다.

현재 우리나라에서는 진동 프로파일과 군사규격을 실제 환경에 맞게 적용하는 테일러링에 대한 연구가 부족하고, 미군 군사규격을 그대로 사용하는 것이 현실이다. 이 연구에서는 주장하는 바와 같이 주행 특성과 탑재 장비의 특성을 고려하여 진동 프로파일을 생성한다면 제품개발 단계에서 보수성에 대한 과도한 비용을 줄일 수 있고, 제품의 수명에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로

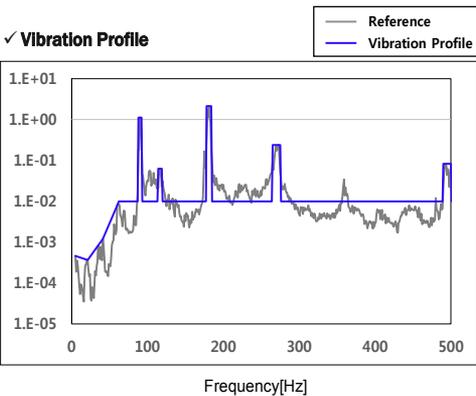


Fig. 10 Final vibration profile

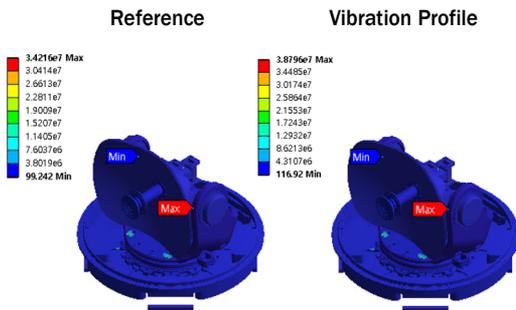


Fig. 11 Analysis through reference & vibration profile

한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M2D2A204829612).

References

- (1) Oh, J. G., 2003, War and Automobile, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No. 2, pp. 89~93
- (2) Han, H. S., Park, T. W. and Seo, J. H., 2000, A Study on the Dynamic Analysis of Tracked Vehicles, Proceedings of the KSAE Annual Spring Conference, pp. 653~658.
- (3) Kwak, T. J., Seo, D. S. and Jeon, S. Y., 2011, The Future When is Predicted about Warfare Pattern from under Battlefield Environment Scenario, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 257~263.
- (4) Weerackody, V. and Cuevas, E. Q., 2011, Technical Challenges and Performance of Satellite Communications on-the-Move Systems, Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 30, No. 2, pp. 113~121.
- (5) Choi, C. H., 1995, Determining Vibration Qualification Level for the Equipment Loaded Inside a Tracked Vehicle, Journal of Environmental Impact Assessment, Vol 4, No. 2, pp.123~130.
- (6) Kim, J. E. and Yang, S. J., 2009, Introduction of Military Standards for Vibration Environment and Cases Application for Development, Journal of KSNVE, Vol. 19, No. 2, pp. 9~17.
- (7) Department of Defense, 2014, Test Method Standard: Environmental Engineering Consideration and Laboratory Tests, MIL-STD-810G w/change1.
- (8) Jeon, J. S., Cha, C. H., Na, K. H. and Joo, M. K., 2018, Standardization of Vibration Durability Test Profile for Construction Equipment, Proceedings of the KSAE Annual Autumn Conference, pp. 1267~1268.
- (9) Lee, Y. W., 2008, Vibration Test Design Method, Journal of the KSME, Vol. 48, No. 5, pp. 44~49.
- (10) Rouillard, V. and Sek, M., 2013, Creating

Transport Vibration Simulation Profiles from Vehicle and Road Characteristics, Packaging Technology and Science, Vol. 26, No. 2, pp. 82~95.

- (11) Park, J. M., Lee, J. W. and Myong, R. S., 2019, Environmental Test Tailoring for Fighter Aircraft Intended for Operating in Korean Peninsula, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Science, Vol. 47, No. 5, pp. 344~357.
- (12) Kim, D. H., 2019, Generation of Vibration Specifications Using Vehicle Actual Vibration Data, Journal of KSNVE, Vol. 29, No. 6, pp. 15~18.
- (13) Irvine, T., 2015, Effective Modal Mass & Modal Participation Factors Revision I.
- (14) Development of Laboratory, 1993, Vibration Test Schedules, ITOP 1-1-050.



SungWon Suh received B.S. degrees from Kyunghee University in 2016 and he is currently majoring in Structural Vibration in Yonsei University. He especially is interested in shock/vibration and dynamics



EunHo Lee received B.S. degrees from Yonsei University in 2016 and he is currently majoring in Structural Vibration in Yonsei University. He especially is interested in shock/vibration and dynamics



No-Cheol Park received B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Yonsei University in 1986, 1988, and 1997, respectively. Dr. Park is currently a professor at the department of Mechanical Engineering in Yonsei University. His research interest is in Vibration & Optics.

차량용 초음파 센서에서 파동유도관에 의한 최소 탐지거리 단축

Shortening the Minimum Detectable Distance in an Ultrasonic Sensor for Automobiles by a Waveguide

임 성 구* · 안 재 혁* · 김 진 오†
Sung Gu Lim*, Jae Hyuck An* and Jin Oh Kim†

(Received July 6, 2020 ; Revised August 7, 2020 ; Accepted August 7, 2020)

Key Words : Ultrasound(초음파), Sensor(센서), Distance(거리), Waveguide(파동유도관), Wedge(썰기), Reflection(반사)

ABSTRACT

In this study, a method of shortening the minimum detectable distance of an ultrasonic sensor for the distance measurement of automobiles was developed. It is necessary to overcome the limitations of the minimum detectable distance, which is induced by the residual vibration of an elastic disc in an ultrasonic sensor. The purpose of this study is to design a waveguide to shorten the minimum detectable distance and to improve the performance of proximal measurement by coupling the waveguide with an ultrasonic sensor. We simulated the ultrasound propagation in the designed waveguide through finite element analysis. The analytical results showed clear signals of transmitted and received ultrasound in a wedged-wall waveguide instead of a flat-wall waveguide. Experimental tests were performed to verify the analytical results. The waveguides of the flat and wedged walls were fabricated using a 3D printer and applied during the experiments. The results showed that the ultrasonic sensor coupled with the wedged-wall waveguide measured the proximal distance reasonably.

1. 서 론

초음파에 의한 거리측정 기술은 차량의 장애물 감지에 사용된다⁽¹⁾. 이러한 용도의 초음파 센서들의 성능 항목 중에는 탐지거리 범위가 있다. 최대 탐지거리를 증대시키는 방안으로 센서 진동부 설계 변경^(2,3)이나 혼 가이드 부착^(4,5) 등이 연구되어 있다. 최소 탐지거리는 센서 내부 진동관의 여진으로 인한 불감지 시간 때문에 제한된다. 이를 극복하기 위해 신호처리 방법이 시도되지만 여전히 제약을 받고 있어 다른 방

법이 필요하다.

초음파에 의한 차량 장애물 감지 기술은 처음에 후방감지에 사용되었고, 전방 및 측방 감지가 추가되면서 주차보조 시스템에 사용되고 있으며, 자율주행 차량에도 사용된다⁽⁶⁾. 근거리 측정 성능을 향상시키기 위하여 초음파 주파수를 높여 파장을 짧게하는 방안⁽⁷⁾이 제시되었으나, 이는 최소 탐지거리 뿐만 아니라 최대 탐지거리도 단축시키는 단점이 있다. 센서 여진에 파묻히는 신호를 추출하는 신호처리 방법^(8,9)이 제안되었지만 아직 실용화 되지 않았다. 불감지 영역을 벗어나 센서를 배치하도록 공간을 확보하는 고안⁽¹⁰⁾이 제시되

† Corresponding Author ; Member, Soongsil University, Professor
E-mail : jokim@ssu.ac.kr

* Member, Soongsil University, Student

A part of this paper was presented at the KSNVE 2019 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jae Young Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

었는데, 이 방안은 센서 구조물을 길게 하므로 실질적으로는 최소 탐지거리 단축이라고 간주되지 못한다.

최소 탐지거리를 제한하는 불감지 영역을 벗어나 센서를 배치하되 초음파 전파 경로를 90° 꺾는 방안이 제시되어 있다⁽¹¹⁾. 이 방안은 아이디어로 제시되었지만 실용화에 장애가 되는 문제가 있어서, 이를 해결하는 파동유도관을 저자들이 고안하였다⁽¹²⁾. 이 논문은 고안된 파동유도관을 초음파 센서와 결합하여 근거리 측정 성능 향상을 평가한 결과를 제시한다. 파동유도관을 설계하고, 유한요소 해석으로 성능을 예측하며, 거리 측정 실험을 하여 최소 탐지거리 단축을 확인한다.

2. 파동유도관 설계 및 성능예측

통상적인 차량용 초음파 센서에서 관찰되는 신호의 사례를 Fig. 1에 제시하였다. 압전소자와 탄성판으로 구성되는 초음파 센서^(3,13)의 경우에 송신신호 인가에 의해 압전소자가 탄성판을 진동시키고 이에 따라 초음파가 방출된다. 전파하던 초음파가 타겟면에서 되돌아와 탄성판을 진동시켜 압전소자가 수신신호를 나타낸다. 송신신호와 수신신호의 시간간격에 초음파 전파 속도를 곱하면 왕복거리, 즉 센서 탄성판으로부터 타겟면까지의 거리 L 의 2배이다. 그런데 탄성판은 짧은 펄스 신호에 의해 가진되어도 진동이 잔류하는 여진이 있기 때문에, 수신신호가 여진신호에 겹치면 초음파 전파시간을 제대로 측정할 수 없다. 이러한 현실적 제약조건을 극복해서 근접 거리 측정을 가능하게 하는 파동유도관을 설계하였다.

2.1 파동유도관 설계

파동유도관의 기본 개념⁽¹¹⁾을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 초음파 센서에서 생성된 송신파가 파동유도관 내에서 일정거리를 전파한 후에 타겟을 향해 방출되고, 반사되어 돌아오는 수신파가 다시 파동유도관 내에서 일정거리를 전파한 후에 센서에 수신되게 하는 구조이다. Fig. 1에 제시된 여진시간 동안 초음파가 파동유도관 내에서 전파하므로, 수신 신호는 여진신호에 겹치지 않는다. 파동유도관 출입구에서 타겟까지의 거리 d 를 0에 가깝게 할 수 있으므로, 센서 구조물과 타겟 사이의 거리가 0에 근접해도 거리 측정이 가능해지는 개념이다.

Fig. 2(a)에 제시한 기본 개념은 실제 상황에서 실용적이지 않은 문제가 있다. 차량용 초음파 센서는 빔 폭이 크므로 센서에서 생성되는 송신파는 넓게 퍼져나가서 벽면에서 반사되기도 한다. 또한 벽면이 평탄하다더라도 거칠기에 따라 초음파 반사가 복잡해질 수 있다⁽¹⁴⁾. 파동유도관의 벽면에서 반사되며 진행되는 파동이 혼합된다. 제4절에서 설명하는 내용인데, 평탄한 벽면에서 반사되어 바로 센서에 수신되는 파동이 존재하여 거리측정을 어렵게 한다. 이를 회피하기 위하여 Fig. 2(b)에 제시한 바와 같이 파동유도관의 내부 벽면을 흡음형 켜기형태로 하였다.

초음파 센서가 원뿔형이므로 파동유도관은 원통형이 바람직하다. 제작의 편의를 위해서 사각통 형태여도 되며, Fig. 3에 횡방향 켜기와 종방향 켜기의 개념도를 제시하였다. 제4절에서 설명하는 실험에서 Fig. 3(b)의 종방향 켜기는 실질적으로 효과가 없는 것으로 나타났다.

