

# 한국소음진동공학회논문집

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

# Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

## 한국소음진동공학회논문집

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

### Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering(Transactions of the KSNVE)

**Aims & Scope** : This journal provides original articles on any aspect of noise and vibration issues in various fields including mechanical engineering, construction engineering, environmental engineering and so on. This journal publishes fundamental work, theoretical analysis, experimental investigation and practical application on noise and vibration problems.

Recently, articles on advanced technology of active noise and vibration control are also included in this journal.

**ISO abbreviation of 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 31 Number 6

# December 2021

**Published by** The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

**Published on** December 20, 2021 (Bi-monthly)

**Publisher** Young Min Park (President, KSNVE)

**Manuscript(Managing) Editor** Jin Tai Chung(Vice president, KSNVE)

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

## 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

Dr.  
**Byung Kwon Lee**

Environmental Assessment Group,  
Korea Environment Inst.

nicelbk@gmail.com  
Tel : 82-44-415-7321

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

### Associate Editors

Prof.  
**Cheol Ung Cheong**

Department of Mechanical  
Engineering,  
Busan Univ.

ccheong@pusan.ac.kr

Prof.  
**Jae Young Kang**

Department of Mechanical  
Engineering,  
Inha Univ.

kangji@inha.ac.kr

Prof.  
**Jong Seok Oh**

Department of Mechanical and  
Automotive Engineering,  
Kongju Univ.

jongseok@kongju.ac.kr

Prof.  
**Seon Jun Jang**

Department of Mechanical  
Engineering,  
Hoseo Univ.

mweagle@hoseo.edu

Dr.  
**Deuk Sung Kim**

NVT

kdsworlds@hanmail.net

Prof.  
**Jin Gyun Kim**

Department of Mechanical  
Engineering, Kyung Hee Univ.

jingyun.kim@khu.ac.kr

Dr.  
**Jung Bin Im**

Daewoo EnC

jungbin.im@daewooenc.com

Prof.  
**Won Seok Yang**

Department of Automotive  
Engineering, Univ. of Transportation

wsyang@ut.ac.kr

Dr.  
**Han Shin Seol**

Naval Ship Engineering Research  
Center, KRISO

seol@kriso.re.kr

Prof.  
**Jin Woo Lee**

Department of Mechanical  
Engineering, Ajou Univ.

jinwoolee@ajou.ac.kr

Prof.  
**Nam Keun Kim**

Department of Mechanical  
Engineering, Incheon National Univ.

nkim@inu.ac.kr

Prof.  
**Yong Hee Kim**

Department of Architectural  
Engineering, Yongsan Univ.

yhkim@ysu.ac.kr

Prof.  
**Heon Jun Yoon**

Department of Mechanical  
Engineering, Soongsil Univ.

heonjun@ssu.ac.kr

Dr.  
**Jin Yun Chung**

Korea Conformity Laboratories

jinyun97@gmail.com

Dr.  
**Pyung Sik Ma**

Department of System Dynamics,  
KIMM

psma@kimm.re.kr

Prof.  
**Yong Hwa Park**

Department of Mechanical  
Engineering, KAISTE

yhpark@kaist.ac.kr

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

# 한국소음진동공학회논문집

2021년 12월

제 31 권 제 6 호 통권 263호

## 목 차

방진구 시스템을 장착한 구조물의 시험 및 해석을 통한 구조설계 .....	송아영 · 임성환 · 권병오 · 한대회 · 정혜진 ... 589
2축 전자기 구동기를 이용한 소형 6축 이동 로봇 .....	레광환 · 이왕훈 · 김영식 · 유봉조 · 심현호 · 신부현 ... 597
데이터 기반 모델축소법을 이용한 효율적인 비선형 구조해석 개발 .....	김혜진 · 조해성 · 이시훈 · 신상준 · 김해동 ... 604
탐욕 알고리즘 및 특이치 분해를 이용한 프로펠러 초생 캐비테이션의 위치추정 .....	이정훈 ... 614
도심지역과 비도심지역 군용비행장의 소음 피해범위 비교분석 .....	김경민 · 이병찬 ... 625
구조-음향 연성 시스템의 진동모드에 의한 소음 예측 .....	황재승 · 송민정 · 류종관 ... 632
축소 기체 구조 모델을 이용한 고속 비행 복합형 무인 회전익기의 능동 진동 제어 시험 .....	홍성부 · 박재상 ... 642
군용비행장 · 군사격장 소음 방지 및 피해 보상에 관한 법률의 개선방향 .....	홍정현 · 하용훈 ... 654
닐센 아치고 케이블 장력에 대한 관리기준치 설정에 관한 모니터링 연구 .....	문인기 · 최선민 · 김두산 ... 661
경사 각도에 따른 전동기의 진동 및 고체소음 특성 분석 .....	정호연 · 구희모 ... 668
이차 배관 결합별 진동 특성에 대한 테스트베드 / 연구로 / 상업로 운전 조건 및 환경의 영향 분석 .....	박상진 · 정변영 · 박진호 · 최영철 ... 675
측정 위치에 대한 강건성을 가지는 구조 진동 신호 기반의 결합 있는 복합재 구조물의 분류 .....	이대운 · 한장우 · 김홍수 · 손정우 ... 684
노트북 컴퓨터에 장착된 SSD의 낙하 실험과 유한요소 해석을 활용한 취약부 및 수명 예측 .....	조영정 · 장건희 · 한미쁨 ... 692
텍스트 네트워크 분석을 이용한 바닥충격음 연구동향 분석 .....	김경우 · 신혜경 · 박상희 ... 700
풍잡음 저감용 방풍망 특성에 대한 실험적 연구 .....	이영진 · 이진우 ... 708

C · O · N · T · E · N · T · S

Structural Design through Test and Analysis of Structure Equipped with Vibration Isolator System .....	Song, A.-Y., Yim, S.-H., Kwon, B.-O., Han, D.-H. and Jung, H.-J. ...	589
Micro Hexapod Robot Using Dual-axis Electromagnetic Actuator .....	Le, Q. H., Lee, W. H., Kim, Y. S. Ryu, B.-J., Shim, H.-H. and Shin, B. H. ...	597
Development of an Efficient Nonlinear Structural Analysis Using Data-driven Model Order Reduction .....	Kim, H. J., Cho, H. S., Lee, S. H., Shin, S. J. and Kim, H. D. ...	604
Localization of Propeller Cavitation Inception Using Greedy Algorithm and Singular Value Decomposition .....	Lee, J.-H. ...	614
A Comparative Analysis for Noise Damage Range of Military Airfields in Urban and Non-urban Areas .....	Kim, K. M. and Lee, B. C. ...	625
Prediction Framework for Vibration Mode Induced Noise of Structure-acoustic Coupling System .....	Hwang, J.-S., Song, M.-J. and Ryu, J.-K. ...	632
Active Vibration Control Test of High-speed Compound Unmanned Rotorcraft Using Scaled Airframe Model .....	Hong, S.-B. and Park, J.-S. ...	642
Possible Improvements to the 「Military Airfields and Military Firing Ranges Noise Prevention and Compensation Act」 .....	Hong, J. H. and Ha, Y. H. ...	654
Monitoring the Management Limit of Cable Tension Force for the Nielsen Arch Bridge .....	Moon, I. K., Choi, S. M. and Kim D. S. ...	661
Effect of Inclination Angles on Motor Vibration and Structure-borne Noise Characteristics .....	Jeong, H. Y. and Goo, H. M. ...	668
Analysis of Vibration Characteristics of Secondary Piping Faults in Testbed, Research, and Commercial Reactors .....	Park, S.-J., Chung, B.-Y., Park, J.-H. and Choi, Y.-C. ...	675
Classification of Damaged Composite Structures Using Structural Vibration Signals Featuring Robustness to Measurement Locations .....	Lee, D. U., Han, J. W., Kim, H. S. and Sohn, J. W. ...	684
Prediction of Vulnerable Location and Fatigue Life of an SSD Mounted on a Notebook Computer Utilizing Drop Test and Finite Element Analysis .....	Cho, Y. J., Jang, G. H. and Hahn, M. B. ...	692
Analysis of Floor Impact Sound Research Trend Using Text Network Analysis .....	Kim, K.-W., Shin, H.-K. and Park, S. H. ...	700
An Experimental Study on the Characteristics of a Windscreen for Reducing Wind Noise .....	Lee, Y. J. and Lee, J. W. ...	708



# 방진구 시스템을 장착한 구조물의 시험 및 해석을 통한 구조설계

## Structural Design through Test and Analysis of Structure Equipped with Vibration Isolator System

송 아 영<sup>†</sup> · 임 성 환<sup>\*</sup> · 권 병 오<sup>\*</sup> · 한 대 희<sup>\*</sup> · 정 혜 진<sup>\*</sup>

Ah-Young Song<sup>†</sup>, Sung-Hwan Yim<sup>\*</sup>, Byung-Oh Kwon<sup>\*</sup>, Dae-Hee Han<sup>\*</sup> and Hye-Jin Jung<sup>\*</sup>

(Received July 19, 2021 ; Revised September 6, 2021 ; Accepted October 28, 2021)

**Key Words** : Displacement Interference(변위간섭), Structural Analysis(구조해석), Gimbal(짐벌), Reconnaissance Equipment(정찰장비), Isolator(방진구), Random Vibration(램덤진동), Transmissibility(전달률)

### ABSTRACT

The vibration characteristics of the mounting platforms of surveillance and reconnaissance equipment differ, and their operating conditions should be considered during their design. In addition, the attenuation characteristics of an applied vibration are important when a dust prevention system is equipped; therefore, structural integrity should be verified through analysis and testing. Vibration and shock tests were conducted to analyze the characteristics of an isolator, and the isolator was selected. Reinforcement was designed by finding the vulnerabilities of the equipment using data obtained from a pretest. A dynamic characteristic analysis of the system with the reinforced structure was carried out using measured data. The reinforcement design was completed by verifying the structural integrity of the system through a structural analysis.

### 기 호 설 명

$d_{static}$  : 정적 편향(static deflection)  
 $d_t$  : 전체 편향(total deflection)  
 $d_{vib}$  : 진동에 의한 편향  
(deflection due to vibration)  
 $F_n$  : 고유진동수(natural frequency)  
 $g_i$  : 지정된 진동 가속도  
(specified vibration acceleration)  
 $g_o$  : 가속도 응답(acceleration response)  
 $K'$  : 동적 스프링률(dynamic spring rate)  
 $S_i$  : 입력 랜덤 진동(input random vibration)

$T_R$  : 공진주파수 전달성  
(resonant transmissibility)  
 $W$  : 중량(weight)  
 $x_i$  : 진동 입력 모션  
(vibration input motion)  
 $x_0$  : 진동 응답 모션  
(vibration response motion)

### 1. 서 론

감시정찰장비의 목적은 멀리 있는 타깃을 식별 및 관측하거나 타깃의 영상정보, 지형정보, 타깃과의 거리정보를 수집하는 등의 다양한 임무를 수행하는 것

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, LIG Nex1, Researcher  
E-mail : ahyoung.song@lignex1.com  
<sup>\*</sup> LIG Nex1, Researcher

<sup>#</sup> A part of this paper was presented at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference  
<sup>‡</sup> Recommended by Editor Nam Keun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이다. 특히, 영상정보를 획득하는 업무를 가지는 감시 장비는 임무 특성상 다양한 영상 센서들을 한정된 공간인 짐벌(gimbal) 안에 탑재하여 임무를 수행한다. 이런 감시정찰장비는 먼 거리에 있는 타깃을 지향하기 때문에 절대변위에 민감하며, 다중의 센서들의 시선오차를 줄이기 위해서 내부에 배치되는 영상장비들을 근접 설계하여 유사한 시야각(FOV: field of view)을 갖게 배치 설계를 한다. 이 때문에 진동에 민감한 장비라 할 수 있다. 또한, 임무 수행 환경에 따라서 Fig. 1과 같이 여러 플랫폼으로 나뉘어 장착되기 때문에 플랫폼 특성에 맞춰 구조 설계를 해야 한다. 이는 플랫폼에 따라 짐벌 내부로 인가되어 들어오는 진동/충격의 크기와 주파수 특성이 다를 수 있기 때문이다. 플랫폼에서 전달되는 진동이 짐벌 시스템을 통해서 내부 영상장비로 전달되기에 진동을 감쇠하기 위해 Fig. 2와 같이 내부짐벌에 방진구(isolator)를 장착하여 영상장치로 인가되는 진동을 최소화하는 구조 설계를 진행해야 한다.



Fig. 1 Reconnaissance equipment mounted on various platforms

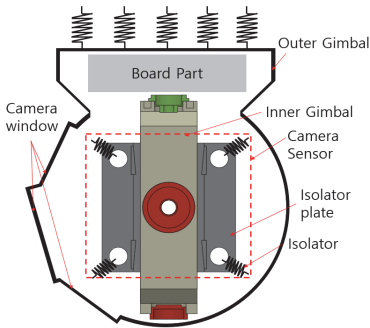


Fig. 2 Dustproof structure in the reconnaissance equipment

이 연구에서는 항공플랫폼에 탑재되는 감시장비의 이용하여 영상장치 내부로 전달되는 진동을 최소화하는 짐벌의 구조설계를 진행하였다. 기존의 감시장비 연구에서는 방진구의 특성을 수치해석을 통하여 선정, 짐벌의 해석과 시험을 진행하였기에 비행조건이 고려된 짐벌에서의 방진구 특성 계측과 짐벌 적용에 관한 연구가 미미하였다<sup>(1)</sup>.

이번 연구에서는 비행조건에서 방진구 특성을 계측하고 2축 짐벌에 구조특성 파악과 적합한 방진구를 선정하는데 목표하였다. 사진에 시험모듈의 동특성 해석을 진행하였으며, 이를 기반으로 시험모듈과 플랫폼 지그를 임의 제작하였다. 랜덤진동의 프로파일로는 항공기 운용 진동을 인가하였다. 진동은 플랫폼 지그를 통해서 시험모듈 내부짐벌로 전달된다. 가속도 센서를 이용하여 진동데이터를 계측하였다. 이때, 내부짐벌에 전달되는 진동을 감쇠해주는 방진구를 특성이 다른 비교 방진구들로 변경해가며 영상장치에 거동을 계측하였다. 계측데이터를 분석하여 장비에 적합한 방진구를 선정하였다. 그리고 구조적 개선점을 도출하여 재설계를 진행하였다. 구조변경 설계가 완료된 모델을 다시 검증하기위해서 시험에서 계측한 데이터를 이용하여, 시험계측거동과 해석거동을 비교하여 해석모델의 신뢰도를 확보하였다. 그리고 개선된 짐벌구조의 구조안정성을 평가하여 그 결과를 제시하였다<sup>(2)</sup>.

## 2. 시험모듈의 방진구 선정

### 2.1 시험모듈 구성 및 동특성 분석

시험모듈의 구성은 Fig. 3과 같이 구성된다. 좌우의 방진구 플레이트(isolate plate)가 내부짐벌(inner gimbal)과 연결되어 있으며, 내부짐벌 안에 카메라센서(camera sensor)가 두 포인트로 연결되어 있는 구조이다. 이때,

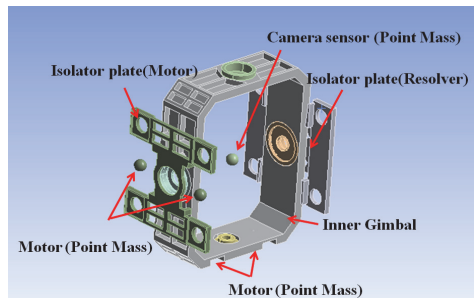


Fig. 3 Test model configuration



방진구 플레이트는 티타늄, 내부짐벌의 물성은 알루미늄을 사용하였다. 방진구 없이 시험모듈의 동특성을 분석하고자 하여 해석모델에는 방진구 특성을 반영하지 않고 진행하였다. 방진구 플레이트와 내부짐벌을 강체라 가정하였다. 모터와 카메라 더미는 포인트 질량으로 구현하여, 관성 값을 적용해 모드해석을 진행하였다. 모드해석의 결과는 Table 1과 같다. 1차 모드는 111.4 Hz, 2차 모드 148.1 Hz, 3차 모드 220.7 Hz의 결과가 나왔다. 이때 카메라 내부에 탑재되는 센서의 회피 주파수는 300 Hz 영역으로 모드해석에서는 해당 주파수 영역을 회피되었음을 판단하여 시험을 위해 해당 모듈을 기반으로 제작하였다(4).

2.2 시험용 방진구 선정

방진구를 선정할 때는, 가장 우선시 되는 부분은 제어하고자 하는 주파수 영역을 회피하는 것이다. 이 연구의 제어주파수가 30 Hz영역에서 100 Hz영역에 있다고 가정한다면, 해당 주파수 영역을 1차적으로 회피한 방진구를 선정하고 탑재중량과 인터페이스 등을 고려하여 선정한다. 또한, 탑재중량 상태에서 방진구의 시스템주파수에서 최대 변위를 확인하여 해당 변위 값이 설계 허용범위인가를 검토하여야 한다. 이에 시험모듈 시험에 앞서 제조사에서 방진구 선정 시 제시하는 사용조건인 식(1)과 (2)를 통해 최대 변위 값을 검토하였다.

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

$$K' = \frac{(F_n)^2 \cdot W}{9.8} \tag{2}$$

Dynamic spring rate를 계산하여 1차적으로 적용이 가능한 방진구를 제조사에서 제공하는 K'정보를 이용하여 선택할 수 있다(5).

Table 1 Test model modal analysis result

Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]
1	111.4	5	285.8	9	432.6
2	148.1	6	339.3	10	466.2
3	220.7	7	357.5	11	487.4
4	263.0	8	401.8	12	500.3

$$g_0 = 3 \sqrt{\frac{\pi}{2} S_i F_n T_R} \tag{3}$$

식(3)에서 나오는 T<sub>R</sub>의 계수는 방진구의 재질에 따른 탄성값이다.

$$x_0 = \frac{g_0}{0.051 \cdot F_n^2} \tag{4}$$

식(4)를 통해서 vibration response motion의 값을 구하면 specified vibration acceleration의 값을 구할 수 있다.

$$g_i = \frac{g_0}{T_R} \tag{5}$$

$$x_i = \frac{g_i}{0.051 \cdot F_n^2} \tag{6}$$

식(5)에 식(6)를 대입하면 d<sub>static</sub> 값이 계산된다. 예상되는 총 변위 값을 구하기 위해서는

$$d_{vib} = \frac{x_i}{2} T_R \tag{7}$$

$$d_t = d_{vib} + d_{static} \tag{8}$$

식(7)를 구해서 식(6)의 값과 더해주면 식(8)의 값으로 방진구 공진영역에서 발생하는 총 변위 값을 예측할 수 있다(5).

계산을 통해서 선정된 방진구는 2번, 8번, 14번(방진구 번호)로 2번, 14번의 경우 12 Hz ~ 13 Hz의 공진주파수를 이며, 8번은 21 Hz의 공진주파수를 갖는다. 세 개의 방진구는 제어주파수영역을 회피하였으며 예측 최대 변위량은 8 mm이내를 갖기에 세 가지 모두 시험에 적용이 가능할 것이라 판단하였다. 그리고 방진구 2번, 8번은 BTR<sup>®</sup> 재질, 14번 방진구는 BTR<sup>®</sup> II재질로 2번, 14번이 비슷한 공진주파수를 갖더라도 감쇠거동이 다를

Table 2 Isolator performance characteristics

Isolator no.	Axial frequency [Hz]	Dynamic axial spring rate [lb/in]	Dynamic radial spring rate [lb/in]	Material
2	13	71	79	BTR <sup>®</sup>
8	21	173	192	BTR <sup>®</sup>
14	12	61	68	BTR <sup>®</sup> II

것이라 판단하여 선정하였다. Table 2는 제조사에서 제공하는 방진구 2번, 8번, 14번의 성능특성이다.

**2.3 진동충격 시험결과**

시험모듈은 내부짐벌의 진동시험을 위해서 Fig. 5와 같이 플랫폼과 동일하게 진동이 인가될 수 있도록 플랫폼 지그를 제작하였으며, 카메라센서부의 응답을 확인하기 위해서 관성과 CG를 고려하여 더미로 특성 구현을 하였다. 플랫폼 지그는 Fig. 2에서 외부짐벌 (outer gimbal)과 같은 역할이며, 인가될 운용 진동은 MIL-STD-810G의 진동규격으로 Fig. 4와 같이 각축당 60분씩 30% safety grms로 인가하였다<sup>(3)</sup>.

가속도 계측 포인트는 Fig. 5와 같다. ①로 표시되어 있는 부분은 플랫폼 지그를 통해서 바로 진동이 전달되어 들어오는 방진구플레이트로 이 부분을 통해서 진동은 방진구로 전달되고 진동이 감소되어 ②로 표

시되어 있는 내부짐벌로 전달된다. ③은 내부짐벌에 두 포인트로 체결되어있는 카메라더미이다. 이렇게 3포인트를 계측부분으로 선정했다. 진동시험은 감소특성이 다른 3가지 방진구를 변경하여 각 축별로 사인과 램딘진동을 수행하였다. 18번의 시험을 진행하였으며, 이중 가장 관심 영역인 Y축 데이터에 대해서 특성이 각기 다른 방진구가 내부의 카메라더미에 영향을 얼마나 미치는지 분석하였다. 먼저 Fig. 6 사인 그래프의 결과를 보면 2번과 14번 방진구의 1번째 공진점이 12 Hz ~ 13 Hz, 8번 방진구 21 Hz영역인 것을 확인할 수 있다. 또한 모드해석에서의 시험모듈의 1차, 2차 모드의 유사 주파수 영역에서 시험모듈의 전달률이 높음을 확인했다.

이후 진행한 램딘진동(비행진동) 시험 역시 방진구 특성이 Figs. 7~9 그래프를 통해서 확인이 가능하였다. 램딘진동에서 세 가지 방진구의 결과값을 보면 14번 방진구가 가장 전달률이 낮았고, 8번 방진구가 높은 값을 가지는 것을 확인하였다. 그리고 모드해석에서는 회피했다 판단했던 300 Hz영역에 특성이 있음을 확인했다. 램딘진동을 통해서 14번이 감소가 가장 많이 이뤄졌지만 나머지 2번과 8번의 방진구가 사용 불가능한 수준이 아니기에 충격시험을 추가 분석하였다. 충격시험은 MIL-STD-810G의 20 g, 11 msec의 규격으로 Fig. 10과 같다<sup>(3)</sup>. 충격시험의 계측 포인트는 진동시험과 동일하다. 시험은 3축에 대해서 플러스와 마이너스 방향으로 모두 진행하였다. 이때 플러스와 마이너스 방향에 큰 차이가 없었으며, 뒤틀림에 취약하다고 판단되는 Y축을 중심으로 데이터를 분석하였다. Figs. 11 ~ 13을 보면 한눈에도 충격에서

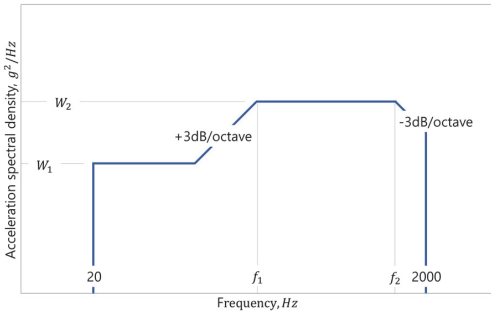


Fig. 4 Vibration testing input file; Mil-STD-810G profile

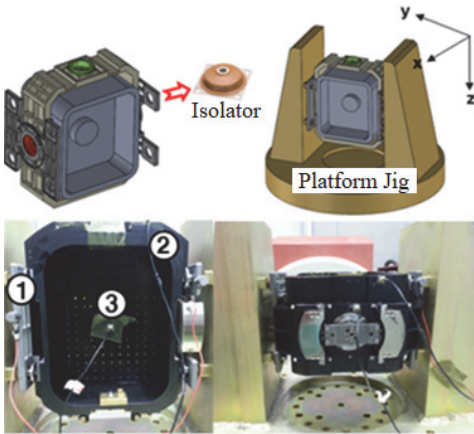


Fig. 5 Inner gimbal vibration test setting; ① isolator plate; ② inner gimbal; ③ dummy sensor

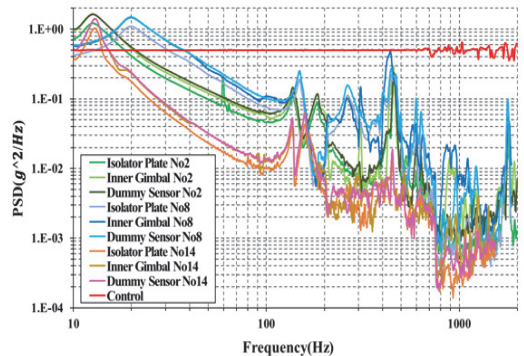


Fig. 6 Sine sweep data for Y axis

의 8번 방진구가 감쇠율이 크기에 짐벌에 8번 방진구를 최종 선정하였다<sup>(6)</sup>.

### 3. 취약부 구조보강 설계

램덤진동 시험에서 계측된 300 Hz영역의 주파수를 회피하기 위해서 구조보강 설계를 진행하였다. 시험

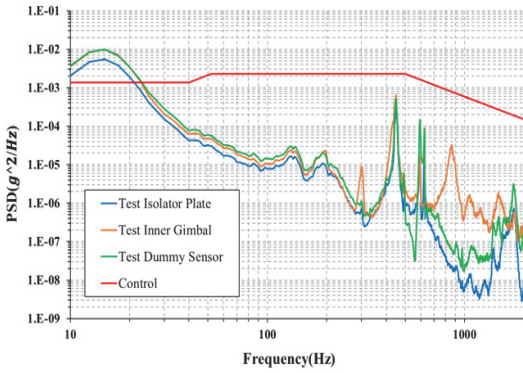


Fig. 7 Random vibration data for isolator no. 2(Y axis)

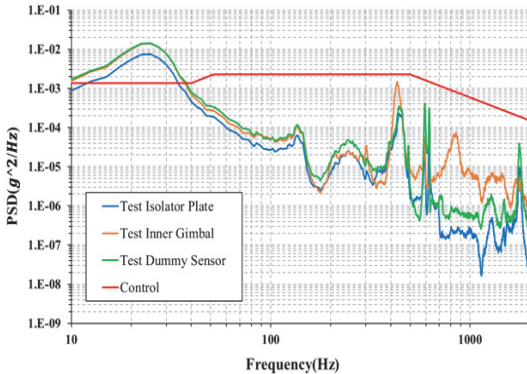


Fig. 8 Random vibration data for isolator no. 8(Y axis)

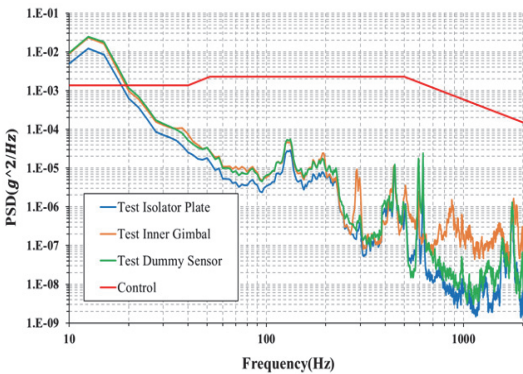


Fig. 9 Random vibration data for isolator no. 14(Y axis)

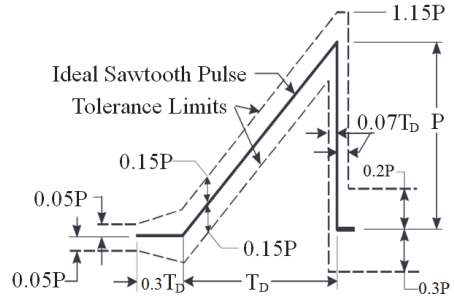


Fig. 10 Shock testing input file; Mil-STD-810G profile

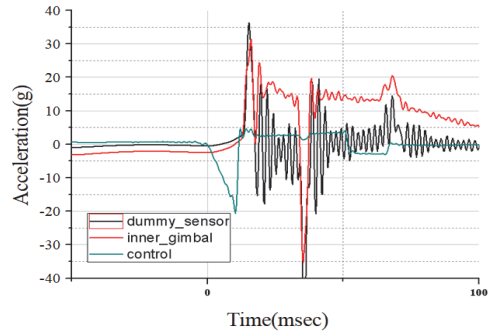


Fig. 11 Shock data for isolator no. 2(Y axis)

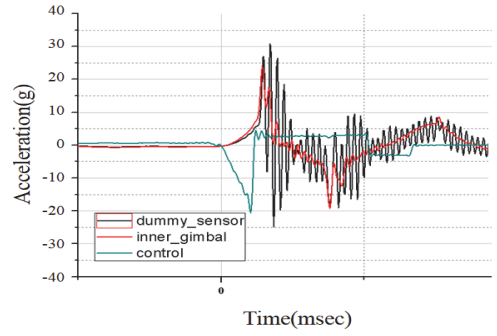


Fig. 12 Shock data for isolator no. 8(Y axis)

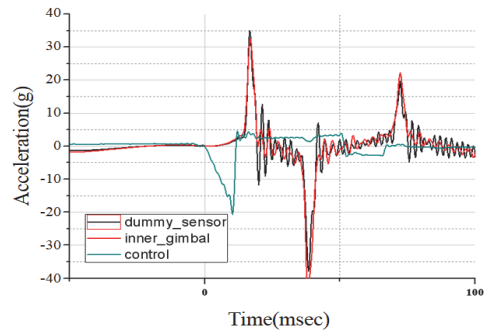


Fig. 13 Shock data for isolator no. 14(Y axis)

과 모드해석 결과의 차이가 발생한 것은 제작한 시험 모듈의 경우 베어링과 모터 등이 조립된 상태이며, 해석모델의 경우 베어링과 모터들이 조립되는 영역을 강제상태로 판단하여 완전 구속(fixed) 조건으로 해석하였다. 하지만 시험 시에 베어링과 모터가 조립되는 구동부 고정을 단순 블록으로 조립하여 고정하기 때문에 해석과 동일한 조건이라 판단되기 어렵다. 이 과정에서 차이가 발생한 것이라 판단하여 베어링의 강성 값을 반영하여 해석모델에 반영하였다. 구조보강은 진동이 가장 먼저 들어와서 내부짐벌로 전달되는 방진구 플레이트부를 구조 보강하여 카메라라미에서 계측되는 300 Hz영역을 보완하고자 한다. Fig. 14는 보강하기 전의 모습이며, Fig. 15와 같이 구조적으로 보강하였다. 해석에 사용한 절점의 수는 120 387개, 요소의 수는 62 145개이다. Mesh의 형상은 Fig. 16과 같다. 방진구가 조립되는 8포인트를 기준으로 스프링요소 COMBIN14를 이용하였고 진동은 8포인트를 통해서 전달되게 구성하였다<sup>(7)</sup>.

절점 보강 검증은 사인 0.5 g 진동해석을 통해서 강성이 얼마나 보강되었는지 비교 분석하였다. 단품으로 비교했을 때 모터 플레이트부는 기존대비 1.1배의 강성이 증가하였고, 리졸버 플레이트부는 기존대비 1.6배의 강성이 증가되었음을 해석을 통해서 확인하였으며, 결과값은 Table 3과 같다.

구조가 보강된 모듈을 검증을 위하여 진동시험 시 방진구 플레이트에서 계측된 데이터 Fig. 17을 활용하여 플랫폼 지그모델 없이 진동해석을 진행하였다. 경계조건은 사인해석과 동일하며, 8번 방진구에 대해서만 진행하였다. 기존과 동일하게 모터와 카메라 센서부는 포인트 질량으로 구성했다. 시험과 유사하게 구현하기 위해서 베어링의 강성 값을 적용하였다. 그리고 시험에서 계측한 방진구 데이터를 통해서 감쇠계수를 맞춰가며 해석을 진행하였다<sup>(8)</sup>.

결과 비교를 위해서 계측데이터와 해석데이터를 Fig. 18과 같이 도식하였다. 해석데이터는 점선으로 도식하였고, 시험데이터는 실선으로 도식하였다. 1차 방진구 주파수에서 시험데이터와 유사하게 반응하였다. 5차 영역까지는 비슷하게 유형을 그리는 것을 확인하였다. 또한 300 Hz영역에서 내부짐벌의 데이터가 완만한 모습을 보이는 것을 확인하였다. 최대변형과 변위는 Fig. 19와 Table 4와 같다. Y축에 의한 최대변형은 내부짐벌 부에서 발생했으며 값은 29.03 MPa이다. 최대변형은

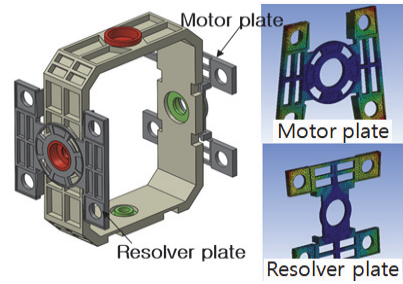


Fig. 14 Structural analysis of isolator plate structures before reinforcement

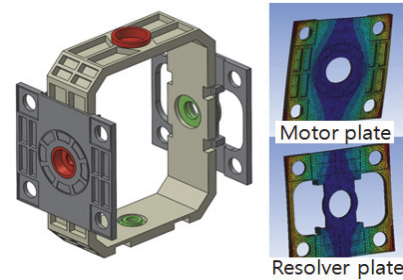


Fig. 15 Structural analysis of isolator plate structures after reinforcement

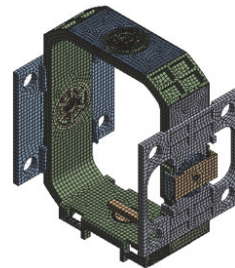


Fig. 16 Finite element model

Table 3 Structural analysis results for before and after isolator plate reinforcement

Sine sweep	Before		After	
	Motor plate	Resolver plate	Motor plate	Resolver plate
Deformation [mm]	8.56e-06	2.51e-05	1.20e-05	1.46e-05
Stress [MPa]	0.026	0.023	0.024	0.014
Frquency [Hz]	111.4	148.1	129.4	143.3

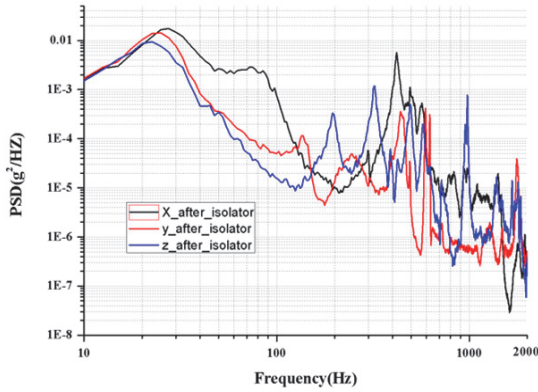


Fig. 17 Convert vibration data measured in the isolator of the test module to an analysis input profile

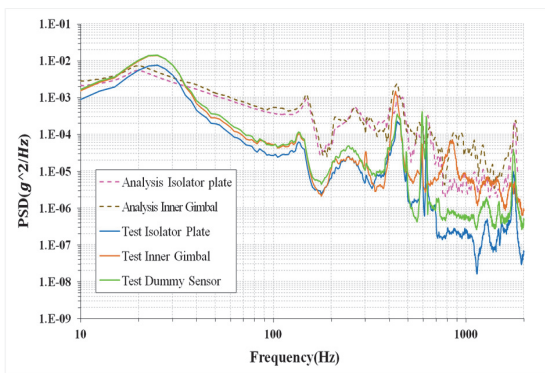


Fig. 18 Comparative analysis data of interpretation and test(isolator no.8, Y axis)

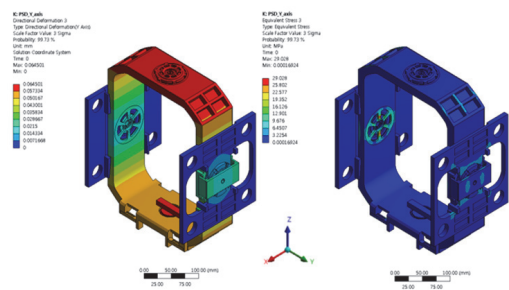


Fig. 19 Analysis result using convert random vibration data; max deformation, max stress

방진구 플레이트와 짐벌이 연결되는 베어링 조립체 부분으로 0.065 mm이다. 이는 알루미늄(6061-T6)으로 이뤄진 내부짐벌의 허용응력은 241 MPa로 운용에 큰

Table 4 Analysis result using convert random vibration data; max deformation, max stress

Axis	Deformation [mm]	Stress [MPa]
X	0.027	26.42
Y	0.065	29.03
Z	0.027	10.66

영향을 미치는 값은 아니기에 보강이 적절하게 이루어졌다 판단하였다.

#### 4. 결론

내부짐벌에 장착될 방진구를 선정하기 위해서 내부짐벌의 동특성을 분석하고, 방진구 제어주파수와 최대 변위에 맞게 시험에 적용할 방진구를 선정하였다. 내부짐벌 구조상 허용되는 최대 변형 범위는 8.0 mm로 최종 선정된 8번 방진구의 경우 21 Hz에서 5.1 mm의 변위를 갖는다. 진동충격 시험을 위해서 시험모듈을 제작하였으며, 플랫폼 진동과 유사하게 진동을 인가하기 위하여 플랫폼 지그를 제작하였다. 가속도 센서를 이용하여 세 가지의 방진구별로 진동, 충격 시험 시 내부짐벌에 전달되는 PSD값을 계측하였다. 계측을 통해서 진동보다 충격시험에서 방진구 8번이 약 2배 정도의 진동감쇠를 해주는 것을 확인하였다. 또한, 랜덤진동을 통해서 모드해석에서 식별하지 못한 시스템의 300 Hz영역 특성이 있는 것을 확인했다. 시스템 주파수 특성을 바꾸기 위해서 방진구 플레이트의 보강설계를 진행하였으며, 시험에서 계측데이터를 활용하여 방진구의 감쇠계수를 도출하였다. 해석과 시험간의 데이터 비교분석을 통해서 해석모델의 신뢰도를 확보하였으며, 이를 바탕으로 보강설계를 진행하였다. 보강이 이루어진 것을 해석 결과로 확인하였다.

이 연구를 통해서 기존 연구에서 데이터화 되어 있지 않던 비행조건에서의 방진구 거동에 대해서 결과값을 계측하여 데이터화 하였다. 이는 유사 환경인 다른 구조물의 방진구 특성을 반영할 때 효과적인 데이터를 제공할 것이라 생각한다. 추가적으로 이 연구의 높은 신뢰도 확보를 위해서는 구조가 보강된 상태에서의 진동, 충격시험을 추가 검증하는 시험을 진행하여야 한다. 보강된 구조에서의 시험모듈을 이용하여

최대 전달률과 회피주파수 탐색 등의 추가적인 보완 시험이 진행되어야하며, 향후 계획으로 연구를 계속 진행할 예정이다.

## References

(1) Lee, S. E., Lee, T. W. and Kang, Y. G., 2014, Shock Analysis of Gimbal Structure System Including Rubber Vibration Isolator in a Observation Reconnaissance Aircraft, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 73~80.

(2) Kwon, K. B., Jung, J. H. and Han, J. S., 2018, Abnormal Condition Analysis and Validation of RK4 Multi Axis Rotor Systems Using Finite Element Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 204~213.

(3) U.S. Department of Defense, Department of Defense Test Method Standard, Revision 2019, MIL-STD-810G.

(4) Inman, D. J., 2009, Engineering Vibration, 3rd Edition, Pearson, New Jersey.

(5) Aerospace & Defense Isolator Catalog : Vibration & Shock Theory, pp. 6~53.

(6) Song, A. Y., Kwon, B. O., Han, D. H., Jung, H.

S. and Jung, H. J., 2020, Analytically Confirm Displacement Interference in the Barrel of the Reconnaissance Equipment under Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 143~148.

(7) Lee, S. E. and Lee, T. W., 2016, Dynamic Analysis of Gimbal Structure System Including Nonlinear Elastic Rubber Vibration Isolator With Shock Acceleration, Transactions of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, A, Vol. 40, No. 4, pp. 415~422.

(8) Shin, D. J., Ahn, S. H., Lee, J. H., Ryu, G. H. and Kwon, M. S., 2019, Analysis of Transport Dynamic Property for Lowbed Trailer and Vibration Specification Establishment of Large Radar, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No 5, pp. 632~638.



**Ah-Young Song** is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. She received a Master's degree in Dept. of Mechanical Engineering from Sungkyunkwan University in 2013.

# Micro Hexapod Robot Using Dual-axis Electromagnetic Actuator 2축 전자기 구동기를 이용한 소형 6족 이동 로봇

Quang Hoan Le\*, WangHun Lee\*, YoungShik Kim\*, Bong-Jo Ryu\*, Hyun-ho Shim\*\*  
and Buhyun Shin†

레 광 환\* · 이 왕 훈\* · 김 영 식\* · 유 봉 조\* · 심 현 호\*\* · 신 부 현†

(Received August 6, 2021 ; Revised September 13, 2021 ; Accepted September 13, 2021)

**Key Words :** Hexapod Robot(6족 로봇), Electromagnetic Actuator(전자기구동기), Tripod Gait(3점 지지), Micro Robot(마이크로 로봇), Simscape(심스케이프)

## ABSTRACT

Microrobots utilized in industrial applications or medical tasks have been researched by applying various types of actuators. However, compared with live organisms, the majority of compact actuators are not able to sufficiently supply the power demanded for robotic implementations. This paper presents a novel design for a hexapod microrobot that uses electromagnetic oscillatory actuators. Each two-degree-of-freedom (2-DOF) leg moves by utilizing compact dual-axis electromagnetic actuators. First, the structure and kinematics of the hexapod microrobot are presented and theoretically analyzed. In our study, a tripod gait is utilized to enable the robot to walk on the desired terrain. All virtual models and physical prototypes are detailed to test the motion plan of the proposed system. Finally, simulation and experimental results are used to evaluate the performance and verify the ability of the novel design of our hexapod microrobot.

## 요 약

최근 소형 이동로봇에 대해 의료용 및 산업용으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 많은 연구자들이 다양한 구동기를 활용하여 소형 이동로봇을 개발하고 있다. 그러나 대부분의 소형 크기의 구동기들은 생체시스템에 비해 충분한 성능을 갖고 있지 않다. 이 연구에서는 전자기 진자형 구동기를 사용하여 소형 6족 이동로봇의 새로운 디자인을 제시한다. 6개의 다리 움직임은 소형 2축 전자기 구동기로 구성되어 움직인다. 먼저 소형 6족 로봇에 대한 구조와 기구학이 소개되고 이론적으로 분석된다. 이 연구에서는 3점 지지 걸음 방법이 적용되어 평면에서 걸기가 가능함을 보인다. 가상 모델 로봇과 실제 제작된 로봇이 자세히 설명되고 각 모션 플래닝을 수행하였다. 마지막으로 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 보이고 제안된 소형 6족로봇의 성능을 비교 검증하였다.

### 기 호 설 명

${}^G P$	: $j$ -th leg foot-tip position in the global reference system	${}^2_j P$	: $j$ -th foot-tip position in the foot coordinate system
		${}^G T_B$	: Transformation matrix between the body coordinate frame and the

† Corresponding Author; Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Professor  
E-mail: jedidiah@hanbat.ac.kr

\* Mechanical of Engineering, Hanbat National University, Student

\*\* NeolCP, Researcher

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

‡ Recommended by Editor Jae Young Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

- global coordinate frame
- ${}^B_j T_0$  : Transformation matrix between the  $j$ -th leg coordinate frame and body coordinate frame
- ${}^0_j T_1, {}^1_j T_2$  : Transformation matrix between the neighboring coordinates frames of the  $j$ -th leg
- $C\theta_{i_j}, S\theta_{i_j}$  : Denote  $\cos\theta_{i_j}$  and  $\sin\theta_{i_j}$ ,  $\alpha_{i_j}, a_{i_j}, d_{i_j}$  and  $\theta_{i_j}$ : the Denavit-Hartenberg parameters

### 1. Introduction

Recently, the studies on diminished robots or micro robots in the field of inspection, rescue, industrial or medical applications have been augmented significantly. Common moving systems such as wheeled driving and crawler are not suitable for these kinds of robot. Contact force alteration, disproportionate actuation and maneuvering friction called “stick-slip”, “impact drive” and “inchworm like motion”<sup>(1)</sup> are proposed as novel moving mechanical systems recently.

Moreover, lead zirconate titanate (PZT)<sup>(2)</sup> shape memory alloy (SMA)<sup>(3)</sup>, electroactive polymers etc. considered as moving mechanism are also implemented to develop on novel actuators of micro robots.

Nevertheless, they are inefficient to accommodate enough demanded power for robot tasks due to the compact size which the acting force reduces intensely as following size diminution<sup>(4)</sup>. Consequently, comparing with live organisms, the majority of compact actuators are insufficient to supply enough demanded power for robotic implementations.

On the contrary, electromagnetic actuators have a lot of advantages such as rapid response, low driving voltage, large displacements, low internal damping, sufficient power, uncomplicated control law and low price<sup>(5,6)</sup>. Electromagnetic actuators are widely used for insect-inspired flapping-wing Robot<sup>(7)</sup>, micro crawling robot<sup>(8-10)</sup>, 4-DOFs modular serial manipulator<sup>(11)</sup>. Nonetheless, hexapod robots utilized electromagnetic actuators are seldom studied. Hence, in this paper we

propose a novel design of micro hexapod robot using dual-axis electromagnetic actuator (DEA) with a simple structure. At first, the concept of a DEA is theoretically analyzed in chapter 2. Then, we propose physical prototype and forward kinematic of the hexapod robot applied DEA to conduct the tripod gait in the chapter 3. In final chapter, the virtual model of the hexapod robot is given and evaluate the dynamic performance of the system via simulation and experimental results.

## 2. Micro Hexapod Robot Using Dual-axis Electromagnetic Actuator

### 2.1 Design and Working Principle of Dual-axis Electromagnetic Actuator

The design of dual-axis electromagnetic actuators (DEA) are relied on the structure of electromagnetic oscillatory actuators (EOA) which vacillate between desired bound. Following the Fig. 1, a DEA comprises double perpendicular frames (one fixed frame and one rotated frame) which are aligned together via another free-moving frame<sup>(5)</sup>. This free-moving frame is appended on two axes so that it is able to revolve around these axes. Besides, each coil which are mounted to fixed frame or rotated frame has 820 turns with a resistance of 58 Ω. The max power to supply the coil can reach 6 V maximum. These dual energized coils will move a permanent magnet which is inserted inside the free-moving frame. Moreover, each side of the DEA comprises a built-in perma-

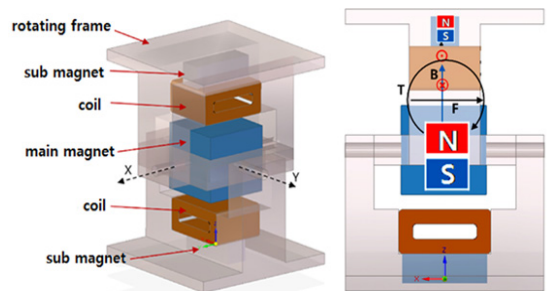


Fig. 1 Structure of dual-axis electromagnetic actuator



nent magnet that place in contrary direction to the magnet of free-moving frame to converge and retain the magnetic field in the linear tendency as shown in Fig. 1. The Neodymium (ND35) is utilized for all permanent magnets due to the most powerful commercialized product. In addition, all frames are designed and conducted with ABS material to reduce the heat tolerances during printing process. The working principle of the proposed DEA is based on engendering Lorentz force among the permanent magnets and energized coils. This force is altered the direction by varying the current direction flown inside the coils and defined following left-hand rule. Consequently, free-moving frame is able to revolve around x-axis when supplying the current to the upper coil. In the same way, the energized coil of the rotated frame creates a torque in order to rotate its frame around the y-axis.

### 2.2 Micro Hexapod Robot Using Dual-axis Electromagnetic Actuator

In this study, we design the hexapod with 2-DOF leg is based on the structure of the DEA. The robot consisted of six DEA modules aligned to the main body of the robot that illustrated in the Fig. 2.

Each three parallel actuated modules are arranged symmetrically at both side of the body. The robot has 22 mm height, 52 mm width, 71 mm length and 22 g weight. The gaps between two narrow legs are 63 mm and 111 mm of each side

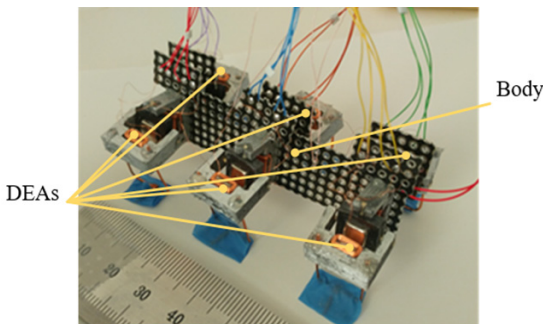


Fig. 2 The overview of the hexapod robot using six DEAs

and two symmetric sides, respectively. At the end of each rotated frame, a double rods are mounted to the end of rotated frame to lift the body from the ground. A rubber pad is fixed at the bottom of the double rods to maintain the stability and friction force between the leg and ground.

## 3. Kinematic and Gait Design of Micro Hexapod Robot

### 3.1 Kinematic

The forward kinematic model of the hexapod robot is determined using Denavit-Hartenberg (DH) rule. Four reference systems maintain path from the body frame to the foot, with last three of them relative the leg, as shown in Fig. 3.

We call  ${}^G_jP$  is the  $j$ -th leg foot-tip position in the global reference system and  ${}^j_jP$  is the  $j$ -th foot-tip position in the foot coordinate system (second following reference system). The relation between the foot coordinate frame and the body frame can be obtained as follows:

$${}^G_jP = {}^G T_{B_j} {}^B T_{0_j} {}^0 T_{1_j} {}^1 T_{2_j} {}^2_j P \tag{1}$$

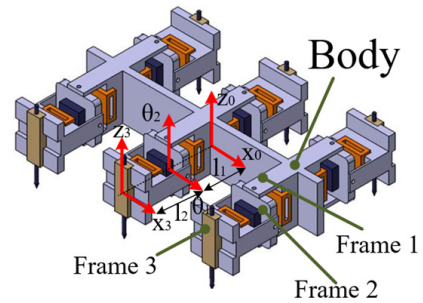


Fig. 3 Coordinate reference system of the body and legs of the hexapod robot

Table 1 Denavit-hartenbeg parameters table of the  $j$ -th leg

$i$	$d$	$a$	$\alpha$	$\theta$
1	0	$l_1$	0	$\theta_1$
2	0	0	$-\pi/2$	$\theta_2$
3	0	$l_2$	$\pi/2$	0

Where,  ${}^G T_B$  refers to the transformation matrix between the body coordinate frame and the global coordinate frame,  ${}^B_j T_0$  refers to the transformation matrix between the  $j$ -th leg coordinate frame and body coordinate frame,  ${}^0_j T_1$  and  ${}^1_j T_2$  are the transformation matrix between the neighboring coordinates frames of the  $j$ -th leg and are given as:

$${}^{i-1} T_i = \begin{bmatrix} C\theta_{i_j} & -S\theta_{i_j} C\alpha_{i_j} & S\theta_{i_j} S\alpha_{i_j} a_{i_j} & C\theta_{i_j} d_{i_j} \\ S\theta_{i_j} & C\theta_{i_j} C\alpha_{i_j} & -C\theta_{i_j} S\alpha_{i_j} a_{i_j} & S\theta_{i_j} d_{i_j} \\ 0 & S\alpha_{i_j} & C\alpha_{i_j} & d_{i_j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Where,  $C\theta_{i_j}$  and  $S\theta_{i_j}$  denote  $\cos\theta_{i_j}$  and  $\sin\theta_{i_j}$ , respectively;  $\alpha_{i_j}$ ,  $a_{i_j}$ ,  $d_{i_j}$  and  $\theta_{i_j}$  are the Denavit-hartenberg parameters with the specific values provided in the Table 1.

### 3.2 Gait Design

Following the path planning shown in Fig. 4, the motion of the robot is operated by six legs which conduct in a sequence to lift and move the body forward that called supporting stage and transferring

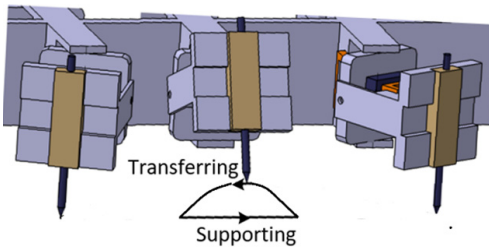


Fig. 4 Path planning of transferring stage and supporting stage

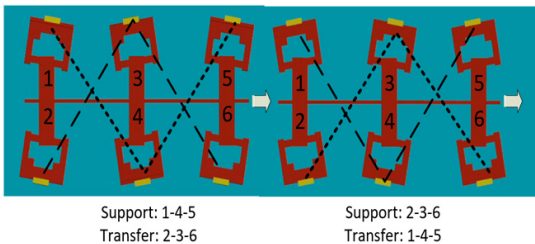


Fig. 5 Two stages of the tripod gait for the proposed hexapod robot

stage, respectively.

In our study, the tripod gait is implemented to the robot so leg groups are defined like as 1-4-5 and 2-3-6. Firstly, group 1-4-5 supports to hold and move body forward while group 2-3-6 steps up to transfer the next transition phase. Then, the subsequent phase is conducted by converting the stage of each group from the preceding phase. The motion of both phases are presented in Fig. 5. Finally, the robot maintains reverting stages of each group in a sequence to move the robot forward continuously.

## 4. Gait Simulation and Experiment of Micro Hexapod Robot

### 4.1 Simulation of Micro Hexapod Robot

In this study, the tripod gait of micro hexapod robot is simulated to verify the walking ability of

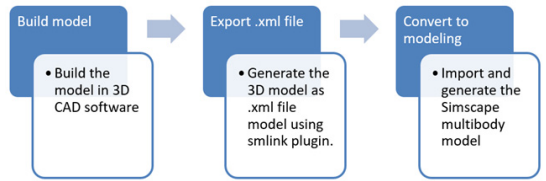


Fig. 6 Flowchart of the process for converting a 3D CAD model to Simscape Multibody model

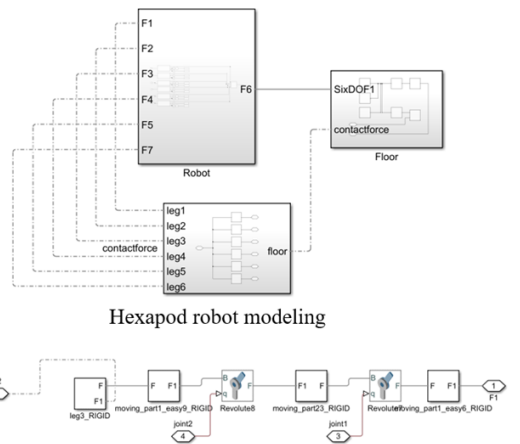


Fig. 7 Modeling of the micro hexapod robot using Simscape Multibody physics engine

the proposed prototype. Firstly, a 3D CAD model of the robot is designed with actual parameters by utilizing CAD software. Then, the model is converted to xml-type model for importing to the

Simscape Multibody physics engine from Matlab/Simulink. In detail, the process for converting a 3D CAD model to Simscape Multibody model is described in Fig. 6.