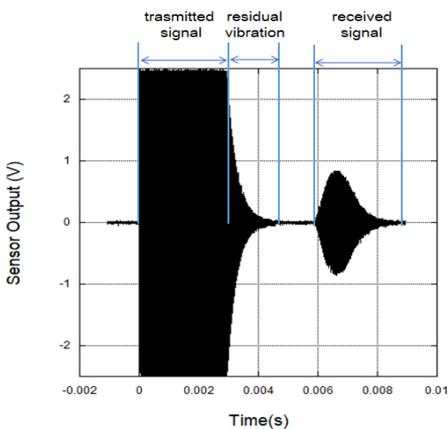


Fig. 1 Signals in a conventional ultrasonic sensor (target distance 1 m)

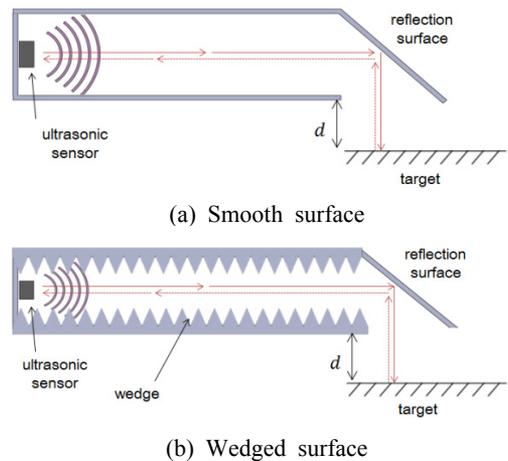
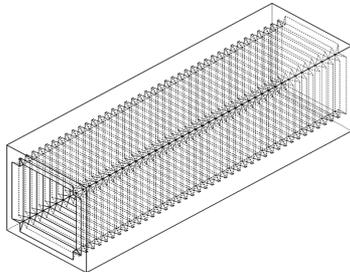


Fig. 2 Concept of a waveguide

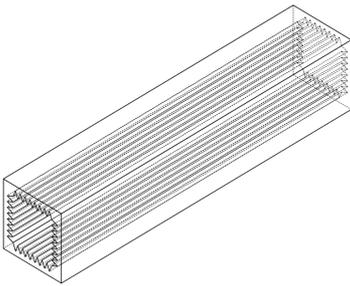
따라서 본 논문은 Fig. 3(a)의 횡방향 켜기가 내부 벽에 형성되어 있는 파동유도관을 주로 다룬다.

2.2 벽 면의 영향

Fig. 2에 제시된 바와 같이 반사면을 갖춘 파동유도관의 성능을 파악하기 위해 앞서, 유도관 벽면의 영향을 조사하였다. 파동유도관이 없는 경우, 평탄한 벽면을 가지는 파동유도관, 켜기형 벽면을 가지는 파동유도관을 유한요소 해석하여 비교하였다. 파동유도관의 길이와 지름은 각각 300 mm와 25 mm로 하였다. 이 길이는 송신신호 폭과 여진 시간을 지나치는 거리이다. 켜기형 면에서 켜기의 높이는 9.3 mm이고, 각도는 30°이며 간격은 5.0 mm로 하였다. 켜기 높이 치수는 50 kHz인 초음파의 파장 2인 6.7 mm 보다 크게 설정된 것이다.



(a) Transverse wedge



(b) Longitudinal wedge

Fig. 3 Design of wedged-surface waveguides

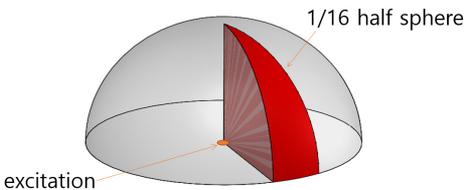
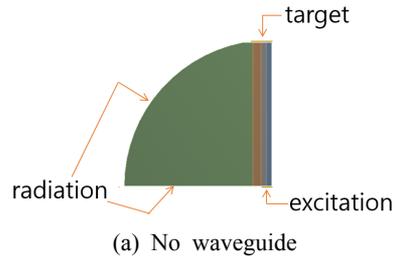


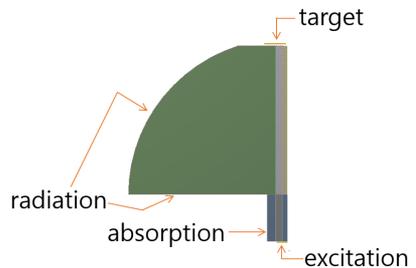
Fig. 4 Model of acoustic analysis

초음파를 송신하고 일정거리에 있는 타겟면에서 반사되어 되돌아오는 초음파의 수신 신호를 관찰하였다. 유도관 출구에서 방출된 이후 초음파 전파는 축대칭으로 간주되므로, 해석 영역을 Fig. 4와 같이 반구를 16등분한 영역으로 하였다. 50 kHz의 초음파 5주기를 가진 부에 가진하였다. 요소 크기를 1/6인 1 mm 이하로 설정하였다. 파동유도관에 의한 초음파의 송·수신 해석 모델과 경계조건을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 파동유도관이 없는 경우의 모델과 경계조건이고, 가진 부로부터 타겟면까지의 거리는 0.9 m이다. Fig. 5(b)는 파동유도관이 있는 경우의 모델과 경계조건이고, 가진 부로부터 타겟면까지의 거리는 1.2 m이다.

시간에 따른 음압분포를 추출하여 초음파의 송신과 수신을 관찰하였다. Fig. 6은 파동유도관이 없는 경우의 음압분포이고, Fig. 7은 파동유도관의 벽면이 평탄한 경우의 음압분포이다. Fig. 8은 파동유도관의 벽면이 켜기형인 경우의 음압분포이다. 초음파 센서에서 초음파 수신에 잘 되는지 관찰하기 위해서 가진 부에서의 시간에 따른 음압을 추출하여 그래프로 제시하였다. Fig. 9에서 (a)는 파동유도관이 없는 경우이고 타겟면에 반사되어 되돌아온 초음파로부터 계산된 거리가 0.92 m로 해석결과가 타당했다. (b)는 파동유도관의 벽면이 평탄한 경우이며, 타겟면에서 반사되어 되돌아온 초음파 신호에 잡음신호(noise)가 포함되어 있지만 추출된 음압으로부터 거리를 계산하면 1.2 m



(a) No waveguide



(b) With waveguide

Fig. 5 Boundary conditions of acoustic analysis

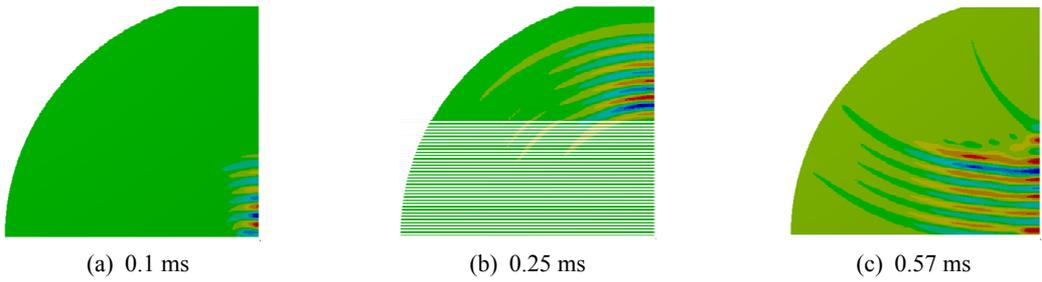


Fig. 6 Sound pressure distribution from transient analysis (without waveguide)

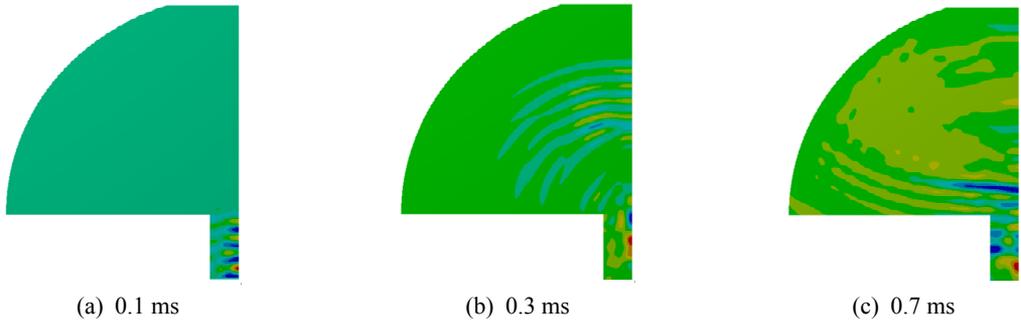


Fig. 7 Sound pressure distribution from transient analysis (with smooth waveguide)

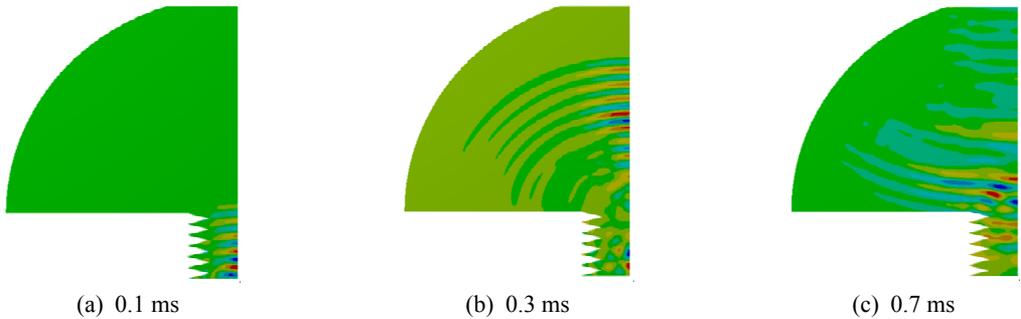


Fig. 8 Sound pressure distribution from transient analysis (with wedged waveguide)

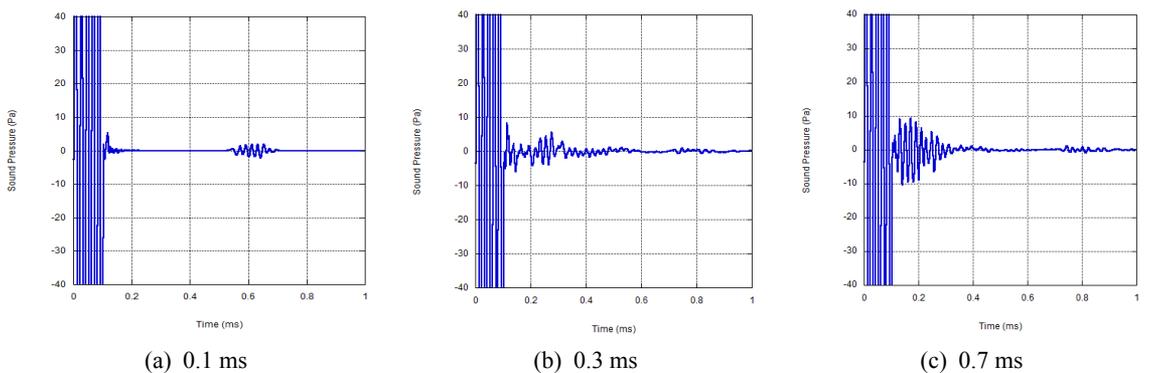


Fig. 9 Acoustic signal from transient analysis

로 거리측정 결과가 타당하다. (c)는 파동유도관의 벽면이 켜기형인 경우인데 벽면이 평탄한 경우와 비교하여 타겟면에 반사되어 되돌아온 초음파 신호에 잡

음신호가 없고, 추출한 데이터로부터 계산된 거리측정 결과도 타당하다.

3. 유한요소 해석에 의한 성능예측

파동유도관에 반사면을 결합하여 초음파 송·수신하는 경우를 유한요소 해석으로 관찰하였다. 평탄한 벽면을 가지는 파동유도관과 켜기형 벽면을 가지는 파동유도관에 Fig. 2와 같이 반사면을 결합한 형상을 모델링하여 해석하였다. 모델링 결과를 Fig. 10에 제시하였다. 해석을 효율적으로 하기 위해 파동유도관의 길이는 짧게 30 mm로 하였다. 반사면의 각도를 45°

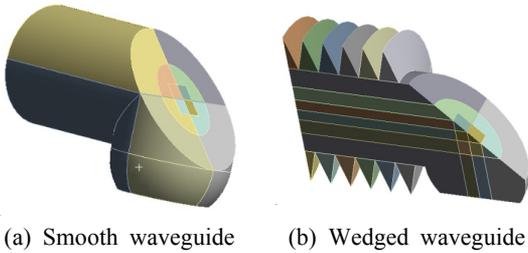


Fig. 10 Acoustic analysis model of a waveguide

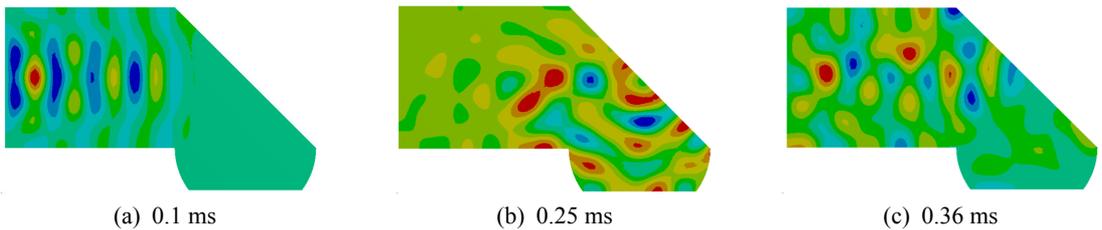


Fig. 11 Sound pressure distribution from transient analysis (with smooth waveguide)

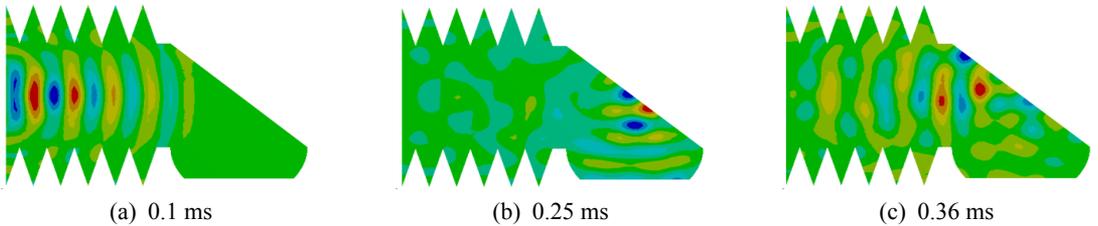


Fig. 12 Sound pressure distribution from transient analysis (with wedged waveguide)

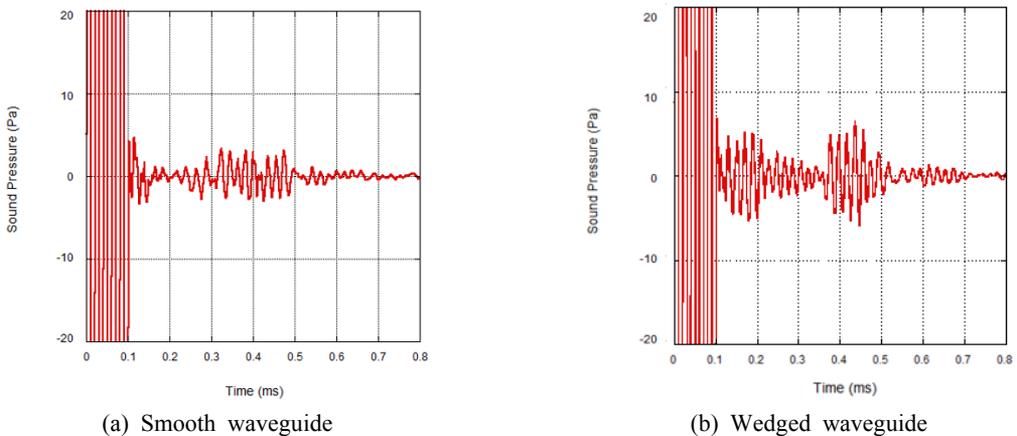


Fig. 13 Signal waveform results from transient analysis

로 하였고 가진부로부터 타겟면까지의 거리는 62.5 mm로 하였다. 초음파를 송신하여 반사면을 거쳐 타겟면에서 반사되어 되돌아온 초음파의 수신 신호를 관찰하였다.

앞선 해석과 마찬가지로 시간에 따른 음압분포를 추출하여 초음파의 송신과 수신을 관찰하였다. Fig. 11은 벽면이 평탄한 파동유도관에서 시간에 따른 음압 분포이다. Fig. 12는 벽면이 췌기형인 파동유도관에서 시간에 따른 음압 분포이다. 가진부에서의 시간에 따른 음압을 추출하여 Fig. 13에 그래프로 제시하였다. Fig. 13(a)는 파동유도관의 벽면이 평탄한 경우이며, 추출된 음압으로부터 거리를 계산하면 30 mm로 거리측정 결과가 타당하지 않다. Fig. 13(b)는 파동유도관의 벽면이 췌기인 경우이며, 추출된 음압으로부터 거리를 계산하면 62.5 mm로 거리측정 결과가 타당하다.

4. 거리 측정 실험

유한요소 해석을 통해 예측한 파동유도관의 성능을 검증하는 실험을 하였다.

4.1 실험장치

실험에 사용된 초음파 센서(SensorTec ST-208W)의 구동주파수는 48.0 kHz이고 지름은 14 mm이다. 실험장치 구성도를 Fig. 14에 제시하였다. 송·수신 보드(AirMar T1 Development Kit)와 DC전원공급기(Keithley 2231A-30-3)를 사용하여 전압이 150 V_{0-p}인 48 kHz 정현파 신호를 초음파 센서에 인가하였다. 전파 후 타겟에서 반사되어 되돌아오는 초음파를 수신하여 오실로스코프(Tektronix TDS 3012C)로 관찰하였다.

4.2 벽 면의 영향

파동유도관 성능 실험에 앞서 유도관 벽면의 영향을 조사하는 예비실험을 하였다. 3D 프린터로 3종류의 파동유도관을 제작하였다. 파동유도관의 내부가 매끈한 면, 횡방향 췌기면, 종방향 췌기면이다. 예비 실험 사례를 Fig. 15에 나타내었다. (a)는 파동유도관이 없는 경우, (b)는 매끈한 파동유도관, (c)는 횡방향 췌기면 파동유도관이다.

초음파 센서로부터 타겟까지의 거리 0.8 m, 1.0 m, 1.2 m로 하여 초음파 송수신을 각각 3회 반복하였으

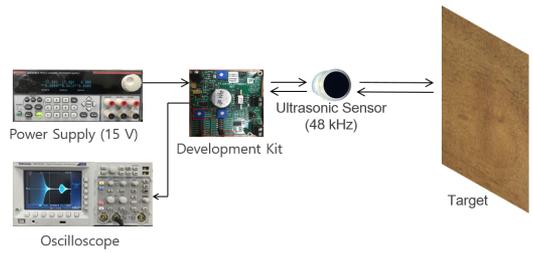
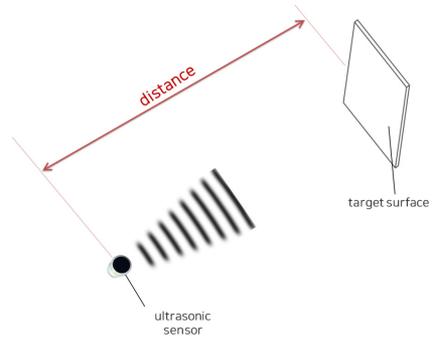
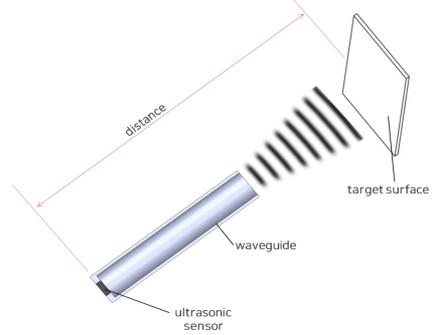


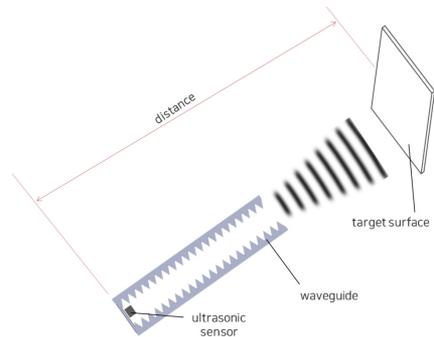
Fig. 14 Experimental apparatus



(a) No waveguide



(b) Smooth waveguide



(c) Wedged waveguide

Fig. 15 Preliminary tests of transmission and reception of ultrasound

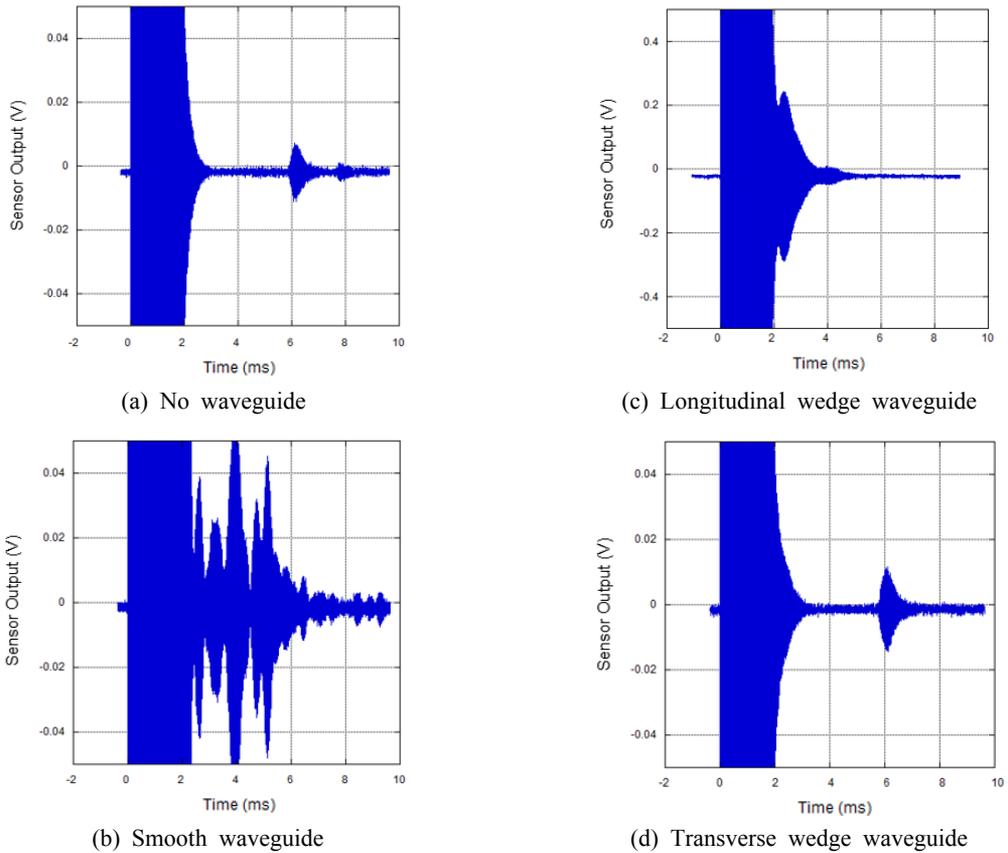


Fig. 16 Received signal of ultrasound at the transmission and reception test (1 m)

Table 1 Distance measured according to waveguides

	Target distance(m)	Measured results	
		Time(ms)	Distance(m)
No waveguide	0.8	4.54	0.78
	1.0	5.87	1.01
	1.2	7.02	1.20
Transverse wedge waveguide	0.8	4.64	0.79
	1.0	5.82	0.99
	1.2	7.00	1.20

며, 1.0 m 거리에서 관찰된 신호를 Fig. 16에 나타내었다. (a)는 파동유도관이 없는 경우이다. (b)는 파동유도관의 벽면이 매끈한 경우이고, (c)는 종방향 쉐기면인 경우인데, 이들의 수신신호는 거리측정이 타당하게 이루어질 수 없다. 초음파 센서에 파동유도관

을 부착하여 거리측정을 하는 경우, (d)에서 보듯이 벽면이 횡방향 쉐기 형상이 가장 적합하다.