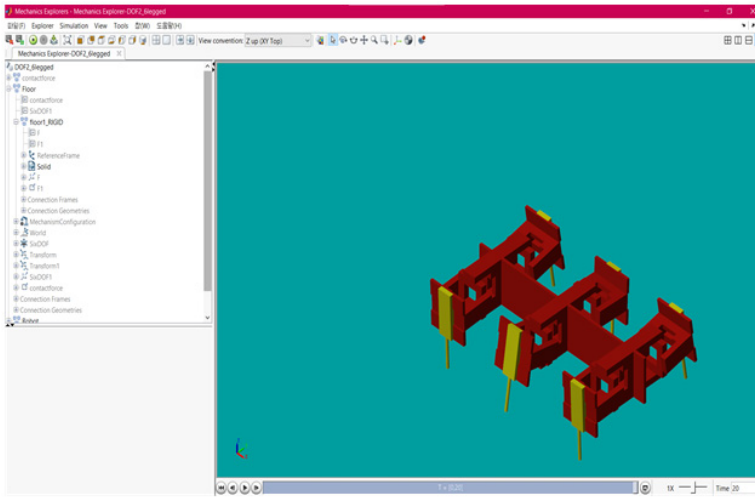


Fig. 8 3D mechanics explorer of the Simscape Multibody simulation

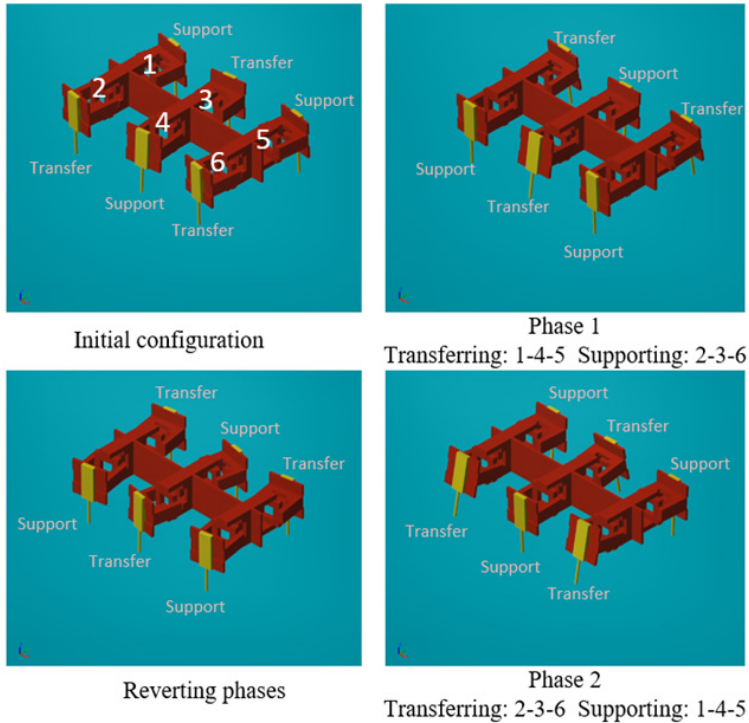


Fig. 9 Simulation result of the tripod gait

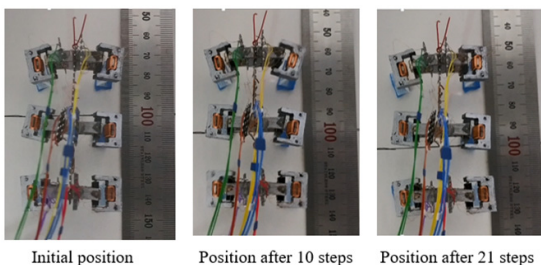
The result of the modeling for MHR consisted of three subsystems is described in Fig. 7. The Robot subsystem is the modeling of the MHR includes of the masses, inertial moments, physical dimension of body and legs. We also design the Floor subsystem and Contact-force subsystem to model the interaction among the legs and ground. Besides, a 3D mechanics explorer shown in Fig. 8 is enable to observe the motion of the robot intuitively.

#### 4.2 Simulation Result

The gait simulation is implemented in this study to verify the motion planning of two stages: transferring and supporting for all legs the MHR presented in the previous chapter. The result of the tripod gait implemented by reverting the stages of each phase is shown in Fig. 9 It indicates that the MHR successfully generates the straight walking when applying the desired paths.

#### 4.3 Experimental Result

In this paper, we also implement the tripod gait test for the physical prototype of the MHR. Following the experimental result presented in Fig. 10, the MHR completed 21 steps for 20 seconds with 15 mm displacement. Thus, the robot reaches 0.75 mm/s in speed and the conduct a distance of 0.71 mm each step. The results validate the performance of the proposed MHR using DEAs when conducting the tripod gait on the flat ground.



**Fig. 10** Experimental result of the tripod gait when micro hexapod robot after conducts 21 steps

## 5. Conclusion

This study proposed a novel design of a micro hexapod robot using dual-axis electromagnetic actuators. Both virtual prototype and physical prototype are presented to implement the tripod gait for verify the performance of the robot in simulation and experiment. The results indicates the robot is able to reach 0.75 mm/s in speed and the conduct a distance of 0.71 mm each step.

## Acknowledgement

This research was supported by the research fund of Hanbat National University in 2020.

## References

- (1) Shin, B. H. and Lee, S., 2012, Micro Mobile Robots Using Electromagnetic Oscillatory Actuator, 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), pp. 575~580, Doi: 10.1109/BioRob.2012.6290681.
- (2) Hoffman, K. L. and Wood, R. J., 2011, Myriapod-like Ambulation of a Segmented Microrobot, *Auton Robot*, Vol. 31, p. 103, Doi: 10.1007/s10514-011-9233-4.
- (3) Mansour, N. A., Jang, T., Baek, H., Shin, B., Ryu, B. and Kim, Y., 2020, Compliant Closed-chain Rolling Robot Using Modular Unidirectional SMA Actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 310, Doi: 10.1016/j.sna.2020.112024.
- (4) Shim, H., 2018, Design of 6-legged Mobile Robot using 2-DOF Electro-magnetic Actuator, Master's Thesis, Hanbat National University, Daejeon.
- (5) Kim, Y. S., Shim, H. H., Lee, K. M. and Shin, B. H., 2017, Development of Miniaturized 2-DOF Electromagnetic Actuator Module, *Journal of the Control Robot System Society*, Vol. 23, No. 7, pp. 546~551, Doi: 10.5302/J.ICROS.2017.17.0008.
- (6) Kim, K. H., Oh, D. H., Shin, B. H. and Lee, S. Y., 2009, A HDD Latch Design Using Electro-magnetic

Force of VCM Actuators, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 788~794.

(7) Zou, Y., Zhang, W. and Zhang, Z., 2016, Lifftoff of an Electromagnetically Driven Insect-inspired Flapping-wing Robot, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 32, No. 5, pp. 1285~1289, Doi: 10.1109/TRO.2016.2593449.

(8) Lee, Km., Kim, Y., Paik, J. K. et al., 2015, Clawed Miniature Inchworm Robot Driven by Electromagnetic Oscillatory Actuator, Journal of Bionic Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 519~526, Doi: 10.1016/S1672-6529(14)60142-6.

(9) Shin, B., Kim, Y., Paik, J. et al., 2018, Miniaturized Twin-legged Robot with an Electromagnetic Oscillatory Actuator, Journal of Bionic Engineering, Vol. 15, pp. 106~113, Doi:10.1007/s42235-017-0008-2.

(10) Liu, X., Liu, Z., Qi, M. et al., 2019, A Fast-moving Micro Crawling Robot with Direct Electromagnetic Driving Mechanism, IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 6~9, Doi: 10.1109/MEMSYS.2019.8870694.

(11) Mansour, N. A., Shin, B., Ryu, B. and Kim, Y., 2021, Development of a Novel Miniaturized Electromagnetic Actuator for a Modular Serial Manipulator, Actuators, Vol. 10, No. 14, Doi: 10.3390/act10010014.



**Quang Hoan Le** received a B.S. in Mechatronics Engineering from Hochiminh University of Technology in 2010. He received a Ph.D. in school of Mechanical Engineering from University of Ulsan in 2015. He was a lecturer at Hochiminh University of Technology from 2018 to 2020. Currently, he is working at Hanbat National University as a Postdoctoral researcher of mechanical engineering. His research interests are in the area of field robot, legged robot, motion control and electromagnetic actuator.



**WangHun Lee** received a B.S. in Mechanical Engineering from Hanbat National University in 2019. Since 2016, he has been working at Applied robotics and mechanics Lab of Hanbat National University, where he is currently studying M.S.

of mechanical engineering. His research interests are in the area of bio-inspired robot, legged robot.



**YoungShik Kim** received a M.S. and Ph.D. in Mechanical Engineering from University of Utah in 2003 and 2008. Since 2011, he has been working at Hanbat National University, where he is currently a Professor of mechanical engineering.

His research interests are in the area of smart actuator, motion control, bio-inspired robot, sensor fusion



**Bong-Jo Ryu** received a M.S. and Ph.D. in Mechanical Engineering from Yensei University in 1983 and 1988. Since 1989, he has been working at Hanbat National University, where he is currently a Professor of mechanical engineering.

His research interests are in the area of structure vibration, control, bar elastic safety.



**Buhyun Shin** received a B.S. and Ph.D. in school of Mechanical and aerospace Engineering from Seoul National University in 2001 and 2007. Since 2012, he has been working at Hanbat National University, where he is currently a

Professor of mechanical engineering. His research interests are in the area of electromagnetic actuator, smart actuator, bio-inspired robot.

# 데이터 기반 모델축소법을 이용한 효율적인 비선형 구조해석 개발

## Development of an Efficient Nonlinear Structural Analysis Using Data-driven Model Order Reduction

김혜진\* · 조해성† · 이시훈\*\* · 신상준\*\*\* · 김해동\*\*\*\*

Hyejin Kim\*, Haeseong Cho†, Sihun Lee\*\*, SangJoon Shin\*\*\* and Haedeong Kim\*\*\*\*

(Received August 6, 2021 ; Revised September 23, 2021 ; Accepted September 23, 2021)

**Key Words :** Model Order Reduction(모델축소법), Artificial Neural Network(인공신경망), Autoencoder(오토인코더), Variational Autoencoder(변이형 오토인코더)

### ABSTRACT

In this paper, a data-driven model order reduction framework is proposed for efficient nonlinear structural analysis. The data-driven model order reduction framework consists of two stages: data mining/analysis with reduced-order modeling (offline) and parametric simulation (online). Herein, the reduced-order modeling is performed using proper orthogonal decomposition and an autoencoder in the offline stage. Furthermore, a variational autoencoder is considered as an artificial neural network-based model order reduction to improve the efficiency within the offline stage. The proposed approaches are compared to the full-order model by analyzing nonlinear numerical examples to demonstrate their efficiency and accuracy.

### 1. 서 론

다양한 공학 분야에서 대규모 자유도를 갖는 문제를 효과적으로 해결하기 위해, 차원 축소를 통한 축소 모델을 구성하는 노력이 이루어져 왔다. 이러한 차원 축소 방식은 해석의 정확도를 유지하면서 반복 계산이 요구되는 대용량 문제에 대한 효율적인 접근 방법으로 대두되고 있다. 대표적인 모델축소법인 축소 기저법(reduced basis method)으로 주성분 분석(principal component analysis, PCA)<sup>(1)</sup>과 적합 직교 분해(proper orthogonal decomposition, POD)<sup>(2)</sup> 등이

적용되어왔다. 나아가, 비선형 문제에 대한 효율적인 축소모델을 구성하기 위해, hyper-reduction 기법으로 경험적 보간법(empirical interpolation method, EIM)<sup>(3)</sup> 및 이산 경험적 보간법(discrete empirical interpolation method, DEIM)<sup>(4)</sup> 그리고 ECSW(energy-conserving sampling and weighting, ECSW)<sup>(5)</sup>와 같은 접근법이 제안되었다. 최근에는 시스템 응답 도출에 대한 효율성만 고려된 기존의 축소 기법에 대하여, 비선형 시스템 행렬 구축의 효율성을 높이기 위해 등가 강성 행렬 기법(stiffness evaluation procedure, STEP)<sup>(6)</sup>이 적용된 모델축소법<sup>(7)</sup>이 제안되었다.

최근 인공지능 기술의 급격한 발전과 함께 다양한

† Corresponding Author ; Member, Jeonbuk National University, Assistant Professor  
E-mail : hcho@jbnu.ac.kr

\* Jeonbuk National University, Graduate Student

\*\* Seoul National University, Graduate Student

\*\*\* Seoul National University, Professor

\*\*\*\* Sejong University, Associate Professor

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

‡ Recommended by Editor Sang Wook Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

공학 분야에 관련 응용 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 복잡한 해석 모델에 대해 데이터 기반의 예측 모델<sup>(8,9)</sup>을 구축하여 효율성을 극대화하는 등의 시도가 이루어지고 있다. 특히, 반복 계산이 요구되는 최적설계 또는 비선형 해석에 효과적으로 적용할 수 있는 딥러닝/머신러닝 기반의 모델축소법은 대용량 해석에 따른 계산 비용의 한계점을 개선할 수 있는 다양한 방법론<sup>(10-13)</sup>으로써 제시되고 있다.

나아가, 딥러닝 기술의 인공신경망(artificial neural network, ANN) 기반 모델축소법이 적용된 연구로, 차원 축소 네트워크인 오토인코더(autoencoder, AE)와 ANN의 네트워크 구조 중 하나인 다층퍼셉트론(multi-layer perceptron, MLP)을 적용하여 유동해석에 대한 축소 모델<sup>(14)</sup>을 개발하였으며, 적합 직교 분해와 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN)을 적용하여 비정상 유동 예측을 위한 축소 모델<sup>(15)</sup>이 개발되었다.

이 논문에서는 대표적인 모델축소법인 적합 직교 분해와 ANN 기반의 차원 축소 네트워크인 AE를 연계한 POD-AE 기반 모델축소법을 제시한다. 나아가, 축소 모델링 관점에서 보다 효율적이고 혼란 안정성이 높은 모델을 정의하기 위해 변이형 오토인코더(variational autoencoder, VAE)를 고려하였으며, 이를 기존의 AE와 비교 분석하였다.

## 2. POD-AE 기반 모델 축소법

### 2.1 적합 직교 분해

적합 직교 분해는 완전 차수 모델을 통해 얻은 시간 응답에 대하여 축소 기저(reduced basis)를 구축하고 저차원에서의 투영(projection)을 통해 축소 차수 모델을 구성하는 투영기반 모델축소법이다<sup>(2)</sup>. 이러한 축소 기저(혹은 적합 직교 모드)는 특이값 분해(singular value decomposition, SVD)를 통해 얻을 수 있다. 먼저, 완전 차수 모델 해석을 통해 얻은 전체 자유도  $N_h$ 에 따른  $s$ 개의 시간 응답으로 이루어진 스냅샷(snapshot) 행렬  $S$ 를 구성한다.

$$S = \Phi \Sigma V^T \tag{1}$$

다음으로, 식 (1)과 같이 특이값 분해를 통해 적합 직교 모드 행렬  $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{N_h}]$ 을 도출한다. 여기서, 각 모드(mode)의 에너지를 의미하는 대각

특이값 행렬  $\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_s\}$ 의 에너지 비율<sup>(16)</sup>에 대한 비교를 통해 전체 모델을 대표할 수 있는 주요 모드의 개수  $r$ 을 선정하여 축소 변환 행렬  $\Phi_r$ 을 정의할 수 있다.

$$u_h(\eta) \approx \sum_{i=1}^r \alpha_i \phi_i = \Phi_r \alpha(\eta) \quad (r \ll N_h) \tag{2}$$

$$\Leftrightarrow \alpha(\eta) = \Phi_r^T u_h(\eta)$$

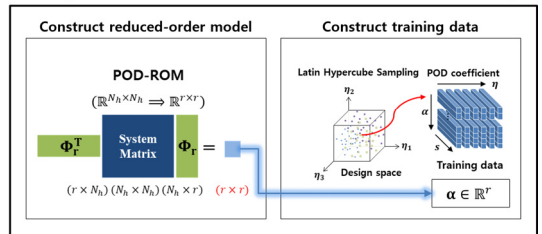
이를 통해 식 (2)와 같이 시간에 따른 변위 응답  $u_h(\eta)$ 을 적합 직교 모드  $\phi_i$ 와 적합 직교 계수  $\alpha_i$ 의 선형 조합을 통해 근사할 수 있다.

이때, 비선형성 및 완전 차수 모델의 자유도에 따라 더 많은 적합 직교 모드가 필요할 수 있으며, 이는 차원 축소 관점에서 제한적일 수 있다. 이에 따라, 충분한 적합 직교 모드를 이용하여 도출한  $\alpha(\eta)$ 를 AE에 적용하여 보다 향상된 차원 축소 효과를 확보할 수 있다.

### 2.2 POD-AE 기반 모델 축소법

POD-AE 기반 모델축소법은 효율적인 데이터 확보 및 축소 차수 모델 구성을 위한 offline 단계와 매개 변수 해석이 수행되는 online 단계로 구성된다. 이때, offline 단계는 Fig. 1과 같이 두 가지 단계의 축소 차수 모델링을 통해 수행된다.

#### 1. Step-I Reduction: POD-based reduced order modeling



#### 2. Step-II Reduction: ANN-based reduced order modeling

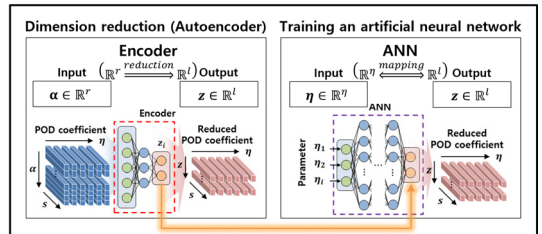


Fig. 1 POD-AE based model order reduction with the unsupervised-supervised learning

먼저, 적합 직교 분해를 통해 축소 차수 모델을 구성하고, 이를 통해 훈련 데이터인 설계변수 변화에 따른 적합 직교 계수  $\alpha(\eta)$ 를 효율적으로 확보한다. 다음으로, ANN의 대표적인 차원 축소 네트워크인 AE를 통해 한 단계 더 차원 축소를 수행하여 축소된 적합 직교 계수  $z(\eta)$ 를 얻는다. 마지막으로, 입력과 출력에 대한 복잡한 관계를 학습할 수 있는 ANN의 장점을 활용하여, 설계변수가 포함된 매개변수  $\eta$  입력에 대한 축소된 적합 직교 계수  $z(\eta)$ 를 출력하도록 훈련한다.

POD-AE 기반 모델축소법의 online단계는 Fig. 2에 나타내었으며, 앞서 학습된 ANN과 AE의 디코더와의 네트워크 연계를 통해 정립된다. 결과적으로, 매개변수 입력에 대하여 적합 직교 계수  $\alpha(\eta)$ 를 예측하며, 전체 자유도에 대한 변위 응답으로 복원하는 과정  $\hat{u}_h(\eta) \approx \Phi_r \alpha(\eta)$ 을 거친다. 따라서 비선형 구조해석을 위한 복잡한 지배방정식 없이 매개변수 입력에 대하여 변위 응답으로의 예측이 가능하다.

2.3 AE 기반 모델 축소

이 절에서는 전술한 POD-AE 기반 모델축소법에서 적용한 AE를 소개한다. ANN 기반의 대표적인 차원

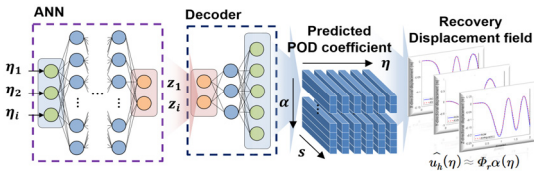


Fig. 2 POD-AE based model order reduction method combined ANN and decoder

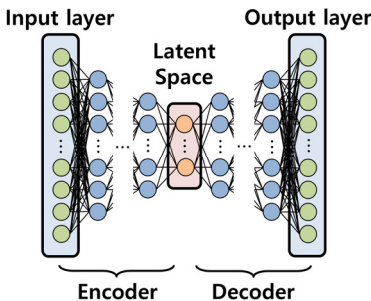


Fig. 3 Architecture of AE

축소 네트워크인 AE는 라벨이 되어있지 않은 훈련 데이터를 사용하여 지도 없이 학습하는 비지도 학습 방법 (unsupervised learning)으로 주어진 입력보다 낮은 차원을 갖는 잠재 공간(latent space)에서의 데이터의 밀집된 표현을 학습할 수 있는 ANN의 네트워크 구조 중 하나이다(17).

Fig. 3은 AE의 기본 구조를 나타내며, 식 (3)과 같이 입력을 잠재 공간에서의 내부 표현(latent representation, code)으로 바꾸는 인코더(encoder)와, 식 (4)와 같이 내부 표현을 다시 입력과 동일한 출력으로 재구성하는 디코더(decoder)로 구성된다. 이러한 AE의 인코더-디코더 구조는 입력을 내부 표현으로 압축하고 다시 출력으로 재구성한다. 이를 통해, 인코더는 고차원의 입력 데이터를 저차원의 내부 표현인 잠재 공간으로 압축하여 입력 데이터에 대한 특징과 패턴을 찾을 수 있다. 또한, 식 (5)와 같이 입력과 출력에 대한 평균 제곱 오차(mean squared error, MSE)를 손실 함수(loss function)로 적용하고, 이를 최소화함으로써 학습이 수행된다.

$$z = f_\phi(x) \tag{3}$$

$$\hat{x} = g_\theta(z) \tag{4}$$

$$L_{AE}(\phi, \theta; x^{(i)}) = MSE(x^{(i)}, \hat{x}^{(i)}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x^{(i)} - g_\theta(f_\phi(x^{(i)}))) \tag{5}$$

따라서 POD-AE 기반 모델축소법을 고려할 경우, 적합 직교 계수  $\alpha(\eta)$ 를 AE의 입력 데이터로 적용하여, Fig. 4와 같이 잠재 공간으로 축소된 적합 직교 계수  $z(\eta)$ 를 얻을 수 있으며, 이는 ANN의 출력에 해당하는 훈련데이터로 사용된다.

그러나 AE는 훈련 과정에서 난수 발생기에 의존함에 따라 형성된 잠재 공간의 분포가 매번 달라진다.

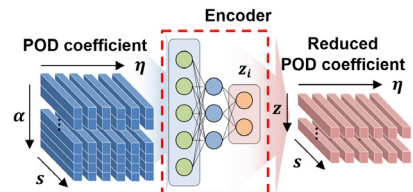


Fig. 4 Reduced POD coefficient with encoder of AE



이는 2.2절에서 제시한 과정 중, 잠재 공간에서의 내부 표현을 이용한 기존 해의 추정 단계에서 어려움이 따를 수 있다. 따라서 이 연구에서는 확률론적인 접근 방법이 적용되어 잠재 공간 형성에 대한 규제가 존재하는 VAE를 고려하고자 한다.

### 3. VAE 기반 모델 축소법

AE에서의 변형된 구조를 갖는 차원 축소 네트워크인 VAE를 통해 축소 차수 모델을 구성한다. VAE는 비지도 학습 기반의 생성 모델(generative model)의 유형 중 하나로써 확률기반의 변분 추론(variational inference)을 통해 데이터의 분포를 추론하는 네트워크이다<sup>(18)</sup>.

Fig. 5는 VAE의 기본 구조를 나타내며, AE의 구조에서 샘플링(sampling)이 추가적으로 존재하는 특징을 가지고 있다. VAE에서도 기존의 AE에서와 마찬가지로, 훈련 과정에서 입력에 대하여 잠재 공간으로의 압축과 이에 대한 재구성 과정을 통해 입력 데이터에 대한 특징과 패턴을 추출하며, 동시에 잠재 공간으로의 압축(또는 차원 축소) 과정을 통해 차원 축소 네트워크로써 사용될 수 있다.

VAE에서의 각 구성 요소는 확률론적인 접근 방법이 적용된다. 먼저, 인코더는 입력 데이터  $x$ 가 주어졌을 때, 내부 표현  $z$ 의 확률 분포를 추론하는데, 이는 사후 분포(posterior distribution)  $p_\theta(z|x)$ 를 의미하며, 이는 수학적 엄밀해를 도출하는데 어려움이 존재한다. 따라서 변분 추론 기법을 적용하여 식 (6)과 같이 인코더에서 정규 분포의 모수인 평균  $\mu$ 과 분산  $\sigma$ 을 변수로 갖는  $q_\phi(z|x)$ 를 도입하고 사후 분포  $p_\theta(z|x)$ 를 근사한다. 다음으로 평균과 표준편차에 관한 정규분포를 따르는 내부 표현  $z$ 에 대하여 샘플링

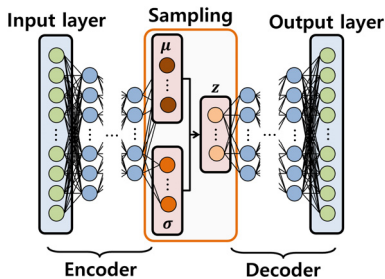


Fig. 5 Architecture of VAE

을 수행하고, 식 (7)과 같이 디코더에서 내부 표현 입력에 대한 재구성인  $\hat{x}$ 를 출력한다. 이때, 인코더에서 얻은 평균  $\mu$ , 표준편차  $\sigma$  및 가우스 정규 분포  $\epsilon$ 를 통해,  $z = \mu + \sigma \odot \epsilon$ 와 같은 재매개변수화 기법(reparameterization trick)이 적용된다. 이를 통해 미분이 가능해짐에 따라 훈련 과정에서의 역전파(backpropagation)<sup>(19)</sup> 알고리즘 적용이 가능해진다.

$$z = q_\phi(z|x) \tag{6}$$

$$\hat{x} = p_\theta(x|z) \tag{7}$$

$$L_{VAE}(\phi, \theta; x^{(i)}) = MSE(x^{(i)}, \hat{x}^{(i)}) + D_{KL}(q_\phi(z|x^{(i)}) \parallel p_\theta(z)) \tag{8}$$

또한, VAE는 식 (8)과 같은 손실함수를 적용하고, 이를 최소화함으로써 훈련된다. 식 (8)에서 우변의 첫 번째 항은 입력과 출력에 대한 평균 제곱 오차이며, 두 번째 항은 인코더의 실제 사후 분포와 근사한 분포와의 유사한 정도를 나타내는 척도인 쿨백-라이블러 발산(Kullback-Leibler divergence, KLD)이다. 자세한 정식화 과정은 참고문헌 19번에 제시되어 있다.

식 (8)과 같은 잠재 공간 형성에 대한 규제가 포함된 VAE를 적용하면 훈련데이터에 대한 분포를 고려한 잠재 공간을 얻을 수 있으며, 이를 통해, 앞서 설명한 AE의 난수 발생기 의존성에 대한 한계점을 개선할 수 있다. 이 연구에서는 VAE 기반 모델 축소법의 적용 가능성을 분석하기 위해 완전 차수 모델의

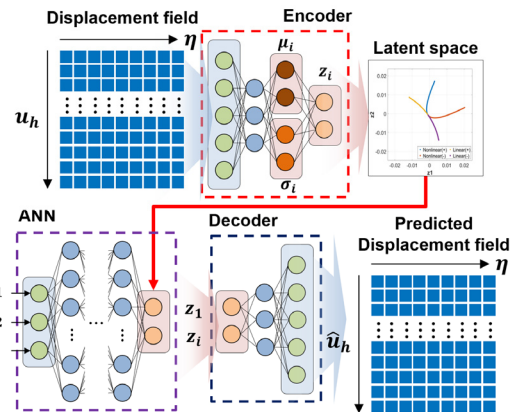


Fig. 6 VAE based model order reduction method combined ANN and decoder

변위 응답을 직접 이용하였으며, 이를 AE가 적용된 모델 축소법과 비교하고자 한다.

VAE 기반 모델 축소법은 ANN과 연계하여 Fig. 6과 같이 정립된다. 이는 비선형 문제에서 복잡한 지배방정식의 풀이 또는 비선형 항에 대한 근사 없이, VAE의 인코더에서 사전에 정의한 매개변수 공간에서의 변위 응답을 통해 직접적으로 차원 축소를 수행할 수 있다. 또한, 내부 표현은 훈련데이터의 분포를 학습하도록 하는 잠재 공간 형성에 대한 규제가 존재하는 VAE를 통해 정의되기 때문에, 보다 유의미한 내부 표현을 얻을 수 있다. 이를 통해, 매개변수 입력에 따른 내부 표현과의 관계를 학습하여 최종적으로 변위 응답을 추종하는 과정 중에서 ANN의 훈련 안정성을 도모할 수 있다.

### 4. 수치 해석 결과

#### 4.1 POD-AE 기반 모델 축소법

##### (1) 문제 정의

POD-AE 기반 모델 축소법의 정확성과 효율성을 확인하기 위한 수치 해석 예제로 동적 하중을 받는 L-shape 프레임에 고려하였다. Fig. 7은 L-shape 프레임의 형상, 물성 및 경계조건을 나타내며, Co-rotational<sup>(20)</sup> 정칙화 기반의 삼각형 shell 요소를 사용하여 8001개의

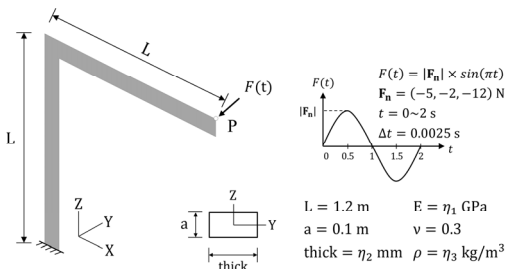


Fig. 7 Model configuration and boundary condition for a L-shape frame

Table 1 Design space for L-shape frame

Design parameter	Range [min, max]	Units
Young's modulus, $E = \eta_1$	[50, 100]	GPa
Thickness, $thick = \eta_2$	[3, 6]	mm
Density, $\rho = \eta_3$	[2500, 3000]	kg/m <sup>3</sup>

절점과 48 006개의 자유도를 갖도록 이산화하였으며, in-house code를 통해 해석을 수행하였다.

나아가 매개변수 변화를 고려하기 위하여 Table 1과 같이 영률 및 밀도와 같은 재료의 특성과 두께에 대한 3차원의 설계변수 공간을 정의하였다.

##### (2) POD-AE 기반 모델 축소법 적용

먼저, 적합 직교 분해 기반 축소 차수 모델을 구성하기 위해, Table 1에 제시된 설계변수 공간의 상한과 하한 값의 8개 조합에 대한 완전 차수 모델 해석을 수행하고 스냅샷 행렬을 구성하였다. 나아가, 스냅샷 행렬에 대한 특이값 분해를 통해 적합 직교 모드  $\Phi$ 를 도출하였으며, 총 80개의 적합 직교 모드를 선정하였다. 따라서 축소 변환 행렬  $\Phi_{80}$ 을 이용하여 적합 직교 분해 기반 축소 차수 모델을 구성하였고, 설계변수 변화에 따른 적합 직교 계수  $\alpha(\eta)$ 를 효율적으로 획득하여 AE의 훈련데이터로 적용하였다. 다음으로 AE 훈련을 통해 80에서 5 자유도를 갖도록 차원 축소를 수행하였으며, 잠재 공간으로 축소된 적합 직교 계수  $z(\eta)$ 를 도출하였다. 마지막으로 설계변수 ( $\eta$ (영률, 두께, 밀도))와 힘, 시간을 ANN의 매개변수 입력으로, 축소된 적합 직교 계수  $z(\eta)$ 를 출력으로 정의하여 매개변수 입력에 대한 축소된 적합 직교 계수  $z(\eta)$ 의 관계를 학습하였다.

앞서 학습된 ANN과 AE의 디코더와의 네트워크 연계를 통해, 최종 구성된 POD-AE 기반 모델 축소 프레임워크는 Fig. 8에 나타내었다. 따라서 POD-AE 기반 모델 축소법을 통해 매개변수 입력만으로 변위 응답을 최종적으로 도출할 수 있다.

##### (3) 매개변수에 따른 변위 응답 예측 비교

앞서 구성한 POD-AE 기반의 모델 축소법(Fig. 8)을 적용하여, 완전 차수 모델(FOM)과 POD-AE 기반의

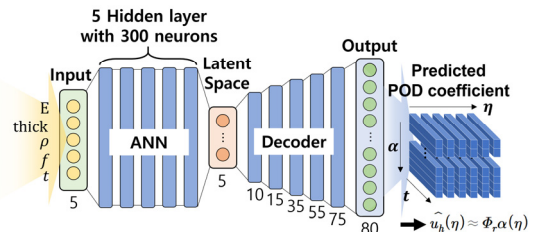


Fig. 8 Reduced-order model using POD-AE

축소 차수 모델(POD-AE-ROM)에서의 변위 응답을 비교하였다. 이때, 훈련데이터에 포함되지 않은 임의의 조건인 설계 변수  $\eta = [85, 0.003, 2670]$ 를 매개변수 입력으로 적용하였다.

Fig. 9는 각 모델 별 X-, Y-, Z-방향의 변위 응답 결과 비교를 나타낸다. FOM과 POD-AE-ROM에서 각 방향의 변위 응답에 대하여 평균 제곱근 오차를 비교하였을 때, 최대 0.0208 이내로 잘 일치하는 것을

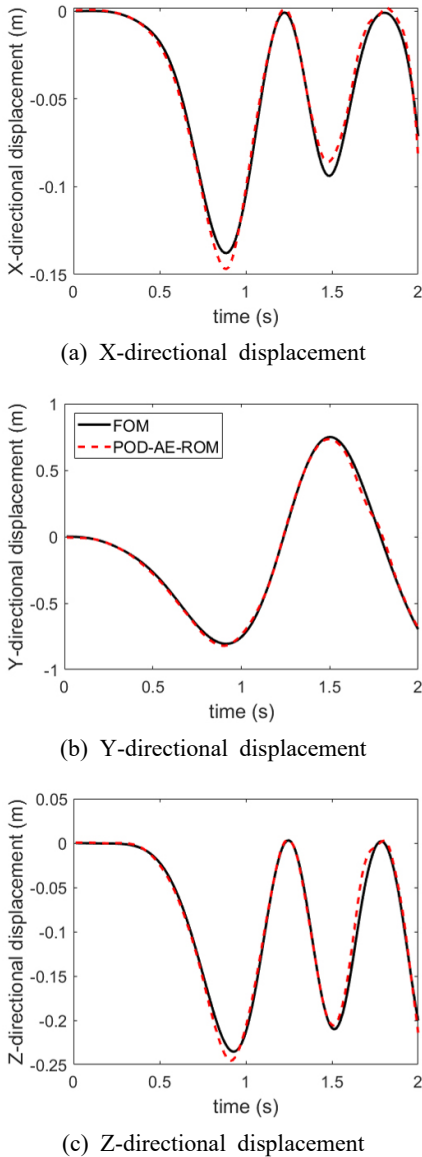


Fig. 9 Comparison of the displacement history for L-shape frame

확인하였다. 또한, POD-AE-ROM에서 소요된 해석 시간은 1.17초로 실시간 변위 예측이 가능함을 확인하였다.

4.2 AE와 VAE 비교

(1) 문제 정의

다음으로 VAE의 적용 가능성을 확인하기 위해, 수치 해석 예제로 끝단에서 전단 하중 P를 받는 외팔보를 고려하였다. 외팔보의 형상, 물성 및 경계조건은 Fig. 10에 나타내었으며, in-house code를 통해 4절점 평면유격 요소를 사용하여 84 자유도를 갖도록 이산화하여 해석을 수행하였다.

또한, Table 2와 같은 매개변수 공간에 따른 외팔보의 기하 비선형 정적해석과 선형 정적해석을 통해 변위 응답인 훈련데이터를 구성하였다. 이때, 훈련데이터는 41개의 두께 변화를 고려하였으며, 비선형과 선형, 하중의 방향에 대하여 대칭적인 훈련데이터를 구성하였다.

(2) ANN 기반 모델축소법 비교

먼저, AE와 VAE의 인코더를 통해 총 84에서 2 자유도를 갖도록 차원 축소를 수행하였다. 각 차원 축소 네트워크의 인코더 구조는 6개의 은닉층을 가지며, 각 은닉층에서 [74-54-34-14-7-4-(2-2,VAE)]의 뉴런으로 구성하였다. 이때, 디코더는 차원 축소 네트워크의 구조적 특징에 의해 인코더와 대칭적으로 존재한다. 다음으로, 앞서 도출한 잠재 공간으로 축소된

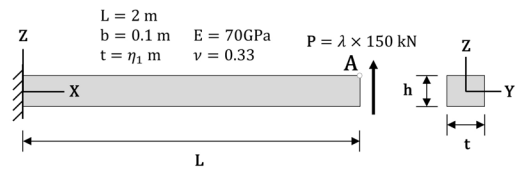
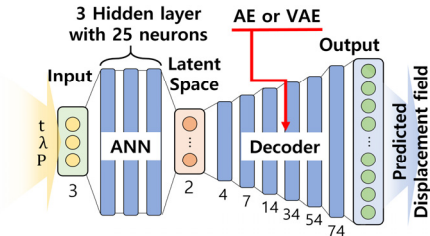


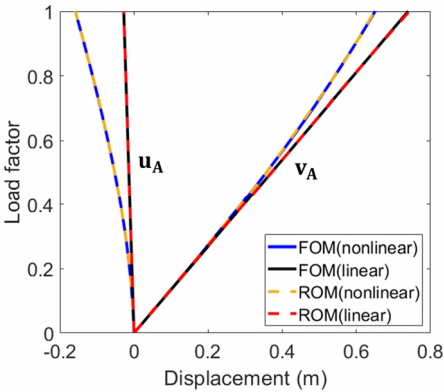
Fig. 10 Model configuration and boundary condition for a 2-D cantilever beam

Table 2 Parameter space for 2D cantilever beam

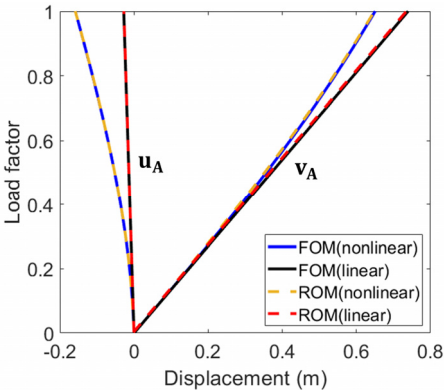
Parameter	Range [min, max]	Units
Thickness, $t = \eta_1$	[0.05, 0.15]	m
Load factor, $\lambda = \eta_2$	[-1:0.002:1]	-
Load, $P = \eta_3$	$\lambda \times 150$	kN



**Fig. 11** Artificial neural network-based model order reduction framework



**Fig. 12** Load-displacement result from AE based model order reduction



**Fig. 13** Load-displacement result from VAE based model order reduction

변위 응답을 ANN의 출력으로, Table 2의 매개변수를 입력으로 정의한 ANN을 훈련하였다. 최종 구성된 ANN 기반 모델 축소 프레임워크는 Fig. 11에 나타내었다.

(3) 매개변수에 따른 변위 응답 예측

앞서 구성한 ANN 기반 모델 축소법(Fig. 11)에 대하여 디코더가 AE 또는 VAE일 때의 변위 응답을 비교하였다. 이때, 훈련데이터에 포함되지 않은 임의의 조건인 두께가  $t = 0.062\text{m}$  일 때를 매개변수 입력으로 적용하였다.

Figs. 12~13은 각각 디코더가 AE 또는 VAE일 때의 변위-하중 선도 예측 결과를 나타내며, FOM의 비선형 및 선형 해석 결과와 비교하였다. 이때, AE에서의 변위 응답은 FOM과 비교하였을 때, 최대 평균 계급 오차 0.012이하로 예측되었다. 또한, VAE에서는 최대 평균 계급 오차 0.004이하로 예측되었다. 따라서 ANN 기반 모델 축소 네트워크에서 AE와 VAE 모두 예측 성능 측면에서 좋은 결과를 보이는 것을 확인하였다.

(4) 잠재 공간으로 축소된 변위 응답 분포 비교

각 차원 축소 네트워크 모델인 AE와 VAE에서의 잠재 공간은 각각의 인코더를 통해 입력 데이터에 대한 특징과 패턴이 밀집된 표현 즉, 내부 표현이 정의되는 공간이다. 따라서 AE와 VAE의 입력 데이터인 전체 자유도에서의 변위는 잠재 공간으로 차원이 축소된 내부 표현으로써 표현된다. 그러나 잠재 공간에서 정의되는 내부 표현은 각 네트워크에서 잠재 공간 형성에 대한 차이에 따라 서로 다르게 표현된다.

내부 표현에서 ANN의 입력 데이터인 매개변수의 특징이 충분히 포함되지 않을 때, 전술한 ANN 기반 모델 축소법에서 내부 표현을 이용한 기존 해의 추정 단계에서의 어려움을 초래할 수 있다. 따라서 각 차원 축소 네트워크 모델의 인코더를 통해 도출된 내부 표현인 잠재 공간으로 축소된 변위 응답 분포를 비교하였다. 이때, Fig. 14와 Fig. 15는 각각 AE와 VAE의 잠재 공간을 나타낸다.

각 차원 축소 네트워크 모델의 잠재 공간은 입력 데이터의 특성과 관련된 영역으로 그 분포가 형성됨을 알 수 있다. 또한, VAE의 경우(Fig. 15), 입력 데이터의 특징이 반영된 보다 정제된 형태의 잠재 공간이 도출됨을 확인하였다.

반면에 AE의 경우(Fig. 14), 난수 발생기에 의존하는 훈련 과정에서 VAE와 같은 입력 데이터와 관련된 잠재 공간 형성에 대한 규제가 없기 때문에, 입력 데이터의 특징이 드러나지 않는 것을 알 수 있다. 이를

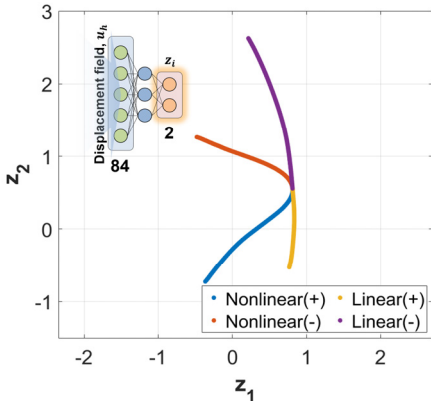


Fig. 14 Dimension reduction from encoder of AE

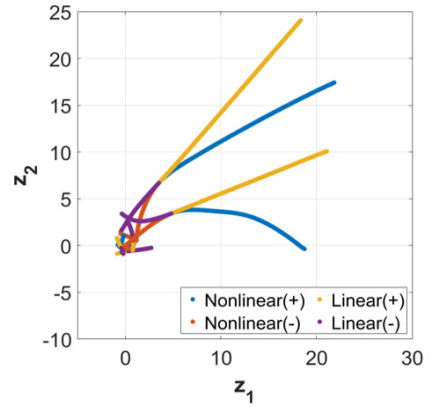


Fig. 16 Latent space from AE with 5-trial training procedure

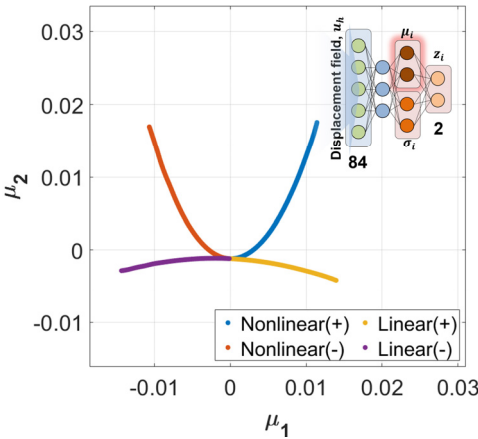


Fig. 15 Dimension reduction from encoder of VAE

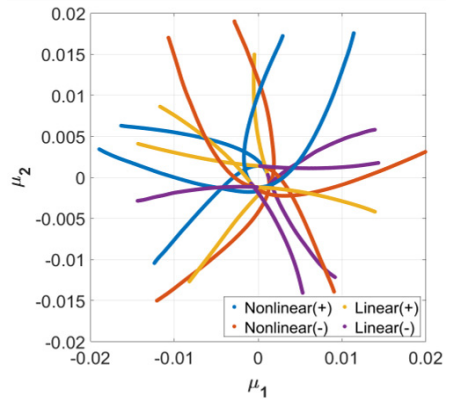


Fig. 17 Latent space from VAE with 5-trial training procedure

보다 명확하게 확인하기 위해, 각 차원 축소 네트워크 모델을 반복 훈련하였다.

(5) 훈련 시도별 축소된 변위 응답 분포 비교  
 각 차원 축소 네트워크 모델을 통한 잠재 공간 형성 시 난수 발생기에 대한 의존적인 훈련 과정의 규제에 대한 영향을 확인하기 위해, 동일한 차원 축소 네트워크에 대하여 동일 조건에서 5번 반복 훈련을 수행하였다. 이를 통해, 각 네트워크의 구조적 특성에 따라 형성되는 잠재 공간의 분포를 비교하였다.

AE에서의 잠재 공간은 매 훈련 시도마다 잠재 공간이 형성되는 분포가 달라지며, 난수 발생기에 대한 큰 의존성을 갖는 것을 알 수 있다(Fig. 16). 반면에, VAE에서의 잠재 공간은 매 훈련 시도마다 유사한

분포의 잠재 공간이 형성되었다(Fig. 17). 따라서 AE와 VAE에서의 차이는 훈련 과정에서의 잠재 공간에 대한 규제가 존재하는 손실 함수의 존재 여부에 의해 나타나는 특징임을 확인하였다.

### 5. 결론

이 논문에서는 효율적인 비선형 구조해석을 위하여 데이터 기반 모델축소법으로 적합 직교 분해와 AE가 적용된 POD-AE 기반 모델축소법을 제시하였다. 여기서, L-shape 프레임에 적용하여 임의의 매개 변수 입력에 대한 변위 응답을 예측하였다. 이때, 완전 차수 모델에서의 변위 응답과 최대 평균 제공근

오차 0.0208 이하로, 기 개발 모델 축소법의 정확성을 검증하였다. 또한, 해석에 소요된 시간은 1.17초로 실시간으로 변위 응답 예측하여 그 효율성을 확인하였다. 다음으로, 축소 모델링 관점에서 네트워크 훈련 안정성의 개선 가능성을 확인하기 위해, VAE 기반 모델 축소법을 제시하였다. 이때, 2차원 외팔보의 정적 해석 문제에 적용하여 기존의 AE와 비교하였다. 임의의 매개변수 입력에 대하여 완전 차수 모델의 변위 응답과 최대 평균 제곱근 오차 0.012 이하로 AE와 VAE 모두 예측 성능 측면에서 좋은 결과를 보였다. 그러나 최대 변위가 발생하는 지점에서  $y$ 축 방향 변위의 정확도는 전체 예측 정확도보다 상대적으로 낮았으며, 이를 개선하기 위해 VAE에 관한 hyperparameter 분석을 수행할 예정이다.

나아가, 각 차원 축소 네트워크의 잠재 공간을 비교하였다. 이때, VAE에서 입력 데이터에 대한 특징이 담긴 보다 정제된 형태의 축소된 변위 응답이 항상 같은 분포의 잠재 공간 내에서 도출되는 것을 확인하였다. 여기서 항상 같은 분포의 잠재 공간을 갖는 잠재 공간은 훈련데이터의 가감 혹은 해석 모델의 차원 증가로 인한 추가적인 훈련이 요구될 때, 잠재 공간에서의 내부 표현을 이용한 기존 해의 추정 단계에서 훈련 안정성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 VAE에서 항상 같은 분포의 잠재 공간을 갖는 것을 확인함으로써, 축소 모델의 훈련 안정성을 개선할 수 있는 가능성이 존재한다. 향후 VAE와 ANN의 네트워크 연계 시, ANN의 hyperparameter 최적화를 통해, 훈련 안정성과 효율성을 확인할 예정이다. 나아가, 대용량 모델에 대한 적용 가능성을 확인하고 transient 및 steady-state 응답을 포함한 보다 긴 시간 영역 해석을 수행하여 VAE 기반 모델 축소법을 보완할 예정이다.

## 후 기

이 연구는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.2020R1C1C1006006).

## References

- (1) Vidal, R., Ma, Y. and Sastry, S., 2005, Generalized Principal Component Analysis (GPCA), *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27, No. 12, pp. 1945~1959.
- (2) Chatterjee, A., 2000, An Introduction to the Proper Orthogonal Decomposition, *Current Science*, Vol. 78, No. 7, pp. 808~817.
- (3) Barrault, M., Maday, Y., Nguyen, N. C. and Patera, A. T., 2004, An 'Empirical Interpolation' Method: Application to Efficient Reduced-basis Discretization of Partial Differential Equations, *Comptes Rendus Mathematique*, Vol. 339, No. 9, pp. 667~672.
- (4) Chaturantabut, S. and Sorensen, D. C., 2010, Nonlinear Model Reduction via Discrete Empirical Interpolation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 32, No. 5, pp. 2737~2764.
- (5) Farhat, C., Chapman, T. and Avery, P., 2015, Structure-preserving, Stability, and Accuracy Properties of the Energy-conserving Sampling and Weighting Method for the Hyper Reduction of Nonlinear Finite Element Dynamic Models, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 102, No. 5, pp. 1077~1110.
- (6) Muravyov, A. A. and Rizzi, S. A., 2003, Determination of Nonlinear Stiffness with Application to Random Vibration of Geometrically Nonlinear Structures, *Computers & Structures*, Vol. 81, No. 15, pp. 1513~1523.
- (7) Lee, J., Lee, J., Cho, H., Kim, E. and Cho, M., 2021, Reduced-order Modeling of Nonlinear Structural Dynamical System via Element-wise Stiffness Evaluation Procedure Combined with Hyper-reduction, *Computational Mechanics*, Vol. 67, No. 2, pp. 523~540.
- (8) Kim, S. W., Oh, K. Y. and Lee, S. C., 2021, Physics-informed Neural Network for Estimation of Lithium-ion Battery State-of-health, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 177~184.
- (9) Nguyen, A. T., Han, J. H. and Nguyen, A. T., 2017, Application of Artificial Neural Networks to Predict Dynamic Responses of Wing Structures due to Atmospheric Turbulence, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 18, No. 3, pp. 474~484.
- (10) Lee, S., Jang, K., Cho, H., Kim, H. and Shin, S., 2021, Parametric Non-intrusive Model Order Reduction for Flow-fields Using Unsupervised Machine

Learning, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 384, 113999.

(11) Im, S., Lee, J. and Cho, M., 2021, Surrogate Modeling of Elasto-plastic Problems via Long Short-term Memory Neural Networks and Proper Orthogonal Decomposition, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 385, 114030.

(12) Kast, M., Guo, M. and Hesthaven, J. S., 2020, A Non-intrusive Multifidelity Method for The Reduced Order Modeling of Nonlinear Problems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 364, 112947.

(13) Lee, K. and Carlberg, K. T., 2020, Model Reduction of Dynamical Systems on Nonlinear Manifolds Using Deep Convolutional Autoencoders, Journal of Computational Physics, Vol. 404, 108973.

(14) Xu, J. and Duraisamy, K., 2020, Multi-level Convolutional Autoencoder Networks for Parametric Prediction of Spatio-temporal Dynamics, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 372, 113379.

(15) Wu, P., Sun, J., Chang, X., Zhang, W., Arcucci, R., Guo, Y. and Pain, C. C., 2020, Data-driven Reduced Order Model with Temporal Convolutional Neural Network, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 360, 112766.

(16) Cho, H., Kim, H. and Shin, S. J., 2020, Efficient Gird Deformation Using Deterministic Sampling-based Data Reduction, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 121, No. 18, pp. 4028~4049.

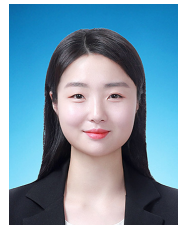
(17) Geron, A., 2019, Hands-on Machine Learning with Scikit-learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems,

pp. 674~715, O'Reilly Media, California.

(18) Kingma, D. P. and Welling, M., 2013, Auto-encoding Variational Bayes, ArXiv Prepr. ArXiv1312.6114.

(19) Werbos, P. J., 1990, Backpropagation through Time: What It Does and How to Do It, Proceedings of the IEEE, Vol. 78, No. 10, pp. 1550~1560.

(20) Cho, H., Kim, H. and Shin, S. J., 2018, Geometrically Nonlinear Dynamic Formulation for Three-dimensional Co-rotational Solid Elements, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 328, pp. 301~320.



**Hyejin Kim** received her B.S. degree in Aerospace Engineering from Jeonbuk National University in 2020. She is currently a M.S. candidate at Department of Aerospace Engineering, Jeonbuk National University. Her research interests include data-driven computational method, structural mechanics, and model order reduction.



**Haeseong Cho** received his B.S. degree in Aerospace Engineering from Korea Aerospace University in 2011 and his M.S. and Ph.D. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University in 2013 and 2017, respectively. He is currently an assistant professor of Aerospace Engineering at Jeonbuk National University. His research interests include computational methods in structures, structural dynamics and aeroelasticity, multi-physics/multiscale simulation.

# 탐욕 알고리즘 및 특이치 분해를 이용한 프로펠러 초생 캐비테이션의 위치추정

## Localization of Propeller Cavitation Inception Using Greedy Algorithm and Singular Value Decomposition

이 정 훈<sup>†</sup>

Jeung-Hoon Lee<sup>†</sup>

(Received August 20, 2021 ; Revised September 27, 2021 ; Accepted September 27, 2021)

**Key Words** : Propeller(프로펠러), Cavitation(캐비테이션), Inception(초생), Localization(정위)

### ABSTRACT

An accurate evaluation of the inception of propeller cavitation is a prerequisite for the prediction of the underwater radiated noise performance of ships. Current work treats the acoustic localization for incipient cavitation using the compressive sensing (CS) method. Orthogonal matching pursuit (OMP) based on a greedy algorithm is employed to tackle the CS localization problem owing to its low computational cost, making it appropriate for online applications. The application of singular value decomposition (SVD) is also suggested to identify the number of independent sources, which is crucial for initializing the algorithm. The established procedure is verified using experimental data acquired in a cavitation tunnel facility.

### 1. 서 론

항해중인 선박에서 발생하는 프로펠러 캐비테이션은 수중방사 소음의 중요한 요인 중 하나이다. 캐비테이션이 발생하기 시작하는 초생(inception) 영역을 지나면서, 전 주파수 대역에 걸쳐 소음 수준이 상당히 증가하며, 이는 주기관 및 보기류 등과 같은 다른 소음원의 영향을 마스킹(masking)할 정도이다<sup>(1)</sup>. 캐비테이션 초생에 대한 관정은 프로펠러의 수중방사소음 예측과 관련하여 중요 잣대가 되며, 조선소 및 모형시험기관 등에서는 여러 가지의 초생 평가방법을 개발 중에 있다.

일반적인 초생 평가는 시각적 관찰 혹은 단수채널

소음분석에 의존한다. 고속 카메라를 이용한 시각적 관찰법은 모형시험에만 국한되며, 관측창(observation window) 설치의 부담이 따르는 실선 상황에는 적용하기 쉽지 않다. 뿐만 아니라, 음향적 초생은 시각적 초생에 선행하는 것으로 알려져 있으므로, 보다 정확한 초생 평가를 위해서는 소음계측에 기반한 방법이 우선한다.

단수채널 소음분석의 경우, 소음을 모니터링하며 캐비테이션이 없는 상황과 비교하거나, 때로는 포락 스펙트럼(envelope spectrum) 혹은 데몬 스펙트럼(demon spectrum) 분석을 통해 초생여부를 진단한다<sup>(2)</sup>. 그러나, 해당분석은 캐비테이션 발생여부에 대한 단순한 결과만을 제공할 뿐, 더 이상의 확증적인 정보는 제공하지 않는다.

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National University, Professor  
E-mail : jhoonlee@changwon.ac.kr

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Won Ju Jeon

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering



반면, 다수의 센서 즉, 센서 배열을 이용하면 캐비테이션에 발생위치에 대한 정보를 얻을 수 있어 초생에 대한 정도있는 평가가 가능해진다. 이에, 관련 연구가 최근들어 시도되고 있다. 예를 들어, Park 등<sup>(3)</sup>은 수중 소음원의 정위를 위해 일반화된 빔형성 방법인 정합장 기법(matched field processing)을 도입한 바가 있는데, 빔형성법의 근원적인 제약조건인 공간 분해능 한계상, 초생 캐비테이션 정위 적용에는 무리가 있다. Lee 등<sup>(4)</sup>은 도달시간차(time-difference of arrival, TDOA)를 기본으로 한 쌍곡면 교차법(hyperbolic localization)을 제안하였다. 초생 캐비테이션 정위에 대해 시간영역 측면에서 접근하고 있으나, 다수 음원 환경하에서는 적용이 어려운 한계가 있다.