(a)와 (d)의 방법으로 거리측정을 하여 결과를 Table 1에 제시하였다. 실험결과 파동유도관이 없는 경우와 파동유도관의 벽면이 횡방향 쉐기인 경우에는 타겟면에 반사되어 되돌아온 초음파로부터 측정된 거리와 실제 거리가 유사하게 나타났다.

4.3 파동유도관의 성능

파동유도관에 반사면을 결합하여 거리측정 실험을 하였다. 파동유도관이 없는 경우와 파동유도관의 벽면의 형상은 종 방향 쉐기 형상인 경우를 비교하였다. Fig. 17에 45도 반사면이 결합된 파동유도관의 단면도와 치수를 제시하였다. 타겟까지의 거리를 0 m부터 1 m까지 0.1 m 간격으로 하여 실험하였고, 결과를 Fig. 18에 제시하였다.

각 지점에서 실측거리 대비 오차를 Fig. 19에 나

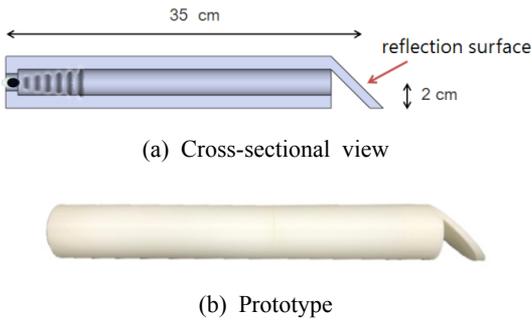


Fig. 17 Waveguide specimen made by a 3D printer

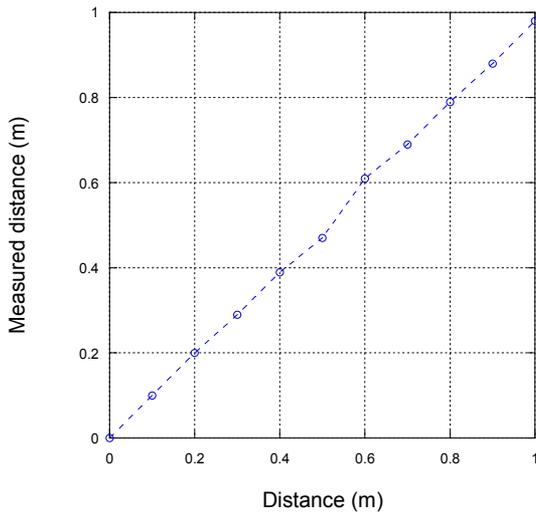
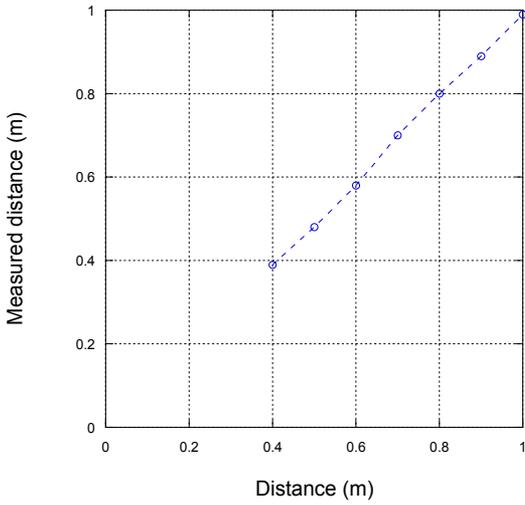


Fig. 18 Distance measurement result with or without waveguide

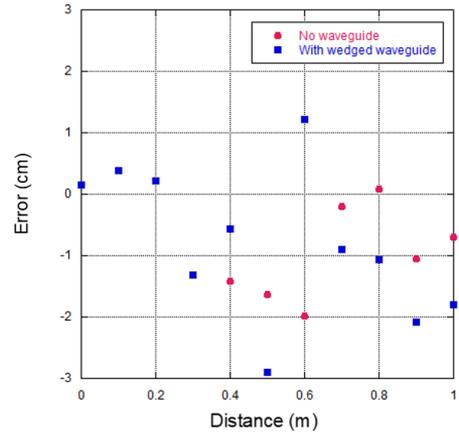


Fig. 19 Error of distance measurement (with wedged waveguide)

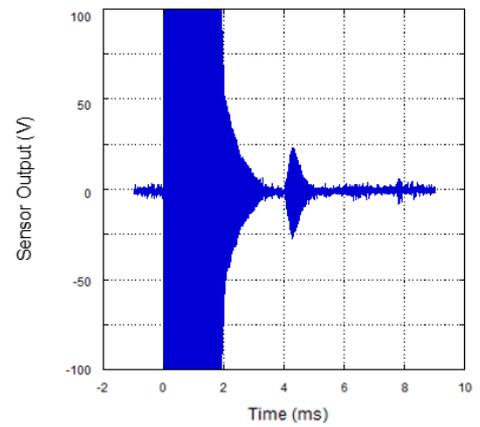
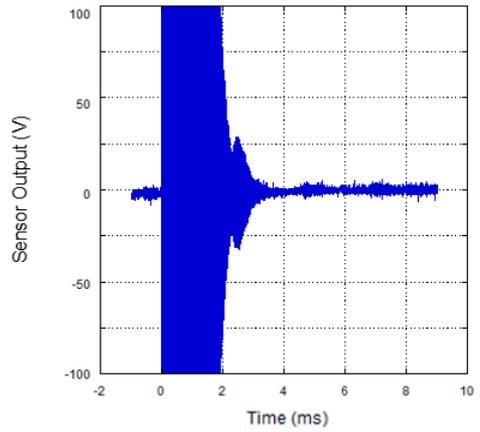


Fig. 20 Received signal of ultrasound at the transmission and reception test (0.35 m)

타내었다. Fig. 20은 초음파 센서와 타겟면까지의 거리가 0.35 m일 때 초음파 송수신 신호이며, 이를 통해 파동유도관이 없는 경우 0 m부터 0.3 m까지는 불감지 영역임을 알 수 있다. 파동유도관이 없는 경우 0.4부터 1 m에서 측정된 거리와 실제거리가 동일하게 나타났고, 파동유도관의 벽면의 형상이 종방향 쉐기 형상인 경우 불감지 영역 없이 측정된 거리와 실제거리가 동일하게 나타나 최소 탐지거리가 단축되었다.

5. 결 론

차량의 장애물 감지에 사용되는 초음파 센서에서 최소 탐지거리 단축 방안을 다루었다. 파동유도관을 설계하고 성능을 입증하는 해석과 실험을 하였다.

초음파 센서에서 생성된 송신파가 파동유도관 내에서 일정거리를 전파한 후에 타겟을 향해 방출되고, 반사되어 돌아오는 수신파가 다시 파동유도관 내에서 일정거리를 전파한 후에 센서에 수신되게 하는 구조이다. 파동유도관의 내부 벽면이 평탄한 경우에 벽면에서 반사된 초음파로 인해 신호가 복잡해지므로, 이를 회피하기 위하여 내부 벽면을 쉐기형으로 울통불통하게 하였다.

유한요소 해석과 실험 결과 파동유도관의 내부 벽면이 평탄한 경우보다 쉐기형인 경우에 초음파 송수신 신호가 명확히 구분되었다. 쉐기형 파동유도관으로 실험한 결과 근거리에서 거리측정이 타당하게 이루어졌다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1F1A1048453)

References

(1) Kim, J. O., 2000, Sensors and Actuators Using Ultrasound, *Journal of KSNVE*, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.
 (2) Park, J. H., Yoo, G. S., Chae, M. K. and Yoon, J. H., 2015, Ultrasonic Transducer for Long-distance,

Korea Patent 10-1491462.

(3) Seon, S. O. and Kim, J. O., 2019, Vibration and Acoustic Characteristics Depending on Housing Structures of Ultrasonic Sensors, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 157~165.

(4) Lim, S. G. and Kim, J. O., 2018, Acoustic Directivity of an Ultrasonic Sensor Depending on Horn Guide Shape, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 707~712.

(5) Lim, S. G. and Kim, J. O., 2019, Acoustic Directivity of an Ultrasonic Sensor Depending on Horn Guide Dimension, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 379~388.

(6) Xu, W., Yan, C., Jia, W., Ji, X. and Liu, J., 2018, Analyzing and Enhancing the Security of Ultrasonic Sensors for Autonomous Vehicles, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5, No. 6, pp. 5015~5029.

(7) Licznarski, T. J. and Jaronski, J. and Kosz, D., 2011, Ultrasonic System for Accurate Distance Measurement in the Air, *Ultrasonics*, Vol. 51, No. 8, pp. 960~965.

(8) Hernandez, A., Urena, J., Mazo, M., Gracia, J. J., Jimenez, A. and Alvarez, F., 2007, Reduction of Blind Zone in Ultrasonic Transmitter/Receiver Transducers, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 133, No. 1, pp. 96~103.

(9) Lee, S. H., 2018, Method for Driving Ultrasonic Sensors to Measure Short Distance, Korea Patent 10-1887902.

(10) Lee, S. H., Jeong, S. G. and Lee, Y. G., 2014, Ultrasonic Sensor for Ultra Short Distance Measurement, Korea Patent 10-1385403.

(11) Lee, S. G., Kim, I. S. and Kwon, N. W., 2014, Ultrasonic Level Measuring Device without Blanking Distance Zone, Korea Patent 10-1419410.

(12) Kim, J. O. and Lim, S. G., 2019, Ultrasonic Wave Apparatus for Measure of Distance, Korea Patent Application 10-2019-0008184.

(13) Yoo, G. S., Lee, T. H. and Chae, M. K., 2017, Ultrasonic Transducer for Vehicle, Korea Patent 10-1728225.

(14) Lim, S. G. and Kim, J. O., 2019, Experiments Characterizing Ultrasound Reflection at a Target Surface Dependin on Roughness and Slope, Transactions of the Korean Society on Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 677~681.



Sung Gu Lim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Soongsil University in 2014 and 2019, respectively. During his stay at Soongsil as a graduate student, he was working on ultrasonic sensors and wave propagation.



Jae Hyuck An received the B.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University in 2020. He is currently a master candidate as a graduate student. He is working on ultrasonic sensors and waves.



Jin Oh Kim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University in 1981 and 1983, respectively, and the Ph.D. degree from University of Pennsylvania in 1989. For ten years he has got research experiences at

Korea Research Institute of Standards and Science, Northwestern University, and Samsung Advanced Institute of Technology. Since 1997, he has been working at Soongsil University, where he is currently a Professor of mechanical engineering. His research interests are in the area of ultrasonic sensors and actuators using mechanical vibrations and waves.

함정탑재장비용 대용량 마운트의 성능검증시험방안

Performance Test Specification for Large-capacity Mounts of Naval Shipboard Machinery

문석준[†] · 김의영* · 김홍섭* · 박진우* · 김원*

Seok-jun Moon[†], Eui-Young Kim*, Heung-Sub Kim*, Jin-Woo Park* and Won Kim*

(Received July 6, 2020 ; Revised August 3, 2020 ; Accepted August 3, 2020)

Key Words : Large-capacity Mount(대용량 마운트), Resilient Mount(탄성 마운트), Rubber Mount(고무 마운트), Performance Test(성능시험)

ABSTRACT

The mounts installed in the main engines and generators among the naval shipboard equipment require a relatively large capacity and are one of the parts that localization development is proceeding. In order to develop these parts, an effective evaluation method must be established so that it can be applied from the design stage. In this paper, two general performance testing methods applicable to large capacity mounts are proposed. We review some US military specifications, determine necessary test items, and propose supplemental measures by considering the domestic test evaluation environment. However, the proposed method can be applied only to resilient rubber mounts.

1. 서 론

마운트는 기계장비의 하부에 설치되어 장비의 자중을 지지하면서 내·외부 진동으로부터 장비를 보호하는 역할을 담당한다. 특히 해군 함정에 설치되는 장비인 경우의 마운트는 기계장비에서 발생하는 진동이 하부 구조물로 전달되는 양을 저감함으로써, 수중으로 방사되는 소음을 차단하는 역할도 수행한다. 또한 외부의 충격하중으로부터 장비를 보호하는 수단으로도 사용되고 있다. 따라서 함정탑재장비의 마운트는 매우 중요한 부품 중 하나이며, 설치 전에 성능의 검증이 요구되고 있다. 국내 산업계에서도 마운트의 검증에 대한 연구들이 발표되고 있다⁽¹⁻³⁾.

국내에서 함정탑재장비용 마운트의 성능평가를 위

해 적용하고 있는 규격(또는 표준)은 주로 미국 국방성, 해군 등에서 발행된 문서이다. 다양한 마운트에 적용할 수 있는 규격을 살펴보면, MIL-M-17185A⁽⁴⁾는 일반 규격으로서 탄성마운트의 설계 및 성능요구 조건 등을 기술하고 있다. 이 규격에 수록되어 있는 그림 등의 자료를 살펴보면, 규격에서 대상으로 고려하고 있는 마운트의 정격하중은 최대 9 kN(=2000 lb)임을 확인할 수 있다. 한편, MIL-M-17185A의 대체 규격으로 MIL-PRF-32407⁽⁵⁾이 공개되었고, 이어 개정판으로 MIL-PRF-32407A⁽⁶⁾가 발간되었다. 이 규격은 수상함에만 적용할 수 있으며, 탄성마운트를 형태(type)에 따라 4개군으로 구분하여 기술하고 있다. 예를 들면, 탄성 고무마운트는 type 1에 해당한다. 규격에서 고려하고 있는 마운트의 정격하중은 최대 225 kN(= 50 000 lb)임을 확인할 수 있다. 대한민국 해군 함

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Institute of Machinery and Materials, Senior Researcher
E-mail : sjmoon@kimm.re.kr

* Korea Institute of Machinery and Materials, Researcher

‡ Recommended by Editor Chan Jung Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

정 설계/건조 기준으로 적용되고 있는 함정용 탄성마운트 적용 및 설치지침⁽⁷⁾은 탄성마운트의 성능평가 방법을 부록으로 수록하고 있으며, MIL-M-17185A 기반으로 작성된 문서이다.

특정한 마운트에만 적용할 수 있는 전문 규격을 살펴보면, MIL-M-17508F(SH)⁽⁸⁾는 미국 표준마운트에 적용되는 규격으로서, 한국기계연구원이 국산화 개발과정⁽⁹⁾에서 적용한 문서이다. 이 규격은 6E100, 6E150, 6E900 등 특별한 형태의 탄성마운트에만 적용할 수 있는 규격으로, 마운트의 정격하중은 최대 16 kN(= 3500 lb)이다. 대용량 마운트에 적용할 수 있는 전문 규격에는 MIL-M-19863D⁽¹⁰⁾와 MIL-M-21649C⁽¹¹⁾ 등이 있다. MIL-M-19863D는 5B5,000H라는 탄성마운트에 적용할 수 있으며, 최대 정격하중은 22.5 kN(= 5000 lb)이다. MIL-M-21649C는 5M10,000-H 탄성마운트에 적용할 수 있으며, 최대 정격하중은 45 kN(= 10 000 lb)이다. 한국기계연구원에서 두 규격을 적용한 마운트의 성능시험평가 연구를 발표한 바 있다⁽¹²⁾.

함정탑재장비 중 주기관 및 발전기 등에 설치되는 마운트는 비교적 큰 용량을 요구하고 있으며, 국산화 개발이 진행되고 있는 부품 중의 하나이다. 이러한 부품을 국산화하기 위해서는 명확한 평가방법이 정립되어야 설계단계에서부터 적용할 수 있다. 하지만 다양한 대용량 마운트에 적용할 수 있는 일반 규격은 존재하지 않으며, 이 논문에서는 대용량 마운트에 적용할 수 있는 일반적인 성능검증방법을 제안하고자 한다. 앞에서 언급된 규격들을 검토하여 필요한 시험항목을 결정하고, 국내 시험평가 환경 등을 고려하여 보완방안 등을 제안하고자 한다. 단, 제안하는 내용은 탄성 고무마운트에만 적용할 수 있는 방안을 밝힌다.

2. 일반 규격의 비교·검토

대용량 마운트에 적용할 수 있는 일반적인 성능검증방법을 개발하기 위해 범용적으로 적용할 수 있는 일반 규격의 내용을 먼저 검토하였다. 최신판 MIL-PRF-32407A의 개정내용을 비교·검토하기 위해 이전 판인 MIL-M-17185A의 성능검증시험 항목을 Table 1에 간략하게 정리하였다. 총 12개의 마운트를 대상으로 5개의 그룹으로 나누어서 시험검증을 수행하게 된다. 각 그룹에는 핵심시험항목(밑줄 표시)

이 배분되어 있는 것을 확인할 수 있다. 규격에는 명확하게 기술되어 있지 않지만, 핵심시험항목 후의 특성변화를 살펴보기 위해 핵심시험항목 전에 수행한 시험항목을 추가로 수행할 필요가 있다. 이를 통해 핵심시험 전·후의 성능변화를 확인할 수 있다.

MIL-PRF-32407A에서는 MIL-M-17185A에서는 언급되지 않은 마운트의 수명을 18 년으로 명시하고 있으나, 어떤 논리로 정의되었는지는 확인할 수 없는 점이 안타깝다. MIL-PRF-32407A의 성능검증시험항목은 Table 2에 상대적으로 자세하게 정리하였다. 총 15개의 마운트를 대상으로 하고 있으며, 전체적으로 MIL-M-17185A와 유사하게 그룹화하고 있는 것을 확인할 수 있다. 각 그룹의 핵심시험항목(밑줄 표시)을 살펴보면, group I에 함운동 내구성시험(ship motion endurance)과 group V에 진동 내구성시험(vibration endurance)이 신규로 도입된 것을 알 수 있다. 또한 핵심시험항목 전·후에 공통적인 시험항목이 설정되어 있으며, 정하중 시험(low load-deflection), 동하중 시험(dynamic stiffness and damping) 및 strength test(극한 하중시험)가 해당된다. 핵심시험항목 전·후의 마운트 성능특성의 변화를 확인하는 절차가 필수항목으로 도입된 것으로 파악된다. 또한 규격을 살펴보면, 시험결과에 대한 평가 요구사항도 전반적으로 강화된 것을 확인할 수 있다.

이해를 돕기 위해 신규 도입된 2개의 내구성시험 방법에 대한 소개하고자 한다. 함운동 내구성시험은 마운트의 수명주기 동안 함 운동에 의한 하중을 반복 적용하여 수행한다. 함정은 40%를 바다에서 운항하고, 운

Table 1 Test items in MIL-M-17185A

Group	No. of mount	Test items
I	4	Examination - Dynamic stiffness (vibration) - <u>Shock isolation</u>
II	2	Examination - Static load-deflection - <u>Salt spray</u>
III	2	Examination - Static load-deflection - <u>Oil test</u>
IV	3	Examination - <u>Drift</u>
V	1	Examination - <u>Cold storage</u>

항 중 바다의 해상상태는 sea state 3~4가 65.5 %, 5가 20 %, sea state 6~8이 14.5 %로 분포한다고 가정한다.

각 해상상태에 대한 동요 각도를 함정탑재체계 함운동 적용기준⁽¹³⁾으로부터 산정하여 시험에 적용할 수 있다. Fig. 1은 한 예로서 함운동 내구성시험 광경을 보여주고 있으며, 3개의 유압식 액추에이터를 활용하여 3축 방향의 함운동 하중을 동시에 작용하게 된다. 3축으로 동하중을 일정 주기로 작용하기 때문에 주의 깊은 시험지그 설계 및 설치가 필요하다. 또한 시험 시간을 줄이기 위해서는 가속시험방법을 이

용하여 하중 주파수와 변위량을 크게 할 수 있으나, 고무 특성에 의한 시험 중에 좌굴이 발생하는 경우를 고려해야 한다. Fig. 1의 시험은 sea state 7 기준으로 산정된 시험조건에서 약 28일간 수행되었다.

진동 내구성시험은 새롭게 도입된 항목이 아니며, MIL-M-17508F에 이미 명시되어 있다. 단, 시험조건에서는 다소 차이가 있다. 동하중 시험으로부터 식별한 동강성계수와 감쇠계수를 이용하여 시험조건(주파수 및 진동크기)을 결정한다. 결정된 주파수는 공진주파수 부근에 해당한다. 반복횟수는 500 000회이며, 3축 방향으로 시험을 수행한다. Fig. 2는 한 예로서 진동 내구성시험 광경을 보여주고 있으며, 대형 진동대에 4개의 마운트를 고정한 후 마운트 상단에 정격하중에 해당하는 중량물을 설치하였다. 만약 마운트의 정격하중이 4톤이라면, 4개 마운트 상부에 설치되는 질량체의 중량은 16톤이 된다. 따라서 진동대 상부에 설치되는 전체 중량은 20톤에 이르게 된다. 국내에서는 일부 시험기관을 제외하고는 불가능한 규모의 시험에 해당한다.

함운동 및 진동 내구성시험 조건은 마운트 수명 18

Table 2 Test items in MIL-PRF-32407A

Group	No. of mount	Test items
I	1	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - <u>Ship motion endurance</u> - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test
II	4	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - <u>Salt spray / resistance to oil</u> - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test
III	2	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - <u>Drift / Cold storage</u> - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - Porosity and delamination
IV	4	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - <u>Shock test</u> - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test
V	4	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - <u>Vibration endurance</u> - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test



Fig. 1 Ship motion endurance test



Fig. 2 Vibration endurance test

년을 기준으로 산정된 것이며, 매우 가혹한 조건의 시험에 해당한다. 나머지 시험항목에 대해서는 4장에 서 검토의견을 제시하고자 한다.

3. 전문 규격의 비교 · 검토

서론에서 언급한 바와 같이, 대용량 마운트에 적용할 수 있는 특화된 규격에는 MIL-M-19863D와 MIL-M-21649C가 있다. 각각 5B5,000H와 5M10,000-H라는 특정 탄성마운트에 적용할 수 있다. MIL-M-19863D에 기술된 시험항목을 정리하면 Table 3과 같다. Table 3에 있는 시험항목명은 해당 규격에서 기술한 명칭보다는 현재 MIL-PRF-32407A에 기술하고 있는 명칭으로 변환한 것이다. 총 4개의 마운트를 대상으로 시험평가를 수행하며, 핵심시험항목은 2개이다. 단, 마운트의 공진주파수가 정격하중에서 (5±1) Hz이어야 한다.