압축센싱(compressed sensing)은 최근 신호처리분야에서 등장한 방법으로서, 위에서 언급한 문제점을 극복할 수 있는 것으로 여겨진다. 과소결정(under-determined) 문제  $y = Ax$ 에서 만약 해  $x$ 가 희소벡터(sparse vector)이고 행렬  $A$ 가 제한등방성(restricted isometry property, RIP)이라는 기준을 만족한다면, 비록 측정치  $y$ 의 개수가 소수라 할지라도  $x$ 를 구할 수 있는 방법이다<sup>(5-7)</sup>.

음원은 관심 3차원 공간상에서 미소한 영역만을 차지한다고 볼 수 있으므로, 음원의 정위 문제 역시 압축센싱에서 취급하는 문제의 틀과 부합한다. 따라서, 초생 캐비테이션 정위 뿐만이 아니라 일반적인 소음원 추정 문제에 대해, 압축센싱을 통한 해법이 연구되었다<sup>(9-12)</sup>. 그러나, 기존의 연구에서는 압축센싱 문제에 접근하기 위해 컨벡스 최적화(convex optimization)를 이용하고 있으나, 이 방법은 익히 알려진 바와 같이 정규화 인자(regularization parameter)에 대해 민감하게 반응한다.

이 연구에서는 압축센싱 문제를 다루기 위한 또 다른 대안인 직교짝 추적(orthogonal matching pursuit, OMP) 기법<sup>(7,13)</sup>을 도입한다. 탐욕 알고리즘에 근거하고 있는 OMP 방법은, 매 단계별 계산시 각 단계에서 최적이라고 간주되는 해를 선택해 나가면 결국 전역 최적해에 이를 수 있다는 '탐욕'적인 개념을 상정한다.

컨벡스 최적화에 비해, 탐욕 알고리즘은 계산량 및 속도, 그리고 구현 용이성 등에서 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 알고리즘의 시작을 위해서는 희박도(sparsity)가 사전에 결정되어야 한다. 물리적으로, 희박도는 음장에 기여하는 독립적인 음원의 수로 해석

될 수 있으므로, 여기서는 특이치 분해(singular value decomposition, SVD)를 통해 음원의 개수를 추정코자 한다.

## 2. 초생 캐비테이션 정위를 위한 이론

### 2.1 압축센싱 기반 정위법

프로펠러 캐비테이션에 의한 음장을 Fig. 1에 나타낸 총  $N$ 개 등가단극음원(equivalent monopole source)의 조합을 통해 표현할 수 있다고 가정하자.  $x_n(n=1, \dots, N)$ 은 각 음원의 (복소) 강도를 의미한다고 할 때,  $m(=1, \dots, M)$ 번째 센서(여기서는 하이드로폰) 응답은 자유음장 그린함수를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서  $r_{mn} = |r_m - r_n|$ 은  $m$ 번째 센서와  $n$ 번째 음원간 거리,  $k = 2\pi f / c$ 는 파수,  $f$ 는 주파수 [Hz],  $c$ 는 음속 (=1502 [m/s])를 의미하며,  $e_m$ 은 잡음을 의미한다.

식 (1)에 대한 벡터-행렬 표현은 식 (2)와 같다.

$$y = Ax + e \tag{2}$$

$y \in \mathbb{C}^M$ 와  $e \in \mathbb{C}^M$ 는 각각 측정벡터, 잡음벡터라 한다.  $A \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 는 측정행렬이라 칭하며 그 원소는  $a_{mn} = \exp(-jkr_{mn}) / 4\pi r_{mn}$ 와 같고,  $x \in \mathbb{C}^N$ 는 미지의 해 벡

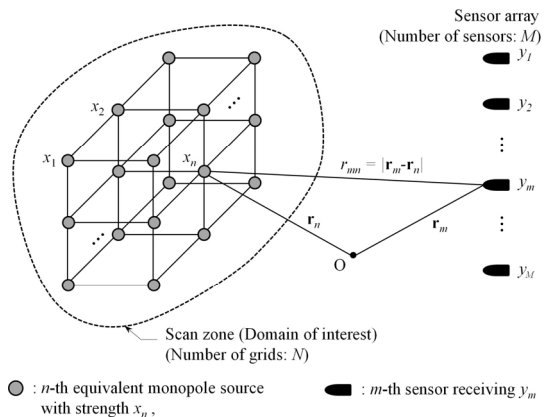


Fig. 1 Equivalent source model consisting of  $N$  monopole sources

터이다. 실제의 캐비테이션 소음원은  $x$ 에서 0이 아닌 요소로 나타나며, 그것에 대응하는 3차원 공간좌표를 캐비테이션의 발생위치로 볼 수 있다.

일반적으로, 센서의 수  $M$ 은 미지수의 개수  $N$ 보다 작다고 할 수 있으므로 ( $M < N$ ), 식 (2)는 과소결정 (under-determined) 문제가 됨을 알 수 있다. 그리고, 정위 문제 특성상  $x$ 에서 단지  $s (\ll N)$  개만 0 아닌 값을 갖는다는 희박성(sparseness)을 가정할 수 있다. 이와 같은 부족조건(ill-posed) 문제는 압축센싱에서 취급할 수 있으며 해법을 위해 진술한 바와 같이 컨벡스 최적화 또는 탐욕 알고리즘을 이용한다.

기저추적(basis pursuit)으로도 불리는 전자의 방법에서는 볼록함수  $l_1$ -norm  $\|x\|_1 = \sum_{n=1}^N |x_n|$ 을 식 (2)의 구속조건에 대해 최소화한다. 즉,

$$\min \|x\|_1 \text{ subject to } \|y - Ax\|_2 \leq \|e\|_2 \quad (3)$$

이며,  $\|x\|_2 = (\sum_{n=1}^N |x_n|^2)^{1/2}$ 은 Euclidean norm을 의미한다. CVX<sup>(14)</sup>,  $l_1$ -magic<sup>(15)</sup> 등과 같은 공개 코드에서 이미 구현된 바와 같이  $l_1$ -norm의 볼록성은 전형적인 선형 프로그래밍(linear programming)의 문제로 변환될 수 있는 근거를 제공하며, 전역 수렴성을 보장한다.

기본적으로 식 (3)의 최적화 문제는 어느 한 주파수에 대해 정의되며, 잡음의 영향을 저감하기 위해 관심 여러 주파수에 대해 계산한 결과들을 평균하여 최종결과를 얻는다. 주목할 점은 프로펠러 캐비테이션 소음은 충격음과 유사한 임펄스 신호가 주기적으로 반복되는 진폭변조의 특성을 가진다는 것이며, 이에 이 연구에서는 스펙트럴 커토시스(spectral kurtosis, SK)<sup>(16)</sup>를 이용하여 관심 주파수 대역을 지정하였다.

컨벡스 최적화의 단점은 잡음의 크기  $\|e\|_2$ 를 알고 있어야 한다는 것인데, 당연히 대부분의 경우 알 수 없으며 현실적으로는 튜닝의 방법을 택한다. 결국,  $\|e\|_2$ 는 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)<sup>(17)</sup>와 동일하게 해의 희박성과 잔차(residual) 사이의 균형을 조정하는 역할을 한다고 할 수 있다(이 측면에서  $\|e\|_2$ 를 정규화 인자(regularization parameter)라 볼 수 있음). 부연하면,  $\|e\|_2$ 가 클 경우 과도한 일반화(generalization)로 인해 너무 희박한 해(음원분포)를 얻는 반면, 그 반대의 경우(즉, 측정치를 신뢰할 경우) 과적합(overfitting)을 초래하여 여러 곳에 산재해 있는 음원분포를 얻을 가능성이 높다. 또한, 컨벡스 최소화 기법은 비교적 많은

반복 연산횟수를 요구하는 편이며, 이는 여러 주파수에 대해 계산할 경우 느린 계산속도의 원인이 된다.

탐욕 알고리즘은 각 반복 단계에서 국소 최소값을 선택해 나가며 궁극적으로는 전역 최소값에 도달하기 희망하는 비교적 단순한 생각에서 출발한 방법이다. 각 반복에서 최적  $x$ 를 구하는 방법에 따라 다양한 형태의 탐욕 알고리즘이 구현된다. 서론에서 언급한 바와 같이, 이 연구에서는 빠른 계산이 가능하며 널리 활용되고 있는 OMP(Orthogonal matching pursuit)<sup>(7,13)</sup>를 도입하였다. OMP는 해 벡터의 서포트 집합(support set)을 특정 종료조건이 만족될 때까지 갱신하며 최적해를 추정한다(상세알고리즘은 부록 참조).

식 (3)의 잡음에 대한 구속식 즉,  $\|y - Ax\| \leq \|e\|_2$ 을 OMP 종료조건으로 고려할 수 있지만, 역시 잡음의 특성을 알 수 없으므로, 이를 사용할 수 없다. 대신, 참고문헌(12)에 의하면, 해 벡터의 희박도(sparsity)가  $s$ (나머지  $N - s$  개 원소는 '0')라면, OMP 방법을  $s$ 회만 반복하면 해를 구할 수 있음이 밝혀졌다. 여기서, 희박도  $s$ 는  $x$  가운데 0이 아닌 원소의 개수를 의미하므로, 물리적으로는 음원의 개수로 해석될 수 있다. 3절에서 보이는 예와 같이, 초생 캐비테이션과 관련한 희박도는 대개 한 자리 숫자이며, 이는 기껏해야 10회 이하의 반복만으로도 해를 산출할 수 있음을 예상할 수 있다. 통상 수십~수백회 반복을 요하는 컨벡스 최적화에 비해 계산속도가 빠를 수 밖에 없다. 그러나, OMP의 시작을 위한 선결조건인 희박도  $s$ 는 별도의 방법을 통해 추정해야 하며, 다음절에서 이에 대해 상술하기로 한다.

## 2.2 특이치 분해를 이용한 희박도(음원개수) 추정

비록 초생 단계라 할지라도, 캐비테이션은 수많은 기포의 붕괴를 수반하며, 이로 인해 다수의 음원이 존재하게 된다. 해당 음원들 사이에는 상관성(coherency)이 존재하며, 그 모든 음원을 규명하는 것은 사실상 불가능하다. 대신, 소음 출력에 독립적으로 기여하는 비상관(incoherent) 음원을 찾는 것이 현실적으로/공학적으로 더 의미있다고 할 수 있으며, 이를 위해 특이치 분해(singular value decomposition, SVD)를 다음과 같이 이용할 수 있다.

우선,  $x$  가운데 상호 독립인 음원의 집합을  $x_s \in \mathbb{C}^s$ 라 하면  $x_s = x(\text{supp}(x))$ 로 쓸 수 있다.  $\text{supp}(x) = \{n, x_n \neq 0\}$ 는  $x$

의 서포트를 의미하는데,  $x$ 에서 0이 아닌 원소 번호의 집합이다. 잡음이 없는 경우, 식 (2)는 식 (4)와 같다.

$$y = A_s x_s \tag{4}$$

$A_s \in \mathbb{C}^{M \times s}$ 는 측정행렬  $A$ 에서  $supp(x)$ 에 해당하는 열(column)을 취해 구성된 부분행렬이다. 식 (4)의 양변의 뒤에  $y^H$ ( $H$ : Hermitian transpose)를 곱하고 기대치를 취하면<sup>(18)</sup>, 식 (5)와 같다.

$$G_{yy} = A_s G_{xxs} A_s^H \tag{5}$$

$G_{yy} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 와  $G_{xxs} \in \mathbb{C}^{s \times s}$ 는 각각 출력 상호스펙트럼 밀도 행렬(output cross spectral density matrix, OSDM), 입력 상호스펙트럼 밀도 행렬(input cross spectral density matrix, ISDM)이라 하며 구체적으로는 다음과 같다.

$$G_{yy} = E \left[ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{matrix} \begin{matrix} \{ y_1^* & y_2^* & \dots & y_M^* \} \end{matrix} \right] \tag{6}$$

$$= \begin{bmatrix} G_{y_1 y_1} & G_{y_1 y_2} & \dots & G_{y_1 y_M} \\ G_{y_2 y_1} & G_{y_2 y_2} & \dots & G_{y_2 y_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{y_M y_1} & G_{y_M y_2} & \dots & G_{y_M y_M} \end{bmatrix}$$

$$G_{xxs} = E \left[ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_s \end{matrix} \begin{matrix} \{ x_1^* & x_2^* & \dots & x_s^* \} \end{matrix} \right] \tag{7}$$

$$= \begin{bmatrix} G_{x_1 x_1} & G_{x_1 x_2} & \dots & G_{x_1 x_s} \\ G_{x_2 x_1} & G_{x_2 x_2} & \dots & G_{x_2 x_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{x_s x_1} & G_{x_s x_2} & \dots & G_{x_s x_s} \end{bmatrix}$$

여기서 기호 ‘\*’는 켈레 복소수(complex conjugate)를 의미한다.

ISDM은 독립된  $s$ 개의 성분(음원)으로 구성된 벡터로부터 정의되므로, 행렬의 계수 즉  $rank(G_{xxs}) = s$ 이다. 센서의 개수가 음원의 수보다 많음을 가정하면 ( $M \geq s$ ), 부분행렬  $A_s$ 의 계수 역시  $s$ 라 할 수 있다. 또한, 두 행렬  $A, B$ 에 대해,  $rank(AB) \leq \min(rank(A),$

$rank(B))$ 가 성립한다(단, 등호는  $A$  또는  $B$ 가 non-singular일때 성립)<sup>(19)</sup>. 위 관계를 식 (5)에 적용하면,

$$rank(G_{yy}) = s \tag{8}$$

식 (8)과 같이 쓸 수 있으며, 이는 OSDM의 계수를 통해 음원개수(희박도) 추정이 가능함을 시사한다.

$G_{yy}$ 에 대한 특이치 분해는 다음과 같다.

$$G_{yy} = U \Sigma V^H \tag{9}$$

여기서  $U$ 와  $V$ 는  $M \times M$  크기의 유니터리(unitary) 행렬이고,  $\Sigma$ 는 대각행렬(diagonal matrix)이며 그 원소  $s_i$ 는 특이치이다. 참고로, OSDM은 허미시언 행렬이므로 ( $G_{yy} = G_{yy}^H$ ), OSDM의 특이치 분해와 고유치 분해(eigenvalue decomposition)는 서로 차이가 없다. 잡음이 없는 경우, 특이치(또는 고유치)는  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_s \geq 0$ 의 관계로 내림차순 정렬된다. 따라서 0이 아닌 특이치의 개수는 OSDM의 계수(혹은 음원의 수)에 해당한다.

잡음의 존재는 OSDM을 정규화하므로 더 이상 ‘0’인 특이치는 없으며, 대신 다음과 같이 ‘0’보다 약간 큰 특이치가 나타나게 한다.

$$\begin{matrix} \sigma_i > \varepsilon, & i = 1, \dots, s \\ \sigma_i \leq \varepsilon, & i = s+1, \dots, M \end{matrix} \tag{10}$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 한계치(threshold)를 의미한다. 따라서, 잡음이 존재하는 경우에는, 한계치보다 큰 특이치 개수를 조사하여 OSDM의 유효 계수(effective rank)를 추정해야 한다. 한계치  $\varepsilon$ 는 사실상 특정하기 어려우므로, 특이치의 급격한 감소가 시작되는 기점을 선택 한계로 본다. 물론, 잡음 수준이 높은 환경에서는 특이치가 완만하게 감소하는 경향을 보이므로 컷오프(cut-off) 방식은 유효하지 않을 수 있다. 그러나, 다음 실험절에서 보이는 바와 같이, 초생 캐비테이션 신호의 경우 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)가 충분히 높아, 이 방법을 도입할 수 있는 것으로 판단된다.

### 3. 실험적 검증

#### 3.1 실험장치

2절에서 설명한 정위법의 검증을 위해 캐비테이션 터널에서 모형실험을 수행하였으며, Fig. 2에 그 개략

을 보였다. 모형선 내부에 설치된 동력계가 모형 프로펠러(4익)를 구동하면서 추력, 토크, 회전 속도를 측정한다. 직경 0.238 m인 모형 프로펠러는 후미에서 바라보았을 때 시계 방향으로 회전한다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 프로펠러 상부 선체 표면에 6개( $M=6$ )의 하이드로폰 배열을 설치하였으며, 조정/증폭 후 256 kHz의 샘플링 주파수로 신호를 취득하였다.

캐비테이션 시험은 기본적으로 터널내 물의 유속  $V_T$ , 프로펠러 회전속도  $n_s$ , 터널압력  $P_T$  세 가지 매개변수를 조정하며 수행한다<sup>(20)</sup>. 여기서는, 프로펠러가 발생하는 힘을 유지하기 위해 두 매개변수( $V_T, n_s$ )를 일정하게 유지한 반면, 캐비테이션 발달 정도를 변화시키기 위해 터널압력  $P_T$ 를 감소시키며 실험하였다. 즉, 비교적 높은 터널압력에서 캐비테이션이 없음을

소음신호 관찰을 통해 확인하였고, 이후 캐비테이션이 충분히 발달할 때까지 여러 압력 조건(Table 1 참조)에 대해 소음신호를 측정하였다. 참고로, 음향적 정위 결과와 비교하기 위해 고속 카메라(SA-5)를 이용한 시각적 관찰도 함께 병행하였다.

**3.2 소음스펙트럼 분석 및 음원개수 추정**

시험조건별 소음 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 4에 보였다. 시험조건 2의 결과는 1 kHz ~ 4 kHz 및 20 kHz 이상의 주파수 대역에서 약간의 증가(< 3 dB)를 보인다. 그러나, 해당 고속카메라 영상에서는 캐비테이션 관련한 시각적인 징후를 관찰할 수 없었다. 즉, 음향적 초생이 이미 시작했음에도 불구하고, 시각적 초생이 시작하지 않았기에 조건 2를 sub-visual inception이라 지칭하였다. 조건 3에서는, 12시 영역 끝단에서 보오텍스 캐비테이션(tip vortex cavitation, TVC)이 미약하게 발생한다(Fig. 5(a)참조). 관련된 스펙트럼의 변화는 20 kHz 이상 주파수 대역에 국한되고 있으며,

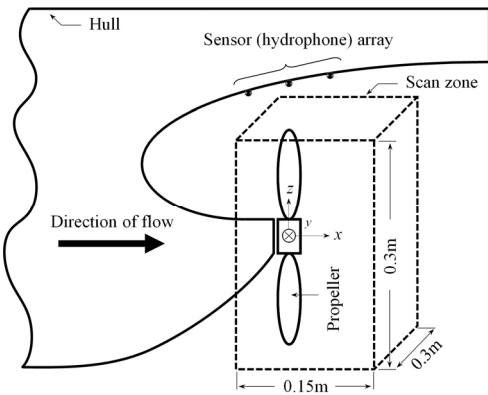


Fig. 2 Sketch for propeller cavitation test

Table 1 Conditions of propeller cavitation test

Test case	$V_T$ [m/s]	$n$ [1/s]	$p$ [Bar]	Description
1	4.0	23.2	1.20	No cavity
2	4.0	23.2	0.75	Sub-visual inception
3	4.0	23.2	0.65	Visual inception

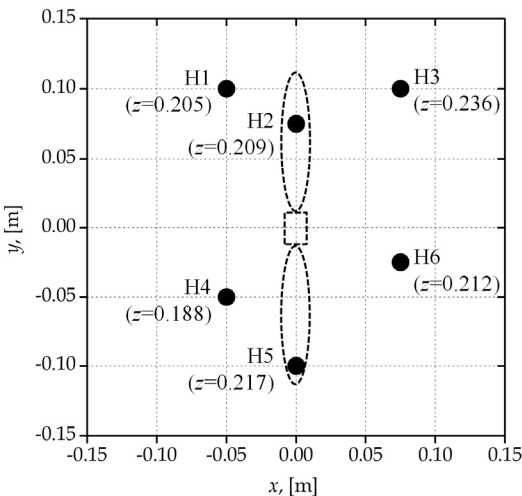


Fig. 3 Arrangement of sensor (hydrophone) array

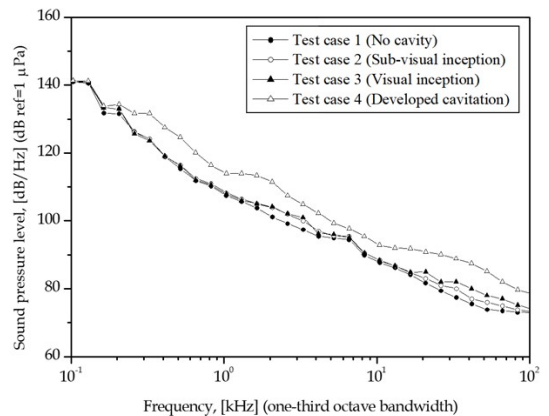
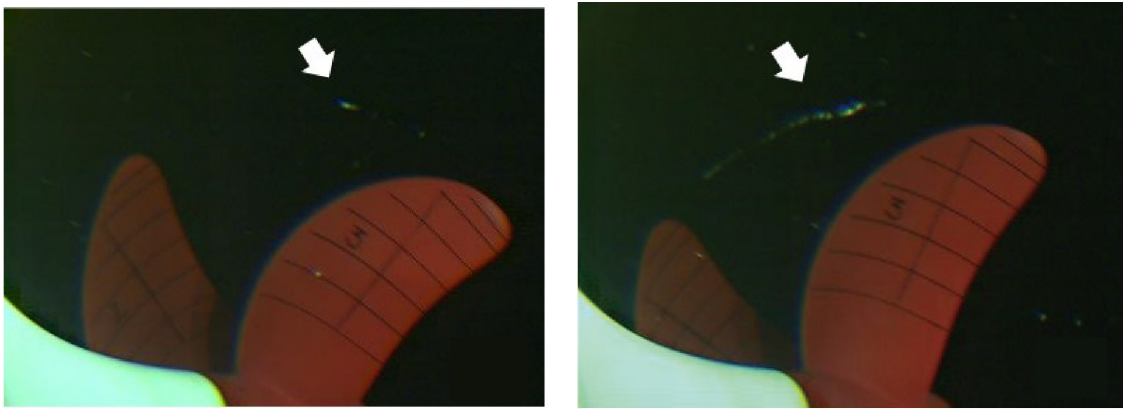


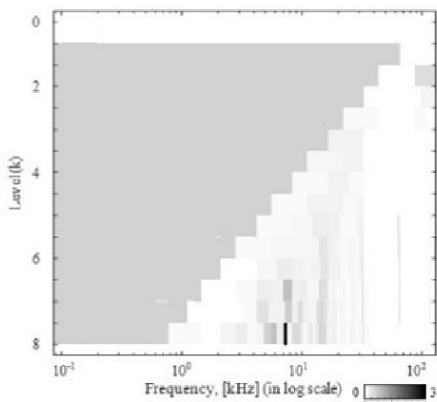
Fig. 4 Power spectral densities for the test cases (analysis channel: H4). Estimated by Welch’s method with Hanning window, 500 times ensemble average and 75 % overlapping



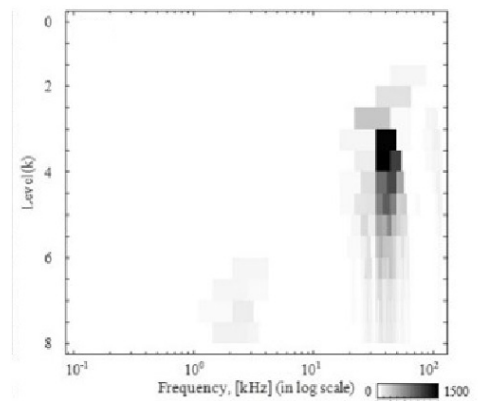
(a) Test case 3 (visual inception of tip vortex cavitation)

(b) Test case 4 (developed tip vortex cavitation)

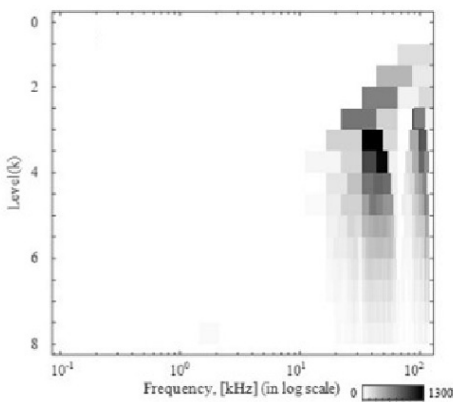
**Fig. 5** Representative high speed images



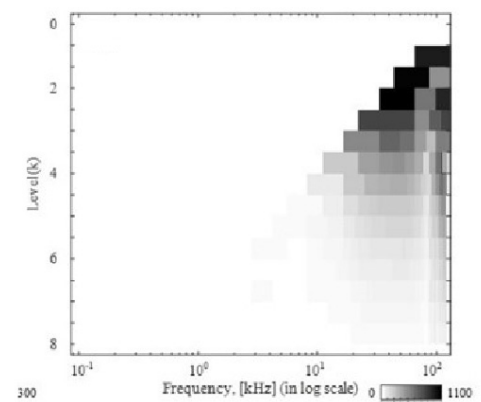
(a) Test case 1



(b) Test case 2



(c) Test case 3



(d) Test case 4

**Fig. 6** Spectral kurtosis (SK) analysis with Fast Kurtogram

이는 팝형(pop-type) 음향 특성<sup>(21)</sup>과 유사하다. 충격성 소음을 야기하는 팝 유형의 소음 발생은 초생 캐비테이션의 중요한 징후로 볼 수 있다.

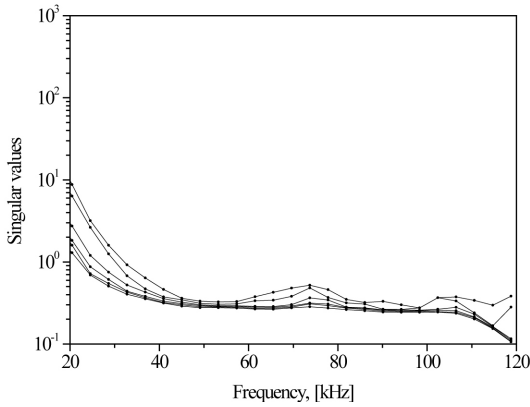
조건 4에서는 TVC가 프로펠러 후류선(slip-stream)을 따라 잘 발달하고 있다(Fig. 5(b) 참조). 충분히 성장한 캐비테이션의 경우 체적 진동(volumetric oscillation)이 발생하며, 이때 충격을 뿐만이 아니라 수 kHz 정도로 낮은 주파수 성분의 칩(chirp)소음도 함께 발생하는 것으로 알려져 있다<sup>(21)</sup>. 따라서, 조건 4에 대응하는 소음 스펙트럼이 전 주파수 대역에 걸쳐 증가하는 양상을 보이게 된다.

상기의 내용은 Fig. 6에서 보인 SK 해석 결과에서도 잘 나타난다. SK는 충격성 신호가 나타나는 주파수 영역에서 큰 값을 가지는데, 그 최대값이 저주파

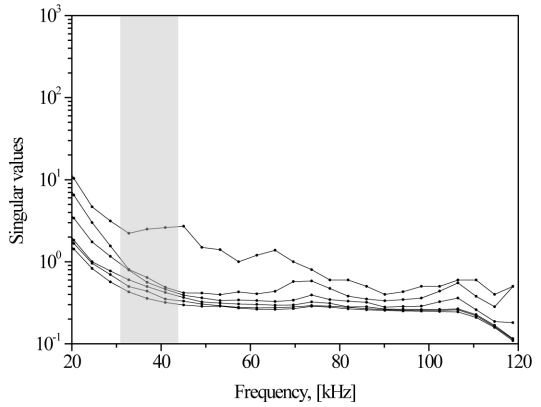
가 아닌 수십 kHz 대역에서 나타남을 볼 수 있는 것이다. 따라서, 초생(즉, 팝 소음)에 대한 진단 정보는 고주파 대역에 포함되어 있음을 확인할 수 있으며, 또한 이 대역에 대해 소음원 개수 추정 및 정위를 수행해야 함을 알 수 있다.

Fig. 7은 OSDM의 특이치를 주파수에 대해 도시한 결과이다. 조건 1(비공동 상황)의 경우, 의미있는 특이치의 변화를 식별하기 어렵다. 반면, 조건 2(sub-visual inception)와 3(visual inception)에 대해서는 하나의 특이치가 나머지 특이치에 비해 큰 주파수 대역을 볼 수 있으며, 특히 SK 값이 커지는 주파수 범위 근방에서(그림에서 음영 표시) 그 양상이 부각되고 있다.

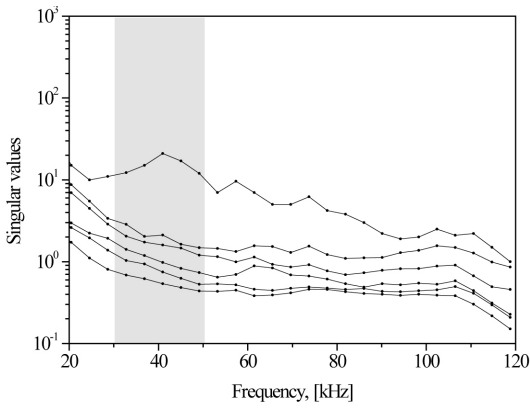
정량적인 계산을 위해 특이치의 변화량을 식 (11)과 같이 정의하였다.



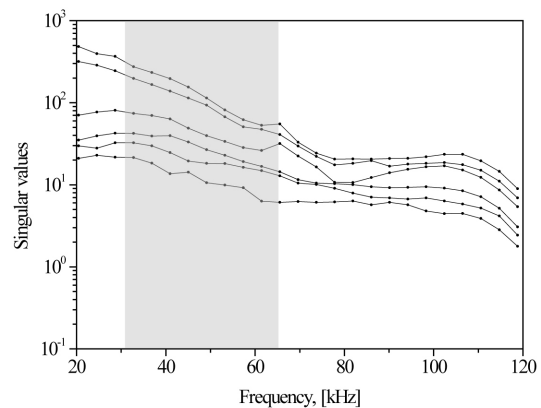
(a) Test case 1



(b) Test case 2



(c) Test case 3

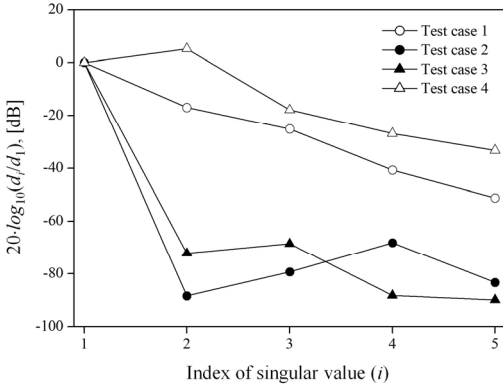


(d) Test case 4

Fig. 7 Singular values of OSDM, Note that the horizontal frequency axis was linear-scaled, not log-scaled

$$d_i = \sigma_i - \sigma_{i+1}, i = 1, 2, \dots, M - 1 \tag{11}$$

이에 따라 특정 주파수(41 kHz)에 대해 계산한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 조건 2 및 3에 대해,  $d_1 \rightarrow d_2$  구간에서 크게 감소하고 있음을 볼 수 있으며, 이를 통해 해당 주파수에서 OSDM의 계수는 ‘1’임과 동시



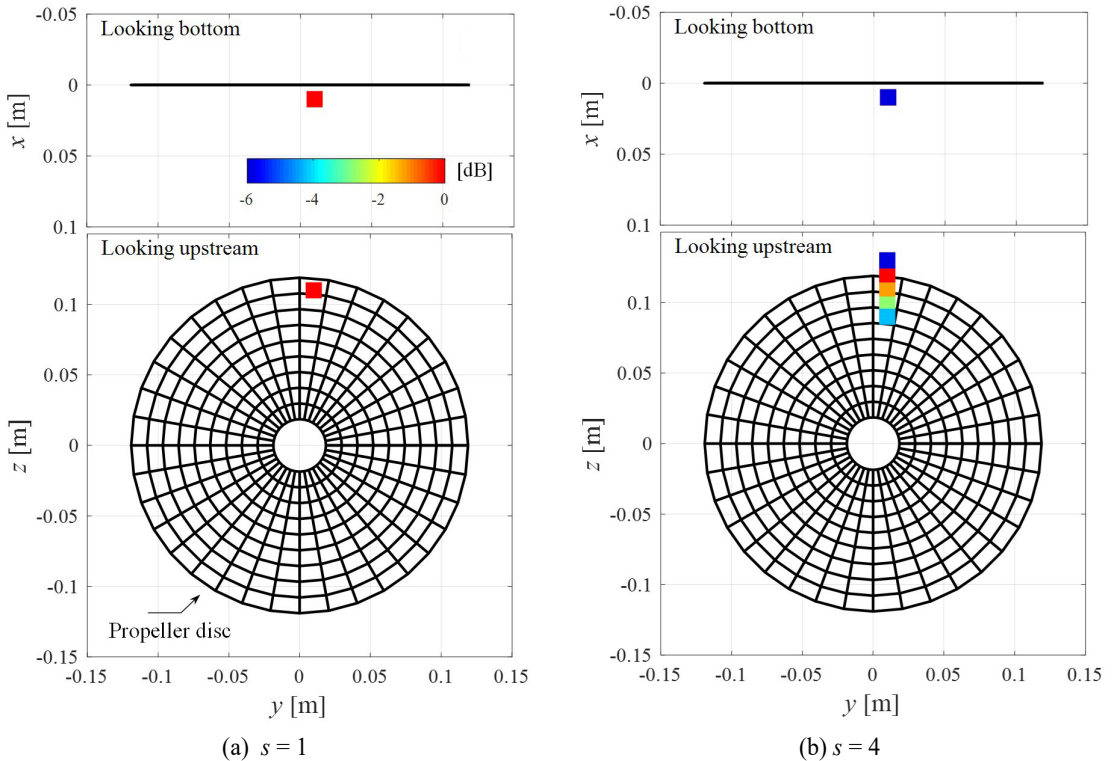
**Fig. 8** Difference of singular value ( $d_i = \sigma_i - \sigma_{i+1}$ ). Evaluated frequency:  $f = 41$  kHz.

에 독립적인 음원의 수는 ‘1’개임을 알 수 있다.

발달된 TVC에 대한 특이치는 그 크기가 모두 전 반적으로 증가하였음을 볼 수 있다(Fig. 7(d)). 특이치의 급격한 변화도 나타나지 않아 음원개수를 추정하기 어려움을 알 수 있다. 초생 시점을 지나 크게 발달한 캐비테이션은 무수히 많은 기포를 내포하며, 음장에 기여하는 독립된 음원의 개수는 초생 상황에 비해 많을 것이 자명하다. 따라서, 센서의 개수가 충분히 많지 않는 한, 발달 캐비테이션에 대해, SVD를 이용하여 음원개수를 추정하는 것에는 무리가 따른다고 정리할 수 있겠다.

### 3.3 정위결과 분석

정위 문제 설정을 위해, Fig. 2 표시한 바와 같이 프로펠러 근방에 지정된  $0.15 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 의 탐색 영역을  $0.01 \text{ m}$ 의 해상도로 이산화하였으며, 이에 따른 미시 음원의 총 개수는  $N = 15376 (= 16 \times 31 \times 31)$ 이 된다. 언급한 바와 같이, 잡음의 영향을 억제하기 위해 여러 주파수에 대해 평균한 결과를 도시해야 하겠으나, 여기서는 주파수별 계산결과의 일관성을 보이기



**Fig. 9** OMP localization for test case 2 with letting

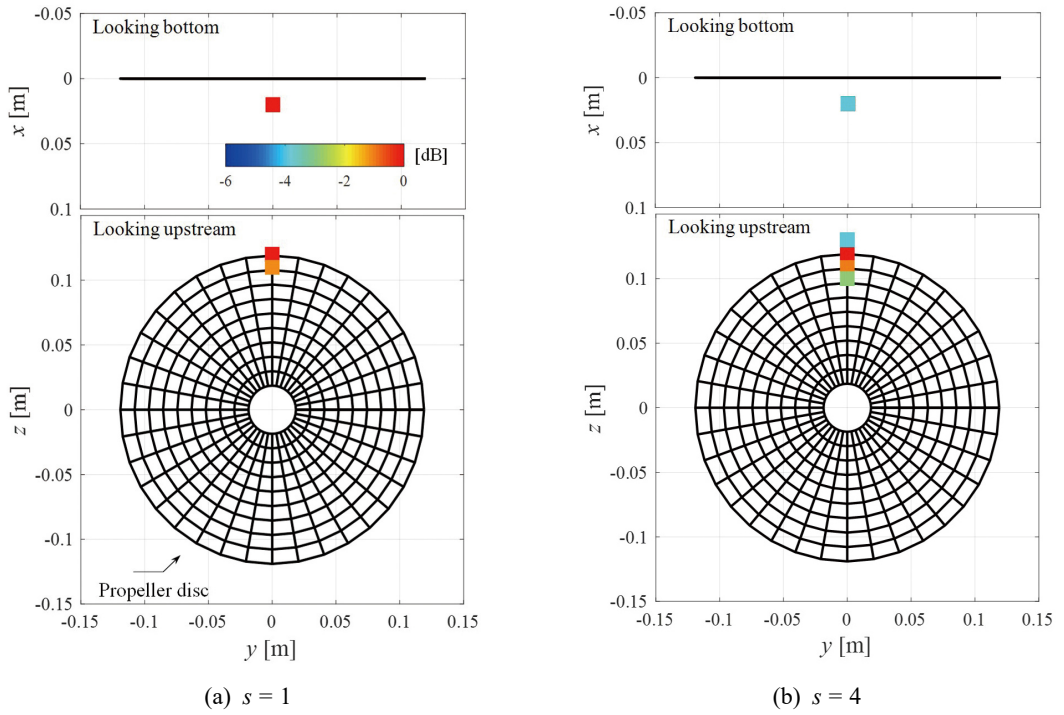


Fig. 10 OMP localization for test case 3 with letting

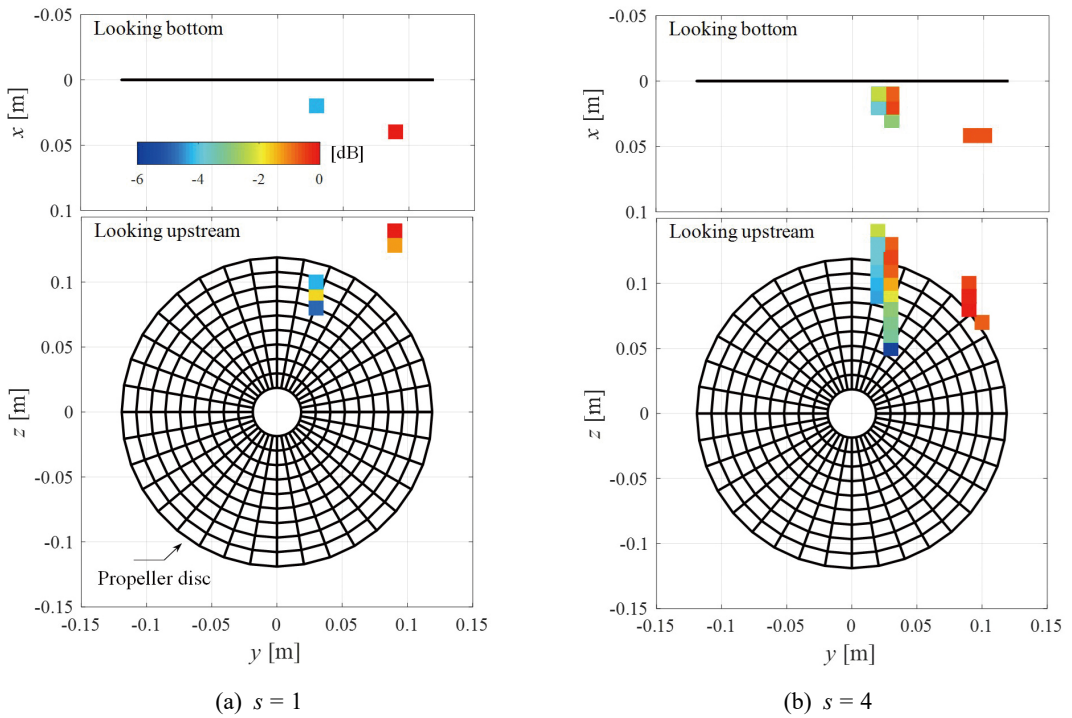


Fig. 11 OMP localization for test case 4 with letting



위해 SK에서 도출된 관심 주파수 영역내 5개점 각각의 결과를 (평균을 취하지 않고) 모두 보였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 조건 2 및 3에 대한 OMP 정위 결과를 보이고 있다. 음원개수  $s$ 의 값을 적절히 설정한 경우(Fig. 9(a), Fig. 10(a)), 정위 결과는 고속 카메라 관찰결과와 상관관계가 크다고 볼 수 있으며 이를 미루어 제안한 방법의 타당성을 검증할 수 있다. OMP 해석 시 음원개수 추정이 잘못된 경우를 가정하여,  $s = 4$ 로 설정한 경우를 Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)에 나타냈다. 이때, 추정된 음원들은 상하방향을 따라 늘어선 형태로 나타나며, 프로펠러 외부 영역에서도 존재하는 음원도 나타나 분석결과의 질을 저해하게 된다. 따라서, 정위과정에 있어 음원개수 추정도 함께 중요함을 강조할 수 있다.

Fig. 11은 조건 4(발달된 TVC)에 대한 해석결과이다. 이 경우 음원 개수를 추정할 수는 없었으나, 앞서와 마찬가지로 각각  $s = 1$ 과 4로 임의 설정하였다.  $s = 1$ 일 때, 나타나는 두 개군 중 하나의 군이 프로펠러 외부로 벗어나고 있으나,  $s = 4$ 일 때에는 좀 더 현실적인 위치로 음원이 옮겨가고 있는 것을 알 수 있다. 이는, 앞절의 특이치 해석과 부합하게도, 발달된 캐비테이션을 구성하는 음원수는 적어도 4개 혹은 그 이상임을 의미한다.  $s$ 를 6까지 늘려 해석하였으나, Fig. 11(b)의 결과와 크게 다르지 않았으며, 센서의 개수는 음원의 수보다는 많아야 한다( $M \geq s$ )는 제한 조건상 더 이상은 시도하지 않았다. 물론, 센서 개수 자체를 늘린다면 더 나은 결과를 얻을 수 있겠지만, 이 연구의 대상이 발달된 캐비테이션이 아닌 초생 캐비테이션에 있었기에 이 역시 시도하지 않았다.

#### 4. 결 론

이 연구의 목적은 프로펠러의 초생 캐비테이션을 탐지하기 위한 수단중의 하나로 음향적 정위 방법을 제안하는 것이었다. 압축센싱 이론에서 활용되고 알고리즘 중 하나인 탐욕 알고리즘을 도입하고자 하였으나, 이는 음원 개수의 추정을 전제로 하였다. 특이치 분해가 OSDM의 유효 계수를 추정할 수 있는 것에 착안하여, 음원 개수를 간접적으로 산출하기 위한 방법을 이론적으로 전개하였다. 캐비테이션 터널 시험 데이터를 바탕으로 제안된 방법의 타당성을 검증할 수 있었고, 기존 컨벡스 최적화 방법에 대한 좋은

대안이 될 수 있음도 확인하였다. 물론, 발달된 캐비테이션에 대해서는 제안된 방법의 적용이 어려웠다. 추가의 센서 사용 또는 다른 알고리즘에 대한 연구가 필요한 것으로 판단되므로, 이에 대해서는 향후 연구로 남겨둔다.

#### 후 기

This paper was supported by the Changwon National University Research Fund in 2021.

#### References

- (1) Han, H. S., Jeon, S. H., Lee, C. W. and Kim, Y. H., 2019, Study for Estimation of Propeller Cavitation Sound using Underwater Radiated Sound from the Hull Estimating with Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 705~713.
- (2) Lee, J.-H. and Seo, J.-S., 2013, Application of Spectral Kurtosis to the Detection of Tip Vortex Cavitation Noise in Marine Propeller, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 40, No. 1, pp. 222~236.
- (3) Park, C., Seol, H., Kim, K. and Seong, W., 2009, A Study on Propeller Noise Source Localization in a Cavitation Tunnel, Ocean Engineering, Vol. 36, No. 9-10, pp.754~762.
- (4) Lee, J.-H., Kim, D.-H. and Shin, Y.-H., 2018, Hyperbolic Localization of Incipient Tip Vortex Cavitation in Marine Propeller Using Spectral Kurtosis, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 110, pp. 442~457.
- (5) Candès, E. and Tao, T., 2005, Decoding by Linear Programming, IEEE Transactions on Information Theory, Vo. 51, No. 12, pp. 4203~4215.
- (6) Donoho, D. L., 2006, Compressed Sensing, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 52, No. 4, pp. 1289~1306.
- (7) Eldar, Y. C. and Kutyniok, G., 2012, Compressed Sensing: Theory and Applications, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (8) Edelmann, G. F., Gaumond, C. F., 2011,

Beamforming Using Compressive Sensing, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 130, No. 4, pp. EL232~EL237.

(9) 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.

(10) Xenaki, A., Gerstoft, P. and Mosegaard, K., 2014, Compressive Beamforming, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 136, No. 1, pp. 260~271.

(11) Malioutov, D., Cetin, M. and Willsky, A. S., 2005, A Sparse Signal Reconstruction Perspective for Source Localization with Sensor Arrays, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 53, No. 8, pp. 3010~3022.

(12) Kim, Y. H., Seol, H. S., Lee, J. H. and Jeong, H. S., 2020, Localization and Source-strength Estimation of Tip Vortex Cavitation Noise Using Compressive Sensing, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 329~339.

(13) Foucart, S. and Rauhut, H., 2013, A Mathematical Introduction to Compressive Sensing. Springer, New York.

(14) Grant, M. and Boyd, S., 2019, CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming, Version 2.1, <http://cvxr.com/cvx/>.

(15) Candès, E. J., 2019, 1<sub>1</sub>-Magic. <https://statweb.stanford.edu/~candes/11magic/>.

(16) Antoni, J., 2006, The Spectral Kurtosis: A Useful Tool for Characterising Non-Stationary Signals, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, No. 2, pp. 282~307.

(17) Kim, Y. and Nelson, P. A., 2004, Optimal Regularisation for Acoustic Source Reconstruction by Inverse Methods., Journal of Sound and Vibration, Vol. 275, No. 3-5, pp. 463~487.

(18) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2010, Random

Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition, Wiley, Hoboken, N.J.

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

(20) Lee, J.-H., Jung, J.-K., Lee, K.-J., Han, J.-M., Park, H.-G. and Seo, J.-S., 2012, Experimental Estimation of a Scaling Exponent for Tip Vortex Cavitation via Its Inception Test in Full-and Model-Ship, Journal of Hydrodynamics, Vol, 24, pp. 658~667.

(21) Chang, N. A. and Ceccio, S. L., 2011, The Acoustic Emissions of Cavitation Bubbles in Stretched Vortices, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 130, No. 5, pp. 3209~3219.

### 부 록: OMP 알고리즘

- Input: A, y

- Initialization:  $supp^{[0]} = \emptyset, x^{[0]} = 0$

- Iteration: Repeat for a specified stopping criterion  $supp^{[i+1]} = supp^{[i]} \cup \{k^{[i]}\},$

where  $k^{[i]} = \arg \min_k |A^H(y - Ax^{[i]})|_k, \hat{x}^{[i+1]} = A^+y$

where  $A^+ = (A^HA)^{-1}A^H$  (the pseudo-inverse of A)

- Output:  $\hat{x}$



**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 department of mechanical engineering of Changwon National Univ. as associate professor. His research interest includes several fields such as air-spring, acoustic cavitation and etc.

# 도심지역과 비도심지역 군용비행장의 소음 피해범위 비교분석

## A Comparative Analysis for Noise Damage Range of Military Airfields in Urban and Non-urban Areas

김 경 민\* · 이 병 찬†  
Kyoung Min Kim\* and Byung Chan Lee†

(Received August 26, 2021 ; Revised November 1, 2021 ; Accepted November 1, 2021)

**Key Words :** WECPNL(가중등가소음레벨),  $L_{den}$ (주석야평균소음도), Aircraft Noise Evaluation Unit(항공기소음 평가단위), Noise Exposure Damage Area(소음노출피해면적), Noise Contour Line(소음등고선)

### ABSTRACT

In this study, the aircraft noise evaluation method WECPNL, currently used by the military in airfields in urban and nonurban areas, and  $L_{den}$ , which is scheduled to be used starting in 2023, were compared and analyzed. Moreover,  $L_{den}$  was calculated from actual data and using the conversion formula presented by the Ministry of Environment. The differences between these calculated values of  $L_{den}$  were compared, and the noise exposure damage area was compared by creating a noise map. There was a difference of about 1 dB(A) between  $L_{den}$  calculated from the actual data for Military Airfield A in urban areas and  $L_{den}$  calculated using the conversion formula. The difference between  $L_{den}$  calculated from actual data for Military Airfield B in nonurban areas and  $L_{den}$  calculated using the conversion formula was about 3 dB(A). The WECPNL map appeared smaller for Military Airfield A in urban areas and appeared larger for Military Airfield B in nonurban areas. The difference between  $L_{den}$  calculated with the conversion formula and the noise exposure damage areas of Airfields A and B may be interpreted as the difference between urban and nonurban areas. However, this may be due to the different dimensions and the number of flights at each airfield. Before the evaluation unit is changed to  $L_{den}$  in 2023, it is necessary to present more reliable  $L_{den}$  conversion values for each airport by conducting more studies that consider the factors for each location and area of the airport.

## 1. 서 론

현대 사회는 과학기술과 산업기술, 교통수단의 발전은 많은 편리함을 제공하고 그 중 항공기술의 큰 발전으로 항공기가 교통수단으로써 보편화됨에 따라 항공기 소음이 심각한 문제로 대두되고 있다.

항공기 소음은 소음도가 크고 영향 범위가 광범위하며 비행장의 주변 지역에서 지속적으로 발생하기 때문에 피해의 질이나 정도 면에서 주변 주민들에게 건강과 심각한 정신적 손상, 생활방해 등을 야기시키고 있으나 항공기 소음의 특성상 음원 및 전파경로 대책이 기술적·경제적으로 한정적이어서 소음해결이 어려운 상황이다. 특히 각각의 운항패턴에 따른 균용

† Corresponding Author ; Dept. of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation, Professor  
E-mail : bclee@ut.ac.kr

\* Dept. of Green Bio Engineering, Korea National University of Transportation, Student

‡ Recommended by Editor Jung Bin Im

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

비행훈련으로 인한 소음발생은 운항경로 주변 지역에서 생활하는 주민들의 소음피해와 인근지역 주민들의 많은 민원을 야기한다. 이러한 분쟁 해결 관련 정책 수립의 일환으로 항공기 소음 피해를 평가하기 위해 여러 가지 항공기 소음 평가방법을 사용하고 있다.

항공기 소음은 고주파 성분을 많이 포함하고 있고 이러한 항공기 소음에 대한 평가는 일반적인 소음단위인 dB(A)로 음의 시끄러움을 고려한 항공기 소음 평가단위를 사용하여 왔다. 항공기소음 평가는 항공기 기종에 따른 소음평가와 공항 주변과 그 외 지역의 소음 평가로 나누어진다. 개별 항공기 기종에 따른 소음평가는 항공기에 대한 소음인가의 기준으로 사용되며, 공항 주변지역의 소음평가는 많은 항공기의 이·착륙을 대상으로 한다.

우리나라는 현재 WECPNL을 항공기 소음 평가방법으로 사용하고 있다. WECPNL은 ICAO(국제민간항공기구)가 1971년에 공포한 Annex 16 Aircraft Noise 중에서 많은 수의 항공기에 의해 오랜 기간 연속 폭로된 소음척도로 제시된 것이다. 국내에서는 ICAO에서 제안한 WECPNL을 간략화한 평가방법을 채택하여 사용하고 있다. 항공기가 통과할 때 측정된  $L_{max}$ 를 기준으로 하루 시간대별 항공기 통과횟수와 지속시간을 적용하여 산출하는 방법이다. 현행 항공기 소음평가방법인 WECPNL은 등가소음도 방식을 적용 중인 공장, 도로, 생활소음 등 다른 환경소음과 달라 비교하기 어렵고, 지속적인 소음노출의 총합을 반영하기에 한계가 있으며, 미국, 유럽 등 대부분의 선진국에서도  $L_{den}$ 을 소음평가방법으로 채택하고 있으므로 국가 간 항공기 소음 비교에도 어려움이 있다 (1). WECPNL과  $L_{den}$ 의 관계 연구(2,3)는 많이 진행되었지만 공항별 상관관계 연구는 미미한 실정이다.

우리나라는 국립환경과학원에서 고시한 소음진동공정시험기준의 개정안(4)에 의해 2018년부터 2022년까지 5년간 WECPNL과  $L_{den}$ 을 병행 사용하고 2023년부터  $L_{den}$ 을 사용하는 정책을 시행하고 있다.

현재 우리나라의 군용 항공기 소음 피해보상 기준은 도심지역 WECPNL 85, 비도심지역 WECPNL 80인데(5),  $L_{den}$ 으로 적용되었을 경우 도심지역 70 dB(A), 비도심지역 66 dB(A)이다. 항공기 소음 평가방법이 WECPNL에서  $L_{den}$ 으로 변경됨으로써 기준에 피해보상을 받던 지역이 피해보상을 받지 못하게 되거나 피해보상을 받지 못했던 지역이 피해보상을 받는 상황

이 발생할 수 있다.

이 연구에서는 도심지역과 비도심지역의 군용비행장을 통해 현재 사용되고 있는 항공기 소음 평가방법인 WECPNL과 2023년부터 사용예정인  $L_{den}$ 을 비교·분석하고 실측데이터와 환경부가 제시한 환산식을 통해 산출된  $L_{den}$ 으로 피해보상기준을 정하면 발생하게 될 문제점 및 대안을 제시하고자 한다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 연구내용

연구대상지역은 도심지역의 군용비행장 A, 비도심지역의 군용비행장 B로 선정하였고 측정지점은 다음 Fig. 1과 같다. 군용비행장 B는 최근 데이터(B(1))와 5년 전 데이터(B(2))를 비교하고자 한다. 군용비행장

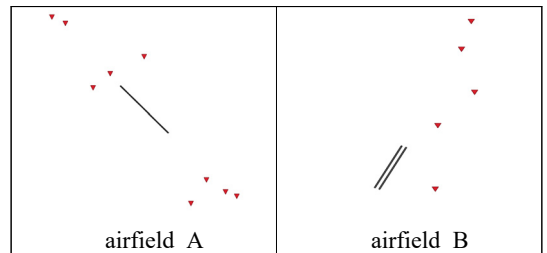


Fig. 1 Measurement points of airfield A and airfield B

Table 1 Combat plane main specifications

(a) F-5 E/F main specifications			
Length	14.45 m	Width	8.13 m
Height	4.08 m	Own weight	4410 kgf
Maximum take-off weight	9920 kgf	Cruising distance	2863 km
Thrust	5000 lbs	Maximum speed	Mach 1.64
Developer	Nothrop T-38 talon	Maximum ascent height	16 200 m
Engine	GEJ-85GE-21B		
(b) KF-16 main specifications			
Length	15.03 m	Width	9.96 m
Height	4.88 m	Own weight	7681 kgf
Maximum take-off weight	21 733 kgf	Cruising distance	4220 km
Thrust	23 000 lbs	Maximum speed	Mach 2.02
Developer	General dynamics	Maximum ascent height	18 200 m
Engine	PW F100-PW-229 turbo fan		

A에서 대표적으로 많이 운항되고 있는 전투기 기종은 F-5 E/F이며, 군용비행장 B에서 대표적으로 많이 운항되고 있는 전투기 기종은 KF-16이다. Table 1은 전투기의 주요 제원이다.