MIL-M-21649C에 기술된 시험항목을 정리하면 Table 4와 같다. 다른 규격과 달리 “Quality of rubber

to metal bond”라는 시험항목이 기본항목으로 있으며, 마운트의 고무요소와 금속요소의 접착력을 검증하는 시험이다. 인장방향으로 마운트의 최대하중의 2 배까지 하중을 작용한 후 60 초 동안 유지한 후 하중을 감소시킨다. 하중을 유지하는 동안의 접착력 상실 여부 등을 확인하는 시험이다(Fig. 3 참조, 참고문헌 (10)). MIL-PRF-32407A에서는 strength test에서 후속시험으로 수행한다.

대용량 마운트에 적용되는 규격의 시험평가에 사용되는 마운트는 4개이며, 일반 규격의 시험평가에 사용되는 마운트 수량(12개 ~ 15개)에 비해 매우 적은 수준이다. 대용량 마운트는 제작에 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 많은 수량을 대상으로 평가를 수행하는 데에는 많은 어려움이 있다. 시험항목도 기본적인 정하중 시험, 동하중 시험, 극한하중 시험과 drift 시험 등으로 매우 간결하게 구성되어 있다. 반드시 확인해야 할 항목만을 대상으로 성능평가시험을 수행하는 것을 알 수 있다.

4. 대용량 마운트의 검증시험 방안

3장에서도 기술한 바와 같이, 대용량 마운트의 성능검증시험에는 많은 비용과 시간이 소요된다. 시험평가용 마운트 제작비용도 제작자 입장에서는 부담스럽다. 이 장에서는 검증시험 방안을 2개로 나누어서

Table 3 Test items in MIL-M-19863D

Group	No. of mount	Test items
I	2	Examination - Static load-deflection - Dynamic stiffness - <u>Strength test</u> - Film thickness of oil and ozone resistant coating
II	2	Examination - Static load-deflection - Dynamic stiffness - <u>Drift</u> - Dynamic stiffness - Porosity and delamination

Table 4 Test items in MIL-M-21649C

Group	No. of mount	Test items
I	2	Examination - Static load-deflection - Dynamic stiffness - Quality of rubber to metal bond - <u>Strength test</u> - Film thickness of oil-ozone resistant coating
II	2	Examination - Static load-deflection - Dynamic stiffness - Quality of rubber to metal bond - <u>Drift</u> - Dynamic stiffness - Porosity and delamination

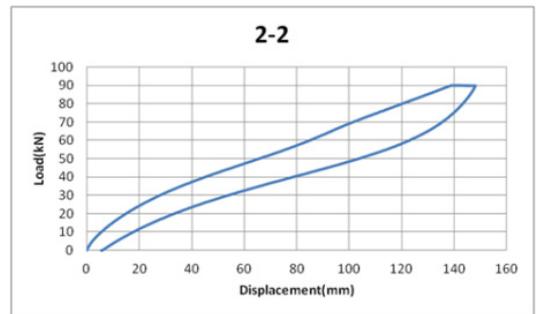


Fig. 3 Quality of rubber to metal bond test result

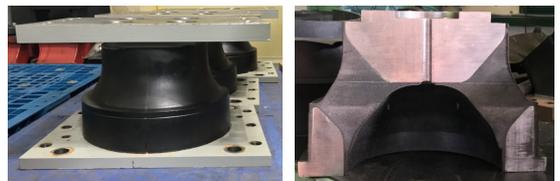


Fig. 4 An example of the rubber mount

제안하고자 한다. 즉, 기본시험항목만으로 구성하는 방안과 일반 규격에서 요구하는 다양한 시험항목으로 구성하는 방안이다. Fig. 4는 대표적인 대용량 r고무 마운트(LD296 mm × UD205 mm × H210 mm)의 모습과 절단모습을 보이고 있다.

4.1 제1안: 기본시험 항목

MIL-M-19863D와 MIL-M-21649C에서 고려하고 있는 항목을 기반으로 성능검증시험을 수행하는 방안을 제시하고자 한다. Table 5에 시험항목을 상세하게 정리하였다. 핵심시험항목으로 “Resistance to oil”과 “Drift” 시험을 선정하였다. 대용량 마운트가 사용되는 장비는 대부분 기관실 및 보기실 등에 설치되며, 오일(oil)에 대한 노출이 상대적으로 많은 구역임을 고려하였다. 또한 이러한 장비는 주기관, 발전기 등이 해당되며, 이들 장비는 작동 중에 많은 열을 발생하는 것을 고려한 것이다.

핵심시험항목 전·후에 공통시험항목을 배정하여, 핵심시험으로 인한 마운트의 성능변화를 평가할 수 있도록 하였다. 모든 시험 항목은 3방향 독립적 시험을 원칙으로 하며, 구체적인 시험방법은 MIL-PRF-32407A에 기술되어 있는 방법을 활용할 것을 제안한다. 단, 극한 하중 시험(strength test)에 대해서는 현실성 등을 고려하여 MIL-M-21649C에 기술되어 있는 하중 값 및 경험치를 채용하고자 한다. 수직 인장방향으로는 정격하중의 2배, 압축방향으로는 정격하중의 8배를 제안한다. 또한 좌우/전후 방향으로는 정격하중의 3배를

Table 5 The first proposal and proposed test items

Group	No. of mount	Test items
I	2	Examination - Static load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - <u>Resistance to oil</u> - Static load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test
II	2	Examination - Static load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - <u>Drift</u> - Static load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test - Porosity and delamination

제안한다. 핵심시험 전에 수행한 결과에 대한 항목 별 uniformity test를 수행하여 마운트의 균질성을 확인해야 한다. 핵심시험 후에 수행한 결과와 항목별로 비교하여 성능변화가 MIL-M-17185A에서는 15% 이내, MIL-PRF-32407A에서는 5%~15%이어야 하나, 국내 시험환경 등을 고려하여 15% 이내이어야 할 것을 제한한다.

4.2 제2안: 상세시험 항목

서론 및 2장에서 검토한 MIL-PRF-32407A는 내용상

Table 6 The second proposal and proposed test items

Group	No. of mount	Test items
I	1	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised) - Ship motion endurance (revised) - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised)
II	4	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised) - Salt spray / Resistance to oil - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised)
III	2	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised) - Drift / Cold storage - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised) - Porosity and delamination
IV (option)	4	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised) - Shock test - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised)
V	4	Examination - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised) - Vibration endurance (Revised) - Low load-deflection - Dynamic stiffness and damping - Strength test (revised)

으로 대용량 마운트(최대 정격하중 225 kN(= 50 000 lb))에 적용할 수 있으나, 대용량 탄성 고무마운트에 적용이 불가능하거나 비현실적인 시험조건이 존재하고 있다. 이 규격을 적용하기 위해서는 규정하고 있는 마운트의 수명 18년을 수정해야 한다. 대용량 마운트가 적용되고 있는 장비의 환경 및 설치되는 주변 환경 등을 고려하여 수명을 결정해야 한다. 하지만 수명 결정을 위해서는 다양한 연구가 장기간 동안 수행되어야 한다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 현재 함정에 설치되고 있는 MTU사의 디젤엔진 마운트의 기술 자료를 분석하였다. 미공개 기술 자료에 의하면, MTU사의 엔진 마운트 수명은 약 5년~6년으로 추정되며, 현실적으로 적절한 것으로 평가된다. 따라서 대용량 마운트의 수명을 6년으로 제안하고자 한다.

제안하는 제2안은 Table 2와 유사하며, 국내 시험환경 등 현실성을 반영하여 Table 6과 같이 시험항목을 제안하고자 한다. 마운트의 수명을 18년에서 6년으로

수정하면, 함운동 내구성시험(ship motion endurance) 및 진동 내구성시험(vibration endurance)의 시험반복 횟수가 1/3수준으로 저감되며, 소요시간도 감축된다. 또한 극한하중 시험(strength test)에 대해서는 제1안과 동일하게 MIL-M-21649C에 기술되어 있는 방법을 채용하고자 한다. 수직 인장방향으로는 정격하중의 2배, 압축방향으로는 정격하중의 6배를 제안한다. 또한 좌우/전후 방향으로는 정격하중의 3배를 제안한다.

Group IV에는 핵심시험항목으로 충격시험(shock test)이 있다. MIL-PRF-32407A에서는 MIL-S-901D⁽¹⁴⁾에 의한 시험 또는 BV043에 의한 시험 등을 요구하고 있다. MIL-S-901D에 의한 시험장비는 한국기계연구원 등 국내 일부 시험기관에서 보유하고 있으나, 대용량 마운트에 대한 충격시험을 수행하기 위해서는 중 중량 충격시험장비(heavy weight shock machine)가 필요하다. 하지만 국내에서는 이 장비를 보유하고 있는 기관이 없다. BV043 시험이 가능한 시험장비는 국방과학연구소 해미시험장에 설치된 것으로 알려져 있으나, 대용량 마운트에 대한 성능시험의 가능성 여부는 알려져 있지 않다. 대안으로 마운트 4개 1 set로 시험하지 않고, 마운트 1개만으로 중간 중량 충격시험장비(medium weight shock machine)를 활용하여 시험하는 방안을 고려할 수 있다. 마운트 1개의 상부에 정격 중량물을 설치하면, 무게중심, 기하중심 등의 불일치 문제로 마운트에 좌굴 현상이 발생한다. 특히 MIL-S-901D 충격시험에서는 수직방향 시험(Fig. 5 참조)뿐만 아니라 30° 경사시험(Fig. 6 참조)이 있기 때문에 시험수행에 어려움이 있다.

따라서 대용량 마운트에 대해서는 충격시험이 불가능한 것이 현재 국내 실정이며, 충격하중에 의한 충격변형 정도 및 손상여부 등은 극한하중 시험(strength test)으로 어느 정도 확인할 수 있는 것으로 알려져 있다. 핵심시험 전에 수행한 결과에 대한 항목 별 균질성 확인시험(uniformity test)을 수행해야 하며, 제1안과 동일하게 핵심시험 후에 수행한 결과와 항목별로 비교하여 성능변화가 15% 이내이어야 할 것을 제안한다.

5. 결 론

대용량 마운트는 주기관, 발전기 등 주요 대형장비에 설치되고 있으며, 신조 함정의 국산화율 증대와



Fig. 5 Shock test with one mount in vertical direction



Fig. 6 Shock test with one mount in inclined direction

함께 마운트의 국산화 요구가 증가하고 있다. 하지만, 대용량 마운트에 특화된 성능검증방법의 정립은 미미한 실정이다. 이 논문에서는 함정탑재장비용 마운트 중 대용량 마운트의 성능검증방안을 제안하고자 하였다.

미국 국방규격을 중심으로 함정탑재장비용 마운트에 대한 일반규격과 전문 규격들을 분석한 결과를 바탕으로 우리 실정 및 현실에 적합한 대용량 마운트의 성능검증방법을 제안하였다. 대형 마운트가 설치되는 장비들은 주로 기관실, 보기실 등에 설치되며, 오일 및 열에 대한 노출기회가 상대적으로 많은 점 등을 고려하였다.

기본항목만으로 구성된 제1안과 제1안에 상세항목을 추가한 제2안을 나누어 제안하였다. 제1안은 정하중 시험, 동하중 시험, 극한하중 시험 등 기본항목만으로 구성하고 있음에도 불구하고, 핵심시험 중 하나인 “drift” 시험의 특성상 1개월 이상의 시험기간이 소요된다. 또한 시험수행을 위해서는 만능시험기(UTM)와 같은 정하중 시험장치 및 진동대와 같은 동하중 시험장치가 필수적이다. 따라서 제1안의 수행에도 상당한 시간과 비용이 소요될 것으로 판단된다. 제2안의 경우, 시험항목이 많고 다양하여 한 기관에서 일괄적으로 시험을 수행하는 것도 어려운 것이 국내 실정이다. 또한 함운동/진동 내구성시험에도 많은 시간 및 비용이 소요될 것으로 예상되어 국산화 개발의 걸림돌이 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 장기간의 시험시간은 시험결과의 분석에도 좋지 않은 영향을 줄 수 있으며, 특히 고무와 같이 온도에 민감한 탄성체에 대해서는 매우 세밀한 결과분석이 필요하다.

국내 마운트 제작사는 대부분 영세한 중소기업이며, 중소기업이 마운트 국산화를 위한 성능검증시험에 많은 자금을 투자할 수 없는 것이 현실이다. 경제성 확보와 검증된 성능의 마운트 개발을 위해 이 논문의 내용이 기여하기를 소망한다.

후 기

이 논문은 한국기계연구원 주요사업(과제명: 인공지능 기반 기계시스템의 예측진단 및 사고대응 기술개발)의 재정적 지원을 받았으며, 지원에 감사를 드립니다.

References

- (1) Kim, H. S., Lee, J. H., Lee, J. H., Seo, Y. J. and Bae, G. H., 2020, Performance Evaluation of Ship Shock Mount for Localization Development, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 115.
- (2) Kim, H. S., Lee, J. H., Lee, J. H., Lee, S. B., Seo, Y. J. and Bae, G. H., 2019, Rubber Material Evaluation and Performance Evaluation of Ship Shock Mount for Localization Development, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 127.
- (3) Lee, J. H., Lee, J. H., Kim, H. S., Lee, S. B., Seo, Y. J. and Bae, G. H., 2019, Performance Evaluation of Ship Shock Mount for Localization Development, roceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 80.
- (4) Department of Navy, 1956, Military Specification, Mounts, Resilient: General Specifications and Tests for (Shipboard Application), MIL-M-17185A(SHIPS).
- (5) Department of Defense, 2012, Performance Specification, Mounts, Resilient (Surface Ship Application). MIL-PRF-32407.
- (6) Department of Defense, 2016, Performance Specification, Mounts, Resilient (Surface Ship Application). MIL-PRF-32407A.
- (7) Republic of Korea Navy, 2015, Guideline of Adapting & Installation for Navy Resilient Mount, 조합(수)-실-1-027(0).
- (8) Department of Navy, 1990, Military Specification, Mounts, Resilient: Type 6E100, 6E150, 7E450, 6E900, 6E2000, 5E3500, 6E100BB, 6E150BB, 7E450BB, and 6E900BB. MIL-M-17508F(SH).
- (9) Lee, H. Y., Shin, S. Y., Chung, J. H., Kwak, J. S. and Lew, J. M., 2009, An Experimental Study on the Vibration of Rubber Mounts for Naval Shipboard Equipments. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 2, pp. 165~170.
- (10) Department of Navy, 1991, Military Specification, Mounts, Resilient: type 5B5,000H, MIL-M-19863D(SH).
- (11) Department of Navy, 1983, Military Specification, Mounts, Resilient: Type 5M10,000-H, MIL-M-21649C(SH).

(12) Moon, S. J., Kim, H. S., Park, J. W., Oh, K. S. and Jeong, J. A., 2015, Experimental Evaluation of the Performance of Large-capacity Mounts for Naval Shipboard Equipments, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 52, No. 3, pp. 275~281.

(13) Republic of Korea Navy, 2005. Criteria for Ship Motion of Shipboard System, 조함(주)-기-0-009(0).

(14) Department of Navy, 1989, Military Specification, Shock Tests. H. I. (High-impact) Shipboard Machinery, Equipment, and Systems, Requirements for, MIL-S-901D(NAVY).



Seok-Jun Moon was born in Seoul, South Korea in 1965. He received the M.S. and Ph.D. degrees in Naval Architecture and Ocean Engineering from the Seoul National University, Seoul, in 1995. Since 1996, he has been a Principal Researcher in System Dynamic Research Department, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, South Korea. His research interests include vibration control devices, testing & evaluation, and conformity assessment.

Information for Authors/논문원고 집필요강

- (1) 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 인정할 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 한국소음진동공학회로 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(he) should be a professor. If the corresponding author's affiliation is research institute, he(he) should be a team leader.
논문의 교신저자는 저자중 선임자로 하며, 저자의 소속이 학교인 경우 교수, 연구소 등은 팀장급 이상을 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.

Guide for Authors/논문원고 집필요령

- (1) The manuscript should follow the format(can be downloaded from the web site). The paper can be typed with HWP or MS-Word. The paper should be submitted on-line.
논문원고는 정해진 규격 사이즈로 우리 학회 논문원고 양식(홈페이지에서 다운로드)에 의해 hwp 또는 MS-word로 작성하고, 학회 홈페이지 논문·투고 심사에서 제출한다.
- (2) The paper should be written in Korean. However, the original terminology can be typed side by side with parenthesis to avoid confusion. The loanword orthography follows the government guideline.
논문원고의 용어는 국어로 작성하는 것을 원칙으로 하며, 의미의 혼동이 있을 경우 ()안에 원어로 병기할 수 있으며, 외래어 표기는 정부안에 따른다.
- (3) The manuscript should be organized in the following order: (1) Title (2) Name(s) of author(s) and his/her (their) complete affiliation(s) (3) Key words (4) Abstract (5) Nomenclature (6) Introduction (7) Main body (8) Conclusion (9) References (10) Appendices.
논문의 체제는 다음에 따름을 원칙으로 한다. (1) 제목 (2) 저자명 (3) 주요기술용어(key word) (4) 초록 (5) 기호설명 (6) 서론 (7) 본론 (8) 결론 (9) 참고문헌 (10) 부록 등
- (4) The title should be concise and consist of Korean and English titles. The name of authors should also consist of Korean and English names.
논문의 제목은 간결하게 표시하며 국문과 영문제목을 병기한다. 저자명도 국문과 영문으로 병기한다.
- (5) The abstract should be written in Korean and English not exceeding 600 characters or 250 words.
초록은 국어와 영어로 각각 600자 또는 250단어 범위내에서 작성한다.
- (6) The number should be written in Arabic numeral and the SI unit system should be used.
숫자는 아라비아 숫자를 사용하며, 수량 단위는 되도록 SI 단위를 사용한다.
- (7) Tables and figures of the paper should be arranged in order and inserted into the main body. The title and content of table and figure should be written in English.
논문중의 표 및 그림은 해당면 상단 또는 하단에 순서에 의해 삽입하며, 그 제목과 내용은 영어로 표기함을 원칙으로 한다.
- (8) Use the following formats for journal articles and books as References.
참고문헌의 구성은 정기간행지의 경우는 저자명, 발간년, 제목명, 지명, 권·호번호, 페이지번호의 순으로 기재하고, 단행본의 경우는 저자명, 발간년, 서명, 권번호 출판사명, 출판사소재지명, 국적, 페이지번호순으로 기재하며, 그 전부를 본문내의 인용번호 순으로 다음과 같은 요령으로 본문 말미에 영문으로 기재하며, 인용문헌 1개 이상은 한국소음진동공학회논문집에서 인용토록 한다.
(1) Cooley, J. W. and Tukey, J. W., 1965, An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Mathematics of Computation, Vol. 19, No. 4, pp. 297~308.
(2) Meirovitch, L., 1980, Computational Methods in Structural Dynamics, Sijthoff and Noordhoff, Maryland, chap. 5.
- (9) References should be cited as follows.
본문에서 참고문헌 인용은 다음과 같이 한다.
(1) Lee and Park⁽¹⁾...
(2) ... solved by the Rayleigh-Ritz method⁽²⁾.
- (10) The original paper should contain names(both in Korean and English), affiliations, the name of corresponding author including address, phone number, fax number and email address.
신규 논문투고시 논문정보에는 저자명(국·영문), 저자 근무처 및 소속을 기재하며, 저자(공저일 경우 주저자 <교신저자> 즉 Corresponding Author)의 주소 및 전화번호(FAX 포함), E-mail주소를 명확히 기재한다.
- (11) The final manuscript accepted for publication should be submitted to the editor office through the society web site.
심사 후 최종 채택된 논문원고는 학회 홈페이지(학회논문관리시스템)을 통해 학회 사무국에 제출한다.

Checklist for Original Article | 저자점검표

Title of the manuscript | 논문 제목 : _____

Please check below items as ✓ mark before submission of the manuscript. | 각 항목을 확인하고 ✓표시를 하십시오

1. General guidelines | 원고 일반

- Manuscript contained ① one original manuscript, ② statement of copyright transfer, ③ Checklist for Original Article and was attached. | 원고는 ① 원본 1부, ② 저작권 양도 동의서, ③ 저자점검표를 첨부하였는가?
- Manuscript should follow the format (can be downloaded from the web site). The paper can be typed with HWP or MS-Word. | 논문은 정해진 규격 사이즈로 우리 학회 논문원고 양식(홈페이지에서 다운로드)에 의해 hwp 또는 MS-word로 작성되었는가?
- The manuscript should be organized in the following order: (1) Title (2) Name(s) of author(s) and his/her (their) complete affiliation(s) (3) Key words (4) Abstract (5) Nomenclature (6) Introduction (7) Main body (8) Conclusion (9) References (10) Appendices. | 논문의 체제는 (1)제목, (2)저자명, (3)주요기술용어(key word), (4)초록, (5)기호설명, (6)서론, (7)본론, (8)결론, (9)참고문헌, (10) 부록 등을 따랐는가?
- Main text consisted of introduction, subjects and methods, and results and discussion in separate pages. | 본문은 서론, 대상 및 방법, 결과, 고찰을 독립하여 구성하였는가?
- The paper should be written in Korean. However, the original terminology can be typed side by side with parathesis to avoid confusion. The loanword orthography follows the government guideline. | 학술용어는 국어로 작성하는 것을 원칙으로 하고, 의미의 혼동이 있을 경우 ()안에 원어로 병기하였으며, 외래어 표기는 정부안에 따랐는가?

2. Cover page | 표지

- Title, name of authors, affiliation was described both in English and in Korean. | 표지에는 논문의 제목과 모든 저자명 및 소속을 국문과 영문으로 기록하였는가?
- In lower area of cover page, the name, address, email, telephone, fax of the corresponding author were described. | 표지 하단에 책임저자의 성명, 소속, 주소 및 연락처(전화, 팩스, E-mail주소)를 명확히 기재하였는가?

3. Abstract | 초록

- The abstract should be written in Korean and English not exceeding 600 characters or 250 words. | 초록은 국어와 영어로 각각 600자 또는 250단어 범위 내에서 작성하였는가?

4. Main text | 본문

- Main text was written in order of introduction, main body(include Figure, Table), conclusion. | 본문의 순서는 서론, 본론(표, 그림), 결론을 따랐는가?
- References should be cited as follows. | 본문에 인용한 참고문헌은 논문원고 집필요령의 방법을 준수하였는가?

5. References | 참고문헌

- Every articles in references were cited in the main text. | 본문에 인용되어 있는가?
- References were numbered according to numeric order. | 참고문헌은 인용된 순서로 (1), (2), (3)으로 정리하였는가?
- All references were written in English. | 참고문헌은 모두 영문으로 표기하였는가?
- The paper from “Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering” was cited if the content is relevant. | “한국소음진동공학회논문집”에 수록된 문헌을 인용한 것이 있는가?
- Use the following formats for journal articles and books as References. | 참고문헌 작성법은 논문원고 집필요령(정기간행지 : 저자명, 발간년, 제목명, 지명, 권·호번호, 페이지번호의 순 / 단행본 : 저자명, 발간년, 서명, 권번호 출판사명, 출판사 소재지명, 국적, 페이지번호)을 준수하였는가?