연구대상지역을 대상으로 실측데이터와 환경부고시 환산식과 비교하고 소음지도 제작 프로그램을 이용하여 Kim과 Choi 등의(6,7) 소음예측기법을 참고하여 소음지도를 제작한 후 소음피해면적을 비교·분석하고자 한다.

## 2.2 연구방법

### (1) 항공기 소음측정 방법

항공기 소음은 소음·진동공정시험기준, 제2020-27호(2020.8.12.)에 따른 『항공기소음관리기준 측정방법』으로 측정한다.

### (2) WECPNL-L<sub>den</sub> 상관관계식 산정

실제 측정 데이터를 이용하여 지점별, 일별 WECPNL과 L<sub>den</sub>을 도출하고 이를 바탕으로 상관관계식을 산정한다.

### (3) 소음지도제작

소음지도는 도시환경의 다양한 원인에 의하여 발생하는 소음의 크기와 분포를 알기 쉽게 표현하고 도시개발사업과 도로건설사업 등으로 인하여 야기될 수 있는 소음을 예측함으로써 소음이 주민들에게 미치는 영향이나 효과적인 소음 제어를 위한 정보를 제공할 수 있다(8).

이 연구에서는 FAA(미연방항공국)에서 항공기 소음 예측 시 사용하고 있는 프로그램인 소음예측모델(INM, Integrated Noise Model 7.0)을 이용하여 소음지도를 작성하였다. 예측 WECPNL과 예측 L<sub>den</sub>을 산출하여 실측치와 비교하고 신뢰성을 검증하였다.

INM 프로그램은 공항 근처에서 항공기 소음영향을 평가한 컴퓨터 소프트웨어 모델이다. SAE AIR 1845 표준의 알고리즘 및 프레임 워크를 기반으로 개발되었으며, NPD(noise-power-distance) 데이터를 사용하여 이·착륙 모드, 추력 설정 및 평가단위, 음향지향성 및 고도별 소음 계산을 추정한다. INM은 사전 선택된 위치에서 소음 등고선 또는 소음 레벨을 출력 할 수 있다. INM 프로그램은 모델링 대상 공항이나 헬기장 주변의 현재 항공기 소음영향평가에 있

어 INM의 예측 기법을 적용하기에 적합하다(1).

INM은 국내에서 한국공항공사 등에서도 사용되고 있는 프로그램이며, 또한 유럽과 미국에서 실험으로 그 정확도를 검증한 결과 기종별로 실측치와 모델치의 편차가 평균 2 dB 정도로 그 정확성이 입증되었고 지형 및 기상상태 등을 고려한 모델결과를 표현하고 있다(9).

비행훈련에 의한 주변지역의 정확한 소음지도를 작성하기 위해서는 비행자료 뿐만 아니라 항공기 운항자료 및 지리정보(10)에 관한 정확한 자료를 수집해야 한다. 따라서 이 연구에서는 INM의 입력 데이터로 소음실측 시 관측한 데이터와 공군비행장의 위·경도, 기상정보, 기종, 엔진형식, 활주로 좌표 및 폭, 비행경로 및 운항횟수 등을 적용하였다.

### (4) 소음피해면적 비교

군용 항공기소음 피해보상 기준은 도심지역 WECPNL 85, 비도심지역 WECPNL 80으로 각각의 소음등고선과 환경부에서 제시한 환산식(11)을 이용해 도출한 L<sub>den</sub>의 소음등고선을 비교한다.

군용비행장 A는 도심지역에 있는 비행장이지만 비도심지역 기준으로도 비교하고, 군용비행장 B는 비도심지역에 있는 비행장이지만 도심지역 기준으로도 비교한다.

## 3. 연구결과 및 분석

### 3.1 WECPNL-L<sub>den</sub> 상관관계식

이 연구에서는 도심지역과 비도심지역의 군용비행장을 대상으로 L<sub>den</sub>의 환산식을 도출하고 환경부에서 제시한 환산식과 비교하였다.

Tables 2~4의 각 지점 소음도 WECPNL은 지속시간 평균치( $\bar{D}$ )가 30초 이상일 경우에 대한 보정값  $[+10\log(\bar{D}/20)]$ 이 반영된 값이다. L<sub>den</sub>은 소음진동공정시험기준에 명시된 방법을 이용하여 구하였다.

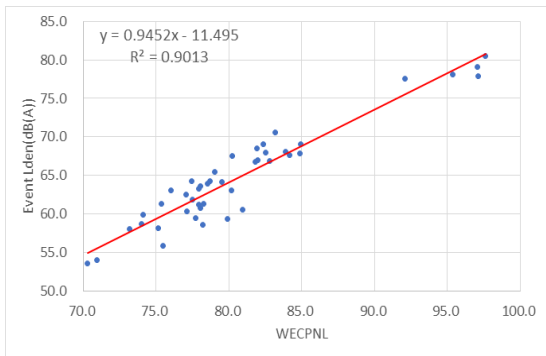
#### (1) 도심지역 군용비행장 A

도심지역의 군용비행장 A의 실측데이터로 산출한 L<sub>den</sub>은 68.8 dB(A)로 나타났고, 환경부에서 제시한 환산식을 이용해 산출한 L<sub>den</sub>은 69.7 dB(A)로 약 1 dB(A)의 차이가 나타났다.

도심지역 군용비행장 A의 측정지점 9개의 WECPNL과 L<sub>den</sub> 데이터는 Table 2와 같고 상관관계는

**Table 2** WECPNL and  $L_{den}$  at points around military airfield A

Point	WECPNL	$L_{den}$ [dB(A)]
1	86	68
2	81	62
3	75	62.6
4	98	78.8
5	84	68.4
6	77	61.8
7	80	65.6
8	76	60
9	74	59.8



**Fig. 2** Correlation between WECPNL and  $L_{den}$  at points around military airfield A

Fig. 2와 같다.

Fig. 2는 각 지점의 일별 WECPNL과  $L_{den}$ 의 상관관계를 비교하였고 WECPNL과  $L_{den}$ 의 상관관계에서 결정계수  $R^2$ 은 약 0.9로 적합도가 높으며 상관관계식은 식 (1)과 같다.

$$L_{den} = (0.9452 \times WECPNL) - 11.495 \quad (1)$$

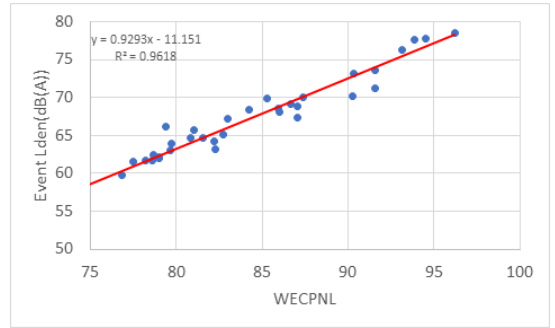
(2) 비도심지역 군용비행장 B(1)

비도심지역의 군용비행장 B(1)의 실측데이터로 산출한  $L_{den}$ 은 63 dB(A)로 나타났고, 환경부에서 제시한 환산식을 이용해 산출한  $L_{den}$ 은 66 dB(A)로 약 3 dB(A)의 차이가 나타났다.

A 비행장과 B(1) 비행장의 데이터의 분포는 상당히 유사하게 측정되어 상관관계식이 비슷하게 나타난 것으로 판단된다.

**Table 3** WECPNL and  $L_{den}$  at points around military airfield B(1)

Point	WECPNL	$L_{den}$ [dB(A)]
1	83	66
2	94	77
3	80	64
4	85	68
5	88	69



**Fig. 3** Correlation between WECPNL and  $L_{den}$  at points around military airfield B(1)

비도심지역 군용비행장 B(1)의 측정지점 5개의 WECPNL과  $L_{den}$  데이터는 Table 3과 같고 상관관계는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3은 WECPNL과  $L_{den}$ 의 상관관계에서 결정계수  $R^2$ 은 약 0.96으로 적합도가 높으며 상관관계식은 식 (2)와 같다.

$$L_{den} = (0.9293 \times WECPNL) - 11.151 \quad (2)$$

(3) 비도심지역 군용비행장 B(2)

B(2)의 실측데이터로 산출한  $L_{den}$ 은 64 dB(A)로 나타났고, 환경부에서 제시한 환산식을 이용해 산출한  $L_{den}$ 은 66 dB(A)로 약 2 dB(A)의 차이가 나타났다. 도심지역의 군용비행장이  $L_{den}$  환산치의 차이가 더 작게 나타났다.

비행장 B(1)과 비행장 B(2)의 데이터분포는 같은 비행장임에도 불구하고 운항경로, 이·착륙 패턴 등의 차이로 데이터분포가 유사하지 않게 나타난 것으로 판단된다.

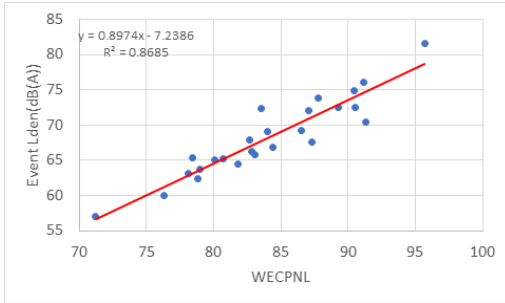
비도심지역 군용비행장 B(2)의 지점별 WECPNL과

**Table 4** WECPNL and  $L_{den}$  at points around military airfield B(2)

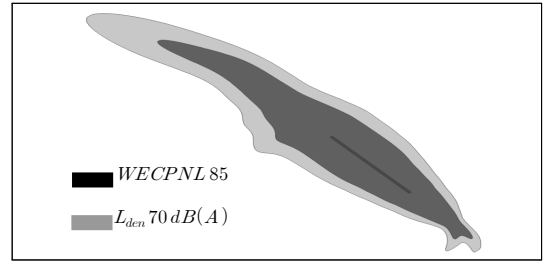
Point	WECPNL	$L_{den}$ [dB(A)]
1	88	70
2	92	77
3	83	66
4	79	65
5	84	70

**Table 5** Areas for WECPNL and  $L_{den}$  noise contour (unit:  $km^2$ )

Airfield A	WECPNL 85	$L_{den}$ 70 dB(A)
	10.9	17.4
Airfield B(1)	WECPNL 80	$L_{den}$ 66 dB(A)
	69.1	53.6
Airfield B(2)	WECPNL 80	$L_{den}$ 66 dB(A)
	57.7	47.2



**Fig. 4** Correlation between WECPNL and  $L_{den}$  at points around military airfield B(2)



**Fig. 5** Comparison of noise contours at military airfield A (WECPNL 85,  $L_{den}$  70 dB(A))

$L_{den}$ 은 Table 4와 같고 상관관계는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4의 WECPNL과  $L_{den}$ 의 상관관계에서 결정계수  $R^2$ 은 약 0.87로 적합도가 높으며 상관관계식은 식 (3)과 같다.

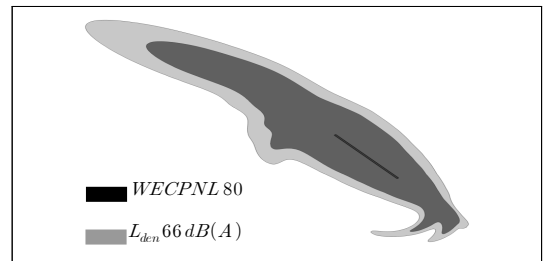
$$L_{den} = (0.8974 \times WECPNL) - 7.2386 \quad (3)$$

### 3.2 소음노출면적 비교

Table 5는 군용비행장 A, 군용비행장 B(1)과 군용비행장 B(2)의 소음등고선의 면적을 나타낸다.

Fig. 5는 군용비행장 A에서 도심지역의 피해보상 기준으로 WECPNL 85와  $L_{den}$  70 dB(A)의 소음등고선을 비교한 것이고, Fig. 6은 비도심지역의 피해보상 기준으로 WECPNL 80과  $L_{den}$  66 dB(A)의 소음등고선 또한 비교를 한 것이다. Fig. 7과 Fig. 8은 군용비행장 B(1)와 군용비행장 B(2)에서 비도심지역의 피해보상 기준으로 WECPNL 80과  $L_{den}$  66 dB(A)의 소음등고선을 비교한 것이고, Fig. 9와 Fig. 10은 도심지역의 피해보상 기준으로 WECPNL 85와  $L_{den}$  70 dB(A)의 소음등고선을 비교한 것이다.

소음노출 피해면적을 보면 도심지역의 군용비행장 A



**Fig. 6** Comparison of noise contours at military airfield A (WECPNL 80,  $L_{den}$  66 dB(A))

에서 WECPNL 85의 면적은  $10.9 km^2$ ,  $L_{den}$  70 dB(A)의 면적은  $17.4 km^2$ 로 WECPNL 85의 면적이 약  $6.5 km^2$  작게 나타났다. 비도심지역을 기준으로 도출한 소음노출 피해면적도 WECPNL이 더 작게 나타났다.

비도심지역 군용비행장 B(1)에서는 WECPNL 80의 면적은  $69.1 km^2$ ,  $L_{den}$  66 dB(A)의 면적은  $53.6 km^2$ 로 WECPNL 80의 면적이 약  $15.5 km^2$ 크게 나타났다. 도심지역을 기준으로 도출한 소음노출 피해면적도 WECPNL이 더 크게 나타났다.

비도심지역 군용비행장 B(2)에서는 WECPNL 80의 면적은  $57.7 km^2$ ,  $L_{den}$  66 dB(A)의 면적은  $47.2 km^2$ 로 WECPNL 80의 면적이 약  $10.5 km^2$ 크게 나타났다.

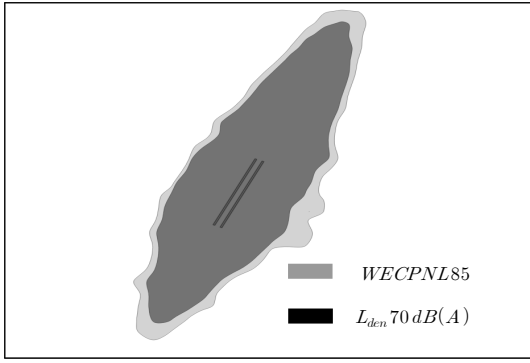


Fig. 7 Comparison of noise contours at military airfield B(1) (WECPNL 80,  $L_{den}$  66 dB(A))

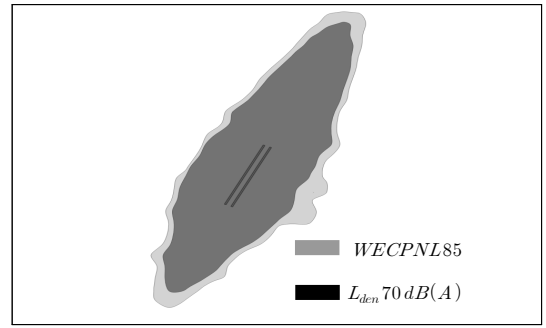


Fig. 9 Comparison of noise contours at military airfield B(1) (WECPNL 85,  $L_{den}$  70 dB(A))

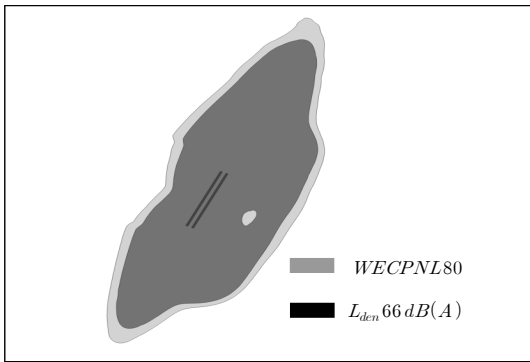


Fig. 8 Comparison of noise contours at military airfield B(2) (WECPNL 80,  $L_{den}$  66 dB(A))

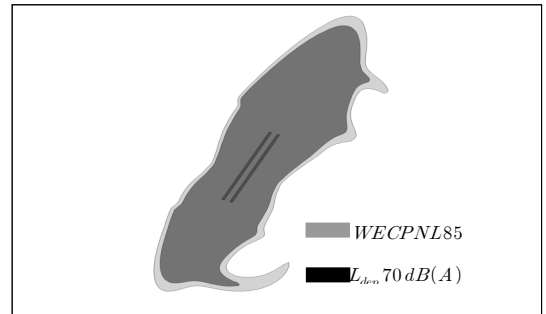


Fig. 10 Comparison of noise contours at military airfield B(2) (WECPNL 85,  $L_{den}$  70 dB(A))

도심지역을 기준으로 도출한 소음노출 피해면적도 WECPNL이 더 크게 나타났다.

도심지역의 비행장 A는 WECPNL 면적이 더 작게 도출되었고, 비도심 지역의 비행장 B는 WECPNL 면적이 더 크게 도출되었다. 도심지역의 비행장을 비도심지역 기준으로 비교하여도 결과는 유사하게 나타났고, 비도심 지역의 비행장을 도심지역 기준으로 비교하여도 결과는 유사하게 나타났다. WECPNL 5,  $L_{den}$  4 dB(A) 차이에서도 소음노출 피해면적이 유사하게 나타난 것은 도심·비도심지역의 차이가 아닌 비행장의 특성이라고 판단된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 도심지역과 비도심지역의 군용비행장을 대상으로  $L_{den}$ 의 환산식을 도출하고 소음지도를

이용하여 소음노출 피해면적을 비교·분석하였다.

비행장 A와 비행장 B의  $L_{den}$  환산식과 소음노출 피해면적 차이가 도심·비도심지역의 차이라고 볼 수도 있지만, 각 비행장에서 많이 운항되는 전투기의 제원이 다르고 운항횟수가 다르기 때문에 나타나는 차이일 수도 있다. 특히 소음노출 피해면적은 도심·비도심지역의 기준에서 WECPNL이 5,  $L_{den}$ 이 4 dB(A) 차이에서도 소음노출 피해면적이 유사하게 나타난 것은 도심·비도심지역의 차이가 아닌 비행장의 특성이라고 판단된다.

2023년부터 평가단위가  $L_{den}$ 으로 변경된다면 비행장 A는 기존의 피해보상을 받던 지역보다 범위가 넓어져 피해보상 지역이 늘어나고, 비행장 B는 기존의 피해보상을 받던 지역보다 범위가 좁아져 피해보상을 받던 지역이 피해보상을 받지 못하는 경우가 발생하여 보다 많은 민원을 야기할 것으로 예상된다.

따라서, 2023년  $L_{den}$ 으로 평가단위가 변경되기 전에 공항의 위치별 면적별 인자들을 고려해 더 많은



연구들을 진행하여 보다 신뢰도가 높은 시뮬레이션 데이터와  $L_{den}$ 의 환산치를 공항별로 제시할 필요성이 있다.

### 후 기

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C1009356).

이 연구는 환경부의 폐자원에너지화 재활용 전문인력 양성사업으로부터 지원을 받았음(YL-WE-19-002).

### References

(1) Kim, K. M., 2021, Comparative Analysis of the Noise Exposure Population according to the Change of Aircraft Noise Evaluation Unit in Non-urban Areas, Master's Thesis in Engineering, Korea National University of Transportation, Korea.

(2) Park, Y. H., 2014, Aircraft Noise Measurement and Evaluation, Journal of KSNVE, Vol. 24, No. 2, pp. 19~22.

(3) Kim, K. B., 2017, Comparison and Correlation Analysis of Aircraft Noise Assessment Units, Master's Thesis in Engineering, Seoul National University, Korea.

(4) National Institute of Environmental Research, 2020, Measurement Method of Aircraft Noise Heard on the Ground for Management Standards, Noise and Vibration Process Test Standards, No. 2020-27.

(5) Korea Ministry of Government Legislation, 2020, Enforcement Decree of the Military Airfields and Military Firing Ranges Noise Prevention and Compensation Act, No. 31173.

(6) Lee, B. C. and Kim, M. J., 2007, A Study on the Reduction of Sumulation Errors in the Prediction of Military Aircraft Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 249~256.

(7) Lee, B. C. and Choi, S. K., 2014, Calculation of Nositie Exposed Population Using the Output Area Population, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 556~557.

(8) Lee, B. C. and Choi, S. K., 2014, A Comparison of Estimation Method for Population Exposed to Noise Using Noise Map, Transactions of the Korean Society for Nositie and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 10, pp. 802~808.

(9) Lee, C. H., 2019, Analysis of Noise Characteristics of Airports According to Aircraft Noise Evaluation Unit Change, Master's Thesis in Engineering, Korea National University of Transportation, Korea.

(10) Korea Land and Geospatial InformatiX Corporation, Korea National Spatial Data Infrastructur Portal, <http://www.nsd.go.kr>.

(11) Ministry of Environment, 2017, Press Release.



**Kyoung Min Kim** received B.S. and M.S. degrees in Environmental Engineering from Korea National University of Transportation, in 2019 and 2021. He is Ph.D. student in the Dept. of Green Bio Engineering at Korea National University of Transportation. His research interests are aircraft nositie and noise map.



**Byung Chan Lee** received B.S. degree from Seoul National University in 1985, M.S. and Ph.D. degrees from KAIST in 1987 and 1996. He worked LG Electronics Lab. Dr. Lee is currently a professor at the department of environmental engineering at Korea National University of Transportation in Chungju, Korea. His research interests are in the areas of environmental noise and vibration.

# 구조-음향 연성 시스템의 진동모드에 의한 소음 예측

## Prediction Framework for Vibration Mode Induced Noise of Structure-acoustic Coupling System

황재승<sup>†</sup> · 송민정<sup>\*</sup> · 류종관<sup>\*\*</sup>

Jae-Seung Hwang<sup>†</sup>, Min-Jeong Song<sup>\*</sup> and Jong-Kwan Ryu<sup>\*\*</sup>

(Received September 1, 2021 ; Revised September 29, 2021 ; Accepted October 7, 2021)

**Key Words :** Acoustic Mode(음향 모드), Structural Vibration Mode(구조진동 모드), Finite Element Model(유한요소 모델), Time Domain Structure-acoustic Coupling Analysis(시간영역 구조음향 연성 해석), Prediction of Acoustic Mode(음향모드 예측), Heavy Weight Floor Impact Sound(중량 충격음)

### ABSTRACT

An acoustic domain combined with a flexible structure induces a unique sound field due to the interaction between a fluid and the structure at acoustic-structure boundaries. In this study, the characteristics of the acoustic modes induced by a structural vibration mode were examined, and the acoustic noise from the vibration mode was predicted using a numerical analysis. For this, a reverberation chamber with a shell at one side was constructed as a finite-element model, and the modal parameters of the vibration and acoustic modes were evaluated using an eigenvalue analysis. In addition, the structural vibration and sound pressure caused by a impulse load impacting the shell were analyzed with a time-domain acoustic-structure coupling analysis, and an acoustic mode was analyzed from a specific vibration mode by identifying the vibration and acoustic modal response from the measured responses. The framework for predicting the acoustic mode presented in this study can enhance the understanding of sound pressure induced by vibration. Further, it is expected that this framework could be applied to predict the heavy weight floor impact sound from the vibration of a slab in an apartment.

### 1. 서 론

구조진동은 구조체가 결합된 음환경에 따라 음영역에 고유의 음장을 형성한다. 음영역과 구조체의 경

계면에서 진동과 유체의 상호작용에 의하여 유발된 음장은 연성 정도에 따라 다르지만 각각 독립적인 영역에서의 진동과 음장과는 또 다른 음장이 발현하게 된다. 공동주택에서 발생하는 중량충격음은 구조-음향 다중 물리공간에서 발생하는 대표적인 구조기인

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, School of Architecture, Chonnam National University, Professor  
E-mail : jshwang@jnu.ac.kr

<sup>\*</sup> Member, School of Architecture, Chonnam National University, Research Professor

<sup>\*\*</sup> Member, School of Architecture, Chonnam National University, Professor

‡ Recommended by Editor Jin Yun Chung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

음압으로 구조체(슬래브)의 진동에 의해 유발된다는 점에서 두 물리량 간의 강한 상관성을 가지는 것으로 예상되고 있다.

구조-음향이 연계된 음영역에서 구조체의 진동으로 음압 또는 소음을 예측하는 것은 음환경(크기 및 형상, 음경계조건)에 따라 불확실성이 내재하지만, 진동 계측의 용이성, 진동량에 의한 포괄적 소음규제나 소음알람기능 등의 측면에서 두 물리량 간의 상관성을 도출하는 것은 매력적인 연구 대상으로 인식되어 왔다. 또한, 바닥충격을 사후확인제도 도입과 관련하여 설계단계에서 바닥충격음을 예측하고 이에 따른 소음 저감 방안을 수립하는 기법으로 바닥 진동에 의한 수음실 소음예측의 필요성은 증대하고 있다.

슬래브 진동과 그에 의한 소음과의 상관성에 근거하여 계측된 슬래브 진동으로 소음을 예측하고자 하는 연구가 있다<sup>(1,2)</sup>. 이들 연구는 진동레벨과 소음레벨의 상관성을 추정한 것으로 경량충격음의 경우 0.95 내외의 매우 높은 상관계수를 가지는 것으로 나타나고 있다. 그에 비해 중량 충격음의 상관계수는 0.46 ~ 0.9 사이로 편차가 크게 나타나고 있으며, 그 결과 가속도레벨을 중간소음 법적기준에 대한 판단기준 데이터로 활용하는 것은 정확도 측면에서 한계가 있음을 제시하고 있다. 중량충격음의 진동 상관성 개선을 위해 진동모드와 음향모드 관계를 이용한 연구가 있다<sup>(3)</sup>. 자유장에서의 진동과 음압레벨의 상관성은 0.91로 매우 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났으나 구조-음향이 연계된 공간에서는 진동레벨과 음압레벨의 상관관계는 모드응답의 기여도, 구조체가 포함된 음환경의 모달특성과 연관된 불확실성에 따라 달라짐을 보였다. 기존 연구를 보면, 구조진동과 음영역 소음의 연관성을 파악하고자 하는 시도는 있었지만 여전히 두 물리량 사이의 정량적인 인과관계는 제시되지 못한 실정이다.

이 연구에서는 구조-음향이 연계된 시스템으로부터 구조진동이 소음로 발견되는 메커니즘을 분석하고, 진동 모달인자뿐만 아니라 음환경이 반영된 음향 모달인자를 이용하여 이들이 수음실의 음향모드 형성에 미치는 영향을 평가함으로써 구조진동모드로부터 수음실 소음을 예측하는 기법을 제시한다. 구조진동-음향 모드응답 예측의 정합성을 평가하기 위하여 시간영역 수치해석을 수행하였다. 진동수 영역 해석은 정상상태(stationary)의 음장해석에 적합한 반면, 충격하중에 의

한 진동이나 이로부터 유발되는 음압(중량충격음과 같은 non-stationary 신호)특성을 반영하기 위해서는 시간영역해석이 적합하기 때문이다. 또한 시간영역해석은 시간이력 raw data를 확보할 수 있으므로 충격하중에 대한 최대진동, 최대음압과 같은 최대응답을 제공하며, 최대응답 발생지점 시간대역에 대한 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼해석과 같은 2차 해석에 의해 최대 가속도레벨, 음압레벨을 용이하게 산정할 수 있다.

수치해석은 한 면의 일부가 셀 구조를 가지는 잔향실을 대상으로 수행하였다. 잔향실은 이상적인 음경계조건을 제공함으로써 진동과 소음의 관계를 명료하게 고찰할 수 있어 수치해석 대상으로 설정한 것이며, 셀 구조는 충격하중에 의하여 진동을 유발하고 잔향실에 중량충격음이 발현되도록 모사한 것이다.

수치해석에 의해 셀, 잔향실 계측위치로부터 진동, 음압 시간이력을 추출하고 이에 모드분해법을 적용하여 진동모드와 음향모드를 각각 구한 후 이 연구에서 제안된 진동의 음향모드 형성특성과 소음 예측기법을 검증하였다.

## 2. 음향모드 발현특성

### 2.1 구조-음향 연성시스템

구조체와 결합된 음영역은 음경계조건 등이 반영된 FEM모델을 이용하여 다음과 같이 구조-음향 연계 시스템으로 나타낼 수 있다<sup>(4-6)</sup>.

$$m \ddot{z} + c \dot{z} + kz + W^T p = E \delta(t) \tag{1a}$$

$$-\rho_a W \ddot{z} + M_a \ddot{p} + C_a \dot{p} + K_a p = 0 \tag{1b}$$

여기서,  $z, p$ 는 구조변위, 음압,  $m, c, k$ 는 구조체 질량, 감쇠, 강성행렬,  $W$ 는 구조체와 음영역의 경계행렬,  $E$ 는 충격하중( $\delta(t)$ )이 작용하는 위치행렬이다. 또한,  $\rho_a, M_a, C_a, K_a$ 는 공기밀도, 음영역의 질량, 감쇠, 강성행렬이다.

구조체와 음영역이 독립된 상태의 모드행렬, 모드응답을 이용하여 구조변위와 음압은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z = \Phi \eta \tag{2a}$$

$$p = \Psi q \tag{2b}$$

여기서,  $\eta, q$ 는 각각, 구조, 음향 모드이며  $\Phi, \Psi$ 는 해당하는

모드행렬이다. 식 (2)를 (1)에 대입하고 component mode synthesis 기법을 이용하면 다음과 같이 진동모드와 음향모드가 연계된 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\eta} + \Sigma_s \dot{\eta} + \Omega_s \eta + \Phi^T W^T \Psi q = \Phi^T E \delta(t) \quad (3a)$$

$$-\rho_a \Psi^T W \Phi \ddot{\eta} + \ddot{q} + \Sigma_a \dot{q} + \Omega_a q = 0 \quad (3b)$$

구조체와 음영역의 질량행렬은 식 (4)와 같이 각각의 모드형상에 대하여 단위행렬 (I)로 정규화된 것이다.

$$\Phi^T m \Phi = I \quad (4a)$$

$$\Psi^T M_a \Psi = I \quad (4b)$$

식 (3)에 사용된 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\Sigma_s = \text{diag}[2\xi_s w_s], \Omega_s = \text{diag}[w_s^2]$$

$$\Sigma_a = \text{diag}[2\xi_a w_a], \Omega_a = \text{diag}[w_a^2]$$

여기서,  $\text{diag}[ ]$  는 대각행렬을 나타내며, 첨자 s는 구조진동, a는 음향모드,  $w_s, \xi_s, w_a, \xi_a$ 는 각각 진동모드의 고유진동수와 감쇠비, 음향모드의 고유진동수와 감쇠비를 나타낸다.

구조체와 음영역의 경계를 나타내는 행렬 W 양변에 모드형상을 곱하여 진동모드와 음향모드의 연성효과를 나타낼 수 있으며 식 (5)와 같이 연성행렬을 정의한다.

$$\gamma = \Psi^T W \Phi \quad (5)$$

연성행렬  $\gamma$ 의 사이즈는 음영역, 구조체 FEM 해석모델의 차수에 의하여 결정된다. 음향모드는 모든 진동모드에 의하여 영향을 받지만, 두 모드의 고유진동수가 멀리 떨어져 있으면 영향이 미미하므로 인근 진동모드만을 고려한다. 식 (3)으로부터 인접한 진동, 음향모드만을 고려하여 나타낸 2계도 연성 운동방정식은 식 (6)과 같다.

$$\ddot{\eta}_i + 2\xi_s w_s \dot{\eta}_i + w_s^2 \eta_i + \gamma_{ij} q_j = \phi_i^T E \delta(t) \quad (6a)$$

$$-\rho_a \gamma_{ji} \ddot{\eta}_i + \ddot{q}_j + 2\xi_a w_a \dot{q}_j + w_a^2 q_j = 0 \quad (6b)$$

여기서,  $\phi_i$ 는 i-번째 진동모드( $\eta_i$ )의 모드형상이며 j-번째 음향모드( $q_j$ )와는 연성행렬의 요소 ( $\gamma_{ij}$ )에 의하여 연계된다. 두 모드의 고유진동수가 인접하여 두 모드

만이 강하게 연계된다고 가정한 것이며, 수식 전개 편의를 위하여 이후부터 특정 모드를 나타내는 첨자는 생략하였다.

연성행렬의 요소( $\gamma_{ij}$ )는 식 (7)과 같이 연성효과를 나타내는 새로운 변수로 정의한다.

$$g_s = \gamma_{ij} \quad (7a)$$

$$g_a = \gamma_{ji} \quad (7b)$$

식 (5)의 연성행렬  $\gamma$ 는 전치행렬 특성에 의해  $g_s = g_a$  이나 적용하는 모드를 구분하기 위하여 다른 첨자로 설정한 것이다. 식 (7)을 식 (6)에 대입하면 식 (8)과 같이 더욱 간단히 연성된 두 모드의 운동방정식을 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\eta} + 2\xi_s w_s \dot{\eta} + w_s^2 \eta + g_s q = \phi_i^T E \delta(t) \quad (8a)$$

$$-\rho_a g_a \ddot{\eta} + \ddot{q} + 2\xi_a w_a \dot{q} + w_a^2 q = 0 \quad (8b)$$

식 (8)에 라플라스 변환을 적용하여 진동(가속도)과 음향모드는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\eta}(s) = \frac{s^2 F_a(s)}{F_s(s) F_a(s) + \rho_a g_s g_a s^2} X(s) \quad (9a)$$

$$q(s) = \frac{\rho_a g_a s^2}{F_s(s) F_a(s) + \rho_a g_s g_a s^2} X(s) \quad (9b)$$

여기서,  $F_s(s) = s^2 + 2\xi_s w_s s + w_s^2$ ,  $F_a(s) = s^2 + 2\xi_a w_a s + w_a^2$ 이다.

또한, 첨자가 아닌 s는 라플라스변수, X(s)는 모달충격하중( $\phi_i^T E \delta(t)$ )의 라플라스변환이다. 식 (9)는 충격하중으로부터 진동(가속도)과 음향모드(음압)로의 전달함수를 나타내고 있다.

진동-음향 연성효과는 분모의  $g_s, g_a$  값에 의하여 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한 식 (9)의 분모는 연성효과에 의하여 두 개의 모드가 합성된 형태를 가지고 있으므로 이를 다시 두 개의 단자유도 모드로 분해할 수 있다. 즉 다음과 같이 식 (9)의 분모가 두 개의 독립된 형태로 분해된다.

$$F_s(s) F_a(s) + \rho_a g_s g_a s^2 = (s^2 + 2\xi_1 w_1 s + w_1^2)(s^2 + 2\xi_2 w_2 s + w_2^2) \quad (10)$$

두 개의 단자유도로 분해하면 원래의 진동, 음향모

드의 고유진동수와 감쇠비가 연성효과에 의해 변화된 두 개의 고유진동수( $w_1, w_2$ )와 감쇠비( $\xi_1, \xi_2$ )를 가진다. 이때  $g_s, g_a$  값이 클수록 연성효과에 의하여 원래의 진동, 소음 모드의 진동수, 감쇠비가 새로운 진동수, 감쇠비와의 차이가 나타나게 된다.

**2.2 진동모드에 의한 음영역 소음 예측**

만약 진동모드를 알고 있다면, 인접 음향모드는 식 (8b)의 라플라스 변환을 통하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(s) = \frac{\rho_a g_a}{F_a(s)} \ddot{\eta}(s) \tag{11}$$

즉, 진동모드(가속도)를 입력으로 사용하는 단자유도 시스템의 응답이 음향모드가 되는 것을 알 수 있다.

진동모드 또는 음향모드는 특정진동수(고유진동수 부근)에서 큰 스펙트럼을 가지며 해당 진동수 부근의 파워 스펙트럼의 합이 진동 또는 음향의 크기를 나타낸다고 볼 수 있다. 그러므로 진동모드, 그로부터 유도된 음향모드의 분산은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 이 분산은 가속도 레벨, 또는 음압레벨을 산정하는데 사용할 수 있다.

$$E[\ddot{\eta}(s) \ddot{\eta}(\tilde{s})] = \int |\ddot{\eta}(w)|^2 dw \tag{12a}$$

$$E[q(s)q(\tilde{s})] = \rho_a^2 g_a^2 \int \left| \frac{\ddot{\eta}(w)}{F_a(w)} \right|^2 dw \tag{12b}$$

여기서  $E[ ]$ 는 평균화기호,  $s = iw$ 이고  $w$ 는 각속도이다. 식 (12a,b)에 각각 식 (9a,b)를 대입하여 직접 진동, 음향모드의 분산을 구할 수 있다. 특히 식 (9a,b)의 외부하중이 이상적인 충격하중이라고 가정하면 최고차항이  $s$ 에 관한 4차 방정식이므로 closed form으로 분산을 구할 수 있다<sup>(7)</sup>. Closed form으로 나타내면, 식 (12)의 진동모드와 음향모드의 분산은 각각의 고유진동수와 감쇠비 그리고 연성효과를 나타내는  $g_s, g_a$  값을 포함한 변수로 이루어진다. 이들 변수를 이용하여 진동, 음향모드의 분산을 구하고 이로부터 진동, 음향모드의 가속도, 음압레벨을 구함으로써 두 모드간의 상관성을 진동수 영역에서 파악할 수 있게 된다.

음영역에 포함된 구조체의 면밀도가 음영역 매질의 밀도에 비하여 매우 큰 경우에는 연성효과가 미약

하게 된다. 아파트의 슬래브와 같이 매우 비대한 질량체는 인접공기의 음압 영향이 작아 연성효과가 떨어질 수 있다. 이와 같이 구조체와 음영역의 연성효과가 작아서 무시할 수 있고 구조체의 진동만이 음영역의 음장을 유발하다고 가정하면, 더욱 간략히 진동모드, 음향모드의 분산을 구할 수 있다.

음장이 구조체에 미치는 영향을 무시하면 식 (8a)의  $g_s=0$ 으로 할 수 있고, 진동이 음영역에 일방향으로 영향(in cascade)을 미친다고 볼 수 있으므로 식 (8b)의  $g_a$ 를 유지함으로써 다음과 같이 진동모드와 음향모드를 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\eta}(s) = \frac{s^2}{F_s(s)} X(s) \tag{13a}$$

$$q(s) = \frac{\rho_a g_a s^2}{F_s(s) F_a(s)} X(s) \tag{13b}$$

구조체에 작용하는 이상적인 충격하중으로써 하중의 스펙트럼이 특정 진동수영역(low-upper bound,  $w_L < w < w_U$ )에서 일정한 값을 가지는 형태(band-limited white noise)로 가정하면 식 (14)와 같다.

$$S_{xx}(w) = |X(iw)|^2 = S_o \text{ (constant)} \tag{14}$$

이러한 충격하중에 대한 가정에 근거하여 식 (13a, b)를 각각 식 (12a,b)에 대입하여 적분하면 식 (15)와 같이 closed form으로 진동모드와 음향모드의 분산을 구할 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$E[\ddot{\eta}(s) \ddot{\eta}(\tilde{s})] = S_o \int \left| \frac{(iw)^2}{F_s(iw)} \right|^2 dw = \frac{\pi S_o}{2} \frac{w_s (1 + 4\xi_s^2)}{\xi_s} \approx \frac{\pi S_o}{2} \frac{w_s}{\xi_s} \tag{15a}$$

$$E[q(s)q(\tilde{s})] = S_o \int \left| \frac{\rho_a g_a (iw)^2}{F_s(iw) F_a(iw)} \right|^2 dw = \pi S_o \rho_a^2 g_a^2 \frac{N}{D} \tag{15b}$$

여기서,  $N = 2 w_s w_a (\xi_s w_a + \xi_a w_s)$   
 $D = 4 \xi_s \xi_a w_s w_a [ (w_a^2 - w_s^2)^2 + 4 w_s w_a ( w_s w_a (\xi_s^2 + \xi_a^2) + \xi_s \xi_a (w_s^2 + w_a^2) ) ]$   
 진동모드 분산에 대한 음향모드의 분산 비율( $R$ )은 식 (16)과 같다.

$$R(\xi_s, \xi_a, w_s, w_a, g_a) = \rho_a^2 g_a^2 \frac{\xi_s}{w_s} \frac{N}{D} \quad (16)$$

Fig. 1은 식 (16)에 의해 진동모드에 대한 음향모드의 고유진동수의 비율( $w_a/w_s$ )로 나타낸 정규화된 분산 비율이다. 그림에서와 같이 음향모드의 진동수가 진동모드의 진동수에 벗어날수록 비율이 줄어들고 있으며, 진동수비가 5%의 차이를 가질 때 최대분산비율의 40% 정도 되는 것을 알 수 있다.

만약 진동모드가 음향모드와 매우 인접하여서  $w_a = w_s$  라 가정하면 최대분산비율 식 (17)과 같다.

$$R(\xi_s, \xi_a, w_s = w_a, g_a) = \frac{\rho_a^2 g_a^2}{4w_s^4 \xi_a (\xi_s + \xi_a)} \quad (17)$$

그러므로 식 (18)과 같이 진동모드 분산으로부터 음향모드 분산을 예측할 수 있다.

$$E[q(s)]q(\tilde{s})] = R E[\ddot{\eta}(s) \ddot{\eta}(\tilde{s})] \quad (18)$$

앞서 언급한 바와 같이 비율 R은 진동모드 고유진동수와 감쇠비, 음향모드 고유진동수와 감쇠비 및 연성계수  $g_a$ 에 의하여 결정되며, 특히 음향모드의 감쇠비가 큰 영향을 미친다. 그러므로 잔향실과 같이 감쇠가 작은 음영역에서는 같은 진동에 대해서 큰 음압이 유발되는 것을 예상할 수 있다.

### 3. 시간영역 연성 해석

#### 3.1 구조-음향 연성시스템 모델링

구조-음향 연성시스템으로 잔향실의 한 면 일부가 셸로 구성된 시스템을 설정하였다. 시간영역 연성해석은 COMSOL 프로그램을 사용하였으며, 모델링된 대상구조물이 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2(a)는 잔향실 한 면에 포함된 셸(3.8 m × 2.6 m)을 나타내며, 셸 평면의 가로 세로 4등분 교차점 중 내부 9개의 가속도계 설치 위치와 셸 좌하부분에 삼각형으로 가진 점이 표시되어 있다. Fig. 2(b)는 잔향실 평면을 나타내는 것으로 5개의 마이크로폰 위치(높이 1.2 m)가 표시되어 있다.

Table 1은 모델링에 사용된 재료의 물성이다. 10 Hz 대역부터 진동 거동을 보기 위하여 셸의 두께를 조정하여 1차 고유진동수를 약 17 Hz 정도로 맞추었다. 셸의 감쇠는 레일리 감쇠의  $\alpha, \beta$  을 이용하여 10 Hz ~

100 Hz 대역의 모달감쇠비가 2.5% ~ 4.5%가 되도록 설정하였다. 잔향실의 감쇠는 임피던스(벽면)로 구현하였으며, 음속의 400배로 설정하였다.

Table 2는 해석에 사용된 FEM 모델의 요소, mesh 최대크기와 시간이력 해석을 위한 시간간격 등을 나타내고 있다. Mesh의 크기를 이용하여 구한 유효 해석 진동수 범위는 약 170 Hz 까지이다. 충격하중은 이 연구진이 보유하고 있는 임팩트햄머를 벽체에 타격했을 때 실측한 하중 시간이력을 모사한 것이다.

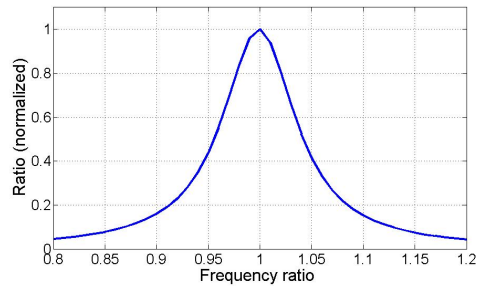
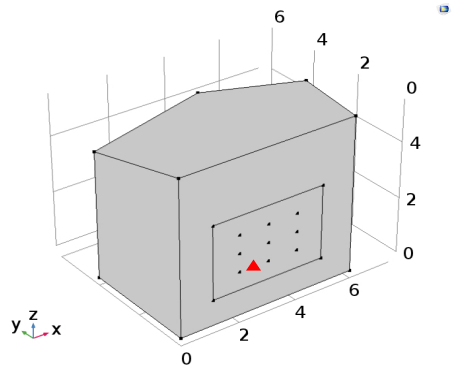
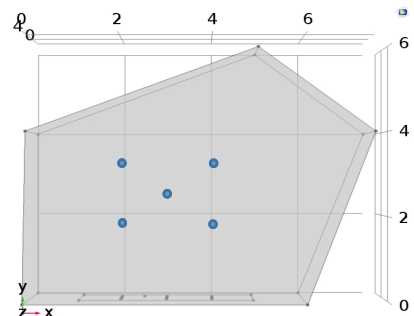


Fig. 1 Covariance ratio



(a) Perspective (unit: m)



(b) Plane (unit: m)

Fig. 2 Modeling of reverberation chamber

해석을 위해 최대크기 400 N의 지속시간 20 msec의 사인파(sine wave)의 반파형태의 펄스로 이상화하였다. 가진 위치는 앞서 언급한 바와 같이 Fig. 2(a) 셀의 좌하영역에 삼각형으로 표시되었다.

### 3.2 연성 해석

#### (1) 모드 해석

구조-음향연성 FEM모델에 대한 고유치 해석 결과

**Table 1** Material properties

Domain	Item	Value
Acoustic	Density	1.225 kg/m <sup>3</sup>
	Speed of sound	$c = 340$ m/sec
	Impedance	$400 c$ Pa sec/m
Shell	Density	2400 kg/m <sup>3</sup>
	Poisson; ratio	0.17
	Young's modulus	$2e10$ Pa
	Size	3.8 m × 2.6 m
	Thickness	50 mm
	Rayleigh damping	$\alpha = 4.5, \beta = 1.5e-4$

**Table 2** FEM model and analysis condition

Domain	Item	Value
FEM analysis	Element type	Tetrahedral
	Max mesh size	300 mm
	Duration	10 sec
	Time step	0.1 msec

**Table 3** Eigenvalues

Shell only	Acoustic only	Coupled
16.714 + 0.48985i	25.227 + 0.10865i	<b>16.686 + 0.48736i</b>
26.053 + 0.67818i	32.718 + 0.11787i	25.207 + 0.12469i
39.543 + 1.0955i	36.003 + 0.11248i	<b>26.038 + 0.66012i</b>
41.418 + 1.1671i	42.469 + 0.14444i	32.720 + 0.11852i
47.871 + 1.4390i	45.235 + 0.12918i	36.001 + 0.11533i
61.860 + 2.1636i	48.826 + 0.14361i	<b>39.502 + 1.0900i</b>
62.149 + 2.1805i	50.127 + 0.12359i	<b>41.379 + 1.1629i</b>
72.567 + 2.8434i	56.491 + 0.16549i	42.469 + 0.14531i
80.413 + 3.4108i	60.204 + 0.14039i	45.239 + 0.13026i
81.437 + 3.4891i	61.792 + 0.14674i	<b>47.822 + 1.4333i</b>
87.588 + 3.9807i	64.827 + 0.12166i	48.829 + 0.14539i
93.539 + 4.4907i	67.742 + 0.12857i	50.135 + 0.12421i

\* Real part of eigenvalue is damped natural frequency and imaginary part can be expressed as  
 real part =  $w \sqrt{1-\xi^2}$ , imag. part =  $\xi w$

를 Table 3에 나타내었다. 연성효과가 고유값에 미치는 영향을 나타내기 위하여 셸과 잔향실이 독립적인 상태에서의 고유값과 연성된 상태에서의 고유값을 편의상 12개 이내로 비교한 것이다.

Table 3에서 감쇠비는 허수부를 실수부로 나누면 구할 수 있다. 셸의 모드 감쇠비는 지정한 바와 같이 2.5%~4.5% 사이, 음향모드의 감쇠비는 0.2%~0.4%의 값을 가진다. Table 3에서 연성효과를 가지는 고유값을 보면 구조체 발현 고유값(굵은글씨 밑줄)은 고유진동수와 감쇠비가 모두 감소하는 경향을 나타내나 그 차이는 매우 작다. 연성된 음향모드의 경우 고유진동수는 큰 차이가 없으며, 감쇠비 또한 저차 음향모드를 제외하고는 큰 차이가 없다. 고유진동수, 감쇠비의 미소한 변화는 음향모드와 인접 진동모드의 연성효과에 의해 식 (10)과 같이 4차 다항함수의 해가 변화되기 때문이다. 또한, 음향모드의 감쇠비가 증가하는 것은 10배 이상 큰 진동모드 감쇠비가 음향모드의 감쇠비 증가를 견인하기 때문이다.

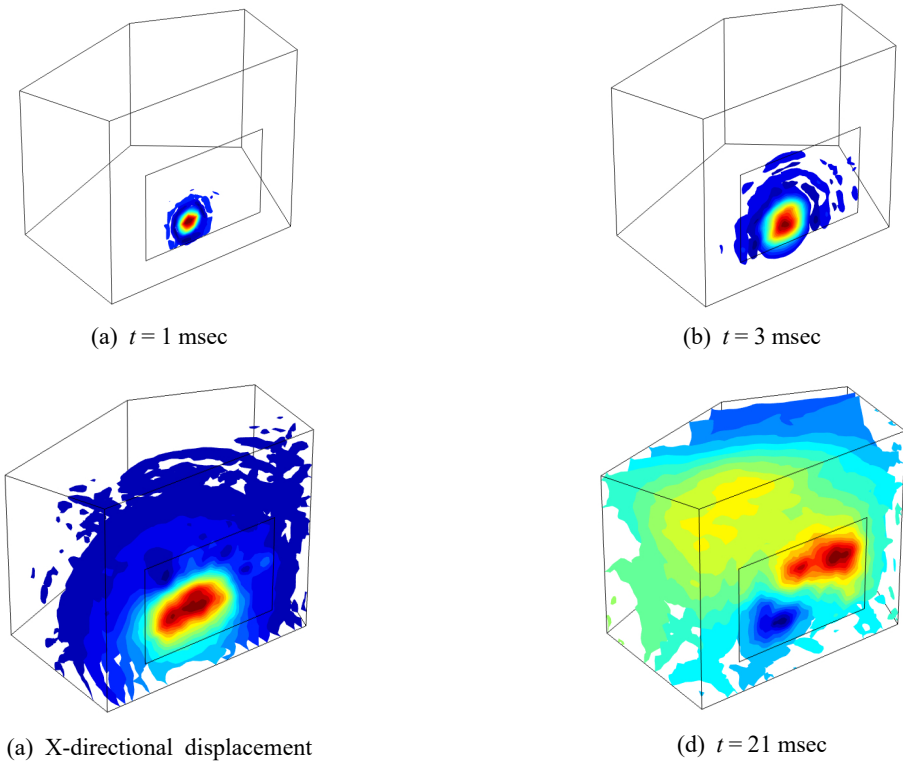
#### (2) 시간이력 해석

충격하중에 의한 셸 진동이 잔향실의 음압변화를 야기한다. Fig. 3은 시간에 따라 잔향실내 음압 전과 과정을 COMSOL의 isosurfaces 기능을 이용하여 도시한 것이다. 충격 후  $t = 1$  msec 경과 시, 셸 평면의 좌하 충격부분의 음압이 국부적으로 발생하다가  $t = 3$  msec를 지나  $t = 9$  msec에서는 셸의 크기를 넘어 잔향실 전반부로 확산되며,  $t = 21$  msec에서 잔향실 전체로 확산되는 것을 볼 수 있다.

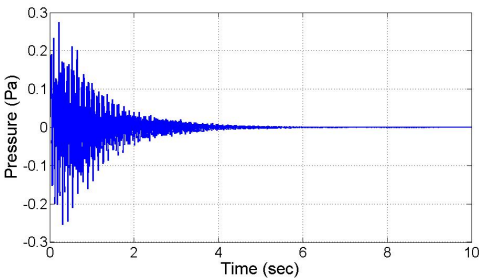
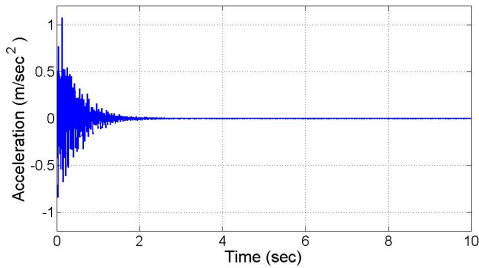
Fig. 4는 Fig. 2에 나타나 있는 가속도계, 마이크로폰 위치에서의 가속도와 음압의 시간이력을 나타내고 있다. Fig. 4(a)는 셸 평면 좌하 모서리 부분의 가속도 시간이력이며, Fig. 4(b)는 중앙부에 설치된 마이크로폰의 음압 시간이력이다. 가속도 응답은 자유진동의 형태이며 2초 이내에서 유지되지만, 음압의 경우 5초까지 지속되는 것을 알 수 있다. 이것은 잔향실의 특성상 큰 임피던스에 의해 음영역의 감쇠비가 작기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.3 해석에 의한 음향모드 예측

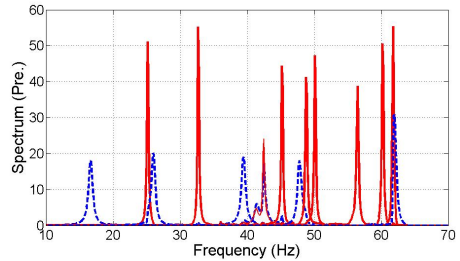
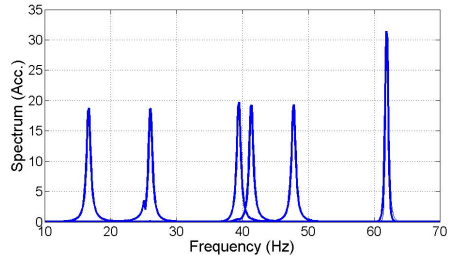
수치해석을 통해서 얻어진 9개의 가속도, 5개의 음압 시간이력에 모드분해법을 적용하여 진동모드와 음향모드를 추출하였다<sup>(8)</sup>. Fig. 5는 분해된 진동, 음향모드 시간이력에 푸리에 변환에 의해 10 Hz ~ 70 Hz 대



**Fig. 3** Propagation of pressure



**Fig. 4** Time history



**Fig. 5** Power spectrum of modes



역의 파워 스펙트럼으로 표현한 것이다. Fig. 5(a)는 진동모드(가속도)의 스펙트럼을 나타내는 것으로 매우 안정적인 모드분해가 이루어지는 알 수 있다. 음압에 의한 진동모드의 영향이 작아 스펙트럼의 형상에 큰 변화가 없다. 이것은 식 (9a)에서와 같이 연성 효과가 작으면( $g_s = 0$ ) 분자 분모의  $F_a(s)$ 가 소거되어 단자유도 전달함수만 남기 때문이다.

Fig. 5(b)는 음향모드의 스펙트럼을 나타낸다. Dashed line은 진동모드가 직접적으로 음압으로 전이

(vibration mode induced pressure)된 것이며, solid line은 진동모드에 의하여 유발된 음향모드에 의해 발현된 음압(acoustic mode induced pressure)이라고 볼 수 있다. 음향모드 감쇠비가 진동모드 감쇠비에 비해 작으므로 스펙트럼이 좀 더 첨도가 크게 나타난다. Fig. 5(b)에서 40 Hz가 약간 초과하는 진동수 대역에서 음압 스펙트럼이 매끄럽지 못한 것은 이 연구에서 채용한 모드분해법에 의하여 진동모드와 음향모드가 인접하여 완전하게 분해가 되지 못한 것 때문이다.

Fig. 5(b)의 음압 스펙트럼에서 음향모드 외에 진동모드가 나타나는 것은 식 (9b)에서 보는 바와 같이 음향모드가 2자유도 시스템으로 표현되며 이것이 각각 2개의 단자유도(진동모드와 음향모드)로 분해되어 음압에 기여하기 때문인 것으로 사료된다.

앞서 언급한 바와 같이 진동모드는 인접한 음향모드에 영향을 미친다. 실제로 진동모드는 모든 음향모드에 영향을 미치지만 두 모드의 고유진동수가 멀리 떨어져 있으면 Fig. 1에서 보는 바와 같이 그 영향력이 급격히 줄어들므로 진동모드에 이웃한 음향모드만을 고려하는 것이다.

분해된 진동모드로부터 음향모드가 예측이 되는지 검증하기위한 해석을 수행하였다. 이를 위하여 Table 3의 shell only 5차 진동모드( $47.871 + 1.4390i$ )와 이웃한 acoustic only 6차 음향모드( $48.826 + 0.14361i$ )를 대상으로 선정하였다. 이 두 모드는 연성 효과에 의하여 Table 3의 coupled 고유값( $47.822 + 1.4333i, 48.829 + 0.14539i$ )을 생성한다.

진동모드의 시간이력을 알고 있으므로, 이를 식 (8b)의 미분방정식의 입력으로 해석하여 음향모드의 시간이력을 구하고 이를 분해된 음향모드와 비교함으로써 예측 가능성을 검증하였다.

Fig. 6은 음향모드의 시간이력과 스펙트럼을 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 계측음압으로부터 분해된 음향모드와 진동모드로부터 해석된 음향모드를 비교한 것이며, Fig. 6(b)는 최대음압이 발생하는 부분을 확대하여 비교한 것으로 매우 유사한 것을 알 수 있다. Fig. 6(c)는 스펙트럼을 비교한 것으로 음향모드의 예측이 신뢰성 있게 이루어진 것을 알 수 있다.

이상과 같은 시뮬레이션을 통하여 구조체의 진동모드로부터 음향모드 예측이 가능함을 알 수 있다. 정교한 음향모드 예측을 위해서는 음영역에서 발생하는 고

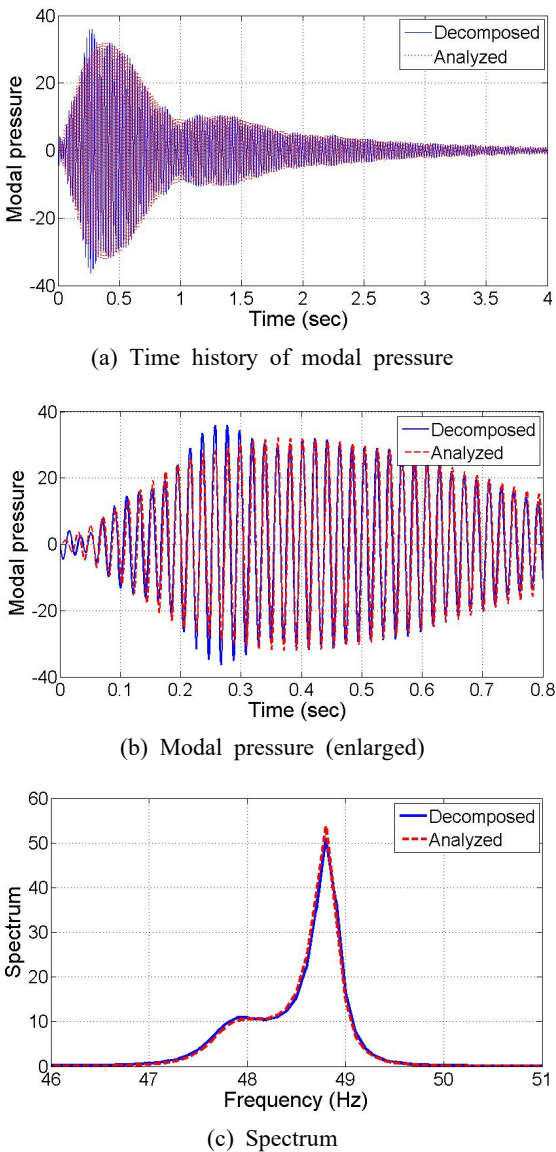


Fig. 6 Comparison of acoustic mode

유의 음향특성(음향모드의 고유진동수 및 감쇠비)이 필요하다. 이 연구에서는 음영역(잔향실)에 대한 고유치 해석을 통하여 음향특성을 이용할 수 있었지만, 실제 음환경에서는 이들 값을 추정할 수 있는 기술이 요구된다. 특히 음향모드의 감쇠비는 진동모드로부터 음향모드를 예측하는 매우 중요한 요소로써 음경계의 임피던스, 잔향시간 등으로부터 감쇠비를 추정하는 실험이나 기법 등의 요소기술개발을 위한 지속적인 연구가 요구된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 구조체와 결합된 음영역의 음압을 구조체의 진동으로부터 예측하기 위한 진동-음향모드의 연관성을 제시하고, 시간영역 구조-음향연성 시뮬레이션을 통해 진동모드로부터 음향모드 예측이 가능함을 검증하였다.

이상적인 음경계조건을 제공하는 잔향실에 대한 FEM해석에 의해 계측된 셸 진동과 음압에 모드분해법을 적용하여 진동모드와 음향모드를 각기 구하고 두 모드 사이의 연관성에 의해 진동모드로부터 음향모드의 예측이 이루어지는 것을 확인하였다. 보다 정밀한 음향모드 예측을 위해서는 해당 음향모드의 고유진동수와 감쇠비가 필요하며, 특히 음경계영역으로부터 감쇠비를 구하는 것이 요구된다.

이 연구에서 제시된 음향모드 예측기술을 구조체 가속도레벨로부터 중량충격음 음압레벨 예측으로 확대하기 위해서는 계측 센서의 수, 각 모드의 진동 및 음압기여도와 음영역의 모달특성 파악을 위한 현장실험기술이 요구되며, 이에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(21CTAP-C164107-01)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2020R1F1A1070349).

#### References

(1) Song, M. J. and Kim, S. W., 2000, An

Experimental Study on the Relationship between VAL in Mini-laboratory and SPL in Reverberation Room: Focused on the Floor Covering PVC, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 16, No. 1, pp. 585-591.

(2) Kim, T. M., Bae, J. Y. and Yang, H. S., 2020, The Study on Characteristic of Floor Impact Noise Using the Structural Vibration on Floor Slab: Effective Plate, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 3 pp. 276-285.

(3) Hwang, J. S., Lee, K. S., Lee, T. J., Park, H. J. and Park, S. H., 2016, Participation Effect of Vibration Mode of Concrete Slab on Heavy Weight Floor Impact Noise, Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea, Vol. 18, No. 6, pp. 127-134.

(4) Fahy, F., 1987, Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response, Academic Press Inc.

(5) Kim, T. C., Kang, S. J. and Seo, J. B., 1994, Noise Reduction of a Vehicle Acoustic Cavity Sample Using Coupled Structural-acoustic Finite Element Analysis, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 288-294.

(6) Sakuma, T., Sakamoto, S. and Otsuru, T., 2014, Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics: Methods and Application of Wave-based Computation, Springer, Tokyo.

(7) Crandal, S. H. and Mark, W. D., 1973, Random Vibration in Mechanical Systems, Academic Press, New York.

(8) Belouchrani, A., Abed-Meraim, K. and Cardoso, J.-F., 1997, A Blind Source Separation Technique Using Second-order Statistics, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 45, No. 2, pp. 434-444.

**Jae-Seung, Hwang** received a B.S., M.S. and Ph.D. in Dept. of Architecture from Seoul National University in 1992, 1994 and 1998, respectively. He is currently working for Chonnam National University in the school of architecture as a professor. His main research area is vibration control and health monitoring, wind resistant design, analysis and control of structure-borne sound.





**Min-Jeong Song** received his Ph.D. in Architectural Engineering from Chonnam National University and worked as a research professor at Mokpo National University's Eco-friendly Architecture Research Center. Currently, he is working as

a lecturer at the School of Architecture at Chonnam National University 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 architec-

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

# 축소 기체 구조 모델을 이용한 고속 비행 복합형 무인 회전익기의 능동 진동 제어 시험

## Active Vibration Control Test of High-speed Compound Unmanned Rotorcraft Using Scaled Airframe Model

홍성부\* · 박재상†  
Sung-Boo Hong\* and Jae-Sang Park†

(Received September 6, 2021 ; Revised October 5, 2021 ; Accepted November 1, 2021)

**Key Words** : Compound Rotorcraft(복합형 회전익기), Active Vibration Control System(능동 진동 제어 시스템),  
Fx-LMS Algorithm(Fx-LMS 알고리즘), Small-scaled Model(축소 모델)

### ABSTRACT

Active vibration control for a 25%-scale model of a high-speed compound unmanned rotorcraft was experimentally studied. The compound rotorcraft uses wings, propellers, and a lift-offset coaxial rotor system with two blades per rotor. A small-scale airframe structure was manufactured using aluminum and steel and appropriately represents the dynamic similarity of the full-scale model. A ground vibration test (GVT) was used in this experimental work. An active vibration control system (AVCS) using two force generators and three accelerometers was applied for the active vibration control of the small-scale airframe model. Three accelerometers that measure acceleration signals in the vertical direction of the airframe are located at specific airframe locations: the remote cockpit unit, wing root, and wing tip. A 2P rotor hub pitch moment that produces a linear force generator was used to excite the airframe structure. The AVCS using the Fx-LMS algorithm was implemented using MATLAB Simulink, dSPACE ControlDesk, and MicrolabBox. This experimental study shows that the vibration responses of the airframe in the vertical direction at the specific airframe positions are reduced by 47.54%~84.67%, and the test results compare reasonably with the simulation results.

### 1. 서 론

최근 회전익기 개발의 선진국에서는 기존의 헬리콥터의 단점인 저속 비행 속도(약 150 knot ~ 170 knot)와 짧은 항속 거리 등의 단점을 해결하고 수직 이착륙 및

제자리 비행 등의 기존 헬리콥터의 장점을 동시에 이용할 수 있는 다양한 형태의 전환형 및 복합형 회전익기의 개발에 집중하고 있다. 복합형 회전익기는 로터, 날개, 및 보조 추력 장치 등을 함께 사용하여 고속 비행을 구현한다. 특히, lift-offset 복합형 회전익기는 lift-offset 로터(강체 동축 반전 로터)<sup>(1)</sup>와 보조 추력

† Corresponding Author; Member, Dept. of Aerospace Eng., Chungnam National University, Associate Professor  
E-mail : aerotor@cnu.ac.kr

\* Dept. of Aerospace Eng., Chungnam National University, Graduate Student

‡ Recommended by Editor Jung Woo Sohn

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

장치를 함께 사용하는 복합형 회전익기이다. Sikorsky사의 XH-59A, X2 Technology Demonstrator(TD)<sup>(2,3)</sup>, S-97 Raider, 및 SB>1은 대표적인 lift-offset 복합형 회전익기(Fig. 1)이며, 우수한 고속 비행 성능을 비행

시험을 통하여 입증하였으나, 동시에 고속 비행 시 극심한 진동을 겪는다는 심각한 문제점이 확인되었다.

회전익기 진동의 다양한 원인 중 메인 로터의 회전에 의해 발생하는 로터 허브 진동이 가장 주요하게 작용한다. 로터 당 블레이드 개수( $N_b$ )의 정수배( $n$ )만큼의 로터 허브의 진동 하중 성분( $nN_bP = nN_b/\text{rev}$ )이 기체를 가진다. 이때  $1P(=1/\text{rev})$ 는 무차원화 된 로터 회전 속도를 의미한다. Lift-offset 로터는 상/하 로터 사이의 간격을 유지하기 위하여 강성이 상당히 큰 블레이드(rigid blade)를 이용하므로 기존 헬리콥터에 비하여 진동이 매우 심대하며, 기체에 전달된 진동은 탑승감 저하, 구조의 피로 수명 단축, 및 유지비용 증가 등의 다양한 문제를 야기하고 lift-offset 복합형 회전익기의 최대 비행 속도를 제한할 수 있다.

Lift-offset 복합형 회전익기는 고속 비행시 적절히 메인 로터의 회전을 감속시키기<sup>(1-3)</sup> 때문에 댐퍼 등의 기존의 수동 진동 제어 기법보다 넓은 주파수 대역 및 비행 환경에 따라 변화되는 진동 특성에서도 적극적으로 적용 가능한 능동 진동 저감 기법의 적용이 필요하다. Sikorsky사는 X2TD<sup>(2,3)</sup>, S-97 Raider, 및 SB>1 Defiant와 같은 lift-offset 복합 헬리콥터의 기체 진동을 제어하기 위해 다양한 능동 진동 저감 기법 중 능동 진동 제어 시스템(active vibration control system, AVCS)을 사용하였다. AVCS(Fig. 2)는 기체 진동 신호와 진폭은 같고 위상은 반대인 진동 상쇄 신호를 이용하여 기체를 가진하여 기체 진동을 제어하는 기법으로, 진동 상쇄 하중을 생성하는 하중 발생기(force generator), 가속도계(accelerometer), 및 페루프 피드백 제어기(closed-feedback controller)로 구성된다<sup>(4-7)</sup>.

NASA Langley Research Center와 Bell사는 AH-1G



(a) X2TD



(b) S-97 Raider



(c) SB>1 Defiant



(d) Raider-X

Fig. 1 Various lift-offset compound helicopters

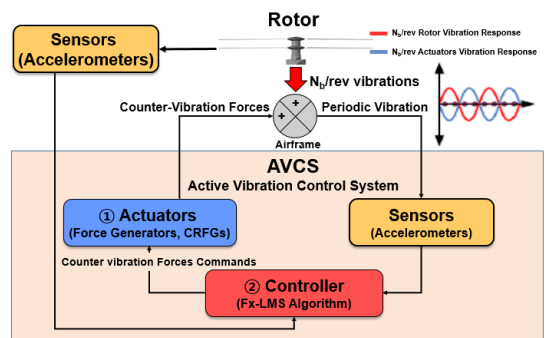


Fig. 2 Concept of AVCS

(Fig. 3(a)<sup>(8)</sup>) 및 V-22(Fig. 3(b)<sup>(8,9)</sup>)의 stick-line 모델의 축소 기체 모델을 이용한 능동 진동 제어의 시험 연구 결과를 바탕으로 V-22 기체에 multipoint adaptive vibration suppression system(MAVSS)로 알려진 고조파 제어 (higher harmonic control, HHC) 기법의 적용 가능성을 판단하였다.

Lift-offset 로터와 한 쌍의 날개 및 프로펠러를 함께 사용하는 복합형 회전익기에 대하여서는 AVCS를 이용하여 동체뿐만 아니라 날개의 진동을 동시에 감소 (제어)를 위한 연구가 필요하며 이를 시뮬레이션뿐만 아니라 시험을 통한 시연 연구가 수행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 현재 개념 설계 연구 중인 lift-offset 동축반전 로터, 날개, 및 프로펠러를 동시에 사용하는 5000 lb급 복합형 회전익기(Fig. 4(a))에 대하여 축소 기체 모델을 설계 및 제작(Fig. 4(b))하고 이에 대한 AVCS 적용의 진동 제어 시뮬레이션 및 시연 연구를 수행한다.

이 논문의 25% 축소 기체 모델은 3차원 설계 프로그램인 CATIA와 유한요소 해석 프로그램인 MSC.NASTRAN을 이용하여 설계하였다. AVCS를 이용한 능동 진동 제어 시험 연구를 위하여서는 3개의 선형 하중 발생기와 3개의 가속도계를 이용하였

다. MATLAB Simulink, dSPACE ControlDesk, 및 MicrolabBox를 함께 사용하여 AVCS를 구현하였다. 시험 및 시뮬레이션 연구를 통하여 230 knot에서의 기체 수직 방향의 2P 진동 응답을 적절히 제어할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 본 론

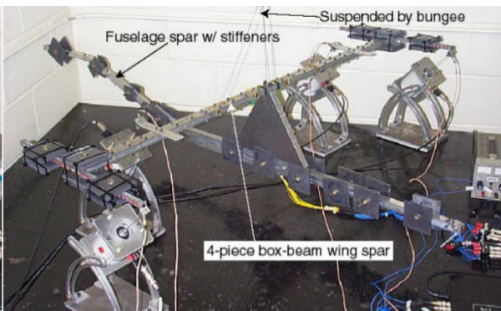
### 2.1 능동 진동 제어 테스트 벤치 구축

#### (1) 고속 비행 복합형 무인 회전익기의 25% 축소 기체 구조 설계 및 제작

선행 연구 결과<sup>(10,11)</sup>를 바탕으로 고속 비행 복합형 무인 회전익기 기체 구조의 진동 응답 측정 및 능동 진동 제어를 소규모의 연구실에서 시연하기에 적절할 수 있도록 stick-line 모델 기반의 1.4 m 크기의 축소 기체 구조(25% 축소 모델, Fig. 4(b))를 설계 및 제작하였다. 축소 기체 구조의 재료로는 가공이 용이한 알루미늄 및 스테인리스 스틸을 이용하였으며, 3차원 설계 프로그램인 CATIA를 사용하여 설계하였다. 이때 상용 유한요소 해석 프로그램인 MSC.NASTRAN을 이용한 축소 기체에 대한 저차 모드 해석 결과가 선행 연구<sup>(10)</sup>의 full-scale 기체의 1차 날개 및 동체 모드 특성을 적절히

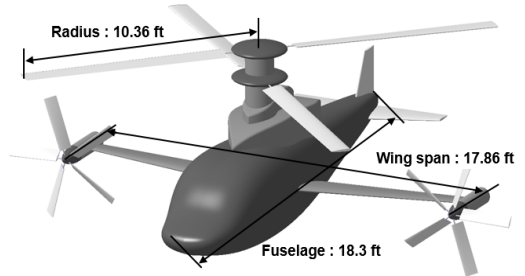


(a) 5.5% scaled dynamic model for AH-1G

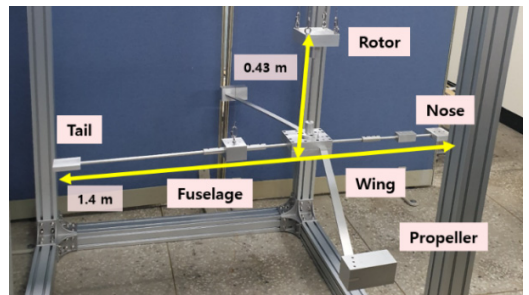


(b) 10% scaled dynamic model for V-22

Fig. 3 Scaled airframe models



(a) Full-scale model



(b) 25% scaled dynamic model

Fig. 4 Unmanned lift-offset compound rotorcraft

구현하도록 축소 기체 구조의 기하학적 형상과 단면적 등을 적절히 설계하였다. 축소 기체 구조 모델에 대한 설계, 모드 특성, 및 기체 진동 응답 시뮬레이션에 대한 자세한 소개는 참고문헌 11번에 주어져 있다.

제작된 축소 기체 구조를 이용한 지상 진동 시험(GVT, ground vibration test)의 경계 조건을 자유 경계 조건의 비행 조건과 유사하도록 구현하기 위해 2개의 스프링 팩을 추가하여 축소 기체 구조를 이용한 지상 진동 시험을 구축하였다. 스프링 팩을 구성하는 스프링의 제원은 시제품 물성치를 사용하였으며 스프링과 강철 케이블(diameter = 1Φ)의 길이를 적절히 조절하여 6개의 강체 모드가 적절히 구현되도록 하였다. 이후 지상 진동 시험을 수행하여 제작된 축소 기체 모델이 비행 속도 230 knot의 선행 연구<sup>(10)</sup>의 full-scale 모델의 기체 진동 응답을 적절히 구현할 수 있도록 스프링과 케이블의 개수 및 길이 등 최적의 조합을 결정하였다. 최종 설계 및 제작된 축소 기체 구조의 총 중량은 9.2 kg 이고, 구축된 능동 진동 제어 시연 연구에 사용된 GVT 구성도는 Fig. 5와 같으며 230 knot 비행 속도에서의 2P 진동수의 값은 15.636 Hz이다.

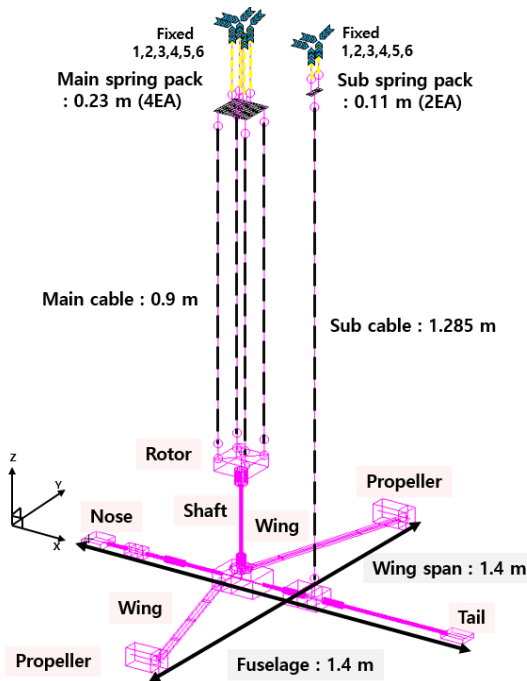


Fig. 5 GVT model for 25 % scaled unmanned lift-offset compound rotorcraft

(2) 능동 진동 제어 시험 장치의 구성

2P 로터 허브 하중 생성을 위하여 1개의 선형 하중 발생기(K2004E01 SmartShaker, Fig. 6의 ①)를 사용하였으며, lift-offset 로터의 2P 허브 하중 중 선행 연구<sup>(12)</sup>의 연구 결과를 참고하여 중 기체 진동 응답에 지배적인 영향을 보이는 허브 피치 모멘트( $M_{y2P}$ )만 이용하였다. 2P 허브 피치 모멘트를 선형 하중 발생기로부터 생성하기 위해 강성이 높은 열처리된 강 재질의 모멘트 암을 사용하였다. 이 논문의 lift-offset 복합형 회전익기의 프로펠러는 수평 비행 시 축대칭 유동 조건에서 사용되므로 lift-offset 로터에 비하여 기체 진동의 유발이 매우 적다고 가정하였다.

Stick-line 모델의 특성 상, 기체 축 방향에 대한 선형 하중 발생기의 가진이 쉽지 않으므로 이 시험 연구에서는 기체 수직 방향의 진동 응답 제어만 고려하였다. 기체 수직 방향의 진동 응답을 제어하기 위한 능동 진동 제어 시스템의 진동 상쇄 하중을 생성하는 2개의 선형 하중 발생기(K2004E01 SmartShaker, Fig. 6의 ②)는 각각 다른 위치에 기체 수직 방향으로 배치하여 사용하였다. 이 연구의 능동 진동 제어 시험에 사용된 선형 하중 발생기의 최대(peak-to-peak) 힘은 31 N이다. Remote cockpit device 위치에서 full-scale 모델의 유사한 크기의 진동 응답을 나타낼 수 있도록 로터 허브 진동 하중을 생성하는 선형 하중 발생기는 최대 힘의 90%로 고정하여 사용하였으며, 진동 상쇄 하중 발생기의 경우, 선행 연구<sup>(4)</sup>를 참고하여 최대 힘의 60%로 제한하여 사용하였다.

가진기로부터 축소 기체 구조에 전달되는 하중은 하중 센서(PCB 208C02, Fig. 6의 ③)를 사용하여 측정하

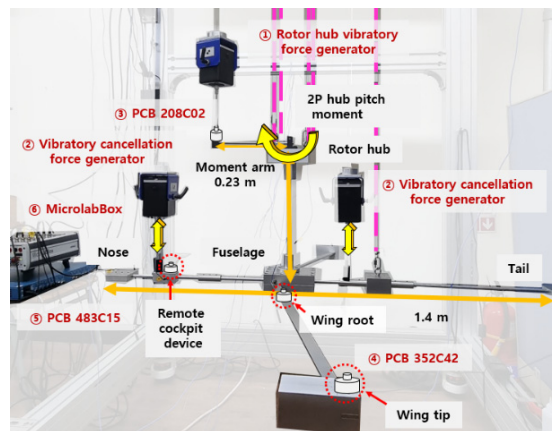


Fig. 6 Experimental equipment for AVCS test

였으며, 축소 기체 구조의 기체 주요 위치에서 기체 수직 방향의 진동 응답은 1축 가속도계(PCB 352C42, Fig. 6의 ④)를 사용하여 측정하였다. 신호 변환 및 필터링을 위하여 PCB사의 Model 483C15(Fig. 6의 ⑤)를 사용하였으며, 신호 획득, 연산 및 실시간 제어 신호 출력 장비로 dSPACE사의 MicrolabBox(Fig. 6의 ⑥)를 이용하였다.

## 2.2 능동 진동 제어 시스템(AVCS)

### (1) Fx-LMS 알고리즘

Fig. 7은 축소 기체 구조를 이용한 기체 수직 방향의 능동 진동 제어 시험을 위해 사용된 Fx-LMS 알고리즘 기반의 AVCS의 블록 다이어그램을 나타낸다(7,10). Disturbance path( $H(i\omega)$ )는 2P 로터 허브 진동 하중으로부터 발생하는 기체 진동의 전달 함수 모델을 의미한다. Actual forward path( $C^*(i\omega)$ )는 진동 상쇄 하중 발생기의 제어 입력(control signal,  $u(n)$ )으로부터 발생되어 기체에 전달되는 상쇄 진동의 동특성을 나타내며, forward path( $C(i\omega)$ )는 지상 진동 시험을 통해 얻어진 actual forward path( $C^*(i\omega)$ )의 수학적 전달 함수 모델을 의미한다. Fx-LMS 알고리즘은 가속도계로 측정되는 에러 신호( $e(n)$ , 식 (1))가 최소가 되도록 하중 발생기의 제어 입력( $u(n)$ )을 지속적으로 업데이트한다. 이후 업데이트 된 제어 입력은 진동 상쇄 하중 발생기로 전달되어 2P 로터 허브 진동 하중에 의한 기체 진동( $y(n)$ )과 위상이 반대인 상쇄 진동 응답 ( $\hat{y}(n)$ )을 발생시켜 기체 진동을 제어(감소)한다(4,5).

$$e(n) = \hat{y}(n) + y(n) = C^* u(n) + y(n) \tag{1}$$

$$\approx Cu(n) + y(n)$$

Fx-LMS 알고리즘(4-5)의 제어 입력( $u(n)$ )은 매 시간

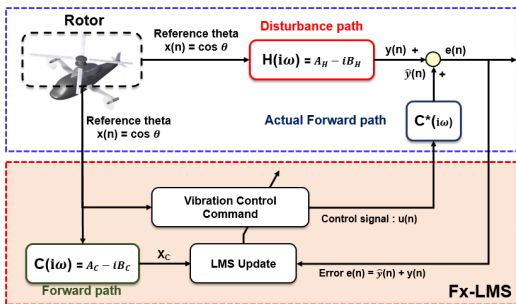


Fig. 7 Block diagrams for AVCS

스텝(time step)마다 경사 하강법(gradient descent<sup>(6)</sup>)을 이용하여 계산된다. 에러 신호( $e(n)$ )를 최소화 하기 위한 목적 함수( $J$ )의 정의와 업데이트된 제어 입력 ( $u(n+1)$ )의 표현은 다음의 식 (2)와 (3)과 같다.

$$J = E\{|e(n)|^2\} = e(n)^H e(n) \tag{2}$$

$$u(n+1) = u(n) - \frac{1}{2} \mu \left( \frac{\partial J(n)}{\partial u(n)} \right) \tag{3}$$

$$= u(n) - \mu C^H e(n)$$

이때,  $\mu$ 는 LMS 업데이트 방정식(식 (3))에 의해 실시간으로 계산되는 제어 입력의 수렴 속도를 결정하는 파라미터이며,  $\mu$ 의 값은 수렴 속도뿐만 아니라 제어기의 안정성을 결정하기 때문에 적절한 값을 사용하여야 한다. 이 논문에 사용된 AVCS 및 Fx-LMS 알고리즘에 대한 보다 자세한 내용은 선행 연구(4-7)에 서술되어 있다.

### (2) 시스템 식별

AVCS를 구성하는 전달 함수 모델은 선형 시불변(linear time invariant, LTI) 시스템으로, 이때, 시스템 식별(system identification)은 이미 알고 있는 입력값과 측정을 통해 확인 가능한 출력값을 이용하여 미지의 전달 함수 모델을 얻어내는 과정을 의미한다. 이 연구에서는 2P 로터 회전 진동수의 로터 허브 하중과 진동 상쇄 하중을 사용하여 기체를 각각 가진하여 지상 진동 시험을 수행하고 기체 주요 위치에서 측정된 진동 응답을 이용하여 기체 동역학 모델 및 작동기 모델에 대한 각각의 전달 함수를 얻었다. 측정된 진동 응답의 2P 진동수 성분을 추출하기 위해 MATLAB curve fitting tool를 이용하여 푸리에 변환(Fourier transform)을 수행하였다.

2P 로터 허브 진동 하중에 의한 기체 진동을 의미하는 disturbance path( $H(i\omega)$ )의 시스템 식별 과정은 Fig. 8과 같다. 입력값인 reference signal( $x(n)$ )는 로터의 2p 신호의 위상을 나타내며, reference signal( $x(n)$ )의

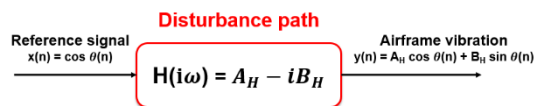


Fig. 8 System identification of disturbance path



$\theta(n)$ 은 로터당 2개의 블레이드를 갖는 lift-offset 로터의 매 시간 스텝의 회전을 적절히 표현할 수 있도록 식 (4)와 같이 정의한다. 이때는 로터의 회전속도를 표현한다. 출력값은 가속도계를 통해 측정된 기체 주요 위치에서 2P 기체 진동 응답( $y(n)$ )이다.

$$\theta(n) = N_b \times \omega \times t(n) \tag{4}$$

제어 입력( $u(n)$ )으로부터 하중 발생기가 생성하는 기체 진동의 수학적 전달 함수인 actual forward path( $C^*(i\omega)$ )는 가진진동수와 진동 상쇄 하중의 크기에 따라 다르게 표현될 수 있다. 따라서 실시간으로 업데이트되는 제어 입력으로 인하여 변화하는 진동 상쇄 신호의 동특성을 적절히 표현하기 위해, 진동 상쇄 하중 발생기의 최대 힘의 0%~60% 이내로 다양한 크기의 진동 상쇄 하중을 이용하여 기체를 가진하여 시스템 식별을 수행한다. 업데이트된 제어 입력으로부터 생성된 상쇄 진동 하중의 진동수는 유지된 채로 진폭과 위상만 적절히 변화시킬 수 있도록 하중 발생기의 제어 입력은 Cosine과 Sine 성분의 합인 조화 함수의 형태로 식 (5)와 같이 정의하였다.

$$u(n) = A \cos\theta(n) + B \sin\theta(n) \tag{5}$$

제어 입력에 따른 진동 상쇄 하중에 의한 2P 기체 진동 응답( $\hat{y}(n)$ )은 식 (6)과 같이 표현 가능하다. 이때  $A_2$  및  $B_2$ 는 MATLAB curve fitting tool을 이용하여 추출한 기체 주요 위치에서 2P 진동 응답의 1차 항의 상수이다.

$$\begin{aligned} \hat{y}(n) &= C^* u(n) \\ &= A [A_{c^*} \cos\theta(n) + B_{c^*} \sin\theta(n)] \\ &\quad + B [A_{c^*} \sin\theta(n) - B_{c^*} \cos\theta(n)] \end{aligned} \tag{6}$$

따라서 actual forward path( $C^*(i\omega)$ )의 전달 함수 모델은 식 (7)로 정리하여 나타낼 수 있으며, Fig. 9와 같이 표현된다.

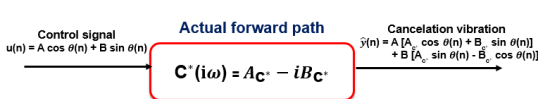
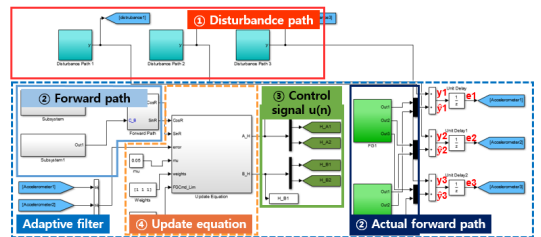


Fig. 9 System identification of actual forward path

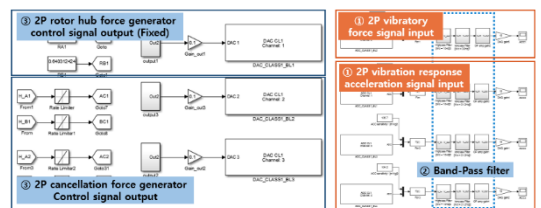
$$\begin{aligned} C^*(i\omega) &= A_{c^*} - iB_{c^*} \\ A_{c^*} &= \frac{AA_2 + BB_2}{A^2 + B^2}, \quad B_{c^*} = \frac{AB_2 - BA_2}{A^2 + B^2} \end{aligned} \tag{7}$$

### 2.3 축소 기체 구조를 이용한 능동 진동 제어 시험 기법

이 저자들의 선행 연구의<sup>(10,11,13)</sup> 능동 진동 제어 시뮬레이션 프레임워크를 기반으로 MATLAB Simulink 환경에서 Simulink 블록과 dSPACE RTI(real-time interface) 블록을 사용하여 능동 진동 제어 시험에서 사용될 능동 진동 제어 알고리즘을 모델링하였다 (Fig. 10). 축소 기체를 이용한 능동 진동 제어 시험에 사용된 하중 발생기의 가진진동수는 고속 비행 복합형 무인 회전익기의 2P 기체 진동 응답의 진동수를 표현하기 위하여 2P 진동수로 고정하였다. AVCS를 구성하는 disturbance path(Fig.10(a)의 ①)와 actual forward path 및 forward path(Fig. 10(a)의 ②)의 전달 함수는 전술한 시스템 식별 과정을 통하여 얻었으며, 진동 상쇄 하중 발생기로 전달되는 제어 입력(Fig. 10(a)의 ③)은 전술한 LMS 업데이트 방정식(식 (3), Fig. 10(a)의 ④)을 이용하여 매시간 스텝(0.0001 s)마다 계산된다. 이때 선행 연구의<sup>(10)</sup> 시뮬레이션 결과인 비행 속도 230 knot에서의 고속 수평 비행 조



(a) AVCS using Fx-LMS algorithm



(b) Signal input/output using dSPACE RTI block

Fig. 10 MATLAB simulink block diagram for AVCS test

건을 구현하기 위한 2P 로터 허브 진동 하중의 생성을 위한 하중 발생기의 제어 입력은 업데이트 되지 않고 고정된 값을 사용한다.

Fig. 11은 AVCS를 이용한 능동 진동 제어 시험의 개략도를 나타낸다. 이 논문의 AVCS는 3개의 가속도계(Fig. 11의 ①)와 2개의 진동 상쇄 하중 발생기(Fig. 11의 ②)를 사용하여 구성되었다. 가속도계의 위치는 선행 연구<sup>(10)</sup>의 가속도계의 배치를 참고하여 remote cockpit device, wing root 및 wing tip에 기체 수직 방향으로 배치하였다. 2개의 진동 상쇄 하중 발생기의 위치는 stick-line 모델 기반의 축소 기체 구조의 형상 특성을 고려하고, 축소 기체 구조의 진동 상쇄 하중 발생기를 이용한 시스템 식별 결과를 바탕으로 적절히 결정하였다.

축소 기체 구조의 주요 위치에 부착된 가속도계(Fig. 11의 ①)의 신호는 MicrolabBox(Fig. 11의 ③)의 ADC 채널(Fig. 10(b)의 ①)에 입력되며, 가속도계의 신호 수집 시 신호 처리 및 노이즈 필터링을 위하여 PCB사의 model 483C15(Fig. 11의 ④)와 high-pass filter와 low-pass filter를 결합한 band-pass filter(Fig. 10(b)의 ②)를 사용하였다. 2P 로터 허브 하중 및 진동 상쇄 하중을 생성하는 선형 하중 발생기를 구동하기 위한 제어 입력은 MicrolabBox의 DAC 채널(Fig. 10(b)의 ③)로 출력된다. MATLAB Simulink 블록과 dSPACE RTI 블록을 사용하여 모델링 된 능동 진동

제어 알고리즘 모델은 PC(Fig. 11의 ⑤)의 dSPACE ControlDesk 프로그램에 연동되어 이 연구의 능동 진동 제어 시험을 전체적으로 제어한다.

## 2.4 축소 기체 구조의 유한요소 모델을

### 이용한 능동 진동 제어 시뮬레이션 기법

2.1절에 서술된 축소 기체를 이용한 능동 진동 제어 시험 연구 모델에 대하여 시뮬레이션 연구를 수행하기 위하여 Fig. 12의 해석 모델을 이용하였다. 그림의 해석 모델은 MSC.NASTRAN을 이용한 유한요소 모델로 구축되었다. 자세한 모델링 기법 및 축소 기체 모델의 동특성 해석 결과에 대한 서술은 참고문헌<sup>(11)</sup>에 주어져 있으나, 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다. 축소 기체 구조의 유한요소 모델링 시, 51개의 1D Bar 요소와 211개의 2D Shell 요소를 사용하였다. 번지 케이블과 스프링은 CBAR와 CBUSH 요소를 각각 이용하여 구현하였으며, 시험 연구 모델과 동일하게 6개의 강체 모드를 적절하게 표현할 수 있도록 모델링하였다. 2P 로터 허브 진동 하중의 생성을 위한 하중 발생기와 진동 상쇄 하중의 하중 발생기 역시 자유 경계 조건을 이용하여 구현 되었으므로 이 유한요소 모델링에서는 표현되지 않았다. 가속도계의 무게(0.0028 kg)

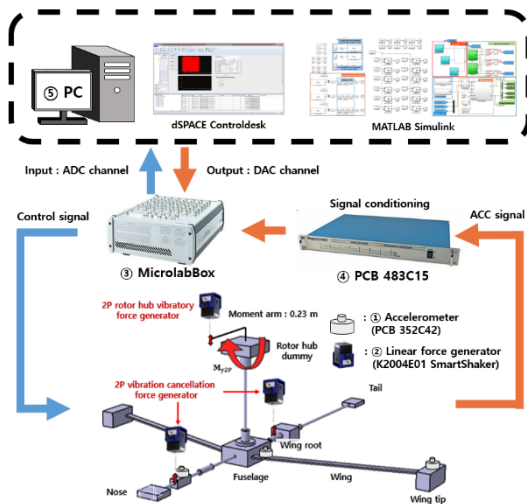


Fig. 11 Schematic diagram for active vibration control test using a small-scaled airframe model

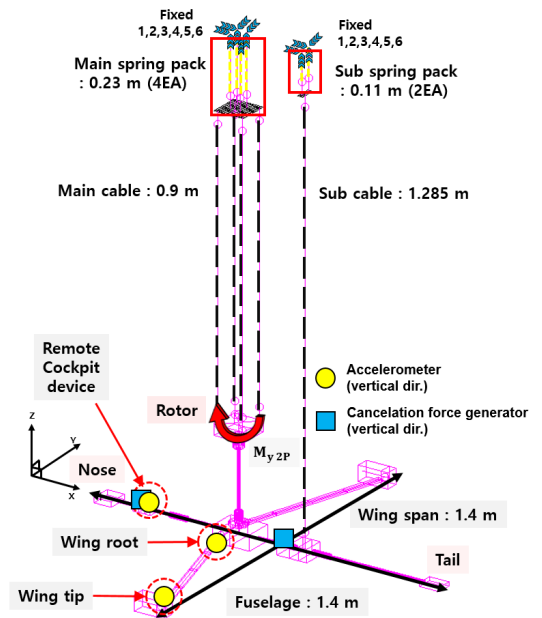


Fig. 12 Finite element model of a small-scaled airframe model for active vibration control simulation

는 축소 기체 구조의 전체 무게(9.2 kg)에 비하여 상당히 작은 값이므로 모델링하지 않았다. 유한요소 모델링 후, 주파수 응답 해석을 수행하여 이로부터 얻은 기체의 고유진동수가 자유 경계 조건의 모드 해석의 고유진동수와 유사함을 확인하였다<sup>(10,11)</sup>.

이후 고속 비행 복합형 무인 회전익기의 축소 기체 구조의 유한요소 모델을 이용한 능동 진동 제어 시뮬레이션을 위해 MATLAB Simulink를 사용하여 MIMO 기반의 AVCS를 Fig. 13과 같이 모델링하였다. Reference theta(Fig. 13의 block ①)는 축소 기체 구조의 2P 허브 하중의 위상을 나타내며, disturbance path(Fig. 13의 Block ②)는 유한요소 모델의 2P 진동 응답 해석 결과의 전달 함수를 의미한다. Forward path 및 actual forward path(Fig. 14의 block ③)는 진동 상쇄 하중 발생기를 통해 생성되는 유한요소 모델로 표현된 기체 진동의 전달 함수를 나타내며, 하중 발생기의 기체 수직 방향의 하중은 운용 범위 내의 최대 힘(maximum force of the 60%)을 가진하여 전달함수 모델을 추출하였다. AVCS의 제어 입력을 계산하기 위해 능동 진동 제어 시험에 사용한 Fx-LMS 기법을 동일하게 사용하였으며, 에러 신호( $e(n)$ )를 최소로 만드는 최적의 제어 입력 신호( $u(n)$ ) 역시 시험 연구에서 사용된 LMS 업데이트 방정식(식 (3))을 이용하여 계산하였다.

### 2.5 연구 결과

#### (1) 지상 진동 시험

능동 진동 제어 시험을 위해 먼저 disturbance path ( $H(i\omega)$ ) 및 actual forward path( $C^*(i\omega)$ )의 시스템 식별을 수행한다. 선행 연구의<sup>(10)</sup> 비행 조건 230 knot에서의 고속 비행 복합형 무인 회전익기의 기체 진동 응답 해석 결과와 유사한 수준의 기체 수직 방향의

2P 진동 응답을 축소 기체 모델에서도 얻을 수 있도록 2P 허브 피치 모멘트의 크기를 Fig. 12의 MSC.NASTRAN 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 결정하였다. 가속도계로 측정된 기체 수직 방향의 2P 기체 진동 응답은 MATLAB curve fitting tool을 이용하여 주파수 영역으로 변환하고 전술한 시스템 식별 과정을 통해 25% 축소 기체 구조의 기체 수직 방향 2P 진동 응답의 동특성(disturbance path,  $H(i\omega)$ )을 추출한다. 이후 2개의 진동 상쇄 하중 발생기를 각각 작동하여 작동기의 운용 범위 이내의 진동 상쇄 하중을 기체 구조 모델에 가한 후 측정된 가속도 신호를 분석하여 진동 상쇄 하중 발생기의 전달 함수 모델(actual forward path,  $C^*(i\omega)$ )을 식별하였다.

Fig. 14는 선행 연구<sup>(10)</sup>의 full-scale 모델을 이용한 GVT 모델의 기체 수직 방향의 2P 진동 응답 해석 결과와 이 논문의 축소 기체 구조를 이용한 GVT 모델의 기체 수직 방향의 2P 기체 진동 응답 해석 및 지상 진동 시험 결과를 비교하여 나타낸다. 선행 연구<sup>(10)</sup>의 full-scale 모델의 기체 진동 응답 해석에서는 3종류의 2P 로터 허브 진동 하중( $F_{x2p}$ ,  $F_{z2p}$ , 및  $M_{y2p}$ )이 모두 이용된 반면, 이 연구의 축소 기체 모델의 경우, 2P 허브 피치 모멘트( $M_{y2p}$ )만 사용하였다. 축소 기체 구조를 이용한 지상 진동 시험을 수행한 결과, 축소 기체 구조의 주요 위치(remote cockpit device, wing root 및 wing tip)에서 기체 수직 방향의 2P 기체 진동 응답이 선행 연구의<sup>(10)</sup> full-scale 모델의 시뮬레이션 연구 결과와 비교하여 1.07% ~ 51.27%의 차이를 보였다. Remote cockpit device의 위치에서는 매우 작은 오차(-1.07%)를 가지므로, 축소 기체 모델은 full-scale 모델의 2P 기체

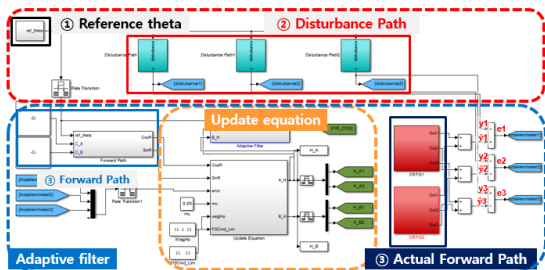


Fig. 13 MATLAB simulink block diagram for active vibration control simulation

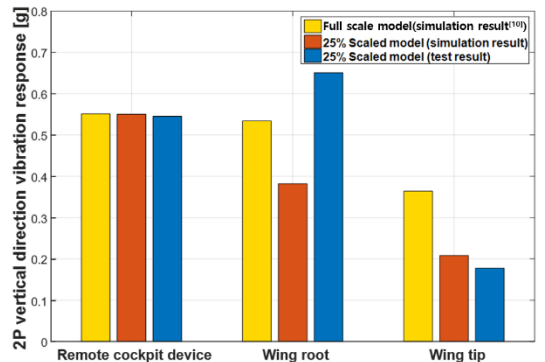


Fig. 14 Comparison of 2P vertical vibration responses between full- and small-scale models (230 knot)

진동 응답이 가장 극심한 remote cockpit device의 기체 진동 응답의 크기를 잘 모사하고 있다. 그러나, wing tip의 위치에서는 -51.27%의 비교적 큰 오차가 확인되었다. Fig. 14의 평균 오차의 크기(24.74%)는 선행연구<sup>(8,14,15)</sup>의 평균 오차(15.46%)의 크기와 비교 시, 다소 높으나, 이 연구의 모델의 경우 선행 연구에 비하여 상당히 고속 비행(230 knot) 조건임을 고려할 시, 얻어진 오차의 크기는 적합하다고 판단된다. 또한, 축소 기체 구조 모델의 wing tip에서 기체 진동 응답이 full-scale 모델 대비, 다소 낮게 예측 및 측정되었으나, 일반 헬리콥터 진동 목표<sup>(16)</sup> 수준인 0.1 g 이상의 높은 진동을 보이므로 AVCS 적용 가능성을 평가하기 위한 적절한 지상 진동 시험 모델을 구축하였다고 판단하였다.

## (2) AVCS를 이용한 능동 진동 제어

전술한 축소 기체 구조 모델과 AVCS를 이용하여 능동 진동 제어 시험 및 능동 진동 제어의 경향성 평가를 위한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 1축 가속도계를 이용한 축소 기체 구조의 수직 방향의 가속도계 신호는 30초간 수집되었으며, AVCS는 능동 진동 제어 시험 및 시뮬레이션 시작 6초 이후 19초 동안 적용하였다. 능동 진동 제어 시험 시작 15초~25초에 수집된 2P 기체 진동 응답의 피크의 절대값의 평균을 이용하여 능동 진동 제어 성능을 평가하였다. Fig. 15는 AVCS를 이용하여 제어(감소)된 기체 수직 방향의 진동 응답의 감소율을 나타내며, 시험의 경우 84.67%~47.54%, 시뮬레이션의 결과에서는 87.12%~15.44%만큼의 진동 감소율을 얻을 수 있었다.

Figs. 16~18에 축소 기체 모델에 대한 능동 진동 제어의 시험 및 시뮬레이션 연구 결과를 시간 영역에서 나타내었다. Remote cockpit device 위치에서의 시험 및 시뮬레이션 결과가 각각 84.67% 및 87.12%의 우수한 감소율을 보이며(Fig. 16), 시험 및 시뮬레이션의 결과의 오차가 2.89%로 상당히 유사함을 알 수 있다. Fig. 17에 주어진 wing root에서는 69.19% 및 83.54%의 진동 감소율을 시험 및 시뮬레이션에서 각각 얻었으며, 역시 우수한 진동 성능을 확인할 수 있다. 마지막으로 wing tip의 진동 응답은 시험 및 시뮬레이션에서 47.54% 및 15.44%만큼 각각 감소되었으며(Fig. 18), 이 연구에서 사용된 3곳의 진동 응답 제어 결과 중 가장 낮은 감소율을 보였다. Wing root 및 tip에서의 진동

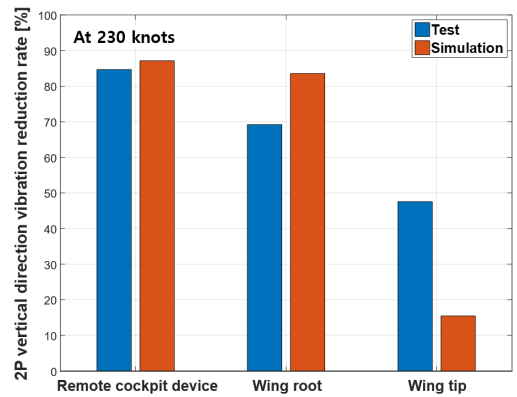
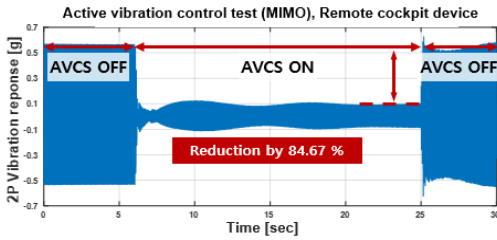


Fig. 15 2P airframe vibration reductions using AVCS

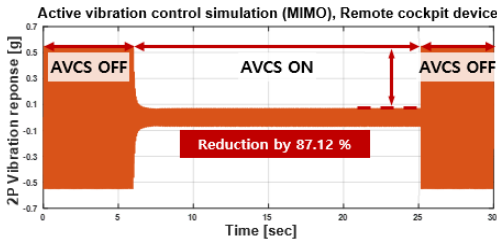
감소율에 대한 시험 대비 시뮬레이션의 오차는 각각 20.74% 및 -67.52%로 작은 오차는 아니지만, AVCS를 이용한 선행연구<sup>(4)</sup>의 진동 감소율에 대한 시험 대비 시뮬레이션의 오차(약 68%)와 비교 시, 이 연구의 경우, 적절한 수준의 오차로 판단할 수 있다.

이와 같은 진동 감소율에 대한 얻어진 오차는 축소 기체 구조의 진동 응답 해석 및 시험의 측정 결과의 차이로 인하여 발생되었으며, 축소 기체 구조에 사용된 재료 물성치와 축소 기체 구조 및 선형 하중 발생기의 자유 경계 조건 구현을 위해 사용된 스프링의 감쇠 효과를 시뮬레이션에서 적절하게 표현하지 못하였기 때문으로 판단된다. 또한 Fig. 16(a)에서 관찰되는 remote cockpit device 위치에서 AVCS 작동 시 능동 진동 제어 시험 초기의 진폭의 출렁임은 자유 경계 조건 및 full-scale 모델의 동특성을 적절히 구현하기 위해 낮은 강성의 스프링을 사용하였기 때문으로 사료된다. 그러나 능동 진동 제어 시험과 시뮬레이션 모두 AVCS 작동 이후 능동 진동 제어를 위한 제어 입력이 2초 이내로 수렴되어 매우 유사한 거동을 보였다.

능동 진동 제어 시험 결과, wing root에서 기체 수직 방향의 제어된 2P 기체 진동 응답이 0.201 g로 일반 헬리콥터의 기체 진동 목표<sup>(16)</sup> 수준인 0.1 g보다 높게 측정되었다(Fig. 17(a)). 그러나 AVCS 적용 이전의 기체 진동 응답(0.6508 g)에 비해 약 70% 감소한 결과로 매우 높은 수준의 진동 감소율을 보였다. 또한 wing tip에서 AVCS를 이용한 능동 진동 제어 시험 결과 AVCS 작동 이전의 기체 진동 응답은 0.177 g로 0.1 g 이상의 높은 진동 응답이 측정되었으나, AVCS

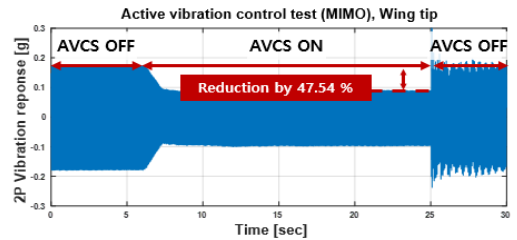


(a) Test

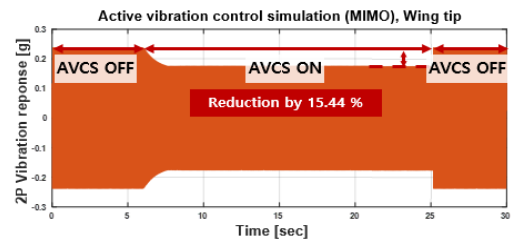


(b) Simulation

**Fig. 16** Reduced 2P vertical direction vibration responses using AVCS at remote cockpit device

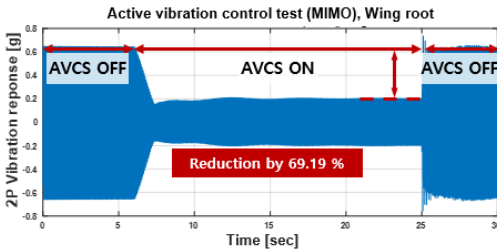


(a) Test

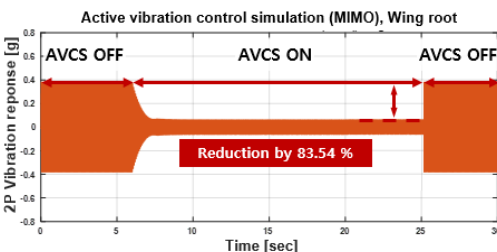


(b) Simulation

**Fig. 18** Reduced 2P vertical direction vibration responses using AVCS at wing tip



(a) Test



(b) Simulation

**Fig. 17** Reduced 2P vertical direction vibration responses using AVCS at wing root

작동 이후 0.0843 g로 제어(감소)되어 일반 헬리콥터 진동 목표 수준인 0.1 g이하의 진동 수준을 보이기 때

문에 이 논문의 AVCS를 이용한 능동 진동 제어 시험 결과는 적절한 것으로 판단하였다. 따라서 이 연구의 lift-offset 복합형 회전기의 동체에 AVCS를 적용하여 동체뿐만 아니라 날개 및 프로펠러 위치에서도 적절한 능동 진동 제어가 가능함을 확인하였다.

### 3. 결 론

이 연구에서는 lift-offset 로터, 날개 및 프로펠러를 사용하는 5000 lb급의 고속 비행 복합형 무인 회전익기에 대하여 축소 기체 구조를 이용한 기체의 능동 진동 제어 시험 연구를 수행하였다. 축소 기체 구조는 실물 크기 모델의 230 knot 조건의 기체 진동 응답을 적절히 모사하며, 1.4 m 크기 (25% small-scale model)로 설계 되었으며, 비행 조건을 모사할 수 있도록 지상 진동 시험 모델로 구현되었다.

기체 수직 방향의 2P 기체 진동 응답에 대하여 능동 진동 제어 시험을 위해 3개의 가속도계와 2개의 하중발생기로 구성된 MIMO 기반의 AVCS를 사용하였다. AVCS의 진동 상쇄 하중을 생성하는 제어 입력을 Fx-LMS 알고리즘에 의해 결정하였으며, 선행 연구의 능동 진동 제어 시뮬레이션 프레임워크를 기반으로 MATLAB Simulink 환경에서 AVCS를 구성하

었다. MATLAB Simulink 블록과 dSPACE RTI 블록을 사용하여 구현된 능동 진동 제어 알고리즘 모델은 PC의 dSPACE ControlDesk 프로그램에 연동되어 이 연구의 능동 진동 제어 시험을 전체적으로 제어하였다.