6. Tables and figures | 표와 그림

- Titles and legends of tables and figures were written in English. | 모든 표와 그림의 제목과 설명은 영문으로 작성되었는가?
- Figures were in required format. | 사진은 정해진 규격에 맞게 별도로 제출하였는가?
- Tables and figures of the paper should be arranged in order and inserted into the main body. | 표 및 그림은 해당면 상단 또는 하단에 순서에 의해 삽입하였는가?

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 doesn’t include any illegal content which violates copyrights of any authors.
- (4) Although all or part of the manuscript is used for commercial purpose before 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, 독창적인 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 게재하고 배포할 권리.
- (4) 저자가 교과서 등 서적과 종설의 기술, 저자에 의한 강의, 연구발표 및 워크샵 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 저자가 속한 기관 또는 단체의 저작권 담당자를 대표하여 본 저작권 양도 동의서에 서명하여야 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 지원한 기관 및 단체가 본 논문에 대한 저작권을 행사하고자 하는 경우에는 그 행사를 제한하지 아니한다.
- (3) 본 저작권 양도 동의서에 서명함으로써 저자는 본 논문이 학술회의에서의 발표를 제외한 다른 형태로 투고 또는 발간되지 않았으며, 타인의 저작권을 침해하는 불법적인 내용을 포함하지 않았음을 서약한다.
- (4) 논문의 전부 혹은 일부가 학회 논문집에 게재되기 전에 어떠한 형태로든 상업적인 목적으로 제작되거나 유포된 경우라도 게재 이후에는 상업적인 목적을 위하여 발간된 내용의 전부 혹은 일부를 포함하는 새로운 내용으로 변경하여 제작하거나 유포할 수 없다.
- (5) 본 저작권 양도 동의서에 서명하는 것은 저자가 본 저작권 양도 동의서에 기재된 모든 내용을 읽고, 그 내용을 이해하였으며, 그 내용에 동의하는 것을 의미한다.

Korean Society for Noise and Vibration Engineering
Research Ethics and Ethics Committee Regulations

한국소음진동공학회

연구윤리 및 윤리위원회 운영 규정

- (1) (Purpose) This provision is subject to the code of ethics of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering(KSNVE), which publishes and presents academic activities such as research ethics and the establishment of relationships in KSNVE. The purpose of this document is to set forth the terms of the research ethics committee for operational sanctions.

(목적) 본 규정은 한국소음진동공학회(이하 “학회”라 한다)의 윤리헌장에 따라 학회에서의 출판과 발표 등 학술활동과 관계되는 연구윤리의 확립, 연구발표 부정행위의 예방과 검증, 제재를 위한 연구윤리위원회(이하 “위원회”라 한다) 구성과 운영에 관한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

- (2) (Configuration and Functions) ① The committee shall be composed of one chairman, one secretary, and five committee members. ② Chairman and members shall be elected by the board of directors and appointed by the KSNVE president. ③ The terms of the chairman and members are two years, and both can be reappointed. ④ The chairman shall represent the committee and oversees the work of the ethics of the KSNVE.

(위원회의 구성 및 직무) ① 위원회는 위원장 1명과 간사 1명, 위원 5명으로 구성한다. ② 위원장 및 위원은 이사회에서 선출하며 회장이 임명한다. ③ 위원장 및 위원의 임기는 2년으로 하며 연임할 수 있다. ④ 위원장은 위원회를 대표하고 학회의 윤리에 관한 업무를 총괄한다.

- (3) (Function) The committee shall work with the following contents: (1) Research and prosecute established ethics, (2) Prevent and contain research misconduct, (3) Research misconduct deliberation and voting, (4) Report results to the board of directors for decisions and sanctions more on cheaters, (5) Provide more details on the improvement and promotion of research ethics.

(위원회의 기능) 위원회는 다음의 내용으로 활동한다. 1) 연구윤리 수립 및 추진. 2) 연구 부정행위의 예방과 방지. 3) 연구 부정행위 심의 및 의결. 4) 부정행위자에 대한 제재내용 결정 및 이사회에 결과보고. 5) 기타 연구 윤리의 개선 및 증진에 관한 사항

- (4) (Convening and Voting) ① The committee shall be convened as necessary by the chairman. The vote in favor of 2/3 of registered members. ② The details that have passed the vote shall be notified to the suspect of misconduct (defendant) and the defendant's opinion must be received as a written plea within 10 days. ③ The committee shall review the explanatory materials received from the person suspected of misconduct. The ever need to listen to your thoughts when the final vote. ④ The details that have passed the vote shall be reported to the board of directors to reach a final decision. ⑤ When judged necessary, the chairman may listen to comments from outsiders or non-members. ⑥ The presented details of attendees or the details of meeting from the committee shall be kept confidential as a general rule.

(위원회 소집 및 의결) ① 위원회는 위원장이 필요에 따라 소집하며, 재적위원 2/3의 찬성으로 의결한다. ② 의결된 내용은 부정행위 의심자(피 제소자)에게 통보하고 10일 이내에 서면으로 소명 의견을 받아야 한다. ③ 위원회에서는 부정행위 의심자로부터 받은 소명자료를 검토하거나 필요시 의견을 청취하여 최종 의결토록 한다. ④ 의결된 내용은 이사회에 보고하여 최종 결정한다. ⑤ 위원장이 필요하다고 판정할 경우, 외부 인사나 위원이 아닌 자의 의견을 청취할 수 있다. ⑥ 위원회에서 참가자 발표내용 및 회의내용은 비공개를 원칙으로 한다.

- (5) (Scope of Research Publication Misconduct) ① "Plagiarism" refers to the act of theft without quoting such information or the results of the research of others without revealing the source. ② "Falsification" or "alteration" is the use of another person's or one's own research results of operations or strain, says the act of distortion. ③ "Duplicate publication" stands for the act of publishing the same details in two or more journals. ④ "Wrongful inscription of author" stands for the action of putting on someone who has not contributed to the research as an author. ⑤ Others say the unacceptable range.

(연구발표 부정행위의 범위) ① “표절”이란 출처를 밝히지 않은 채 타인의 연구내용이나 결과 등을 인용치 않고 도용하는 행위를 말한다. ② “위조” 및 “변조”란 타인이나 자기 자신의 연구자료 결과의 조작이나 변형, 왜곡하는 행위를 말한다. ③ “이중게재”란 2개 이상의 학술지에 동일한 내용을 게재하는 행위를 말한다. ④ “부당한 저자표기”란 연구에 기여하지 않은 자를 저자로 올리는 행위를 말한다. ⑤ 기타 용인할 수 없는 범위를 말한다.

- (6) (Informing and Notifying Research Misconduct) ① The contents of research misconduct are limited to the publications "Journal of KSNVE" and "Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng." ② The report of research misconduct must be submitted in writing accompanied by the relevant data in accordance with the five W's and one H. ③ The committee then received a report that information within three months of deliberations to finalize the report to the board of directors. ④ The final content as determined by the board of directors shall notify the informant and the malfeasant within 10 days and posted on the KSNVE homepage. ⑤ The end result regarding the misconduct should not be released to the public before finalized.

(연구 부정행위의 제보 및 통보) ① 연구 부정행위의 내용은 한국소음진동공학회는문집과 학회지(소음·진동)에 발표된 간행물에 한한다. ② 연구 부정행위의 제보는 육하원칙에 따라 관련 자료를 첨부하여 서면으로 제출하여야 한다. ③ 위원회는 제보가 접수된 후 3개월 내에 심의 내용을 확정하여 이사회에 보고하여야 한다. ④ 이사회에서 최종 결정된 내용은 10일내에 제보자와 부정행위자에게 통보하고 학회 홈페이지를 통해 공지한다. ⑤ 연구 부정행위에 대한 최종결과가 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안된다.

- (7) (Sanctions for Research Misconduct) ① For authors whose research misconduct has been confirmed, punishment may be selected to be imposed on each case after being reviewed by the committee and considering the severity of misconduct determined by the committee: 1) Cancellation of publications published by the KSNVE for the announcement study, 2) Prohibition for five years from contributing "Journal of KSNVE" and "Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.", 3) Prohibition for five years from attending the KSNVE Conference, 4) Notification of the details of misconduct to the institution, 5) Disqualification of society members. ② If a caller has intentionally and falsely reported a violation, according to the decision of the committee, the committee may impose the same sanctions and level as described in "Sanctions for Research Misconduct."

(연구 부정행위에 대한 제재) ① 연구 부정이 확인된 저자에게는 위원회 결정에 따라 부정행위의 경중을 고려하여 다음의 제재를 선택하여 가할 수 있다. 1) 해당 발표연구물에 대한 학회 간행물에 게재취소. 2) 5년간 학회의 논문집과 학회지에 투고금지. 3) 5년간 학회 학술대회 발표금지. 4) 부정행위자 소속기관에 부정행위 내용 통보. 5) 학회 회원자격 박탈 ② 제보자가 고의로 허위제보를 하였을 경우 위원회의 결정에 따라 연구 부정행위자 수준과 동일한 제재를 가할 수 있다.

This regulation shall enter into force on October 24, 2008 (enactment)

본 규정은 2008년 10월 24일부터 시행한다(제정)

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 노력하여야 한다. 또한 소음진동공학 전문가로서 자기분야에 성실히 봉사하고 경쟁력과 권위를 높이기 위해 노력하여야 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 학자적 양심에 충실하여야 한다.
4. 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. | 한국소음진동공학회 회원은 삶의 질을 향상시켜 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, 위업을 지킬 수 있도록 정직하고 공정하게 행동한다.

Authorship | 저자의 윤리의식

- 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 노력하여야 한다. 또한 소음진동공학 전문가로서 자기분야에 성실히 봉사하고 경쟁력과 권위를 높이기 위해 노력하여야 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 처신하며, 윤리성과 학자적 양심에 충실하여야 한다.
- 4) Authors should not behave against the purpose of the foundation of the society. | 우리는 학회의 설립목적에 반하고 훼손하는 제반활동을 하여서는 아니 된다.

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 학문적 가치가 높은 것으로 한다. 한국소음진동공학회 논문집에 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 주장의 일부분을 자신의 연구나 주장인 것처럼 논문이나 저술에 제시해서는 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 부당하거나 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 논문원고는 편집팀(편집위원장, 편집이사)의 판단하에 적정성을 검토하여 채택불가 또는 논문 심사위원 3인을 선정하고, 해당편집이사는 접수일로부터 10일 이내에 논문 심사위원에게 서류를 갖추어 논문심사를 의뢰한다. 의견교환 등 심사과정에 대한 전반적인 사항은 편집팀의 책임하에 논문 심사 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 대외적으로 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 지나면 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 원고가 편집팀 또는 학회 사무국에서 발송한 날로부터 1개월 이내에 회송되지 않을 경우에는 취소할 수 있다.
- If the author of the unaccepted manuscript requires review again, it cannot be accepted. | 최종적으로 채택(採擇) 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). | 논문원고의 저자는 논문게재 회비 규정에 따라 소정의 논문관리회비(편당 5만원) 및 게재회비(일반논문 : 기본6면 10만원/초과면당 2만원, 연구비 지원 : 기본 6면 15만원/초과면당 3만원, 긴급논문 : 기본 6면 20만원/초과면당 4만원, 학술회발표논문 무료)를 납부해야 한다.



사단
법인 한국소음진동공학회

The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

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