축소 기체 구조에 AVCS를 적용하였을 경우, 대부분의 기체 주요 위치에서 기체 수직 방향의 2P 진동이 84.67%~47.54% 감소함을 확인하였다. 축소 기체 구조의 remote cockpit device 위치에서 시험-시물레이션의 진동 감소율이 매우 잘 일치(2.89%의 오차)하였으며, 능동 진동 제어 시험과 시물레이션 모두 AVCS 작동 이후 능동 진동 제어를 위한 제어 입력이 2초 이내로 수렴되어 매우 유사한 거동을 보였다. 특히 wing tip에서 기체 진동 응답이 일반적인 헬리콥터의 진동 목표 값인 0.1 g 이하로 제어되었다. 이 연구를 통하여 lift-offset 복합형 회전익기에 AVCS를 사용하여 동체에서 생성된 진동 상쇄 하중으로부터 동체뿐만 아니라 날개 및 프로펠러 위치에서도 기체 진동 응답 제어가 가능함을 축소 기체 구조 모델을 이용한 시험 및 시물레이션을 통하여 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 차세대 고속 복합형 무인 회전익기 특화연구실에서 수행되었습니다. 이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2020 R111A3071793). 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2021 R1A5A1031868).

## References

(1) Ruddell, A. J., Groth, W. and McCutcheon, R., 1981, Advancing Blade Concept(ABC) Technology Demonstrator, US Army Research and Technology Laboratories, USAAVRADCOM-TR-81-D-5.

(2) Bagai, A., 2008, Aerodynamic Design of the X2 Technology Demonstrator™ Main Rotor Blades, Proceedings of American Helicopter Society 64th Annual Forum, Montréal, Canada.

(3) Blackwell, R. and Millott, T., 2008, Dynamics

Design Characteristics of the Sikorsky X2 Technology™ Demonstrator Aircraft, Proceedings of American Helicopter Society 64th Annual Forum, Montréal, Canada.

(4) Kim, D.-H., Kim, T.-J., Jung, S.-U. and Kwak, D.-I., 2016, Test and Simulation of an Active Vibration Control System for Helicopter Applications, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 17, No. 3, pp. 442-453.

(5) Kim, D.-H., Kwak, D.-I. and Song, Q., 2019, Demonstration of Active Vibration Control System on a Korean Utility Helicopter, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 20, No. 1, pp. 249-259.

(6) Kim, D.-H., 2021, Multicyclic Helicopter Vibration Control, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 247-259.

(7) Lee, Y.-L., Kim, D.-H., Park, J.-S. and Hong, S.-B., 2020, Vibration Reduction Simulations for Rotor and Airframe of a Lift-offset Compound Helicopter Using Two Active Vibration Control Techniques, Journal of the Aerospace Science and Technology, Vol. 106, 106181.

(8) Kvaternik, R. G., Juang, J.-N. and Bennett, R. L., 2000, Exploratory Studies in Generalized Predictive Control for Active Aeroelastic Control of Tiltrotor Aircraft, NASA/TM-2000-210552.

(9) Piatak, D. J. and Kunz, D. L., 1999, Experimental Investigation of a Fullspan Tiltrotor Model with Higher-Harmonic Vibration Control, Proceedings of the Eighth ARO Workshop on Aeroelasticity of Rotorcraft Systems, State College, PA.

(10) Hong, S.-B., Lee, Y.-L. and Park, J.-S., 2020, Airframe Vibration Reduction Simulations of High-speed Compound Unmanned Rotorcrafts Using Active Controls, 2020 Spring Conference of the Korean Society of Aeronautics and Space Sciences Proceedings, Sokcho, Korea.

(11) Hong, S.-B., Kim, J.-S. and Park, J.-S., 2020, Design and Active Vibration Control Simulation for a Small-scaled Model of High-speed Compound Unmanned Rotorcrafts, 2020 Korea Institute of Science and Technology Annual Conference Proceedings, Online, Korea.

(12) Kim, J.-S., Hong, S.-B., Kwon, Y.-M. and Park, J.-S., 2021, Effect of Lift-offset Rotor Hub Vibratory Load Components on Airframe Vibration Responses of High-speed Compound Unmanned Rotorcrafts, *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 24, No. 3, pp. 255~263.

(13) Hong, S.-B., Kwon, Y.-M., Kim, J.-S. et al., 2021, Active Airframe Vibration Control Simulations of Lift-offset Compound Helicopters in High-speed Flights, *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 357~367.

(14) Settle, T. and Nixon, M., 1997, MAVSS Control of an Active Flaperon for Tiltrotor Vibration Reduction, *Proceedings of the American Helicopter Society 53rd Annual Forum*, Virginia, USA.

(15) Yeo, H. and Chopra, I., 2001, Coupled Rotor/Fuselage Vibration Analysis Using Detailed 3-D Airframe Models, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 33, No. 10~11, pp. 1035~1054.

(16) Walsh, D., Weiner, S., Arifian, K. et al., 2011, High Airspeed Testing of the Sikorsky X2 Technology™ Demonstrator, *Proceedings of the*

*American Helicopter Society 67th Annual Forum*, Virginia Beach, VA.



**Sung-Boo Hong** is currently a graduate student in Department of Aerospace Engineering from Chungnam National University, Daejeon, Korea. His research interests include the active vibration control tests and simulations of

rotorcraft.



**Jae-Sang Park** received Ph.D. degree in Mechanical and Aerospace engineering, from Seoul National University, Seoul, Korea in 2006. Dr. Park is currently an associate professor, Department of Aerospace engineering, Chungnam National

University, Daejeon, Korea. His research interests include aerospace structural analyses and rotorcraft aeromechanics analyses.

# 군용비행장·군사격장 소음 방지 및 피해 보상에 관한 법률의 개선방향

## Possible Improvements to the 「Military Airfields and Military Firing Ranges Noise Prevention and Compensation Act」

홍정현\*·하용훈†

Joung Hyun Hong\* and Yonghoon Ha†

(Received September 8, 2021 ; Revised October 7, 2021 ; Accepted October 7, 2021)

**Key Words :** Military Noise Prevention and Compensation Act(군소음보상법), Military Noise Damage Compensation(군소음보상), Area Requiring MeasureS Against Noise(소음대책지역), Compensation for Noise-induced Damage(소음피해보상금)

### ABSTRACT

This study aims to identify any problems that may arise as a result of enforcing the 「Military Airfields and Military Firing Ranges Noise Prevention and Compensation Act」 and suggest improvements regarding the enforcement of the law. To do so, the purpose and main contents of the law, are compared to those of the 「Airport Noise Prevention and Areas Assistance Act」 a well as similar legislations enforced overseas. Specifically, this study aims to identify improvements to the law by conducting a series of interviews with residents living around military airfields and firing ranges. Suggested improvements to the enforcement of the law include higher noise compensation standards, a higher minimum compensation, and a practical solution in the form of noise countermeasures.

### 1. 서 론

2019년 11월 27일에 「군용비행장·군사격장 소음방지 및 피해 보상에 관한 법률」(이하 군소음보상법)이 제정되어 2020년 11월 28일부터 시행되고 있다. 그러나, 군소음보상법의 제정 목적인 ‘군시설의 소음방지 및 피해에 대한 보상, 생활환경 보장을 통한 군사활동의 안정된 기반조성’과는 다르게 법에 제시된 보상기준의 소음기준치가 민간 공항의 소음에 대한 「공항소음방지 및 소음대책지역 지원에 관한 법률」

(이하 공항소음방지법)에 비하여 높고, 군 사격장은 특성상 소음 외에 진동과 먼지로 인한 피해도 있는데 보상 대상이 소음에만 한정되어 있다

또한, 소음대책 사업, 주민지원 사업 등 피해지역의 지원에 대한 내용이 포함되지 않고, 적은 보상금액 등이 법안 통과 후에도 지속적인 문제점으로 대두되고 있다. 이는 지역 주민들이 과거 십수 년간 시달려 온 오랜 피해의 감정을 치유할 정도의 피해 보상에 대한 법적인 근거가 미약하고 충분한 내용을 담지 못하고 있어 법 개정 요구, 사격훈련 반대 및 군 공항 이전 시위 등 새로운 갈등 요인으로 작용되고 있는

† Corresponding Author ; Member, Department of Defense Science, Korea National Defense University, Assistant Professor  
E-mail : yonghoonha@mnd.go.kr

\* Department of Defense Science, Korea National Defense University, Graduate Student

‡ Recommended by Editor Jong Seok Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering



실정이다. 따라서, 이 연구는 법의 제정 배경과 「공항 소음방지법」, 국외 유사법 적용 사례를 비교하고 소음지역의 피해 주민들과의 인터뷰를 통한 의견수렴을 종합분석하여 소음으로 인한 지역의 갈등 해소에 도움이 될 수 있는 법으로 개선해 나갈 수 있는 방향을 제시한다.

## 2. 군소음보상법의 주요내용

### 2.1 제정배경 및 경과

군에서 운영하는 비행장과 사격훈련장의 소음피해에 대하여 현재까지 제도적 방법으로는 국가소송을 통하여 국가배상을 받는 것이 유일한 구제의 방법이 었다. 이러한 현실에 대한 개선방안으로 군소음 피해에 대하여 소송을 통한 배상보다 국가가 보상을 해 줄 수 있는 법안이 15대 국회때 처음 발의<sup>(1)</sup>되었으나 예산 등의 문제로 20대 국회에 와서야 법으로 제정되게 되었다. Fig. 1은 법 시행 이전과 법 시행이후의 소음 피해 보상 절차를 나타낸 것이다. 법 제정 이전 법적 근거가 없어 군 소음 피해 지역 주민들이 배상을 받기 위해서는 반복적으로 변호사를 선임하고 국가소송 통하여 배상 판결에 따라 국가배상금을 받는 체계에서 법 시행에 따라서 기존의 소송절차 없이 소음 피해 정도에 대하여 매년 정해진 기준에 따라 보상금을 국가로부터 받을수 있게 되었다. 소음기준과 보상금액 또한 기존의 국가소송 시 법원의 판례를 기초로 하여 동일한 수준으로 소음기준에 따른 보상금액이 지급되도록 법적 근거가 마련되었다.

### 2.2 소음피해 보상 대상 및 기준

법 제2조에 따라 군용비행장과 군사격장이 해당되며 군비행장은 「군사기지 및 군사시설 보호법」 상에

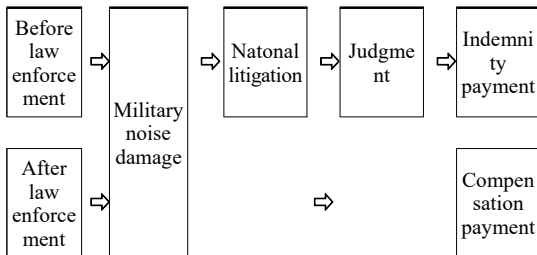


Fig. 1 Improvement of noise damage compensation procedure

명시된 48개 비행장으로 한정되고 그 이외의 헬기를 운용하는 헬리콥터나 항공기가 빈번히 운용되는 훈련장 등은 대상지역에 포함되지 않는다. 군사격장은 군이 활용할 목적으로 사격을 할 수 있도록 시설을 갖춘 특정 장소로 약 1천여 곳의 사격장이 해당된다.

소음보상을 위해서 해당 비행장 및 사격장의 소음에 대한 소음영향도를 조사하고 소음피해정도에 따라 Table 1<sup>(2)</sup>과 같이 1 ~ 3종 구역으로 구분하여 소음대책지역으로 지정된다.

Table 1의 비행장을 대구지역 등과 그 외의 지역으로 구분한 것은 기존 법원의 판례를 따라 대구, 광주, 수원은 대도시로 분류하여 85웨클 이상을 소음 피해 기준으로 보았고 그 외의 지역은 대도시보다 생활 소음이 적은 지역으로 구분하여 80웨클 이상을 소음피해의 기준으로 정하였으며, 사격장의 경우 대형화기 사격장은 진동과 저주파 충격의 발생을 고려하여 소음수치에 성가심 지표(%HA)를 반영하여 보정한 dB(C)<sup>(3)</sup>로, 소형화기는 사람의 청각과 최대한 유사한 소음측정 단위인 dB(A)로 소음 피해 기준을 정하였다.

### 2.3 보상금 지급

보상금액은 현재까지 우리나라의 군 소음과 관련된 법원의 배상 판결을 기준으로 정해졌으며, Table 2와 같이 소음대책지역별로 보상금을 차등 지급하도록 되

Table 1 Based on the noise level by area

Division		Area requiring measures against noise		
		Category 3 zone	Category 2 zone	Category 1 zone
Airfield	Dae-gu, Gwangju, Suwon (WECPNL)	85 ~ 90	90 ~ 95	Over 95
	Other areas (WECPNL)	80 ~ 90		
Range	Large firearm (dB(C))	84 ~ 90	90 ~ 94	94 dB
	Small firearm (dB(A))	69 ~ 77	77 ~ 82	82 dB

Table 2 Area requiring measures against noise compensation

Division	Category 3 zone	Category 2 zone	Category 1 zone
Compensation (KRW)	30 000	45 000	60 000

**Table 3** Reduction standard

Reason for reduction	Reduction rate	Note	
Where a resident moved into the area on or after January 1, 1989	30 %	Machyang-ri range First issue of noise damage	
After January 1, 2011	50 %	The date of the first compensation judgment at the military airfield	
Work place	Exceeds 100 kilometers	Reduction by 100 %	
	Within 100 kilometers	Reduction by 30 %	
Number of days of residence	Excluded from the number of days of residence (Military serve, staying abroad such as emigration. etc)	Actual number of days of residence only	
Number of shooting days	No shooting	100 %	Actual number of days of firing per month
	1~7 days	Reduction by 2/3	
	8~14 days	Reduction by 1/3	
	More than 15 days	No reduction	

어 있다.

소음피해에 대한 보상시기는 과거 1년간의 피해에 대하여 연간 보상금액을 1년 단위로 소급하여 매년 지급한다. 보상금 지급은 국방부에서 예산을 획득하여 각 지방자치단체로 할당을 하고 지방자치단체에서는 해당 주민들로부터 소음피해보상금 청구 접수를 받아 지급하도록 정하고 있다.

대책지역별 보상금액은 소음피해보상금 신청 후 Table 3<sup>(5)</sup>의 감액기준에 따라 해당사항을 감액 후 지급된다. 이 기준은 기존의 국가배상 판결시 ‘위험에의 접근’ 이론<sup>(4)</sup>에 따라 전입시기 등을 고려하여 감액의 근거로 정하고 있는 것과 동일하다.

법의 제약사항으로는 Table 4<sup>(6)</sup>와 같이 법 제6조 소음대책지역에서 시설물의 설치 제한에 따라서 1종 구역에 한해서만 방음시설 설치시 시설물의 설치를 허가하도록 정하고 있다.

**2.4 국외·국내 법 비교**

소음과 관련한 국외의 관련 법을 알아보면 비행장

**Table 4** Restriction on installation of facilities

Division	Category 3 zone	Category 2 zone	Category 1 zone
Residential facility	No limit	No limit	Permission to install soundproofing facilities
Education and medical facilities	No limit	No limit	Permission to install soundproofing facilities
Public facilities	No limit	No limit	Permission to install soundproofing facilities

**Table 5** Overseas noise-related law

Division	Category 3 zone	Category 2 zone	Category 1 zone
US (WECPNL)	70~74	75~79	80~84
		Limited use	Land use restrictions
Japan (WECPNL)	Over 75	75~90	90~95
		Loss compensation	Buffer zone
Germany (Lden)	Less than 62	67~75	Over 75
			Loss compensation

소음에 대한 법은 제정되어 있지만, 사격장에 관한 규제된 법은 없는 것으로 확인되었고, 미국, 독일 등의 국가에서는 사격 소음에 대한 관리 차원에서 규정 수준으로 기준을 마련하여 활용하고 있다. 또한, 소음대책지역의 선정은 Table 5<sup>(7)</sup>와 같이 국내 「공항소음방지법」과 유사하게 대책지역을 선정하고 해당 지역에 대한 소음대책사업이나 주민지원사업을 시행하고 있지만, 소음피해에 대한 보상금을 지급하는 국가는 없다.

특히, 미국의 경우 중별 구역은 정하고 있지 않으며 공항 시설 적정사용지역(AICUZ, airport installation compatible use zone)<sup>(8)</sup> 프로그램을 운영하고 있으며 소음구역(noise zone)을 정하여 토지이용 제한에 중점을 두고 있다.

국내에서는 「소음·진동관리법」을 근거로 국토부에서 공항의 소음에 대해서는 「공항소음방지법」에 따라 소음에 대한 규제를 하고 있으나, 군용 비행장은 대상에서 제외되며 민간 공항만 법의 적용을 받고 있으며

**Table 6** Enforcement decree of airport noise prevention and areas assistance act

Division	Category 3 zone	Category 2 zone	Category 1 zone
Standard (WECPNL)	75 ~ 90	90 ~ 95	Over 95
Noise countermeasure project	- Compensation for demolition of buildings and land in the area - Compensation for loss of relocating buildings and land fixtures within the area to outside the countermeasure area - Request for purchase of land in the relevant area		
Resident support project	- Soundproofing facilities, air conditioning bill, TV license fee support - Libraries, sports parks for senior citizens, etc.		

공항주변의 소음피해지역에 대해서는 Table 6<sup>(9)</sup>과 같은 기준에 따라서 소음대책사업 등을 시행하고 있다.

### 3. 법 시행에 대한 인터뷰 결과

인터뷰는 비행장 및사격장 인근 주민대표 및 지자체 관계자와 소음 전문가 등 약 140여 명을 대상으로 2020년 8월부터 21년 4월까지 군비행장 및 사격장 소재 지역 30여 개소를 방문하여 법의 시행 배경과 향후 진행에 대한 설명, 질의응답, 의견수렴 등으로 진행하였다.

인터뷰 결과를 종합해보면 법 제정에 대해서는 군 소음에 대한 보상의 근거가 마련된 것에 큰 의미가 있다는 점에 공감대가 형성되어 있으나, 법 시행에 있어서는 이견이 많았다. 지자체 관계자나 소음 전문가 집단에서는 소음기준을 「공항소음방지법」과 동일한 수준으로 낮추고 소음대책사업 등의 포함이 필요하다는 의견이 있었으나, 법 시행 초기이므로 향후 점차적으로 개선될 여지가 있는 점에서 긍정적인 입장이었다. 그러나 주민대표 집단에서는 법 시행 자체에 대한 부정적인 의견이 대부분이었는데 그 이유는 십수 년간을 군 소음에 시달려 왔는데 이제 제정된 법이 보상은 약하고, 기준은 높으며, 개인 재산권까지 침해하는 내용을 포함하여 주민들의 희생만을 강요하는 법이라는 인식 때문이었다. 따라서 법의 개선이 반드시 필요하다는 입장이었다.

이와 같이 인터뷰 결과를 종합하여 개선이 필요한 사항으로 주장하는 문제를 정리하면 Table 7의 4가지

**Table 7** Law improvement requirement

Division	Contents
1	Increase in compensation amount and decrease in compensation standard
2	Deletion of reduction criteria for compensation
3	Including compensation, noise countermeasures, and resident support project
4	Removal of restrictions on new construction

사항으로 정리할 수 있다.

기타 사항으로 소음 이외에 가축 피해 보상, 진동과 먼지 등에 대한 보상, 전투기에 비해 소음이 적은 헬기에 대한 별도의 소음측정기준 마련 등의 의견이 있었으나, 연구에서 제외하였다.

### 4. 개선방향

「군소음보상법」의 제정으로 군 소음에 대하여 보상 할 수 있는 근거가 마련되고 현재는 다소 내용이 부족하여도 향후 보완해 나갈 수 있다는 점에 큰 의미를 두고 있다. 그러나 법 시행 초기에 보상기준과 보상금 등의 이견으로 일부 지역에서는 새로운 갈등으로 확산되고 있다. 또한, 법에 따라 2021년 현재 소음측정을 통하여 2022년부터 최초로 보상금이 지급되기 시작하면 보상금의 문제, 보상지역의 문제 등 새로운 갈등은 더욱 커질것이고 법의 개선요구는 더욱 급증할 것으로 예상된다. 따라서, 앞서 알아본 국내 공항소음방지법, 국외사례, 인터뷰결과 등을 바탕으로 개선방향을 4가지의 방향으로 제시하고자 한다.

#### (1) 현실적 보상대책 마련

현실적 보상을 위해서는 보상금을 상향하던지, 보상기준을 낮추어야 하는데 보상금 상향보다는 보상기준을 낮추는 것이 더 합리적일 것이다. 그 이유는 현 「군소음보상법」과 「공항소음방지법」의 최저 소음기준이 다르게 적용되어 형평성의 문제는 계속 제기될 것이며, 국외의 사례에서도 알 수 있듯이 공항의 성격에 따라서 소음기준을 다르게 적용하는 경우는 없기 때문이다. 그러나, 보상기준을 낮추는 것은 국가의 소음보상금 예산에 직접적으로 영향을 미치는 사안으로 Table 8<sup>(10)</sup>과 같이 보상기준을 80웨클에서 75웨클로

**Table 8** Estimating the cost when the compensation standard is lowered

Compensation criteria	80~85 WECPNL	80 WECPNL	75 WECPNL
Number of residents affected by noise	Population 304.000	Population 522 000	Population 1280.000
Compensation year budget	80.3 billion won	137.8 billion won	337.9 billion won
Magnification	1.0	1.7	4.2

조정할 경우 소요예산은 약 4배 이상 급증하게 된다. 따라서 22년 최초 보상금의 집행결과에 따라 점진적으로 기준 완화에 대한 검토가 필요할 것이다.

(2) 보상범위 및 보상방법의 다양화

현재의 보상금 외에 「공항소음방지법」과 같이 소음대책사업과 주민지원사업도 병행하도록 보상 방법을 다양화할 필요가 있다. 이는 소음 크기에 따라 보상을 현금으로 개인별 차등 지급하는 제도는 세계에서 유일하며 이에 따른 지역 내의 주민 간에 새로운 갈등 요인이 될 수 있다. 또한, 현금 보상에 따른 향후 물가 상승률 등의 요인으로 인한 보상금액 상승 고려시, 실효성 면에서 개인별 보상금의 상향보다 효과가 더 크다고 사료된다. 이러한 문제와 갈등요소를 차단하고 개선하기 위해서는 다음과 같은 방안들을 제시한다.

- ① 보상금 지급 기준을 소음등고선에서 마을단위로 변경
- ② 지자체에서 보상금 지급과 주민지원사업을 병행
- ③ 보상금 지급을 소음대책사업 또는 주민지원사업 등으로 변경

①안은 현재의 소음대책지역 결정 시 소음등고선으로 구분하여 지정하게 됨에 따른 문제점을 최소화하기 위한 방안이다. 보상금 지급기준은 등고선으로 경계선을 정하든 마을단위로 하든 어떤 방식이던지 소음등고선에 인접하지만 대상에 포함되지 않는 주민들로부터의 갈등과 민원은 발생할 수밖에 없다. 또한 소음등고선은 측정시마다 약간의 오차가 있을 수 밖에 없어 경계에 인접한 주민들이 소음 조사에 대하여 신뢰하지 않을 가능성이 매우 높다<sup>(11)</sup>. 따라서, 이와 같은 주민 간의 갈등과 소음 조사 결과에 대한 불복 사례를 최소화 시키기 위해서는 소음영향도 조사 결

과 소음등고선 경계선에 포함되는 마을의 최소단위(리 또는 동단위)까지를 소음대책지역으로 포함 시켜야 할 것으로 판단된다.

②안은 보상금 재원을 가지고 개인에게 보상금을 지급할 것인지, 또는 지역 주민지원사업 예산으로 활용할 것인지를 지자체에서 결정하도록 하는 방법이다. 현재의 보상금 지급 체계도 소음측정 결과를 기초로 보상 대상이 확정되면 지자체로 보상금 예산이 배정되어 지자체에서 집행하도록 되어 있으므로 지역별로 주민들이 요구하는 보상 방법 등 지역특성에 따라서 선택 적용이 가능도록 법 개정이 이루어진다면 추가예산의 증액 없이 적용할 수 있는 방법이다.

③안은 소음피해에 대하여 현금을 지급하는 사례는 국외에서도 찾아볼 수 없고 소음대책사업, 주민지원사업 등으로 지역주민들에게 보상이 되도록 하고 있다. 따라서, 「군소음보상법」도 현행 현금 보상 보다는 주민지원사업, 대책사업, 복지사업 등으로 해당 군 시설 주변 지역에 도움이 될 수 있는 지원형태로 전환하는 것도 바람직한 방법이라고 사료된다. 이 방법을 적용하는 경우에는 「공항소음방지법」의 소음피해에 대한 지원과 동일한 방법으로 국가적으로 소음피해에 대한 정책시행에 있어서 더 합리적일것으로 판단된다.

(3) 보상금 감액기준의 최소화

감액기준을 적용함에 따라 보상금 지급업무를 위한 지자체의 행정소요가 과다하게 발생하고 업무효율성이 떨어진다. 보상금 지급을 위해서 담당공무원은 모든 주민들을 대상으로 전입, 퇴거, 병역, 병원입원, 해외체류 등의 감액기준을 모두 검토하여 보상금을 산정해야 함에 따라 지자체 별로 그 대상자가 수백명에서 수만 명까지 될 수 있는데 보상금 신청자가 많을수록 지자체 담당 공무원의 보상금 지급을 위한 신청서류 등의 확인과 검토업무가 증가되고 이에 따라 지자체에서는 보상금 지급 이외의 행정서비스에 불편을 초래할 수 있다. 또한, 보상금의 감액은 법적 취지에 적합하지 않다. 과거 관례에 따라 보상금의 감액적용은 법적으로 합리적이나, 다른 한편으로는 군소음에 피해를 받고 있는 주민에게 보상을 하겠다는 법의 제정 취지와는 다르게 피해 주민들에게 직접적으로 체감되는 보상금의 삭감으로 이러한 취지가 반감될 소지가 매우 크기 때문이다. 따라서, 감액기준의 개선방안을 제시해보면 다음과 같다.

**Table 9** Reduction standards according to number of shooting days

Number of shooting days	No shooting	1~7 days	8~14 days	More than 15 days
Reason for reduction	100%	2/3	1/3	No reduction

첫째, 전입일에 따른 감액기준은 대도시와 지방 소도시의 경우 별도의 적용 방안이 필요하다. 군 사격장의 경우 대부분 접경 지역이나 도시에서 떨어진 지방에 위치하여 새로운 전입자가 없는 지역으로 전입일에 따른 감액을 제외하여 지역의 인구 유입을 위한 인센티브 성격으로 적용한다면 지자체에서도 환영할만한 방안이 될 것이다.

둘째, 비행장과 사격장의 형평성을 고려하여 사격일수에 따른 감액기준의 삭제가 필요하다. 비행장은 비행일수와 무관하게 월별 동일한 보상금을 지급하는 반면, 사격장은 Table 9<sup>(5)</sup>와 같이 월별 사격일수에 따른 감액을 적용함에 따른 형평성의 문제가 있기 때문이다.

**(4) 개인 재산권 침해 최소화 방안 마련**

소음대책지역으로 지정이 되면 시설물의 설치 제한을 받게 되며, 방음시설 등 일정한 조건에 따라 시설물의 설치를 허용할 수 있도록 되어 있다. 또한, 시행령 12조에 소음대책지역은 「토지이용규제법」에 따라 지적이 표시된 지형도에 소음대책지역을 명시해야 하고 일반 국민이 모두 볼 수 있도록 국토이용정보체계에 등록하도록 명시<sup>(12)</sup>하고 있다. 따라서, 소음대책지역으로 지정되고 보상금을 받게 되면 이후 토지를 취득한 자는 방음시설을 설비해야만 건축물 설치가 가능하게 되며, 토지 거래시에 토지 대장 등에 소음대책지역이라는 표기가 되어 지역의 부동산 시세에도 영향을 미치게 된다는 주장도 있다.

그러나, 국외의 소음관련 법제나 국내 「공항소음방지법」에서도 소음피해에 노출 인구를 줄이고 보상금 등 추가적인 국비 예산의 증가를 막기 위해서 대책지역내 시설물 설치의 제한을 하고 있는 만큼 「군소음보상법」에서도 동일한 적용이 필요하다

앞서 언급한 바와 같이 「군소음보상법」에서도 소음대책 및 지원사업이 가능하도록 선행된다면 소음지역에서의 이주지원, 토지매수 등이 가능하게 되어 개인재산권의 침해에 대한 우려를 최소화할 수 있게 될 것이다.

**5. 결 론**

「군소음보상법」의 제정에 따라 직접적으로 법의 적용을 받게 되는 지역 주민들과의 인터뷰를 통하여 법 시행에 따른 갈등 요인과 개선 요구에 대한 의견을 종합하고 그 결과를 분석하여 4가지의 개선방향으로 제시하였다. 제시된 「군소음보상법」 개선방안의 적용을 위해서는 추가적인 충분한 검토가 필요하고 국회에서 법 개정을 통해서 가능하며, 소요되는 국가 예산이 우선적으로 뒷받침되어야 가능하다. 또한, 예산 다음으로 법 개정시 가장 먼저 검토되어야 할 사항이 소음대책사업과 주민지원사업의 포함여부라고 할 수 있다. 그 이유는 소음대책지역에 대한 지원사업이 가능하게 된다면 보상금의 상향, 감액기준의 삭제, 개인 재산권 침해 문제 등이 모두 해소될 수 있는 근거가 마련되기 때문이다. 그 다음으로 대책지역의 선정, 보상방법의 다양화 등 세부적으로 다듬어 나간다면 법의 제정 목적인 군 시설에서 발생하는 소음을 방지하고, 피해에 대한 보상을 효율적으로 추진함으로써 주민의 쾌적한 생활환경을 보장하고 군사활동의 안정된 기반을 조성하는데 부합되고 소음피해지역에서도 충분히 동의할 수 있는 법으로 발전할 수 있을 것이다.

**후 기**

군 소음에 대한 보상법의 제정과 시행은 오랜 기간 동안 소음피해를 받고 있는 지역 주민들에게 부족하나마, 군 소음에 대하여 보상할 수 있는 법적 근거가 마련되었다는데 큰 의미가 있다고 할 수 있다. 현재는 법의 초기 시행으로 문제점이 있을 수도 있지만, 이를 토대로 지역 주민 및 군이 함께 동반성장할 수 있도록 군과 지자체 주민이 함께 노력하여 현재 법 시행에 따른 문제점을 분석하고 보완사항을 개정해 나간다면, 법의 취지에 맞고, 지역주민이 보다 만족할 수 있는 법이 될 수 있을 것이다.

**References**

(1) Enforcement Decree of Military Airfield and Military Firing Ranges Noise Prevention and

Compensation Act(Agenda), Bill Number 150765, <https://likms.assembly.go.kr>.

(2) Enforcement Decree of Military Airfield and Military Firing Ranges Noise Prevention and Compensation Act, 2020, Article 2-asterisk.

(3) Park, Y. M., Kwang, K. K., Lee, B. K. and Kim, K. M., 2019, A Study on Noise Standards and Cost Estimation at Military Shooting Ranges Related to the Enactment of the Act on Support for Areas Around Military Facilities, p. 90.

(4) Supreme Court Sentencing 2004.3.12., 2002다 14242.

(5) Enforcement Decree of Military Airfield and Military Firing Ranges Noise Prevention and Compensation Act, 2020, Article 11.

(6) Enforcement Decree of Military Airfield and Military Firing Ranges Noise Prevention and Compensation Act, 2020, Article 5-asterisk.

(7) Kang, M. S., 2014, National Research Council for Economics, Humanities and Social Sciences, Feasibility Study of Compensation Act for Military Noise Damage, Vol. 3, No. 2, pp. 52~56.

(8) US Airforce, AICUZ Brochure, <https://www.jble.af.mil/home/A>.

(9) Enforcement Decree OF Airport Noise Prevention and Areas Assistance Act, 2021, Article 2.

(10) National Assembly of the Republic of Korea, Law Amendment Enforcement Decree of Airport Noise Prevention and Areas Assistance Act, Bill Number 2101963: Cost Estimate, <http://www.likms.assembly.go.kr/bill/main.co>.

(11) Woo, J. Y., Kim, H. S., Son, J. W. and Park, S. K., 2018, A Study on the New Proposal of the Compensation Criteria for Noise Pollution Areas in the Vicinity of the Airport, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conferences, p. 113.

(12) Framework Act on The Regulation of Land Use, 2018, Article 8.



**Joung Hyun Hong** is a graduate student in the program of defense project management at the Korea National Defense University and is currently serving as an army lieutenant colonel in the Ministry of National Defense.



**Yonghoon Ha** received a B.S. degree in oceanography from ROK Naval Academy and Seoul National University in 1994 and 1997, and received a M.S. degree in engineering acoustics from US Naval Postgraduate School in 2000. He then received a Ph.D. degree of naval architecture and ocean engineering from Seoul National University in 2009. He retired as a ROK navy captain in 2019 and is currently an assistant professor at the department of defense science, weapon systems program, in the Korea National Defense University.

# 닐센 아치교 케이블 장력에 대한 관리기준치 설정에 관한 모니터링 연구

## Monitoring the Management Limit of Cable Tension Force for the Nielsen Arch Bridge

문인기<sup>†</sup> · 최선민\* · 김두산\*\*

In Ki Moon<sup>†</sup>, Sun Min Choi\* and Du San Kim\*\*

(Received September 14, 2021 ; Revised September 24, 2021 ; Accepted September 24, 2021)

**Key Words** : Cable Bridge(케이블교량), Management Limit Measure(관리한계치 산정방법), Cable Tension(케이블 장력), Measuring System(계측 시스템), Nielsen Arch Bridge(닐센 아치교)

### ABSTRACT

This study monitors the Nielsen Arch Bridge using U-Network, both during and after construction. The U-Network monitoring system consists of a sensor part that detects structural behavior, a data logger part that stores and measures signals from the sensor, a communication part that connects each data logger, and a main server for data collection and processing. The installation of the monitoring sensor was performed in compliance with principles that aim to minimize damage towards the target structure and secure long-term durability, as well as maximize the sensor's maintenance efficiency. Furthermore, the sensor was field-tested after installation to ensure that it is properly installed without any errors. The stability and reliability of the bridge was assessed by a structural analysis using monitoring and finite element analysis.

To adapt and develop the U-Network system as a tool to monitor bridge, the Unique Feature Identifier technology, Geographical Information System 3D technology, and collaboration with local government and organizations shall be needed. A linkage plan to incorporate the technology into management systems of existing facilities is required to be prepared and followed by continuous research investments.

### 1. 서 론

현재까지 모니터링 시스템을 통한 구조물의 이상거동 판정은 구조해석을 통해 미리 설정한 관리한계치와 구조물로부터 얻은 계측 값을 비교함으로써 행해지고 있다. 따라서 계측 값이 관리한계치를 상회한다면 이는

구조물이 이상거동을 하고 있다는 것으로 해석하고 교량통행의 통제 또는 보수 등을 실시하도록 하고 있다.

국내에서 수행된 관리한계치에 대한 연구로는 전문가 설문조사를 통한 흠박이 구조물 공사에 있어서 관리한계치에 대한 신뢰도 분석이 수행<sup>(1)</sup>된 바 있으며 장대교량에 대해서는 신뢰성에 기초한 사장교 케이블의 장력관리를 위한 관리한계치 설정에 관한 연구가 수행<sup>(2)</sup>된 바 있다.

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Housing Land Development Office of Jeonnam Development Corp, Department of Civil Engineering at Chosun University  
E-mail : inki66@naver.com

\* Member, Department of Civil Engineering, Dongshin University, Adjunct Professor

\*\* Department of Civil Engineering at Chosun University, Student

‡ Recommended by Editor Byung Kwon Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

그러나 닐센 아치교 같은 특수교량에 대한 케이블 관리 한계치 설정방안에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

일반적으로 닐센아치교에 사용되는 행어는 사장교에 사용되는 stay cable과 같다. Stay cable의 구성은 사장재(고인장력 저항), 튜브, 정착장치, 채움재(부식 방지) 등으로 이루어진다. Stay cable은 행어 배치에 따라 케이블의 장력 변동이 상이하므로 상황에 따른 케이블 장력관리의 필요성이 매우 높다.

## 2. 케이블 장력 추정에 대한 이론

장력추정 방법은 현재 실무에서 일반적으로 간접법을 주로 채택하고 있으며 이 논문 역시 간접법을 통한 장력추정에 대한 이론과 방법을 검토하였다.

장력추정 간접법은 크게 케이블 변형률을 이용하는 방법과 케이블의 진동을 이용하는 방법이 있다. 이중 케이블 진동 시 케이블 가속도를 통해 고유진동수의 변화를 매개체로 하는 케이블 진동모드에 따라 측정된 고유진동수를 적용하여 케이블 장력을 추정한다<sup>(3)</sup>.

해당 방법에서는 가속도센서를 이용하여 데이터를 수집하며 안정된 데이터를 확보하기 위해 일반적으로 20분간의 데이터를 확보한다. 그 후 불필요한 주파수 필터링과 같은 처리작업을 수행한다. 그리고 파워스펙트럼을 통한 해당 케이블 고유진동수를 확보하고 푸리에 변환을 이용하여 장력을 추정하였으며, 케이블 장력은 현 이론식을 이용한 현에 작용하는 장력 방정식의 해를 구할 수 있다. 이 경우 케이블 휨 강성을 고려한 경우와 무시한 경우로 나누어진다.

식 (1)은<sup>(4)</sup> 케이블 휨 강성을 무시한 경우의 방정식이다.

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \tag{1}$$

- $y$  : 진폭
- $w$  : 단위길이당 케이블 무게
- $g$  : 중력가속도
- $x$  : 길이방향의 좌표
- $t$  : 시간

식 (1)을 양단고정 경계조건으로 해석하면 식 (2)와<sup>(5)</sup> 같은 장력을 구하는 식을 도출할 수 있으며, 이는 단순한 현의 진동으로부터 구할 수 있다.

$$T = \frac{4wl^2}{n^2g} f_n^2 \tag{2}$$

- $f_n$  :  $n$ 차 고유진동수
- $l$  : 케이블의 길이

## 3. 닐센 아치교의 케이블 장력 모니터링

### 3.1 대상 시설물의 현황

Table 1은 모니터링을 위한 대상시설물은 철근콘크리트 교량의 교각이며 하중기반설계법을 통해 내진설계가 이루어졌다. 역량스펙트럼을 이용하여 대상교각의 내진성능을 평가하고, 변위기반 해석과 하중기반 해석을 비교분석하여 실제로 내진성능을 확보하고 있는지 검토할 수 있다.

### 3.2 계측 시스템의 구성

#### (1) 센서의 구성 및 계측항목

구조물을 이루고 있는 부재의 분석을 통하여 장기적이고 효율적인 유지관리를 위해서 계측데이터 확보를 위한 계측센서의 부착은 구조물의 거동을 확인할 수 있는 대표단면에 설치된다. Table 2는 구조물의 거동분석을 통해 교량 구조물의 유지관리를 위한 계측항목 및 센서 설치 위치를 나타낸다.

Table 1 Status of target bridge

Categorize		Contents
Design load		DB-24 (gross weight: 43.2 tonf)
Length		Total length L=358.8 m Main span (Nielsen arch) : 160.0 m Concrete arch: 2 @85.0 = 170.0 m Connecting bridge: start point-15.9 m, end point-12.9 m
Width		Main span: 18.49 m Connecting bridge: 15.50 m (Effective : 13.5 m)
Structure Type	Top	Main Span: Nielsen arch (steel plate deck) Concrete arch: deck concrete arch Connecting bridge: RC Rhamen
	Bottom	Main span: octangle sloping pier Concrete arch: concrete arch rib Connecting bridge: Rhamen pier
Bearing		Main span: spherical bearing (special) Connecting bridge: elastomeric bearing
Expansion joint		Main span: rail joint Connecting bridge: NB (ACE) joint

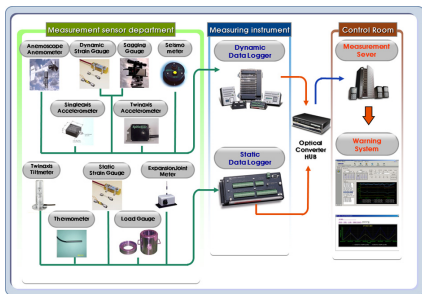


**Table 2** Configuration of the instrumentation system

Categorize		Contents
H/W	Data measurement system	Structural behavior measurement sensor
	Data gathering system	Data gathering
	Data transmission system	Data transmission
S/W	Data storage & mornitoring	Data storage & mornitoring
	Data analysis system	Data analysis & comparison of management standard

**Table 3** Maintenance instrumentation items

Measurement Item	Place	Purpose
Strain rate	Delegation section	Strain analysis & provide data
Mold acceleration	Center of span	Dynamic behavior analysis and recording
Deflection	Center of span	Continuous monitoring of deflection variant
Temperature	Delegation section	Analysis of effect of temperature variant
Seismic force	Upper part of pier	Analysis of effect of seismic load
Cable tension	Main cable	Tension variance measurement
Wind direction & wind velocity	Center of arch	Analysis of wind direction & wind velocity
Pier slope	Upper part of pier	Analysis of differential settlement, etc.
Expansion joint displacement	Expansion joint	Mornitoring of expansion joint behavior



**Fig. 1** Configuration of the instrumentation system

**Table 4** Equipment and contents for optical network establishment

Categorize	Device name	Measurement details
Data transmission system	FDF	Optical fiber cable splitter
	Optical media converter	Optical - UTP converter
	Patch cord	FDF - connect to optical media converter
	Hub	UTP splitter
	Serial converter	Serial - UTP converter

Table 3에서 온도계, 변형률계, 경사계 등은 정적 데이터로거에 연결되며, 케이블 가속도계, 지진계, 치짐계, 풍향풍속계 등은 동적데이터로거에 연결된다 (Fig. 1 참조).

(2) Optical network 구축

계측된 데이터 전송은 기존의 사용되어온 다양한 통신 시스템을 통해 이루어진다. 이는 해당 구조물과 주변의 여건에 따라 적합한 시스템을 적용하면 된다.

대상 교량의 계측은 실시간으로 이루어지는 계측 시스템을 갖추고 있어 실시간으로 안정적으로 데이터 전송이 이루어야 한다. 교각(P2)에 설치된 데이터로거의 방대한 양의 데이터가 계측관리를 담당하는 컴퓨터로 전송된 후 실시간으로 대상 교량을 모니터링해야 한다. 이를 위해 Table 4와 같이 optical network를 구축하여 이용한다.

4. 닐센 아치교의 케이블 장력 모니터링

4.1 관리한계치 설정 목적

교량의 거동은 교량형식, 하중 특성 등 다양한 조건에 의해 지배된다. 따라서 이러한 교량의 특성, 외부조건, 자료의 변화속도 및 안정성 여부를 충분히 검토하여 적절한 관리기준치와 모니터링 빈도를 Table 5와 같이 설정하였다. 즉, 자료의 변화속도가 빠른 모니터링 항목은 측정 빈도를 높이고, 장기간에 걸쳐 변화량이 미세한 모니터링 항목은 빈도를 낮추는 것이 합리적이며, 안전성과 관련이 깊은 모니터링 항목은 측정 빈도를 높인다.

- ① 케이블 장력의 확률분포 모형 설정 : 케이블 장

**Table 5** Cable tension data comparative analysis

Sensor name	Management standard (kN)	Caution management standard (kN)	Warning standard (kN)	Remark (design tension)
CA001 (618)	565.86	848.79	1131.72	1865.5
CA002 (617)	544.87	817.29	1089.73	1860.8
CA003 (717)	544.87	817.29	1089.73	1860.8
CA004 (718)	565.86	848.79	1131.72	1865.5

력에 따른 이론적 확률분포 모형을 확정하고 확률적 변량을 갖는 케이블 장력을 취급한다.

② 케이블 장력의 관리한계치 설정 : 신뢰성 이론을 바탕으로 효율적 관리가 가능한 관리한계치 수준 설정하며 교량 구조물의 안전성은 신뢰성 이론을 적용하기 위한 한계상태방정식의 구성요소와 관계된다.

**4.2 케이블의 장력 Data 측정**

다음의 장력 측정값은 19.12.12. ~ 20.01.12.사이 에 가속도계를 이용하여 계속하였다. Table 6은 진동 법을 기반으로 하는 Daqview(장력계산프로그램)을 통해 산출되었다.

여기서 기준 주파수 = 1.070 Hz, 케이블 단위 중량 = 0.24 kN/m를 사용하였다.

**4.3 Cable의 영향선 해석**

케이블의 영향선 해석의 목적은 케이블의 비선형 적 거동을 파악하는데 있다. 이 과정에서 케이블의 자중으로 인해 발생하는 Sag에 의한 케이블 탄성계수 ( $E_c$ )의 변화를 고려해야한다. Ernst방법에 의하면 케이블의 등가탄성계수는 식 (3)과 같다.

$$E_q = \frac{E_c}{1 + \frac{1}{24} \times \frac{(w \times L)^2 \times (T_f + T_o) A_c \times E_c}{(T_o^2 \times T_f^2)}} \quad (3)$$

$w$  :  $A_c \gamma$ (케이블 단위길이당 중량)(N/mm)

$L$  : 케이블의 길이(mm)

$E_c$  : 재료의 탄성계수(Mpa)

$E_q$  : 케이블의 등가탄성계수(Mpa)

$T_o$  : 초기케이블의 장력(N)

$T_f$  : 하중증가 따른 최종 케이블 장력(N)

**Table 6** Result of tension measurement

Cable name	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	Avg.
CA001 (618)	127.0	124.5	117.9	119.6	114.9	129.6	135.2	124.1
CA002 (617)	113.5	106.9	103.5	109.4	108.8	116.9	118.5	111.1
CA003 (717)	118.0	120.3	132.4	113.3	132.9	120.7	123.5	123.0
CA004 (718)	124.7	140.6	145.0	130.2	140.4	129.2	128.5	134.1

케이블의 등가탄성계수 산정은 대상 구조물인 닐센아치교 케이블 중 최장 길이를 갖는 케이블의 장력 값을 적용한다.

교량 가설 시 닐센아치교의 사하중에 의한 값을 고려하여 초기 케이블 장력을 산정하며, 교량 가설 완료 후 가능한 하중조합을 고려한 최대 장력 값을 적용하여 최종 케이블 장력을 산정한다.

식 (3)에 의해서  $E_q$  값을  $E_c$  값과 비교하면 99.21% 정도로 나타난다(식 (4)).

$$E_q = \frac{210000}{1 + \frac{1}{24} \times \frac{30.51 \times 210000}{(626360^2 \times 1110480^2) \times (0.24 \times 37840)^2 \times (626360 + 1110480)}} = 208,338\text{MPa}$$

$$E_q / E_c = 208338 / 210000 = 0.992 (99.21\%) \quad (4)$$

이는 탄성계수 변화는 매우 미소하여 무시할 수 있으며 케이블의 영향선 해석 시 케이블의 비선형성은 고려하지 않고 탄성거동만을 고려할 수 있음을 보여준다.

대상 교량 구조물 설계 시 케이블의 구조해석에 의한 영향선 해석과 케이블 장력 산정 값을 Table 7에 나타내었다. 또한 케이블은 부재에 대한 영향선해석 결과를 이용하여 충격계수를 적용하였을 때 케이블의 장력을 비교한 결과 차이는 허용오차 이내인 최대 1.10% 이내이므로 평균치를 적용한다.

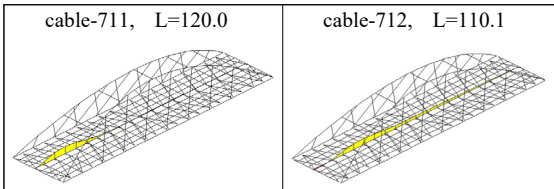
참고적으로 각 케이블 장력에 대한 영향선을 아래의 Figs. 2 ~ 5와 같이 정리하였다.

**4.4 관리한계치 설정**

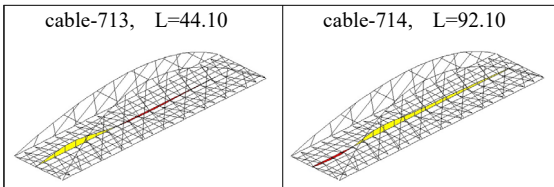
식 (5)는 한계상태(limit state)방정식으로 관리한계치 설정을 위한 식이다<sup>(6)</sup>.

**Table 7** Compare impacted coefficient by analysis of cable influence line

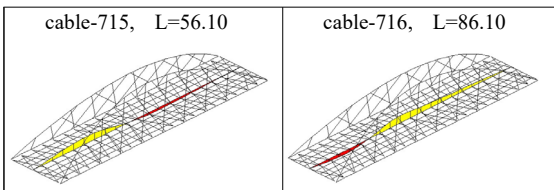
Cable no.	Cable tension		Apply details			Apply average	
	Dead load	Live load	Length	Impacted coefficient	Maximum tension	Impacted coefficient	Maximum tension
711	760.1	201.6	120.00	0.094	980.6	0.136	989.1
712	1521.8	355.8	110.10	0.100	1913.2		1926.0
713	1028.9	377.9	44.10	0.178	1474.2		1458.2
714	1414.0	364.9	92.10	0.114	1820.3		1828.5
715	1265.3	448.4	56.10	0.156	1783.7		1774.7
716	1366.4	403.4	86.10	0.119	1817.8		1824.7
717	1345.8	457.5	62.10	0.147	1870.5		1865.5
718	1361.5	439.5	74.10	0.131	1858.8		1860.8



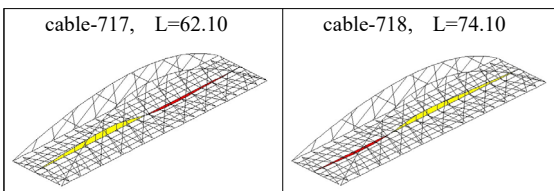
**Fig. 2** Influence line of cable(711, 712) tension



**Fig. 3** Influence line of cable(713, 714) tension



**Fig. 4** Influence line of cable(715, 716) tension



**Fig. 5** Influence line of cable(717, 718) tension

**Table 8** Estimate of regression equation of cable

Cable Name	Estimate of regression equation	Remark
CA001 (618)	$y = 0.328x + 11.1$	
CA002 (617)	$y = 0.249x + 10.11$	
CA003 (717)	$y = 0.324x + 11.0$	
CA004 (718)	$y = 0.386x + 11.94$	

즉 예측치가 관리한계치보다 커지는 경우를 한계상태로 정의하였다.

$$g(\cdot) = T_{\text{관리한계}} - S \tag{5}$$

$T_{\text{관리한계}}$  : 관리한계치  
 $S$  : 케이블 장력 변수

각 케이블 장력에 대한 확률분포모형을 이용하여 관리한계치를 산정하기 위해 AFOSM기법에 의한 신뢰성 해석을 수행하였다. 한계상태 방정식에 대한 신뢰성 해석으로부터 각 신뢰성 지수에 해당하는 관리한계치를 산정할 수 있다. 그러나  $\beta$ 에 대응하는 관리한계치를 바로 결정하기가 어려우므로,  $T_{\text{관리한계}}$ (장력 관리한계치)를 몇 개의 값으로 가정한다. 그 후 신뢰성이론을 바탕으로 해석을 수행하여 각 가정 값에 대한 신뢰성 지수를 구하고, 이를 회귀방정식에 이용하면 신뢰성 지수에 상응하는 관리한계치를 산출할 수 있다.

각 케이블에 대한 측정 자료로부터 Table 8과 같은

**Table 9** Level of bridge management standard

Categorize	Lv.1 (Normal)	Lv.2 (1st management standard)	Lv.3 (2nd management standard)	Lv.4 (3rd management standard)
Management Lv.	Safety	Caution	Warning	Dangerous
Setting criteria	60 % (of representative value) or less	60 % (of representative value) or more	80 % (of representative value) or more	Over 100 % (of representative value)
Using the structure	Normal use	Caution use	Decide whether to use it or not	Stop use

**Table 10** Establishing new management standard by reliability index

Cable Name	Management standard (kN)		1st management standard (kN)		2nd management standard (kN)	
	Existing standard	$\beta=1.0$	Existing caution level	$\beta=2.0$	Existing warning level	$\beta=3.0$
CA001 (618)	565.86	438.5	848.79	766.0	1131.72	1095.0
CA002 (617)	544.87	350.1	817.29	599.1	1089.73	848.1
CA003 (717)	544.87	434.0	817.29	758.0	1089.73	1082.0
CA004 (718)	565.86	505.4	848.79	885.8	1131.72	1277.4

회귀방정식을 산출하였다.

대상교량의 관리기준치 설정은 크게 구조형상, 부재 응력, 케이블장력, 구조진동, 외부하중에 대하여 설정하였다. 교량 설계 시 계산된 구조계산서 상의 설계값을 구조해석결과, 시공 중 모니터링 결과 및 초기 재하시험 결과와 비교 검토하여 대표값으로 설정하였고 대표값의 60%값을 초과하는 경우 주의단계(1차 관리기준치), 대표값의 80%값을 초과하는 경우 경고단계(2차 관리기준치), 대표값을 초과하는 경우 위험단계(3차 관리기준치)로 설정하였다. 그리고 구조계산서에 명시되지 않은 항목들은 시방서, 유사교량사례 등을 적절히 활용하여 관리기준치에 적용하였다. 현재 설정된 관리기준치의 관리 단계는 Table 9와 같다.

여기서 추정된 회귀방정식을 이용하여 산정한 신뢰성 지수  $\beta$ 에 대하여 Table 10과 같은 관리기준치를 설정하였다.

### 5. 결 론

닐센 아치교 케이블 장력관리를 위한 관리한계치

설정에 대해 기존의 방법에 대해 문제점을 분석하고 실제 닐센 아치교 대상 교량의 특성에 맞는 새로운 관리한계치 설정 방법을 제시하였다. 기존의 관리한계치는 설정방법에 대한 문제점은 다음과 같음을 보였다.

(1) 기존의 관리한계치 설정방법의 경우 최종도입장력을 기준치로 하여 기준이 되는 값보다 상회(%)하는 값을 기준으로 하여 관리한계치를 설정하였다.

그러나 이러한 주의치나 경고치 설정은 단지 경험적인 방법으로 유지관리자가 임의로 설정하는 경우가 대부분으로 각 계측 항목에 대하여 같은 편차량을 적용하여 관리한계치를 설정하는 것은 각 계측 항목의 특성을 무시한 것으로 불합리하다.

(2) 닐센 아치교의 모든 케이블에 대해 관리한계치 설정을 위해 동일한 할증률을 적용한 결과 어떤 케이블에 대해서는 관리한계치가 허용장력을 초과할 수 있어 관리한계치의 의미가 상실된다.

(3) 교량 구조물은 필연적으로 시간의 경과와 함께 열화가 진행되며 이는 일반적으로 점진적 진행의 성격을 보이거나 상황에 따라 급작스러운 열화의 진행을 보이기도 한다. 교량 구조물의 열화는 처짐을 발생시키고 이는 변형률의 증가를 야기한다. 즉, 관리한계치 설정 역시 교량의 거동에 대응하여 지속적으로 변화하여 설정되어야 한다.

(4) 실제 계측된 장력 값의 확률분포를 이용하여 각 케이블에 대해 기존에 설정된 관리한계치에 대한 신뢰성 지수를 산출한 결과 모든 케이블에 동일한 할증율을 사용하였으나 각 케이블은 각기 상이한 신뢰성 지수를 나타냈다. 따라서 기존의 관리한계치 설정방법에 의해 케이블 장력을 관리하는 경우 동일한 할증율을 적용한다고 할지라도 각 케이블에 대한 안전도를 알 수 없으며 각 케이블 마다 각기 상이한 안전도로 관리되는 결과를 초래하였다.

향후 U-네트워크 모니터링 시스템을 발전시키기 위

하여 UFID(unique feature identifier) 기술 적용, GIS 3D 기술 도입, 지자체 및 관련기관의 유기적인 협조 등 기존 시설물 관리 체계에 적용된 기술들과의 연계 방안이 시급하고 그에 따른 연구 투자가 있어야 할 것이다. 그리고 기존의 유지관리 시스템의 정보관리체계 분석 및 유비쿼터스 기술 적용을 통하여 단순한 모니터링 수치정보의 습득이 아닌 자동화 되고 실시간으로 정보를 관리하여 유지관리 정보 콘텐츠의 유비쿼터스 기술기반에 적용을 도모하여야 할 것이다.

### References

(1) Jeong, S. G., Lee, S. and Shim, T. S., 1999, Analysis of Reliability for Management Standards for Retaining Structures Applied in Korea, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. 1-3, pp. 479-487.

(2) Kang, K. G., 2005, A Study on Setting Management Limits for Cable Tension Management of Cable-stayed Bridges Based on Reliability, pp. 37-56. Doctoral Dissertation, Hanyang University Graduate School, Korea.

(3) Kim, N. S., Bin, J. M. and Chang, S. J., 2006, Back Analysis for Estimating Tension Force on Hanger Cables, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 782.

(4) Sin, J. H., Park, J. S., Lee, M. K., Kim, S. H. and Hwang, H. J., 1993, Study on the Tension Measurement of the Cable, Proceedings of the KSCE Conference, pp. 292-295.

(5) An, S. S., Kim, M. H. and Kim, I. B., 2001, Study on the Calculation of Tension of Cable-stayed Bridge in Seohae Bridge by Constant Vibration Measurement, Proceedings of the KSCE Conference, pp. 1-4.

(6) Kang, K. K., 2005, Study on the Determination of Reliability-based Critical Timeshold Value for Management of Cable Tension Force in Cable-stayed Bridge, pp. 37-56, Doctoral Dissertation, Hanyang

University Graduate School, Korea.

(7) Irvine, H. M. and Caughey, T. K., 1974, The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable, Proceedings of the Royal Society of London: Series A, Vol. 341, pp. 299-315.

(8) Shimada, T., 1994, Estimating Method of Cable Tension from Natural Frequency of High Mode, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 501, No. 1-29, pp. 163-171.

(9) Triantafyllou, M. S., 1984, The Dynamics of Taut Inclined Cables, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 37, No. 3, pp. 421-440.

(10) Kang, M. S., 2018, Real Time Estimation of Cable Tension from Transverse Vibration Measurement, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 126.



**In Ki Moon** is Housing Land Development Office of Jeonnam Development Corp, currently a Ph.D. Chosun University Civil Engineering student. His research interests are noise and vibration and cable vibration.



**Sun Min Choi** received his Ph.D. in Civil Engineering Chonnam National University, Gwangju, Korea From 2019 to 2021. he is currently Department Adjunct Professor, Dongshin University, Department of Civil Engineering, Analysis of Noise and Vibration and Cable Tension.



**Du San Kim** is currently a Ph.D. student in the Department of Civil Engineering, Chosun University. His research interests are noise and vibration and cable vibration.

# 경사 각도에 따른 전동기의 진동 및 고체소음 특성 분석

## Effect of Inclination Angles on Motor Vibration and Structure-borne Noise Characteristics

정 호 연\* · 구 회 모†  
Hoyeon Jeong\* and Heemo Goo†

(Received September 23, 2021 ; Revised November 1, 2021 ; Accepted November 3, 2021)

**Key Words :** Electric Motor(전동기), Inclination(경사), Angle(각도), Structure-borne Noise(고체소음), Rotor Vibration(회전체 진동)

### ABSTRACT

If less noise radiates from vessels and submarines under water, it is less likely for enemy troops to detect them, which in turn improves the survivability and mission capability of their crews. The Korean Navy thoroughly assesses the structure-borne noise level as a special-performance evaluation item to reduce the underwater radiated noise before loading any equipment. The evaluation is performed at the manufacturing site or in an anechoic chamber, depending on the allowable horizontal support conditions. However, the pre-installation evaluation method does not take into account the influence of inclination conditions during the rolling, pitching, diving, and surfacing of vessels, which may cause its results to differ from the noise levels during an actual operation. This study tests and analyzes the effect a vessel's inclination angle on the structure-borne noise in an electric motor. The results show no major frequency movement, which confirms that the structure-borne noise in the rotational frequency component increases with the inclination angle. Therefore, the inclination angle is a factor to consider during the design, evaluation, and operation of a vessel.

### 1. 서 론

오늘날 잠수함을 비롯한 함정에서 발사할 수 있는 함대지 무기체계가 발전됨에 따라 해군력이 차지하는 비중은 갈수록 증가하고 있으며, 전 세계 각 국에서 해군력 증강을 위한 신형 구축함 및 잠수함 건조에 막대한 비용을 투자하고 있다. 최첨단 무기시스템을 탑재한 함정의

보호와 승조원의 생존성 및 작전능력을 높이기 위한 스텔스(stealth)화가 지속적으로 연구 중이며<sup>(1-3)</sup>, 해군에서는 소음원인 장비에 대하여 함정에 탑재하기 전 고체소음(structure-borne noise), 공기소음(air-borne noise) 및 회전체 밸런싱을 확인하는 베어링 진동 측정 시험을 특수성능 시험으로 분류하여 철저하게 관리하고 있다.

위 항목의 특수성능 평가는 수평지지 조건에서 이루어지며, 허용 기준레벨 및 배경소음에 따라 제조 현

† Corresponding Author; Member, Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI), Principal Researcher / Department of Mechanical IT Convergence Engineering, Korea Maritime & Ocean University  
E-mail : shiner1981@komeri.re.kr

\* Member, Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI), Senior Researcher / Department of Mechanical IT Convergence Engineering, Korea Maritime & Ocean University

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Yong Hee Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

장 또는 반무향실에서 수행한다. 이는 실제 운용 환경에서 함체의 롤링, 피칭, 잠항 및 부상(surfacing)에 의한 경사 각도는 고려되지 않은 설치 전 평가 방법으로써, 운항 중 함정에서 발생하는 소음레벨과 차이가 발생한다. 또한 수직발사관을 탑재한 최신 잠수함의 경우 발사각 확보를 위해 필요시 함체의 경사 각도를 요구하고 있다. 이와 같은 이유로 함체의 경사 각도가 진동 및 고체소음 레벨에 어떠한 영향을 미치는지 진동기를 대상으로 실험적 연구를 진행하였다.

함정 특수성능 시험 항목 중 고체소음 시험은 탑재 전 평가 방법으로써, Fig. 1의 (a)와 같이 수평 상태의 반무향실 또는 제조 현장에서 진행한다. 그러나 실제 운용 환경에서 잠수함의 경우 Fig. 1의 (b)와 같이 잠항 및 부상 시 약 22°~25°의 각도를 가지며, 롤링 및 피칭에 의한 각도 변화가 발생할 경우 수평 조건 대비 소음 레벨의 차이가 발생할 수 있다.

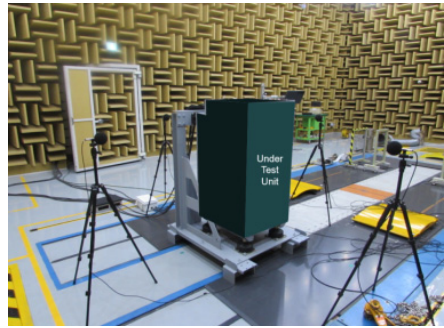
본 연구에서는 함체의 운용환경을 모사하여 진동기를 사용한 시험 장치를 구현하였다. 이를 통해 최대 ±30°의 경사각 조건과 수평 조건에서의 고체소음 레벨의 차이를 시험을 통해 비교 분석하여, 함체의 경사 각도가 수중방사소음 발생 요소들 중에 유의미한 불확도 요소가 될 수 있음을 확인하였다.

## 2. 함정 탑재장비 특수성능 평가

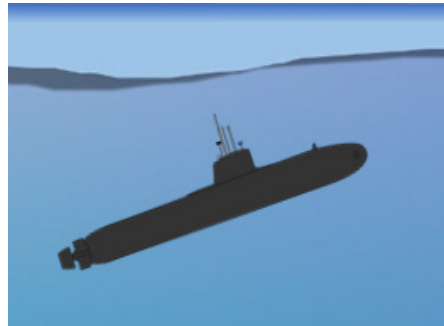
함정의 수중방사소음과 관련된 특수성능 평가 항목 중 고체소음(structure-borne noise) 및 공기소음(air-borne noise)의 전달 경로는 Fig. 2와 같다. 탑재 장비에서 발생하는 진동은 마운트 및 지지대를 통해 구조적으로 선체에 전달되며 이 구조전달소음을 고체소음이라 한다. 또한 공기를 매질로 하여 전파되는 음압에 의한 소음을 공기소음이라 부른다. 이 두 항목은 프로펠러 소음 및 유체소음과 더불어 수중방사소음을 일으키는 중요한 요소들이다.

고체소음 측정은 장비를 정상적으로 구동 후 장비 및 설비의 하부 탄성마운트 상단에서 평가한다. 측정 방향은 전후, 좌우, 상하 3축에 대하여 평가하며, 모든 측정 포인트의 고체소음 레벨이 승인 기준치를 초과하지 않을 경우 함정에 탑재될 수 있다.

측정 시 가속도계를 사용하여 측정하며 고체소음 진동 가속도 레벨  $L_a$ 는 식 (1)에서 얻을 수 있다<sup>(4)</sup>.



(a) Horizontal condition



(b) Inclined condition

Fig. 1 Environment condition (test lab. vs underwater)

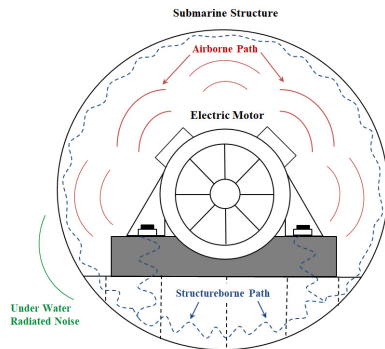


Fig. 2 Transfer paths of structure-borne & air-borne noise

$$L_a = 10\log_{10}\left(\frac{a^2}{a_{ref}^2}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{a}{a_{ref}}\right) [dB] \quad (1)$$

$$a_{ref} = 10^{-5} [m/s^2]$$

## 3. 경사조건 고체소음 및 진동 평가



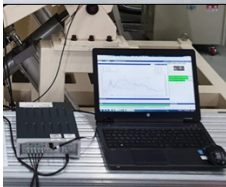
### 3.1 평가 방안

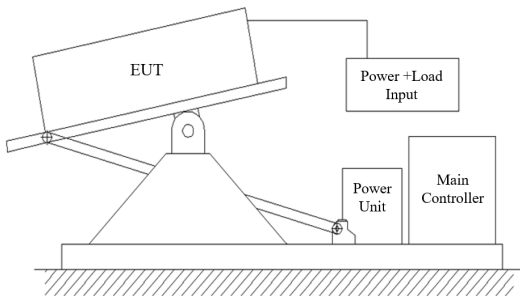
현재 함정 특수성능 분야에서 탑재장비에 대한 경사

**Table 1** Inclination angle for the test

Trim	Test angle (°)
Diving angle	-30.0
	-27.5
	-25.0
	-22.5
	-15.0
	-7.5
Even	0.0
Surfacing angle	+7.5
	+15.0
	+22.5
	+25.0
	+27.5
	+30.0

**Table 2** Test equipment

Equipment	Specification & type	
	Test RPM	1 200 r/min
	Diameter (L)	100 mm
	Diameter (H)	80 mm
	Power	25 W
	Max. inclination	±35°
	Table size	2 000 mm × 2 000 mm
	Pay load	1 500 kg
	Control parameter	Frequency, Time, Velocity
	Signal analyzer	LMS / SCM201
	Accelerometer	MMF / S943B100, Kistler / 8776A50
	Vibration calibrator	Kistler / 394C06



**Fig. 3** Inclination test diagram

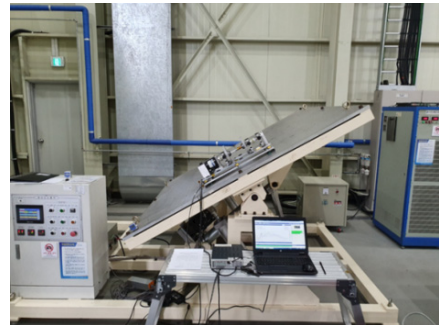
시험을 강제적으로 요구하고 있지 않으며, 해상 및 해저 상황에 따라 함정에 경사가 발생할 경우 탑재 장비의 베어링 진동, 공기소음 및 고체소음에 영향을 미칠 수 있는 상황을 배제하고 있다.

이 연구에서는 경사 각도에 따른 고체소음에 미치는 영향을 실험을 바탕으로 확인하기 위해 IEC 및 미국연방규정집(CFR)의 경사 시험 규격<sup>(5,6)</sup>을 참고하여 Table 1과 같이 경사 조건을 수립하였으며, 이때 고체소음 레벨 및 베어링 진동을 측정하고 분석하였다.

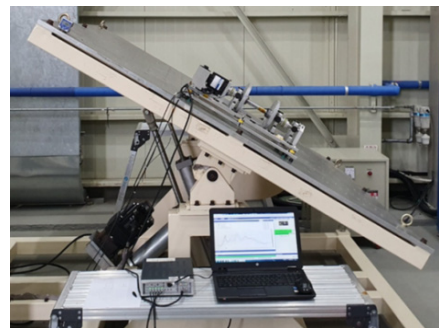
**3.2 장비 구성**

현재 산업 전반적인 분야에서 추진 시스템이 전기 시스템으로 급속도로 바뀌고 있으며, 함정 및 잠수함 추진체계도 과거의 기계식, 하이브리드 추진체계에서 전기추진체계를 적용하고 있는 추세이다. 전기추진체계는 연료 효율이 우수하며 소음 진동을 최소화할 수 있어 생존성 및 대잠능력을 향상시킬 수 있다.

이와 같은 이유로 시험 대상을 전동기로 선정하였으며, 축소 모델에 사용된 전동기는 잠수함에 사용되는 2.85 kW급 추진전동기와 비교했을 시 출력은 1:114이며, Diameter는 약 1:25의 모델이다. 전동기



(a) Test angle -30°



(b) Test angle +30°

**Fig. 4** Inclination angle for the test

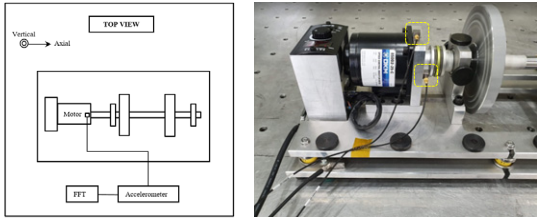


에 경사를 주기 위한 시험 장비의 구성 및 장비사양은 Table 2와 Fig. 3에서 보여준다.

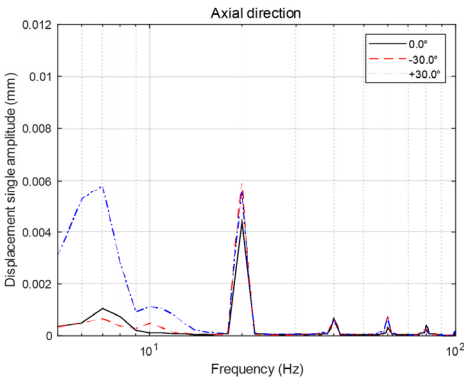
**3.3 경사 각도에 따른 진동 측정**

진동 측정 시험은 고체소음 시험과 동시에 수행하며 전동기의 베어링 하우징에 가속도계를 부착하여 운전 중 발생하는 진동을 측정하고 주파수 분석을 통해 각도별 변화를 확인한다.

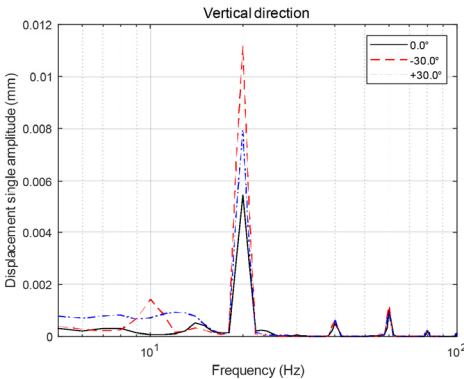
측정 방법은 MIL-STD-167-1A:2005 규격의 Type II 진동 측정 절차에 따르며<sup>(7)</sup>, 장비를 정상 구동 후



**Fig. 5** Test setup for the vibration test



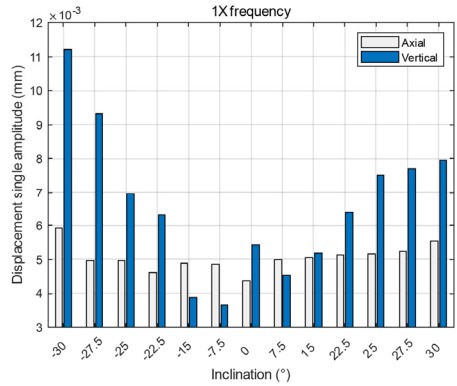
(a) Vibration levels of axial direction



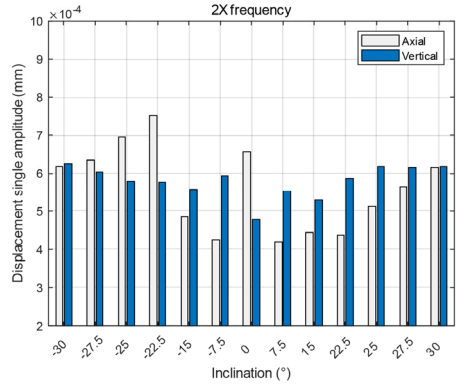
(b) Vibration levels of vertical direction

**Fig. 6** Test results of the vibration by inclination

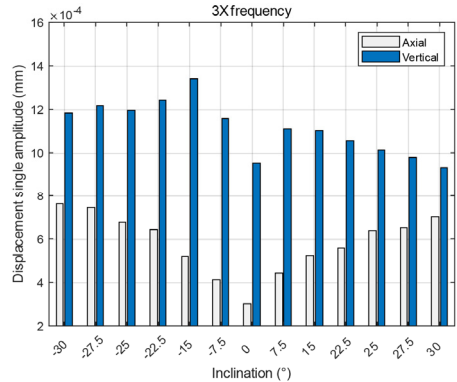
Fig. 4와 같이 최대 ±30°의 정적 경사를 구현하여 측정하였다. 설치 시 잠수함의 잠항 및 부상 각도를 고려하여 전동기의 축방향으로 경사를 주었으며, 각도를 설정한 후 약 1분간의 안정화된 상태에서 30초간 linear 평균값으로 측정하였다. 측정 방향은 Fig. 5와 같이 전동기의 베어링 하우징 부에 축방향과 수직하



(a) 1X frequency, 20 Hz



(b) 2X frequency, 40 Hz



(c) 3X frequency, 60 Hz

**Fig. 7** Test results of the vibration by harmonic frequency

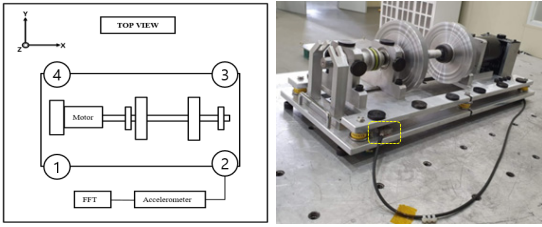


Fig. 8 Test setup for the structure-borne noise level

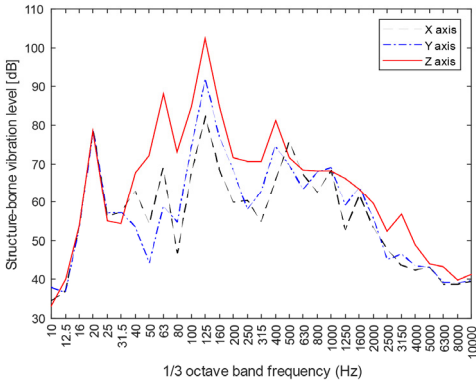


Fig. 9 Test results of structure-borne noise by frequency (0.0°, Point 1)

는 방향으로 단축 가속도계 2개를 부착하였다. 측정 주파수 범위는 회전주파수 1X 성분인 20 Hz를 포함한 2 Hz ~ 1 kHz이며, 경사각에 따른 주파수 성분 변화와 변위 레벨의 변화를 관찰하였다.

3.4 경사 각도에 따른 진동 시험 결과

진동 스펙트럼 분석 결과, 전동기의 정상운전 회전수 1200 r/min의 1차 회전주파수 성분인 20 Hz에서 가장 큰 변위값을 가지며 그 뒤에 배수성분이 고조파(harmonic) 형태로 나타났다. Fig. 6의 (a)는 축방향(axial)에서 수평 조건과 ±30° 경사를 주었을 경우의 진동 레벨을 비교한 그래프이다.

0° 기준으로 경사가 주어졌을 때 회전 주파수 1X 성분의 경우 최대 변위가 약 1.5 배 상승함을 보이고 있으며, 4 Hz의 저주파수 진동이 나타났지만 수직방향(vertical) 진동과 비교했을 시 전체적인 진동에 큰 영향을 주는 수준은 아니었다. Fig. 6의 (b)는 수직방향의 그래프로써, ±30° 경사가 주어졌을 시 수평일 때보다 2배의 진동 증폭이 발생하였다.

측정 결과 가장 높은 변위값을 가지는 1X 주파수

(20 Hz)를 비롯하여 배수 성분인 2X 주파수, 3X 주파수에서의 경사 각도별 진동 진폭은 Fig. 7의 그래프에서 확인할 수 있다. 경사 각도가 증가할수록 1X 주파수에서 수직방향 진동이 두드러지게 상승함을 확인하였다. 2X 주파수에서는 상대적으로 낮은 변위값을 보이며 각도별 선형적 변화는 관찰되지 않았다. 3X 주파수는 축방향 진동이 수직 방향 진동보다 크지 않지만 경사에 따라 선형적으로 증가함을 보여준다.

3.5 경사 각도에 따른 고체소음 측정

고체소음 측정 시 경사각도 및 측정 시간 등 환경 조건을 동일하게 맞추기 위해 진동 측정 시험과 동시에 진행하였다. MIL-STD-740-2(SH):1986 규격에서 제시하는 방법에 따라 측정 시스템의 현장 교정을 수행하였으며, Fig. 8과 같이 시료를 기준으로 좌우(X), 전후(Y), 상하(Z) 방향으로 측정하였다. 측정 위치는 하부 마운트 4개와 연결되는 지지부 상단(point 1~4)에 3축 가속도계를 부착하였다. 주파수 밴드는 1/3 octave band로 10 Hz ~ 10 kHz 대역이며, 배경 소음의 영향을 최소화하기 위하여 주요 회전 주파수의 고체소음 수준보다 10 dB 이하인 배경 소음 환경에서 시험을 진행하였다. 최대 ±30°의 정적 경사를 주었을 때 고체소음 레벨의 변화를 관찰하였으며, 3축 방향에 따른 고체소음 특성과 주파수 이동이 발생하는지를 확인하였다.

3.6 경사 각도에 따른 고체소음 시험 결과

일반적인 시험 방법인 수평 조건에서의 고체소음 레벨 측정 결과는 Fig. 9와 같다. 정상운전 상태인 1200 r/min의 회전 주파수 성분 20 Hz 및 배수 주파수 성분을 포함한 63 Hz, 125 Hz 밴드 대역에서 두드러진 응답 특성을 보이며, 3축 방향 중 상하방향(Z-axis)으로 가장 큰 고체소음을 발생시키고 있다. 이는 베어링 진동 측정 시 확인한 수직방향 진동이 하부 구조물을 통해 전달되어 고체소음에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

최대 ±30.0°의 경사를 주었을 경우 가장 큰 진동 변위값 및 변화율을 보인 Point 1의 주요 Harmonic 주파수 성분의 각도별 변화를 확인하여 Fig. 10에 나타내었다. 1X 주파수 수직방향에서 -30° 각도일 경우 8.2 dB 상승으로 가장 큰 변화를 보였으며, 125 Hz 주파수 대역의 경우 2.5 dB 증가함을 볼 수 있다. 경사에 따른 특정 주파수의 이동은 나타나지 않았으며, 진폭의 크기에 따라 고체소음 레벨의 증가만 나타났다.

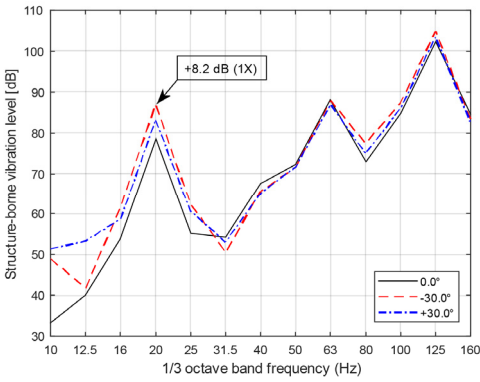


Fig. 10 Changes of structure-borne noise levels by inclination (Z-axis)

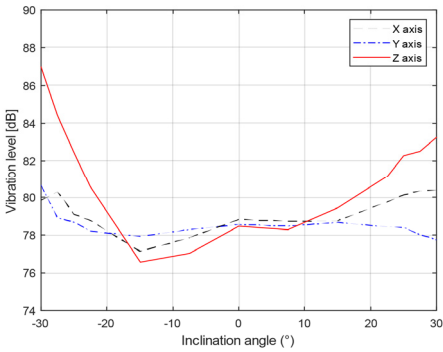


Fig. 11 Changes of the structure-borne noise by inclination (X, Y, Z-axis)

Fig. 11에서는 경사에 따른 X, Y, Z 각 축의 고체소음 레벨 변화량을 비교하였다. X축의 고체소음 변화량은 수평 대비 경사각에 따라 최대 +1.5 dB, Y축은 최대 +2.0 dB 변화하며, Z축의 +8.2 dB의 변화량과 비교했을 때 상대적으로 낮은 변화량을 보여준다. 또한 기울임에 따라 수직이었던 하중의 방향이 변화할 시, 각 축의 고체소음 레벨은 상호 상쇄되거나 줄어들지 않았으며 탄성마운트를 통한 에너지 전달량은 전체적으로 증가하였음을 확인할 수 있다.

4개의 point에서 수직방향, 1X 주파수 성분의 고체소음 레벨 변화는 Fig. 12 및 Table 3에서 볼 수 있다. 각도가 증가함에 따라 고체소음 레벨도 증가함을 보여주고 있으며 구조 및 하중 분포에 따라 고체소음 상승 정도의 차이가 발생하였다. 각 지점의 측정 결과 값을 보면 15° 경사를 넘어갈 경우 상대적으로 가파르게 증가하는 경향을 보인다.

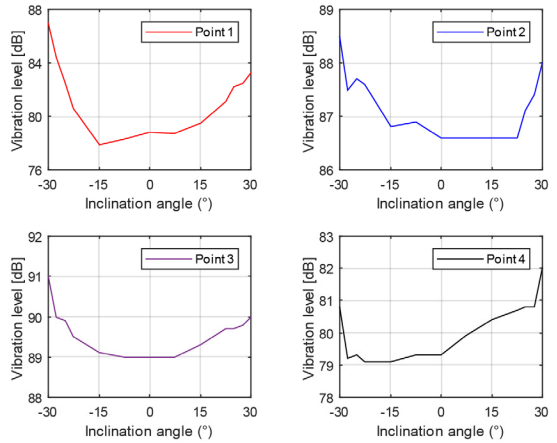


Fig. 12 Changes of the structure-borne noise by inclination (1X frequency)

Table 3 Structure-borne noise levels by inclination (1X frequency, Z-axis)

Inclination (°)	Structure-borne noise levels (dB)			
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
-30.0	87.0	88.5	91.0	80.8
-27.5	84.4	87.5	90.0	79.2
-25.0	82.5	87.7	89.9	79.3
-22.5	80.6	87.6	89.5	79.1
-15.0	77.9	86.8	89.1	79.1
-7.5	78.3	86.9	89.0	79.3
0.0	78.8	86.6	89.0	79.3
+7.5	78.7	86.6	89.0	79.9
+15.0	79.5	86.6	89.3	80.4
+22.5	81.1	86.6	89.7	80.7
+25.0	82.2	87.1	89.7	80.8
+27.5	82.5	87.4	89.8	80.8
+30.0	83.2	88.0	90.0	82.0

#### 4. 결 론

이 연구에서는 고체소음 평가 방법과 경사 상태에서 시의 성능평가 시험 조건을 결합하여 복합적인 평가 방법을 제시하였다. 전기 추진시스템으로 전환되는 추세를 고려하여 전동기를 시험 대상으로 선정하였으며 함정에서 발생할 수 있는 경사각도 ±30°를 구현시켜 고체소음에 미치는 영향을 연구하였다.

수평 및 경사 조건에서 측정된 고체소음의 경우 수직 방향에서 가장 큰 값을 나타내었으며, 각도별 가장 큰 변화율을 가진 주파수는 회전주파수 1X 성분으로 나타났다. 고체소음 레벨은 경사각이 커짐에 따라

수평조건 대비 회전주파수 1X 성분에서 최대 8.2 dB 증가하는 결과를 보였다.

고체소음 측정과 동시에 전동기 베어링 하우징에서 진동을 측정하여 상호 연관성을 분석하였으며, 경사각에 따른 고체소음 증가 원인은 전동기 베어링에서 발생하는 경사 하중에 의한 회전주파수 진동이 베어링 하우징 블록을 통해 하부 지지대까지 전달되는 것으로 확인하였다.

전동기의 베어링에 경사가 발생하는 경우 베어링 내부의 마찰과 발열이 증가하여 구름 접촉 피로 및 진동을 발생시킬 수 있다. 이를 방지하기 위해 장비 설계 시 수평 조건에서 사용하는 일반적인 베어링을 선정하는 것보다 경사에 따른 축이나 하우징의 힘이 있을 시 축심을 자동적으로 보정하는 기능을 갖는 자동 조심 롤러베어링 등의 사용을 고려할 수 있다. 또한 미끄럼 저널 베어링을 사용하는 저속 대형 추진 전동기의 경우 설계 시 유막의 두께, 압력 등을 고려하여 경사각에 따른 경계 마찰 진동을 최소화 시킬 수 있어야 한다.

이와 같이 함정 설계 단계에서부터 적합한 베어링 선정 및 경사에 의한 변수를 반영해야 하며, 고체소음의 허용 기준치 설정 시 경사 오차를 감안한 기준 레벨을 수립하는 것이 필요하다. 특히 잠수함과 같은 수중방사소음에 민감한 함정의 경우 잠항, 부상 및 수직발사에 따른 경사각 변화 시 고체소음이 증가할 수 있음을 인지하고 함정 운용 시 이러한 특성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구임(미주시장 사업확장을 위한 USCG 형식승인 기준 CO<sub>2</sub> 소화설비 SYSTEM 기술 개발).

References

(1) Han, H. S. and Lee, K. H., 2013, Estimation of the Underwater Radiated Noise of a Naval Vessel Using Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 394-400.  
 (2) Yi, J. J., Kang, M. H., Han, S. J., Bae, S. R., Kim, J. H. and Jung, W. J., 2014, A Numerical

Analysis Study on the Estimation of the 3D Underwater Radiated Noise Pattern using the Hull Vibration Signals, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 10, pp. 770~779.

(3) Kim, J. S., Kim, H. S. and Kim, S. Y., 2001, Transfer Function of Structure-Borne Noise to Underwater Radiated Noise, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 138~142.

(4) US Department of Defense, 1986, Structure-Borne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment, MIL-STD-740-2(SH), p. 3.

(5) IEC 60092-504 edition 4.0, 2016, Electrical Installations in Ship - Part 504 : Automation, Control and Instrumentation.

(6) United States Government, 2012, Testing Requirements for Ballast Water Management System(BWMS) Components - Fluctuation in Power Supply Test, 46 CFR 162.060-30.

(7) US Department of Defense, 2005, Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment (TYPE-I Environmental and TYPE-II Internally Excited), MIL-STD-167-1A, pp. 11~15.



**Hoyeon Jeong** received a B.S. in Department of Marine Engineering from Mokpo National Maritime University in 2009, He then received M.S. degree in Weapon System Engineering from Pukyong National University in 2020. He is currently a Ph.D. candidate in the National Korea Maritime & Ocean University and a Senior Researcher in the field of sound, vibration and shock at Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI).



**Heemo Goo** received a B.S. and M.S. in department of Mechanical Engineering from National Korea Maritime & Ocean University in 2007 and 2013. He is currently a Ph.D. candidate in the National Korea Maritime & Ocean University and a Principal Researcher in the field of sound, vibration and shock at Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI).

# 이차 배관 결함별 진동 특성에 대한 테스트베드 / 연구로 / 상업로 운전 조건 및 환경의 영향 분석

## Analysis of Vibration Characteristics of Secondary Piping Faults in Testbed, Research, and Commercial Reactors

박 상 진\* · 정 변 영\*\* · 박 진 호\*\* · 최 영 철†

Sang-Jin Park<sup>†</sup>, Byun-Young Chung, Jin-Ho Park and Young-Chul Choi<sup>\*</sup>

(Received September 23, 2021 ; Revised October 28, 2021 ; Accepted October 28, 2021)

**Key Words :** Secondary System(이차 계통), Secondary Piping(이차 배관), Pipe Wall-Thinning Fault(배관 감육 결함), Leakage Fault(누설 결함), High Amplitude Vibration Fault(고진동 결함), Loose Part Fault(이물질 결함), Shell Mode Vibration(셸 모드 진동)

### ABSTRACT

In pressurized water reactor systems, pressure boundary components are mechanical systems that exhibit significant differences in pressure between the inside and outside of their boundaries. Any cracks and faults in pressure boundary components should be diagnosed in advance, and pressure boundary integrity should be continuously monitored. Against this backdrop, many diagnostic techniques based on various physical phenomena have been developed. However, most of these technical developments have been conducted in testbed, rather than in a commercial environment, and therefore, they require feasibility checks for more practical conditions. In this study, the vibratory characteristics of different types of faults in secondary piping are analyzed to estimate the field applicability of the vibration-based prognosis technology currently under development. The analysis results show that this technology is advantageous in diagnosing every type of fault in a commercial reactor environment.

### 1. 서 론

가압경수로(pressurized water reactor; PWR) 기반의 상업 원자력 발전소에는 수많은 압력경계기기(pressure boundary component)들이 존재한다. 여기서, 압력경계기기들은 고온, 고압의 냉각재를 유지하

기 위한 기계적 시스템의 경계 영역을 지칭하는 것으로 주로 압력용기, 배관, 밸브 등의 경계들이 속한다. 이러한 압력경계기기에서는 높은 압력 하중이 작용하고 있으며, 이로 인해 압력경계의 건전성 진단 및 상태 감시는 매우 중요한데, 압력경계에서는 비록 작은 균열(crack) 혹은 소소한 결함(fault)일지라도 배관 파단과 같은 대형 사고로 이어질 가능성이 있기 때문에

† Corresponding Author; Member, Korea Atomic Energy Research Institute, Senior Researcher  
E-mail : eyc@kaeri.re.kr

\* Member, Korea Atomic Energy Research Institute, Postdoctoral Researcher

\*\* Member, Korea Atomic Energy Research Institute, Senior Researcher

‡ Recommended by Editor Jin Gyun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

반드시 사전에 예측·진단(prognosis) 되어야 한다.

이러한 중요성을 바탕으로 원전 압력경계에서의 결함을 진단하기 위해 결함 종류에 따라 초음파, 와전류, 영상 촬영 등 다양한 방식의 감시, 진단 기술들이 개발되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 개발되고 있는 여러 기법들 중에서 구조물 진동 특성을 이용하는 결함 예측·진단 기술도 연구되고 있는데<sup>(4,5)</sup>, 이러한 진동 기반의 예측·진단 기술은 다양한 종류의 결함 진단에 적용할 수 있고 발전소가 정상 운전 중일 때도 적용가능하여 상시 진단이 가능하다. 또한, 결함 진단을 위해 부가적으로 진동에너지 공급원없이 계속 센서만 필요하다는 큰 장점을 지니고 있다.

하지만, 이렇게 다양한 방식들의 결함 검출 기법 및 예측·진단 기술들은 실제 상업로 원전과 다른 환경에서 개발되고 있는 경우가 일반적이다. 실제 기술 개발이 이뤄지는 테스트베드의 환경은 기술 적용 대상인 원전 환경에 비해 소규모로 축소되고, 시험 조건 역시 실제 상업로의 운전 조건과 큰 차이를 보이는 경우가 많다. 따라서, 상업로 원전에 대한 기술 적용을 목표로 하는 많은 결함 예측·진단 시작품 기술들은 현장 적용가능성을 선행적으로 확인해야 하고 실현가능성(feasibility)을 검증해야 한다.

이 연구에서는 현재 연구 중인 진동 기반의 압력계통 결함 예측·진단 시작품 기술의 현장 적용 가능성을 예측하고 예비평가하기 위해 테스트베드/연구로(HANARO)/상업로 이차계통 운전 조건 및 환경 조사 결과를 기반으로 이차 배관(secondary piping)에 대한 네 종류 결함(배관 감육, 누설, 고진동, 이물질)의 진동 특성을 분석하였다.

## 2. 테스트베드/연구로/상업로 이차 계통 운전 조건 및 환경

Table 1은 테스트베드/연구로/상업로 이차 계통의 운전 조건과 운전 환경을 조사한 결과이다<sup>(6-8)</sup>. 실제 상업로 원전의 이차 계통은 구역별로 배관 제원과 운전 조건이 천차만별이나, 이 연구에서는 테스트베드와 차이가 큰 가혹 조건(severe condition) 과 급수 라인(feedwater line)을 주요 분석 대상으로 선정하였다.

테스트베드/연구로/상업로 세 가지 환경은 Table 1에서 볼 수 있듯이 서로 배관 제원, 운전 온도와 압력, 운전 유량, 그리고 기타 환경에서 서로 큰 차이를

**Table 1** Operational conditions and environments of testbed/research/commercial secondary systems

	Testbed	Res. reactor (HANARO)	Com. reactor	Com. eactor (severe condition)
Dia. <i>h</i> (inch)	8	24	36	30
Thick. <i>D</i> (inch)	0.25	0.375	0.5	0.5
<i>h/D</i>	0.031	0.0156	0.0138	0.016
Material	Carbon steel			
Temp. (°C)	Room temp.	32 ~ 40	136	210 ~ 232
Press. (kPa)	Atmospheric pressure		380	2200 ~ 2800
Flow rate (m/s)	0.5 ~ 0.85	1.7	2.5	3.5
Mass flow (kg/s)	16 ~ 27	500	1,600	
Insulator	None		Installed	
Supporter	Simply supported	-	Full clamped	

보인다. 특히, 배관 크기 측면에서 연구로와 상업로의 이차 배관은 테스트베드에 비해 대구경임을 볼 수 있고, 직경 대비 두께 비율(*h/D*)이 절반 이하임을 알 수 있다. 또한, 테스트베드와 연구로는 상온, 대기압에 가깝게 운전하는 반면에 상업로는 고온, 고압의 운전 환경이며, 서로 유속, 유량 차이도 매우 큰 것을 볼 수 있다. 마지막으로, 배관 단열재와 지지대 설비 여부도 서로 다른 것으로 확인되었다.

## 3. 배관 제원의 영향성

### 3.1 배관 감육 결함의 진동 특성

현재 개발 중인 진동 기반의 배관 감육 예측·진단 시작품 기술<sup>(4,5)</sup>은 배관 셸(shell) 모드의 진동 특성을 기반으로 개발되고 있다. 배관 셸 모드의 고유진동수 공식은 다음과 같은데<sup>(9)</sup>,

$$f_{shell} = \frac{1}{2\pi} \frac{h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \frac{n(n^2-1)}{\sqrt{12(n^2+1)}} \quad (1)$$

여기서, *R*과 *h*는 각각 배관의 공칭 반지름과 두께이며, *E*,  $\rho$ , 그리고  $\nu$ 는 각각 배관 재료의 탄성계수, 밀도, 그리고 푸아송 비(Poisson's ratio)이고, *n*은 셸 모드의 차수(order)이다.

테스트베드/연구로/상업로 운전 조건 및 환경 조사 결과에 따르면, 배관의 재질은 모두 탄소강 계열로서 물성치는 서로 큰 차이를 갖지 않는 것으로 확인된다. 따라서, 식 (1)을 통해 배관 셀 모드 진동 특성에 대한 주요 지배 인자는 바로 배관 치수와 셀 진동 모드의 종류라는 것을 알 수 있다. 특히 배관의 반경 대비 두께 비율( $h/R$ )에 매우 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있고 연구로 및 상업로의 대구경 배관들에서는 배관 셀 모드의 고유진동수가 테스트베드의 배관에 비해 크게 감소할 것으로 예상할 수 있다.

이러한 이론적 분석과 함께 곡관에서의 배관 감속 결합의 진동 특성을 더욱 상세히 평가하기 위해 조사된 Table 1의 배관 제원을 바탕으로 ANSYS<sup>(10)</sup>를 통해 자유 상태(free-free condition) 곡관들의 진동 해석(modal analysis)을 수행하였다.

여기서, 곡관의 곡률반경(radius of curvature)은 테스트베드의 곡관 실제 치수를 바탕으로 직경 대비 곡률 반경 0.677을 세 가지 경우에 대하여 모두 동일하게 적용하였다. Table 2와 Fig. 1은 테스트베드/연구로/상업로 곡관들의 진동해석 결과이다. Table 2에서 확인할 수 있듯이, 연구로 및 상업로 곡관들의 셀 모드 고유진동수는 테스트베드에 비해 매우 크게 감소한 것

을 볼 수 있는데, 첫 번째 셀 모드를 기준으로 테스트베드 배관은 480 Hz인 것에 비해 연구로 및 상업로 배관들은 각각 80 Hz와 47 Hz 로써 고유진동수가 매우 크게 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 경향성은 상술한 바와 같이 배관 셀 모드에 대하여 큰 배관 직경의 영향이 크게 작용한 것으로 판단할 수 있으며 상업로 배관의 경우, 첫 번째 셀 모드가 50 Hz 이하까지 감소할 수 있을 것으로 확인되었다.

이러한 연구로 및 상업로 배관의 셀 모드 고유진동수 감소는 배관 내부 유체에 의한 유동기인진동(flow induced vibration; FIV)에 의해 셀 모드 가진 가능성이 상승될 수 있다는 것을 뜻한다<sup>(11-14)</sup>. 일반적으로 배관 내부 유동에 의한 유동기인진동은 크게 난류의 압력변동(pressure fluctuation), 펌프에 의한 압력 맥동(pressure pulsation), 그리고 음향공진(acoustic resonance) 세 가지로 분류할 수 있는데, 이 중에서 난류의 압력 변동은 주로 50 Hz 미만의 저주파수 진동 대역의 특성을 가지고 배관의 빔(beam) 모드 진동을 주로 일으키는 것으로 밝혀져 있다<sup>(11-14)</sup>. 결과적으로, 테스트베드의 소구경 배관에 비교하여, 연구로 및 상업로의 대구경 배관에서는 저차(low-order) 셀 모드 역시 가진 가능성이 높아질 것으로 예상할 수 있으며, 셀 모드의 고유진동수 변화를 활용한 배관 감속 결합 예측·진단 시작품 기술의 상업로 현장 적용이 가능하고 타당하다는 것을 예비적으로 알 수 있다.

Table 2 Modal analysis results of elbow

	Testbed	Res. reactor (HANARO)	Com. reactor
1st mode	480	80	47
2nd mode	514	97	60
3rd mode	1055	208	128
4th mode	1274	221	133

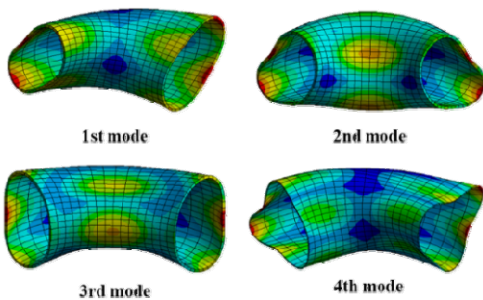


Fig. 1 Mode shape results of elbow

### 3.2 이물질 결합의 진동 특성

테스트베드/연구로/상업로 이차 배관의 체원 차이에 의해 진동 특성에 대한 영향을 받는 두 번째 결합 종류는 이물질 결합이다.

Fig. 2는 상용 분산선도 계산 코드인 DISPERSE<sup>(15)</sup>를 통해 계산한 테스트베드/연구로/상업로 배관의 최저차 굽힘파(flexural wave)의 분산선도이다. 분산선도 계산결과로부터 알 수 있는 경향성은 상업로 환경에 가까워질수록 굽힘파의 위상속도 및 군속도가 전주파수 대역에서 증가한다는 것이다. 하지만 두 파동 속도는 10 kHz 이하에서 복잡한 특성을 보이는데, 이러한 이유는 저주파수 대역에서 배관 굽힘파의 파장이 길어지면서 그 전파 특성이 작은 직경의 봉(thin rod) 혹은 선(wire)에서의 유도파(guided wave) 특성에 가까워지기 때문으로 확인된다. 테스트베드/연구로/상업로 배관의 최저차 굽힘파 모드의 변화 구간

주파수는 각각 7 kHz, 2.4 kHz, 그리고 1.7 kHz로 상업로 배관에 가까워질수록 변화 구간 주파수가 감소하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 이러한 변화 구간 근처에서는 분산 특성이 복잡하기 때문에 이물질 결합의 충격 신호 분석이 까다로워질 것으로 예상할 수 있다. 이를 반대로 설명하면, 테스트베드의 소구경 배관에 비교하여, 연구로 및 상업로의 대구경 배관에서는 상대적으로 굽힘과의 분산 특성이 단순해지기 때문에 이물질 결합 진단과 정보 분석이 유리해질 것으로 추론된다.

더불어, 상업로 환경에 가까워질수록 굽힘과의 군속도는 주파수 전반적으로 증가한다. 그리고 이로 인해 지연시간(time delay) 구별을 통한 이물질 위치 추

정에 다소 불리할 수 있을 것으로 예상되나, 군속도 대비 상업로의 긴 배관 길이를 고려하면 증가된 군속도는 지연시간 구별을 통한 위치 추정 특성과 무관할 것으로 판단된다. 따라서, 이물질 결합 진동 특성은 굽힘과의 분산 특성 측면에서 상업로 환경에 가까워질수록 현상 적용성이 유리한 방향으로 변화되는 것으로 추론된다.

### 3.3 고진동 및 누설 결합의 진동 특성

테스트베드/연구로/상업로 간의 배관 크기 차이는 고진동 및 누설 결합의 진동 특성에도 일부 영향을 미칠 것으로 예상된다. 우선, 배관의 고진동 결합은 주로 빔 모드 진동에 의해 발생되므로, 배관 치수에 따른 빔 모드 진동 특성을 분석하였다. 식 (2)와 식 (3)은 각각 양단이 고정된 빔의 굽힘 진동 고유진동수 (angular frequency) 과 최대 처짐량(deflection)  $u$ 에 대한 수식이다<sup>(16,17)</sup>.

$$f_{beam} = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \tag{2}$$

$$u = -\frac{FL^3}{24EI} \tag{3}$$

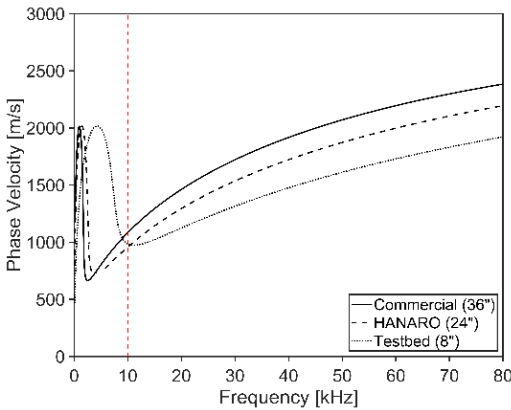
여기서  $\alpha$ 는 빔 모드 상수,  $A$ 는 빔의 단면적,  $L$ 는 빔의 길이, 그리고  $F$ 는 외력이다. 배관 형상을 기준으로 단면관성모멘트  $I = \pi R^3 h$ 이고, 단면적  $A = 2\pi R h$ 이다.

이러한 두 수식을 통해 빔 모드의 진동 특성은 배관 반경 대비 길이 비율( $L/R$ )에 매우 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 상업로 환경에 가까워질수록 배관 반지름이 증가하지만 배관 길이는 더 크게 증가한다. 그러므로, 연구로 및 상업로 이차 배관의  $L/R$  비율이 테스트베드 환경에 비해 일반적으로 더욱 클 것이기 때문에 빔 모드의 고유진동수는 테스트베드 배관에 비해 낮을 것이며, 최대 변형량은 상대적으로 클 것으로 예상할 수 있다. 마지막으로, 누설 결합은 배관 크기와 무관한 것으로 확인된다.

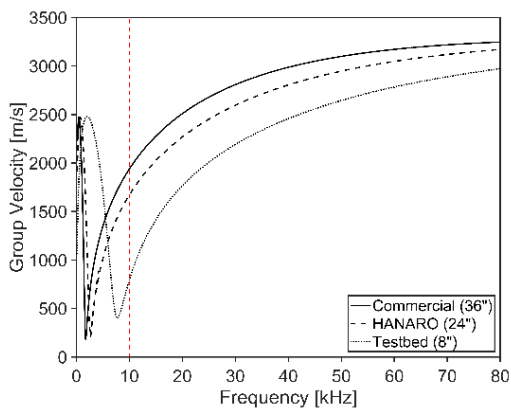
## 4. 고온, 고압 운전 조건의 영향성

### 4.1 배관 감속 결합의 진동 특성

테스트베드/연구로/상업로 이차 계통에서 서로 큰 차이를 보이는 두 번째 운전 조건 및 환경은 온도와 압력이다. 결합별 진동 특성에 대한 고온, 고압 운전



(a) Phase velocity dispersion curve



(b) Group velocity dispersion curve

**Fig. 2** Dispersion curves of the lowest order flexural wave of testbed/research/commercial secondary piping



조건의 영향성을 평가해보면, 우선 고온의 운전조건은 Fig. 3과 같이 탄소강 계열의 탄성 계수를 열화시킨다<sup>(18)</sup>. 하지만, 상온에서의 탄성계수는 203 GPa, 상업로 이차 급수 배관에서의 최고 운전 온도인 232 °C에서는 191 GPa로서, 탄성계수 감소율은 5.9 %로 매우 크지는 않다. 한편, 고압의 운전 조건은 배관에 후프(hoop) 응력을 가함으로써 배관 셸 모드에 대하여 예비 응력 효과(pre-stress effect)를 일으킬 것으로 예상할 수 있다.

보다 정확한 고온, 고압 운전 조건의 영향성을 해석하기 위해 Fig. 3에 제시된 탄소강 계열의 온도별 물성치와 고압 운전 조건을 적용한 진동 해석을 수행하였다. Table 3은 자유 상태의 상업로 곡관에 대한 온도 및 압력별 1차 셸 모드의 고유진동수 해석결과이다. 상온, 대기압 조건에서의 1차 셸 모드 고유진동수는 47 Hz인 것으로 확인되며 232 °C의 고온 운전 조건만 적용되었을 때는 46.5 Hz로 0.5 Hz 감소한 것으로 확인되었다. 또한, 상업로 원전 이차 계통 급수 배관의 최대 운전압력인 2800 kPa만이 배관 에 적용

되었을 때는 70.2 Hz로 상온, 대기압일 때의 1차 셸 모드 고유진동수에 비해 23.2 Hz 증가한 것으로 확인되었다. 결과적으로, 셸 모드 진동 특성에 대한 고압의 운전 조건 영향이 고온의 영향성보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 고압의 운전 조건은 셸 모드 고유진동수를 증가시키므로 셸 모드 가진 가능성 측면에서 다소 불리한 요소로 고려된다.

하지만, 주파수 증가량이 이전 절에서 분석된 배관 제원 차이에 의한 변화량에 비해 상대적으로 작기 때문에 셸 모드 특성에 대한 결정적인 지배 인자는 아닌 것으로 판단되며, 그 영향성 또한 매우 크게 작용하지는 않을 것으로 예비적으로 예상된다.

### 4.2 누설 결함의 진동 특성

고온, 고압 운전 조건의 상업로 이차 배관에서의 물은 주로 포화(saturation) 혹은 아냉(subcooled) 상태이다. 그리고 이러한 급수 배관으로부터 발생하는 누설은 임계 유동(choked flow or critical flow)의 특성을 가지며, 상변화(phase transition)와 이상 유동(two-phase flow) 특성을 동반하기 때문에 누설 분출 속도, 누설률, 누설량과 같은 여러 누설 특성들은 상온, 대기압에 가까운 환경에서의 누설 특성과 매우 큰 차이를 보인다<sup>(19)</sup>. 그리고 이러한 누설 발생에 의한 진동 및 소리 특성 역시 상온, 대기압 근처에서의 특성과 매우 큰 차이를 보이는 것으로 여러 선행 연구들을 통해 이미 밝혀져 있다<sup>(20,21)</sup>.

특히 누설의 음향방출(acoustic emission; AE)에너지는 Fig. 4와 같이 공기와 구조물을 통해 전파되는데, 이때 누설음의 크기  $P_{sound}$ 는<sup>(20)</sup> 식 (4)와 같다.

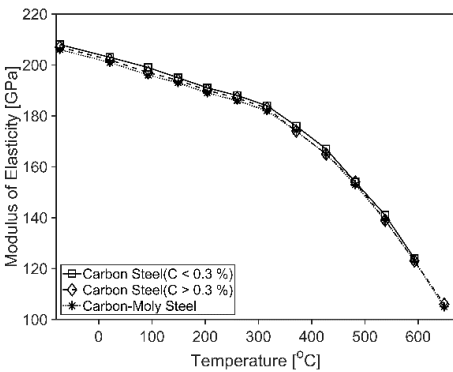


Fig. 3 Change of modulus of elasticity of carbon steel depending on temperature

Table 3 FEM analysis results for natural frequency of first shell mode of commercial curved pipe

Analysis condition	1st shell mode frequency (Hz)
Room temp. and atmospheric press.	47.0
High temperature (232 °C)	46.5
High pressure (2800 kPa)	70.2
High temperature and pressure (232 °C and 2800 kPa)	70.1

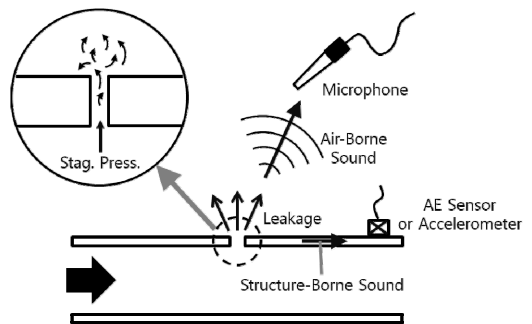


Fig. 4 Leakage phenomenon and acoustic emission energy transfer

$$P_{sound} = C_0 \frac{p_{inner}^4 d^{16}}{c^5 \rho^3 D^{14}} \tag{4}$$

여기서  $C_0$ 는 비례 상수,  $c$ 는 음속,  $\rho$ 는 유체 밀도,  $p_{inner}$ 은 배관 내부 압력, 그리고  $d$ 는 결함 직경이다. 이를 통해 배관 내부 압력과 결함 직경이 커질수록 누설음 크기가 증가한다는 것을 알 수 있다. 비록 이 수식은 공기 중으로의 AE 에너지 전파와 관련되어 있지만, 배관 내부 압력이 증가하면 구조물로 전파하는 진동 에너지는 역시 증가할 것으로 유추할 수 있고 그 크기는 누설음에 비례하는 것으로 알려져 있다<sup>(21)</sup>.

### 4.3 고진동 및 이물질 결함의 진동 특성

고진동 및 이물질 결함의 진동 특성은 고온, 고압 운전 조건과 무관할 것으로 예상된다. 이러한 이유는 고진동 결함이 상술한 바와 같이 빔 모드 진동 특성과 연관되어 있으며, 고온, 고압 운전 조건의 영향성이 무시할 수 있을 만큼 미미했기 때문이다.

더불어, 이물질 결함의 진동 특성에 대한 주요 지배 인자는 이물질의 질량, 형상, 충격 각도 및 속도이며, 상업로 원전 이차 계통에 비해 더 높은 온도와 압력의 운전 조건을 갖는 일차압력경계(primary pressure boundary) 기기들에서 이미 금속파편감시시스템(loose part monitoring system; LPMS)이 성공적으로 적용되었고 현재 상업로 원전에서 실제 가동되고 있기 때문이다<sup>(22)</sup>.

## 5. 고유량 운전 조건과 기타 환경의 영향성

### 5.1 배관 감속 결함의 진동 특성

상업로 원전의 이차 계통 주급수배관에서는 Table 1에 제시되어 있듯이 최대 1초당 1.6톤의 물이 흐르고 최대 평균 유속은 최대 3.5 m/s인 것으로 조사되었다. 이러한 고속, 고유량의 운전 조건은 난류 유동 특성을 변화시키며 이로 인한 유동기인진동(FIV)의 특성에 영향을 미친다<sup>(23,24)</sup>. Hirota는 직경 0.41 m(16 인치) 배관 시스템을 이용하여 곡관 엘보(elbow)로부터 발생하는 난류와 와류 박리(vortex shedding) 현상의 특성을 실험적으로 연구하였다<sup>(23)</sup>. 실험이 수행된 루프테스트 시설의 곡관 곡률 반경은 테스트베드 환경의 곡관과 유사한 짧은 엘보(short elbow)이다. 실험 조건으로써, 운전 유속은 0.8 m/s ~ 9.2 m/s이며 작

동 유체는 60 °C의 물이다.

시험 결과에 따르면 난류 압력 변동의 Strouhal 수는 0.45에서 최대 피크(peak)를 갖는 것으로 밝혀졌다. 여기서 Strouhal수의 정의는 다음과 같은데,

$$st = \frac{fD}{U} \tag{5}$$

여기서  $D$ 와  $U$ 는 배관 직경과 유속이다. 이 수식으로부터, 엘보에 의해 발생하는 난류의 압력 변동 주파수  $f$ 는 배관 직경  $D$ 에 반비례하고 유속  $U$ 가 증가함에 따라 상승한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 유속 증가는 압력 변동의 FIV 주파수를 상승시킴으로써 감속 진단에 활용되는 저차 셀 모드의 가진에 기여할 수 있다.

### 5.2 이물질 결함의 진동 특성

상업로 원전 이차 계통의 고속, 고유량 운전 조건에 큰 영향을 받을 것으로 예상되는 결함은 이물질 결함이다. 이러한 이유는 테스트베드 환경에 비해 증가된 상업로 이차 배관의 내부 유동의 속도는 금속 이물질의 충격 속도를 상승시키기 때문이다. 이물질에 의해 발생하는 구조물의 진동 응답 크기  $A_{plate}$ 는 Fig. 5와 같은 유연체 강구(metal sphere)와 유연체 판에 대한 Hertz 접촉 이론(Hertzian contact mechanics) 기반의 수식을 통해 얻을 수 있으며, 관련 수식은 다음과 같다<sup>(25)</sup>.

$$A_{plate} = F_{max}/m_{eff} \tag{6}$$

$$F_{max} = k_H^{-0.1}(mV^2)^{3/5}R_1^{1/5} \tag{7}$$

$$m_{eff} = \pi(C_{plate}T_d)^2h\rho_2 \tag{8}$$

식 (6)에서  $F_{max}$ 와  $m_{eff}$ 는 각각 이물질의 최대 충격력

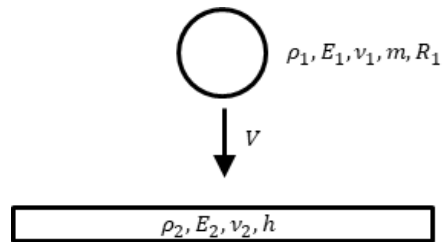


Fig. 5 Contact between a flexible metal sphere and a flexible plate

과 유효 질량이다. 여기서,  $F_{max}$ 는 식 (7)에서 볼 수 있듯이 Hertz 접촉 계수  $k_H$  구의 질량  $m$ , 충격 속도  $V$ , 그리고 구의 반지름  $R_1$ 과 연관되고,  $m_{eff}$ 는 수식 (8)에서 볼 수 있듯이 판재에서의 굽힘파의 전파 속도  $C_{plate}$  접촉 시간  $T_d$ , 판 두께  $h$ , 그리고 밀도  $\rho_2$ 와 연관되어 있다.

$$k_H = \left[ \frac{15}{16} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{2/5}, T_d = \frac{D_{max}}{V}$$

로 알려져 있으며, 여기서  $D_{max}$ 는 두 물체의 접촉 시 발생하는 최대 접촉 직경이다.

이러한 Hertz 접촉 이론을 통해 알 수 있는 사실은 최대 충격력  $F_{max}$ 가 충격 속도  $V$ 의 제곱에 비례한다는 것과 충격 속도  $V$ 의 증가는 접촉 시간  $T_d$ 를 감소시킨다는 것이다. 결국, 구조물의 응답  $A_{plate}$ 는 최대 충격력  $F_{max}$ 와 정비례하고 접촉 시간  $T_d$ 와 반비례하기 때문에, 충격 속도  $V$ 의 증가는 구조물의 진동 응답 크기를 증가시킨다.

더불어, 유속 증가는 레이놀즈(Reynolds)수를 증가시키고 유동 흐름을 복잡하게 만들기 때문에 밸브, 분기관, 리듀서(reducer)와 같은 불연속적인 영역에서 소용돌이(swirl)을 발생시킬 가능성이 높을 것으로 예상된다. 그리고 이렇게 발생한 소용돌이 유동은 이물질 결합이 같은 위치에서 주기적이고 반복적인 충격 신호를 발생시킬 가능성을 상승시킨다. 이러한 경우, 이물질 충격 신호는 열충격(thermal shock)와 같은 거칠 충격 신호와 쉽게 구분할 수 있기 때문에 이물질 결합 진단에 매우 유리해진다. 그러므로, 상업로 환경의 높은 유속 운전 조건은 기술의 현장 적용 가능성 측면에서 이물질 결합의 진동 특성을 유리하게 만드는 것으로 예상된다.

### 5.3 고진동 및 누설 결합의 진동 특성

마지막으로 고진동 및 누설 결합의 진동 특성에 대해 고속, 고유량 운전 조건의 영향성을 추정해보면, 고진동 결합은 반복하여 기술하지만 배관의 빔 모드 진동 특성과 연관되어 있고, 유속 증가는 난류의 압력 변동 FIV 주파수를 상승시킬 것으로 분석되었다. 더불어, 상업로 이차 배관은  $L/R$  비율이 테스트베드 환경에 비해 높기 때문에 빔 모드의 주파수 또한 매우 낮을 것으로 예상된다. 이러한 이유로 인해 높은 유속의 운전 조건은 배관의 고진동 발생 가능성을 높일 것으로 예상된다.

그러나 고진동 결합의 진동 특성과 달리, 높은 유

속의 운전 조건은 누설 결합의 진동 특성과는 무관할 것으로 판단된다. 왜냐하면 누설 특성은 배관 내부의 온도와 압력, 작동 유체 종류, 점성 등에 큰 영향을 받으며 유동의 흐름 상태와는 큰 관련이 없는 것으로 밝혀져 있기 때문이다.

### 5.4 기타 환경의 영향성

고온으로 운전되는 상업로 원전 이차 배관은 상온의 테스트베드와 연구로 환경과 달리 단열재와 지지대가 설치된다. 그러므로, 각 결합별 진동 특성에 대한 단열재 및 지지대의 영향성을 마지막으로 추론해 본다면, 우선 단열재는 배관 전체를 감싸고 있기는 하지만 배관과 기계적 결합(mechanical coupling)을 이루거나 배관의 거동을 구속하지는 않는다. 따라서 단열재는 각 결합별 진동 특성에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 하지만 지지대는 배관을 구속함으로써 배관라인(pipeline)의 거동을 억제하기 때문에 빔 모드 특성과 연관된 고진동 결합의 진동 특성에 특히 큰 영향을 기여할 것으로 예상되고, 경계조건 변화에 의해 빔 모드의 고유진동수를 크게 증가시킬 것으로 추정된다.

**Table 4** Effect of operation condition and environment of commercial reactor on different type of secondary piping faults (symbol - indicates no effect or small effect)

	Pipe spec. (large dia.)	High temp. and press.	High flow rate	Insulator and supporter
Wall thinning	Reduction of shell mode frequency	Increase of shell mode frequency	Increase of pressure fluc. frequency of turbulent	-
Loose part	Simple dispersion characteristics	-	Increase of shock (vibration) response	-
Leakage	-	Increase of leakage sound and vibration	-	-
High amp. vibration	Reduction of beam mode frequency and increase of maximum deflection	-	Increase of pressure fluc. frequency of turbulent	Increase of beam mode frequency

## 6. 결 론

이 연구에서는 개발 중인 압력경계 결함 예측·진단 기술의 현장 적용가능성을 예비적으로 평가하기 위해 이차 배관 결함별 진동 특성에 대한 테스트베드/연구로(HANARO)/상업로 운전 조건 및 환경의 영향성을 분석하였다.

테스트베드/연구로/상업로 이차계통의 운전 조건과 환경을 분석한 결과에 따르면, 상업로 이차 급수 배관은 주로 테스트베드에 비해 대구경의 배관들이 사용되고, 고온, 고압, 고유량으로 운전되었다. 이러한 상업로의 운전 조건 및 환경 하에서 네 종류의 이차 배관 결함들의 진동 특성 분석결과는 개괄적으로 Table 4와 같았다.

이러한 분석 결과로부터, 상업로 환경에 가까워질수록 이차 배관 결함들의 진동 특성들은 전반적으로 개발 중인 압력 경계 결함 예측·진단 기술의 현장 적용성 측면에서 유리한 방향으로 변화되는 것을 확인하였으며, 현재 테스트베드 환경에서 개발 중인 예측·진단 기술의 상업로 현장 적용이 가능하고 충분히 타당하다는 것을 예비적으로 확인할 수 있었다.

이 연구 결과는 상업 발전소 이차 배관 결함들의 진동 특성을 이해하기 위한 기초 자료와 진동 기반의 압력 경계 결함 예측·진단 시작품 기술의 실현가능성(feasibility) 상세 평가 및 향후 실증 연구의 기반 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (NRF-2020M2C9A1062710).

## References

(1) Oh, S. B., Cheong, Y. M., Lee, D. H. and Kim, K. M., 2017, Development of a Magnetostrictive Guided Wave Technique for Defect Detection and Monitoring in a Pipe Weld, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 4, pp. 230~238.  
 (2) Seo, H., Jun, J., Shin, J. W. and Park, D.-G.,

2021, Pipe Thickness Estimation by Deep Learning of Pulsed Eddy Current Time-series Data, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 41, No. 3, pp. 164~171.

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

(4) Sohn, C.-H., Choi, Y.-C., Park, J.-H. and Yoon, D.-B., 2006, Monitoring Pipe Thinning Using Time-frequency Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 1224~1230.

(5) Choi, Y.-C., Park, J.-H. and Yoon, D.-B., 2008, Monitoring Pipe Thinning Using Two Accelerometers, Vol. 18, No. 12, pp. 1278~1284.

(6) KEPCO, 1990, Final Safety Analysis Report: Ulchin Units 3&4, Vol. 14, Seoul.

(7) KEPCO, 1990, Final Safety Analysis Report: Younggwang Units 3&4, Vol. 15, Seoul.

(8) Yun, H., Hwang, K., Lee, H. and Moon, S.-J., 2016, Analysis of Wall-thinning Effects Caused by Power Uprates in the Secondary System of a Nuclear Power Plant, Corrosion Science and Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 135~140.

(9) Rayleigh, J. W. S., 1945, The Theory of Sound - Vol.1, pp. 395~430, Dover Publications, New York.

(10) ANSYS Inc., ANSYS release 10.0.

(11) Kim, Y. W., 2012, Introduction of Flow-induced Vibration in Plant Piping Systems, Journal of the KSNVE, Vol. 22, No. 6, pp. 6~11.

(12) Seok, D. H., 2006, Analysis and Solutions on Plant Pipe Vibrations, DAEWOO Eng. Tech. News, Vol. 24, No. 1, pp. 90~104.

(13) Blevins, R. D., 1990, Flow-induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, New York.

(14) Chun, C.-B., Park, S.-I. and Chun, H.-S., 2006, A Study on Evaluation Method for Piping Shell Mode Vibration, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 1~5.

(15) Pavlakovic, B., 2008, Disperse: User's Manual Version 2.0.16B, Imperial College London, South Kensington, London.

(16) Choi, J. K., Lee, S. B., Mechanics of Material – 2 ed., CheoungMunKak.

(17) Rao, S. S., 2010, Mechanical Vibrations, 4th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

(18) ASME, 2000, ASME Code for Pressure Pipings, ASME B31.1.

(19) Kim, Y.-S., Euh, D.-J., Kim, W.-S. and Kwon, T.-S., 2019, Investigation of Leakage Characteristics on Major Equipment: Component in Reactor System, The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 6, pp. 30~35.

(20) Kaewwaewnoi, W., Prateepasen, A. and Kaewtrakulpong, P., 2010, Investigation of the Relationship between Internal Fluid Leakage through a Valve and the Acoustic Emission Generated from the Leakage, Measurement, Vol. 43, No. 2, pp. 274~282.

(21) Joo, Y.-S., 2008, Application Technology of Acoustic Emission on Nuclear Structures and Components, 2008 KCIHD Conference, p.361

(22) Park, J.-H., Metallic Loose Part Monitoring Method of Pressure Boundary Structures of Nuclear Power Plant using Time-frequency Analysis, 2007, Journal of the KSNVE, Vol. 17, No. 1, pp. 22~29.

(23) Kaneko, S., 2014, Flow-induced Vibrations: Classifications and Lessons from Practical Experiences,

Chapter 4, pp. 157~195, Elsevier, Amsterdam.

(24) Hirota, K., Ishitani, Y., Nakamura, T., Shiraiishi, T. and Sago, H., 2008, Flow-induced Vibration of a Large-diameter Elbow Piping in High Reynolds Number Range: Random Force Measurement and Vibration Analysis, Proceedings of FIV 2008, pp. 1~6.

(25) Harris, C. M., 1961, Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill, New York.



**Sang-Jin Park** received his Ph.D. degree in Major of Advanced Nuclear System Engineering from UST (University of Science and Technology). He is currently post-doctoral researcher at KAER I (Korea Atomic Energy Research

Institute).



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

# 측정 위치에 대한 강건성을 가지는 구조 진동 신호 기반의 결합 있는 복합재 구조물의 분류

## Classification of Damaged Composite Structures Using Structural Vibration Signals Featuring Robustness to Measurement Locations

이 다 운\* · 한 장 우\*\* · 김 홍 수\*\*\* · 손 정 우†

Daun Lee\*, Jang Woo Han\*\*, Heung Soo Kim\*\*\* and Jung Woo Sohn†

(Received October 7, 2021 ; Revised October 28, 2021 ; Accepted November 3, 2021)

**Key Words :** Composite Structure(복합재 구조물), Damage Detection(결함 탐지), Classification(분류),  
Autoencoder(오토인코더), Convolutional Neural Network(합성곱 신경망)

### ABSTRACT

In the present work, a new method to classify healthy and damaged composite structures using experimentally obtained structural vibration data is proposed and evaluated. After fabricating healthy and damaged laminated composite beam specimens, structural vibration data for fixed-free boundary conditions is experimentally obtained via random excitation. The measured vibration signals are converted into images using a Short-Time Fourier Transform and used as input data for learning and testing. First, an autoencoder is used to detect the presence of damage. The autoencoder model is trained using the vibration data of the healthy composite structure. The vibration data of a healthy composite structure is input to the trained autoencoder model with the data of a damaged composite structure, and errors between the input and output data are compared to detect the presence of damage. Second, a convolutional neural network model is used to classify the healthy and damaged composite structures with two different damage locations. This study confirms that the proposed technique can effectively detect and locate damage in composite structures.

### 1. 서 론

적층 복합재 구조물은 질량 대비 높은 강도를 갖고  
있어, 경량화와 고강도화가 동시에 요구되는 시스템

에 활용하는 것이 적합하다. 최근 적층 복합재 구조  
물은 항공기와 풍력 발전기의 블레이드 등 활용 분야  
를 확장하고 있으며, 가까운 미래에는 전기자동차의  
차체 재료로도 활용될 것으로 기대되고 있다. 그러나  
적층 복합재 구조물은 복잡한 파괴 특성을 가지고 있

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Design  
Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Professor  
E-mail : jwsohn@kumoh.ac.kr

\* Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence  
Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of  
Technology, Student

\*\* Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National  
Institute of Technology, Professor

\*\*\* Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering,  
Dongguk University, Professor

# A part of this paper is presented at the KSNVE 2021 Annual Autumn  
Conference

‡ Recommended by Editor Han Shin Seol

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

어 구조물의 주 재료로 활용되기에는 제한이 있다. 적층 복합재 구조물의 여러가지 파괴 모드 중에서 적층된 층 사이의 결합이 손상되는 층간 분리 현상은 가장 많이 발생하는 결함이다. 층간 분리 현상이 발생하게 되면 구조물의 강성이 크게 저하되고 이에 따라 구조물 전체의 동적 특성이 변하게 된다. 강성이 저하되면 구조물의 고유진동수가 감소하게 되고, 감소된 고유진동수가 구조물의 작동 주파수 또는 가진 주파수와 가까워지게 되면 시스템의 파괴도 발생할 수 있으므로, 적층 복합재 구조물에 발생한 결함은 반드시 탐지되어야 한다.

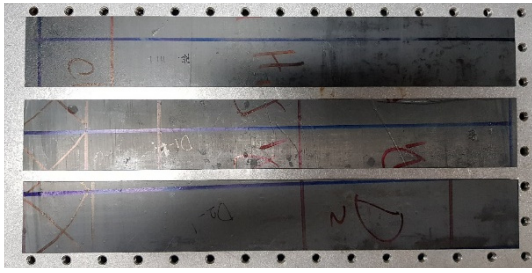
적층 복합재 구조물에 발생하는 층간 분리를 모델링하기 위한 연구가 다양하게 수행되었다. Saravanas 등은<sup>(1)</sup> 층간 분리가 구조물의 동적 변화에 미치는 영향을 이론 해석과 실험을 통하여 확인하였다. Cho와 Kim은<sup>(2)</sup> 층간 분리가 발생한 구조물의 거동을 지그재그 변위장 이론을 바탕으로 설명하였다. Radu와 Chattopadhyay는<sup>(3)</sup> 층간 분리가 있는 복합재 구조물의 동적 안정성을 고차 이론을 이용하여 해석하였다. Kim 등은<sup>(4)</sup> 압전 재료가 포함된 스마트 복합재에 대하여 층간 분리에 의한 동적 특성 변화를 고찰하였다. 비파괴검사 등 다양한 방법을 통해 복합재 구조물 내부의 결함을 탐지하고자 하는 연구도 다양하게 진행되고 있다. Chattopadhyay 등은<sup>(5)</sup> 항공기 구조물의 구조 건정성 모니터링과 결함 예측을 위한 다학제 접근법을 제안하였다. Swan 등은<sup>(6)</sup> 복합재 구조물의 층간 분리를 탐지하기 위한 압전 센서의 최적 위치 선정에 대한 연구를 제안하였다. Hong 등은<sup>(7)</sup> 복합재 구조물에 발생하는 충격 위치를 검출하고 충격에 의하여 구조물에 손상이 발생하였는지 판단하는 기법을 제안하였다. Han 등은<sup>(8)</sup> 레이저 스캐닝과 정상파를 이용하여 평판 구조물의 결함을 탐지하는 기법을 제안하고 성능을 검증하였다. Cho 등은<sup>(9,10)</sup> 유도 탄성파를 이미지로 변환하고 이미지를 기반으로 손상 위치를 탐지하거나, 손상 크기를 예측하는 기법을 제안하였다. 또한 초음파 등을 이용한 다양한 비파괴검사 기법들이 제안되었지만, 대부분 주파수 성분 차이가 크게 발생하는 수 kHz 이상의 고주파수 대역의 진동 신호를 이용하고 있으며, 진동 신호의 측정 위치가 변하게 되면 성능이 제한되는 단점이 있다. 또한 연속적으로, 실시간으로 결함을 탐지하는 것은 아직 어려움이 있다<sup>(11)</sup>. 최근 Khan 등은<sup>(12)</sup> 합성곱 신경망을

이용하여 적층 복합재의 12가지 결함을 분류하는 기법을 제안하였다.

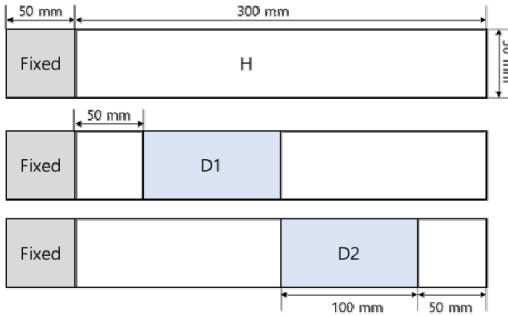
이 연구에서는 1000 Hz 이하 저주파수 대역에서의 구조물의 진동 신호 실험 데이터를 이용하여 복합재 구조물의 결함 유무를 판단하고 결함의 위치를 분류할 수 있는 기법을 제안하고, 제안된 방법의 정확성을 검증한다. 결함이 없는 복합재 보와 결함을 인위적으로 생성한 두 가지 다른 복합재 보를 제작한 후, 고정-자유 경계조건에서 랜덤 가진을 인가하는 진동 실험을 수행하여 구조물의 진동 신호 데이터를 획득한다. 학습 데이터와 테스트 데이터로 사용될 진동 신호의 측정 위치를 달리하여 측정 위치가 다르더라도 강건하게 결함을 탐지할 수 있는지 확인한다. 측정된 진동 신호를 단시간 푸리에 변환을 통하여 이미지로 변환하고 학습과 테스트의 입력 데이터로 이용한다. 먼저 결함 유무를 탐지하기 위하여 오토인코더를 이용한다. 결함이 없는 보의 진동 데이터를 이용하여 오토인코더를 학습하고 모델을 구성한다. 학습된 오토인코더 모델에 결함이 없는 보의 진동 데이터와 결함이 있는 보의 진동 데이터를 입력하고 출력되는 데이터와 입력 데이터의 차이를 비교하여 결함 유무를 탐지한다. 두 번째는 합성곱 신경망 모델을 이용하여 결함이 없는 보의 진동 데이터와 결함의 위치가 다른 두 가지 보의 진동 데이터를 분류한다. 제안된 기법을 통하여 효과적으로 복합재 구조물의 결함을 탐지하고, 서로 다른 위치의 결함들을 구분할 수 있음을 확인한다.

## 2. 데이터 획득

결함이 없는 복합재 시편과 위치가 서로 다른 층간 분리 결함이 있는 두 개의 복합재 시편을 탄소 섬유를 사용하여 제작하였다. 시편은 총 여덟 층을 적층하였고, 가운데를 기준으로 위 아래 네 개의 층을 0°와 90°로 교차하여 대칭적으로 적층하였다. 복합재 시편의 층간 분리 결함은 두께 방향의 가운데에 있도록 하였고, 0.03 mm 두께의 테프론 필름을 가운데 층에 부착하여, 고온 프레스 공정 후 시편 내부에 층간 분리가 유지될 수 있도록 하였다. 시편의 길이는 350 mm이고 폭은 50 mm, 두께는 1 mm이다. 시편 내부의 결함 위치를 다르게 하여, 고정단 가까운 쪽에 결함이 위치한 시편을 D1, 고정단 먼 쪽에 결함이 위치



(a) Photos



(b) Schematic configurations

Fig. 1 Prepared composite specimens

한 시편을 D2로 하였다. 층간 분리 결함의 크기는 길이 100 mm, 폭 50 mm로 하였다. 제작된 시편들의 사진을 Fig. 1(a)에 나타내었고, 세 가지 시편들의 개념도를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 제작된 시편들의 진동 신호 측정 위치를 결정하기 위하여 유한요소해석을 수행하여 시편의 모드 형상을 확인하였고, 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 폭이 넓은 시편 형태라 굽힘 모드와 비틀림 모드가 교차하여 나타나는 것을 확인할 수 있다. 시편의 진동 신호를 길이 방향의 끝 단과 폭 방향의 가운데에서만 측정하면 굽힘 모드에 대한 정보는 포함되나, 비틀림 모드에 대한 정보가 포함되지 않게 되므로, 진동 측정은 폭 방향의 끝 쪽에 센서를 부착하여 수행하도록 하였다. 제작된 복합재 시편의 진동 신호를 측정하기 위한 측정 위치를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 원형점으로 표시된 위치가 학습 데이터로 사용하기 위한 진동 신호를 측정할 위치이다.

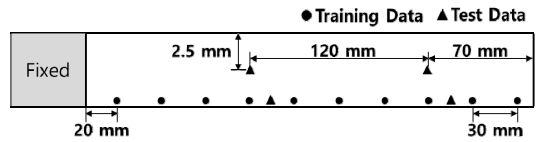


Fig. 3 Vibration measurement points

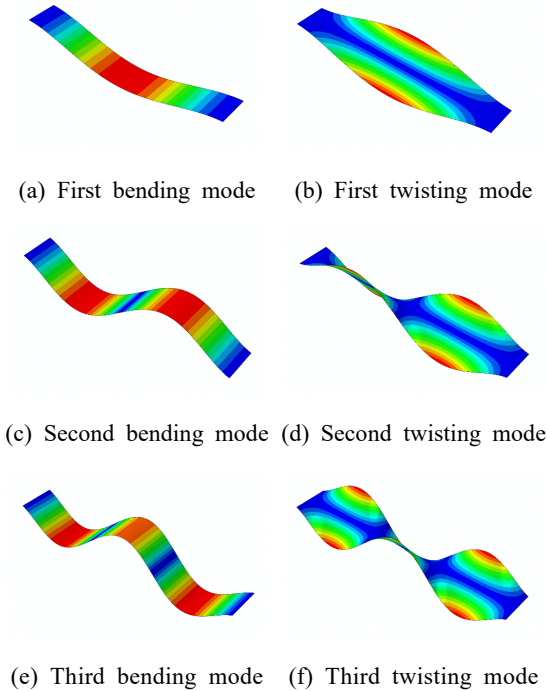
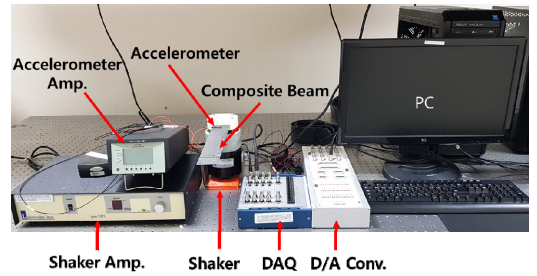
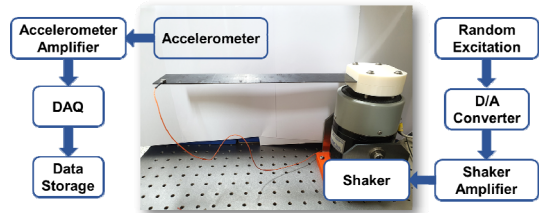


Fig. 2 First six mode shapes



(a) Experimental apparatus



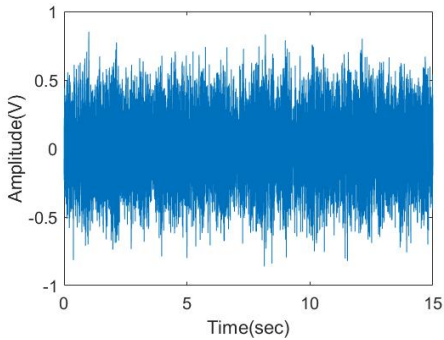
(b) work flow

Fig. 4 Experimental setup

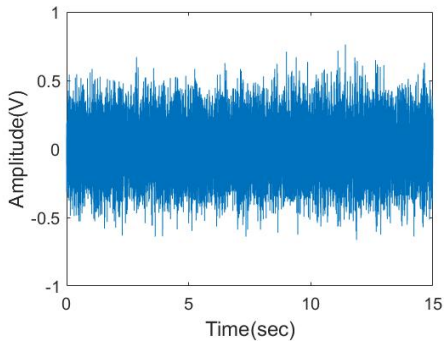


길이 방향으로 동일한 30 mm의 간격으로 열 개의 위치에 가속도계를 부착하여 반복해서 진동 신호를 측정하고, 각 위치에서 20회 반복 측정을 수행하여 전체 200개의 학습 데이터를 확보하였다. Fig. 3에서 삼각형으로 표시된 위치는 테스트 데이터로 사용하기 위한 진동 신호를 측정된 위치이다. 실제 시스템의 적용에서는 항상 동일한 위치에서 측정된 진동 신호

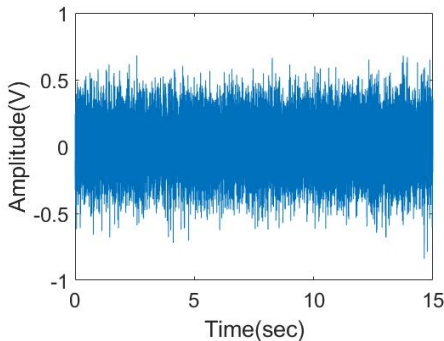
를 이용하는 것이 어려우므로, 테스트 데이터의 측정 위치를 학습 데이터 측정 위치와 다르게 선정하여 측정



(a) Healthy

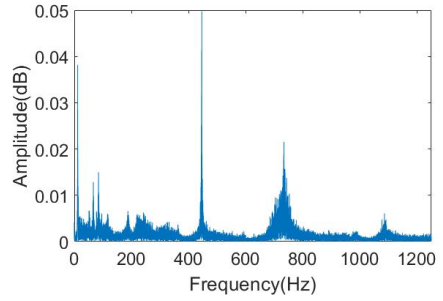


(b) Delamination 1

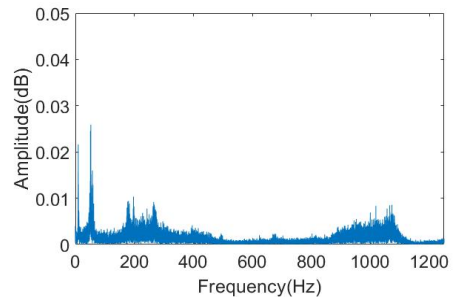


(c) Delamination 2

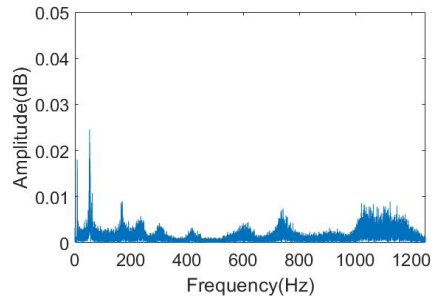
**Fig. 5** Time responses of the specimens



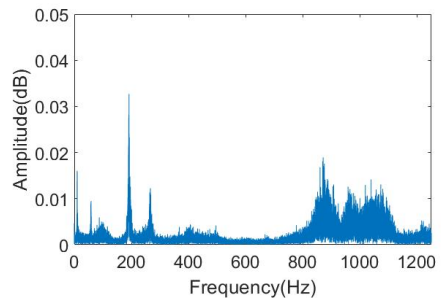
(a) Healthy



(b) Delamination 1



(c) Delamination 2



(d) Delamination 1 measured at different point

**Fig. 6** Frequency responses of the specimens

위치가 다른 경우에도 효과적으로 결함 탐지가 가능한 지 검증하였다. 각 위치에서 15회 반복 측정을 수행하여 전체 60개의 테스트 데이터를 확보하였다. Fig. 4에 진동 실험을 위한 장치와 실험 방법을 나타내었다. SIMULINK를 이용하여 0에서 1000 Hz 사이의 랜덤 신호를 생성하여 가진기를 작동하도록 하였다. 진동 신호의 측정을 위해서는 가속도계를 사용하였고, 측정된 진동 신호는 증폭 장치와 데이터 획득 장치를 통하여 컴퓨터에 데이터를 저장된다. 가진기는 방진 테이블에 고정되어 있으며, 복합재 시편의 한 쪽 끝은 제작된 지그를 이용하여 가진기에 고정되어 있다.

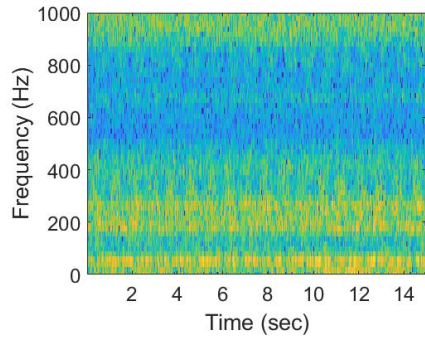
측정된 세 가지 다른 시편의 끝 단에서 측정한 진동 신호의 시간 응답과 주파수 응답을 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. Fig. 5에 나타낸 시간 응답에서는 결함이 없는 시편과 결함이 있는 시편의 차이를 확인하기 어려운 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에 나타낸 결함이 없는 시편과 결함이 있는 시편의 주파수 응답에서는 주파수 성분과 크기가 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 층간 분리 결함이 있으면 공진 주파수가 감소하는 특성을 나타내나 이 연구에서 사용한 1000 Hz 이하의 저주파수 영역에서는 그 차이가 크게 나타나지 않는다. 또한, Fig. 6(b)와 Fig. 6(d)에 나타난 것과 같이 동일한 시편에서도 측정 위치에 따라 주파수 응답 특성이 다르게 나타날 수 있으므로, 주파수 성분과 크기 차이만으로 결함의 유무 또는 결함의 위치에 대한 분류를 수행하기에는 한계가 있다. 또한, 시간 응답과 주파수 응답에서는 각각 주파수 특성과 시간에 대한 특성 정보가 나타나지 않는 한계가 있으므로, 이 연구에서는 시간 특성과 주파수 특성을 동시에 표현할 수 있는 스펙트로그램(spectrogram) 데이터를 이용하여 결함을 탐지하고 결함 위치 분류를 수행한다.

### 3. 탐지 및 분류

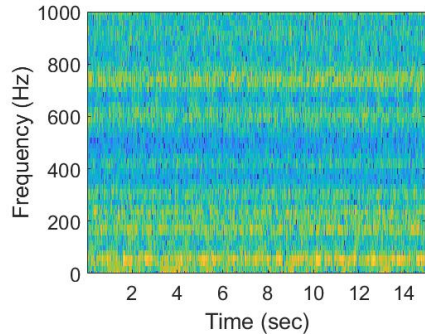
#### 3.1 오토인코더

먼저, 결함의 유무만을 탐지할 수 있는 단순한 기법으로 오토인코더를 적용하였다. 오토인코더에 입력 데이터로 사용하기 위하여 측정된 진동 데이터를 단 시간 푸리에 변환을 통하여 이차원 이미지 데이터 변환하고 이를 Fig. 7에 나타내었다. 오토인코더는 입력

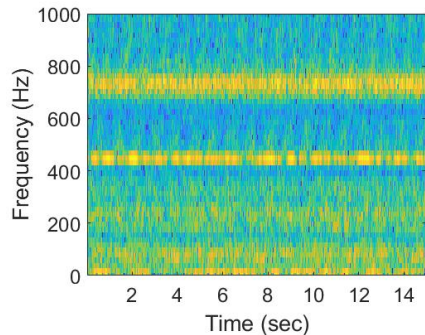
데이터의 정보를 압축하는 인코더와 압축된 정보로부터 입력 데이터를 다시 재생해 내는 디코더로 구성되어 있으며, 일반적으로 이미지 등의 입력 데이터와 유사한 특성을 갖는 데이터를 생성하기 위해 사용된다. 결함이 없는 복합재 시편의 데이터를 생성할 수 있도록 학습된 오토인코더 모델에 결함이 없는 복합



(a) Healthy



(b) Delamination 1



(c) Delamination 2

Fig. 7 Images from short-time fourier transformation

재 시편의 테스트 데이터를 입력하면 출력된 데이터와 입력 데이터 사이의 오차가 작게 발생하지만, 결함이 있는 시편의 테스트 데이터를 입력하면 이에 대해서는 학습이 잘 되어있지 않으므로 출력 데이터와 입력 데이터 사이의 오차가 크게 발생하게 된다. 이러한 오차의 크기를 비교하여 결함의 유무를 판별할 수 있다. 입력 데이터와 출력 데이터 사이의 오차는 다음 식과 같은 평균제곱오차를 이용한다.

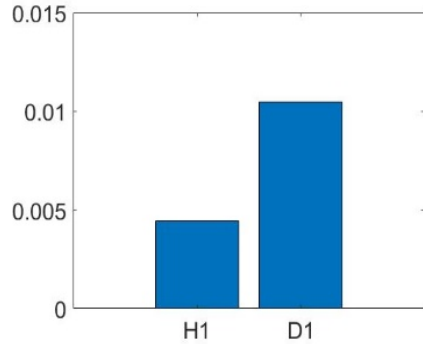
$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \hat{x}_i)^2 \tag{1}$$

여기서  $x_i$ 는 입력 데이터,  $\hat{x}_i$ 은 출력 데이터,  $m$ 은 전체 데이터의 갯수이다.

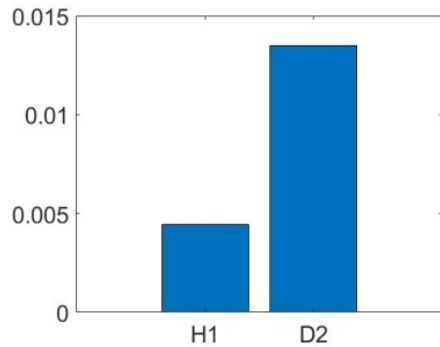
결함이 없는 복합재 시편의 학습 데이터 200개를 입력으로 하여 오토인코더 모델을 학습한다. 학습된 모델에 결함이 없는 시편의 테스트 데이터 60개와 D1 결함이 있는 복합재 시편의 테스트 데이터 60개를 입력하여 출력과 입력 사이의 오차를 계산하고 결과를 Fig. 8(a)에 나타내었다. D1 결함이 있는 경우 오차값이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 동일한 오토인코더 모델에 결함이 없는 시편의 테스트 데이터 60개와 D2 결함이 있는 복합재 시편의 테스트 데이터 60개를 입력하여 출력과 입력 사이의 오차를 계산하고 결과를 Fig. 8(b)에 나타내었다. D1 또는 D2 결함이 있는 경우, 결함이 없는 경우보다 출력과 입력 사이에 더 큰 오차값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 오토인코더를 통해 생성된 출력과 입력을 비교하여 오차를 계산하고, 특정 값을 기준으로 오차가 더 작을 경우 결함이 없고, 더 클 경우 결함이 있다고 판단할 수 있다. Fig. 8의 결과에서는 0.005에서 0.006 사이의 값을 결함 유무를 판단하는 기준값으로 사용할 수 있을 것이다.

### 3.2 심층 신경망

오토인코더를 이용할 경우 결함의 유무는 판단할 수 있었지만, 결함의 위치가 다른 시편을 구분할 수는 없다. 따라서, 결함의 위치가 다른 두 종류의 시편을 분류할 수 있도록 심층 신경망 알고리즘을 이용하였으며, 심층 신경망 중에서도 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN)을 이용하였다. 이 연구에서는 CNN 알고리즘의 사용을 위해 MATLAB 소프트웨어를 이용하였다. 또한 CNN 알고



(a) Healthy and delamination 1



(b) Healthy and delamination 2

**Fig. 8** Mean square errors between healthy and damaged composite specimen

리즘의 학습과 테스트를 위해 활용된 이미지는  $135 \times 171 \times 3$ 의 크기를 가진다. 구성한 CNN 알고리즘은 총 15개의 layer를 가지며, 이를 Table 1에 나타내었다. 학습률(learning rate)은 loss가 충분히 빨리 감소하는 0.001로 설정하였으며, 반복(iteration) 3, 정확도의 수렴을 확인하기 위해서 반복 학습(epoch) 10으로 훈련을 진행하였다. 또한, 3회 반복(iteration)마다 검증(validation)을 진행하였고, 이에 따른 훈련 정확도와 검증 정확도는 Fig. 9(a)에 훈련 손실 및 검증 손실은 Fig. 9(b)에 각각 나타내었다.

훈련된 CNN을 이용해 테스트를 진행한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 각 클래스 별로 입력 데이터와 다른 곳에서 측정된 60개의 테스트 데이터를 이용해 테스트를 진행한 결과, 결함이 있는 D2의 데이터를 결함이 없는 경우로 잘못 분류하는 경우가 발생하였으나, 결함이 없는 경우와 D1 결함이 있는 경우는 매

**Table 1** Structure of the CNN model

Layer 1	Image input layer
Layer 2	Convolution 2D layer Filter size: 3 × 3 / number of filter: 16
Layer 3	Batch normalization layer
Layer 4	ReLU layer
Layer 5	Max pooling 2D layer
Layer 6	Convolution 2D layer Filter size: 3 × 3 / number of filter: 32
Layer 7	Batch normalization layer
Layer 8	ReLU layer
Layer 9	Max pooling 2D layer
Layer 10	Convolution 2D layer Filter size: 3 × 3 / number of filter: 48
Layer 11	Batch normalization layer
Layer 12	ReLU layer
Layer 13	Fully connected layer number of class: 3
Layer 14	Softmax layer
Layer 15	Classification layer

**Confusion Matrix**

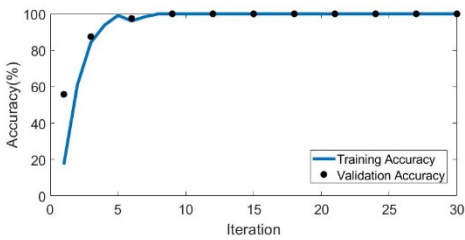
Output Class	D1	60 33.3%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	D2	0 0.0%	55 30.6%	0 0.0%	100.0% 0.0%
	H1	0 0.0%	5 2.8%	60 33.3%	92.3% 7.7%
		100.0% 0.0%	91.7% 8.3%	100.0% 0.0%	<b>97.2%</b> <b>2.8%</b>
	D1	D2	H1	Target Class	

**Fig. 10** Confusion matrix

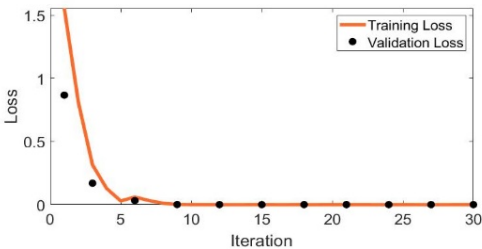
우 정확하게 분류하는 것을 확인할 수 있다. 학습 데이터와 훈련 데이터의 측정 위치를 다르게 한 경우에도 97.2%의 높은 분류 정확도를 갖는 것을 확인할 수 있으며, 상당히 높은 정확도로 결함의 위치가 다른 구조물 시편들을 분류할 수 있는 것을 확인하였다.

**4. 결 론**

이 연구에서는 구조물에서 측정된 진동 신호와 심층 신경망을 이용하여 적층 복합재 구조물에 발생한 층간 분리 결함을 탐지하는 기법을 검증하였다. 특히 결함 탐지 및 분류를 위한 학습 데이터와 테스트 데이터의 진동 측정 위치를 달리하여 측정 위치 변화에 강건함을 가질 수 있는지 확인하였다. 결함이 없는 복합재와 서로 다른 위치에 결함이 있는 두 개의 복합재 구조물에 랜덤 가진에 대한 진동 신호를 측정하고, 단 시간 푸리에 변환을 통해 이미지로 변환한다. 오토인코더의 입력과 출력 사이의 오차를 확인하여 구조물의 결함 유무를 탐지하는 것이 가능함을 확인하였다. 또한 심층 신경망을 적용하여 결함이 없는 구조물과 결함의 위치가 서로 다른 두 구조물에 대한 분류가 가능함을 확인하였다. 이 연구에서는 결함이 있는 구조물에 대한 실험 데이터도 충분히 확보한 상태에서 연구를 수행하였으나, 실제 환경에서는 결함이 있는 구조물의 데이터를 다량 확보하는 것은 어려운 단점이 있다. 이에 다음 단계 연구에서는 데이터 증강 기법을 적용하여 결함 탐지 성능을 검증할 계획이다.



(a) Accuracies



(b) Losses

**Fig. 9** Training curves of the CNN model

## 후 기

이 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 Grand ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2021-2020-0-01612). 또한 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R111A3074547).

## References

- (1) Saravanos, D. A. and Hopkins, D. A., 1996, Effects of Delaminations on the Damped Dynamic Characteristics of Composite Laminates: Analysis and Experiments, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 192, No. 5, pp. 977~993.
- (2) Cho, M. and Kim, J. S., 2001, Higher-order Zig-zag Theory for Laminated Composites with Multiple Delaminations, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 68, No. 6, pp. 869~877.
- (3) Radu, A. G. and Chattopadhyay, A., 2002, Dynamic Stability Analysis of Composite Plates Including Delaminations Using a Higher Order Theory and Transformation Matrix Approach, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, No. 7, pp. 1949~1965.
- (4) Kim, H. S., Kim, J. and Choi, S. B., 2005, Study on Dynamic Characteristics of Delaminated Smart Composite Laminates, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 395~403.
- (5) Chattopadhyay, A., Peralta, P., Papandreou-Suppappola, A. and Kovvali, N., 2009, A Multidisciplinary Approach to Structural Health Monitoring and Damage Prognosis of Aerospace Hotspots, *Aeronautical Journal*, Vol. 113, No. 1150, pp.799~810.
- (6) Swann, C. and Chattopadhyay, A., 2006, Optimization of Piezoelectric Sensor Location for Delamination Detection in Composite Laminates, *Engineering Optimization*, Vol. 38, No. 5, pp. 511~528.
- (7) Sung, D. W., Oh, J. H., Kim, C. G. and Hong, C. S., 2000, Impact Damage Detection of Smart Composite Laminates Using Wavelet Transform, *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 13, No. 1, pp. 40~49.
- (8) Kang, S. H., Jeon, J. Y., Kim, D. H., Park, G., Kang, T. and Han, S. W., 2017, Damage Detection on Thin-walled Structures Utilizing Laser Scanning and Standing Waves, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, Vol. 41, No. 5, pp. 401~407.
- (9) Kim, C., Jeon, Y., Park, J. and Cho, J. Y., 2021, Image Based Damage Detection Method for Composite Panel with Guided Elastic Wave Technique: Part I. Damage Localization Algorithm, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 1, pp. 1~12.
- (10) Kim, C., Jeon, Y., Park, J. and Cho, J. Y., 2021, Image Based Damage Detection Method for Composite Panel with Guided Elastic Wave Technique: Part II. Size Estimation Algorithm, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 1, pp. 13~20.
- (11) Wang, B., Zhong, S., Lee, T.-L., Fancey, K. S. and Mi, J., 2020, Non-destructive Testing and Evaluation of Composite Materials/Structures: A State-of-the-art Review. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 1~28.
- (12) Khan, A., Ko, D.-K., Lim, S. C. and Kim, H. S., 2019, Structural Vibration-based Classification and Prediction of Delamination in Smart Composite Laminates Using Deep Learning Neural Network, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 161, 586~594.



**Jung Woo Sohn** received his Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering from Inha University in 2008. He is now working as a professor in the Department of Mechanical Design Engineering of Kumoh National Institute of Technology. He has interests on the design and control of smart systems using smart materials, smart interaction system based on gesture recognition and haptic system and vibration-based prognostics and health management (PHM).

# 노트북 컴퓨터에 장착된 SSD의 낙하 실험과 유한요소 해석을 활용한 취약부 및 수명 예측

## Prediction of Vulnerable Location and Fatigue Life of an SSD Mounted on a Notebook Computer Utilizing Drop Test and Finite Element Analysis

조영정\* · 장건희† · 한미쁨\*\*

Yeungjung Cho\*, Gunhee Jang† and Mibbeum Hahn\*\*

(Received October 22, 2021 ; Revised November 8, 2021 ; Accepted November 8, 2021)

**Key Words :** SSD(solid state drive), Drop Simulation(낙하 해석), Solder Ball(솔더 볼), Finite Element Analysis(유한요소 해석), LCF(low cycle fatigue)

### ABSTRACT

This study demonstrates a method for predicting the vulnerable location and fatigue life of an SSD (solid state drive) mounted on a notebook computer in a drop environment. In order to construct the drop environment of a notebook computer, a jig with the same weight and structure as the actual computer was used. The SSD was fixed in the same location as it would be on a notebook computer, and a drop experiment was performed. A drop analysis was performed by developing a finite element model of the notebook computer with the SSD. Additionally, we analyzed the effects of secondary contact between the SSD and other components. The vulnerable location was determined using the stress analysis results from the solder ball of the SSD. Using the analysis results and the Coffin–Manson equation, the fatigue life of the SSD in a drop environment was predicted.

### 1. 서 론

최근 휴대전화, 태블릿, 노트북 컴퓨터와 같은 휴대용 전자기기의 수요가 증가하고 있다. 휴대 편의성을 위하여 전자기기 부품은 소형화, 경량화, 다기능화되고 있으며 내부 구조는 복잡하고 조밀하게 설계되고 있다. 휴대용 전자기기 특성상 사용자 부주의로 떨어뜨리는 경우가 빈번하게 발생하며 이는 전자기기 수

명에 악영향을 미친다. 특히, SSD(solid state drive)는 휴대용 전자기기에 필수적으로 사용되는 데이터 저장장치이며 낙하 시 데이터 소실 위험이 있어 필수적으로 안전성이 보장되어야 한다. 한 번에 파괴가 되지 않더라도 반복된 충격은 SSD의 solder joint에 균열을 유발하며 결국 SSD의 기능을 잃게 된다. 이러한 배경 속에서, 전자기기의 낙하 환경에 관한 신뢰성 연구가 활발히 진행되고 있다.

Board level 낙하 실험은 JEDEC(joint electron device engineering council)에서 표준 시험 방법을 제

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang university, Professor  
E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr

\* Member, Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang university, Student

\*\* Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang university, Student

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jae Young Kang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

공하고 있어 연구의 기준이 되고 있다<sup>(1)</sup>. 많은 연구자들이 해당 기준에서 제시하는 시험 보드와 낙하 조건을 이용해서 낙하 환경에 대한 신뢰성 분석을 수행하였다. Lee 등은<sup>(2)</sup> 낙하 환경에서 다양한 표면 마감과 reflow 과정에 따른 신뢰성에 대한 연구를 수행하여 최적의 표면 마감 방법을 제시하였다. Che 등은<sup>(3)</sup> solder ball의 탄성, 탄소성, rate dependent 소성 물성치를 실험을 통하여 도출하였으며, 수명 실험 결과와 비교하여 낙하 환경에서는 rate dependent 소성 물성치가 낙하 해석에 가장 적합하다는 결론을 도출하였다. Wang 등은<sup>(4)</sup> 소성 변형 에너지와 낙하 횟수 간의 상관관계를 도출하여 board-level reliability test board의 수명 예측에 기여하였다. Wu 등은<sup>(5)</sup> SAC102와 SAC305 solder joint에 대하여 낙하 환경 해석과 실험을 통하여 응력과 수명의 상관 관계 곡선을 도출하여 피로 수명을 예측하였다. Sridhar 등은<sup>(6)</sup> 낙하 환경에서 solder paste의 종류와 aging이 수명에 미치는 영향을 연구하였다. Nguyen 등은<sup>(7)</sup> 낙하 실험과 해석을 통하여 재료 물성을 구하여 검증하였다. 하지만 이러한 연구들은 JEDEC 규격에 따라 연구되어 실제 낙하 환경을 대변하지 못했다. 이러한 연구의 한계를 극복하기 위하여 실제 작동 환경을 고려한 제품 단계에서의 낙하에 관한 연구가 수행되었다.

Chung 등은<sup>(8)</sup> 실제 제품에 적용되는 다양한 PBA(printed board assembly)의 고정 방법에 따른 낙하 환경에서의 신뢰성에 관한 분석을 수행하였다. Yu 등은<sup>(9)</sup> 다양한 휴대폰 case 형상에 따라 낙하 시 발생하는 변위를 측정하여 고정부가 많은 수록 변형이 줄어드는 것을 확인했다. Sharan 등은<sup>(10)</sup> 휴대폰에 사용되는 PCB의 낙하에 따른 응답을 이론적 풀이를 통하여 계산하였고 해석과 비교하여 정합성을 확인하여 이론적 분석의 가능성을 증명하였다. 이러한 제품 단계의 연구들 또한 실제 제품에 사용되는 PCB는 구현하였지만 제품 전체의 구조를 고려하거나 다른 부품과의 2차 충돌은 고려하지 않았다. Ong 등은<sup>(11)</sup> 휴대폰 완제품의 낙하 실험을 수행하였으나 실험을 통한 현상 측정에만 머물렀으며 해석을 통한 분석이나 수명을 예측하는 등의 활용법이 부족했다. 다만 현상 분석을 통해 제품 단계에서는 1차 충격보다 2차 충격에 의한 손상이 더 심할 수 있다고 언급하여 완제품 단계에서의 연구 필요성을 제시하였다. Yau 등은<sup>(12)</sup> 휴대용기기의 낙하 충격에 관한 문헌들을 정리하였다. 많은 문헌들을 종합한 결과 보드 레벨 낙하 분석과 실제 제품의

낙하 분석의 상관관계는 확립되지 않으며 제품 단계에서 많은 연구가 이뤄져야 한다고 발표하였다.

실제 사용되는 제품의 수명 평가는 다른 부품과의 2차 충돌 여부, 구조, 무게 등 고려해야 할 변수들이 많아 어려운 평가로 분류되며 이전 연구자들의 연구만으로는 실제 제품의 수명을 예측하기에는 한계가 따른다. 이 연구는 기존 연구와는 다르게 실험 환경이 아닌 실제 제품에 장착된 환경에서 SSD의 신뢰성을 분석하였다. 또한, 단품의 신뢰성 연구로 밝힐 수 없는 다른 부품과의 2차 충돌에 대한 영향을 분석하였다. 실제 작동 환경을 고려하여 낙하 시험을 수행하였고 유한요소 해석과 Coffin Manson 식을 통하여 노트북 컴퓨터에 장착된 실제 SSD의 수명을 예측하였다. 낙하 충격 시험기를 이용하여 SSD가 포함된 노트북 컴퓨터 지그의 낙하 실험을 진행하였다. 이를 통해 노트북 컴퓨터 지그에 가해지는 가속도와 SSD의 변형률을 측정하였다. 또한 노트북 컴퓨터 지그와 SSD의 유한요소 모델을 개발하여 낙하 해석을 수행하였다. 실험에서 측정된 SSD의 변형률과 해석에서 계산된 변형률을 비교하여 해석 모델의 정합성을 검증하였다. 해석 결과를 바탕으로 낙하 환경에서 취약한 solder ball의 위치를 도출하였으며 이때 응력과 변형률을 도출하였다. 최종적으로 계산된 변형률과 Coffin Manson 식을 활용하여 노트북 컴퓨터 낙하 시 SSD의 수명을 예측하였다.

## 2. 노트북 컴퓨터에 장착된 SSD의 실험 및 해석 방법

### 2.1 SSD의 낙하 실험 방법

이 연구에 사용한 SSD는 NAND(Negative AND), DRAM(dynamic random access memory), controller가 PCB에 solder ball을 매개로 하여 실장되어 있으며 Fig. 1에 나타나 있다. 그 주위에 작은 수동 소자가 배치되어 있으며 절연 수지의 일종인 underfill을 이용하여 패키지 아래의 빈 곳을 모두 메웠다. Fig. 1

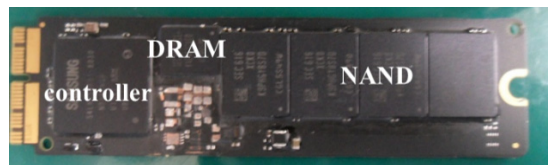
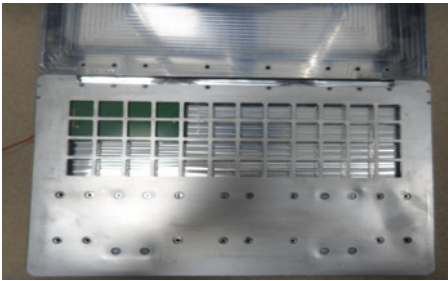


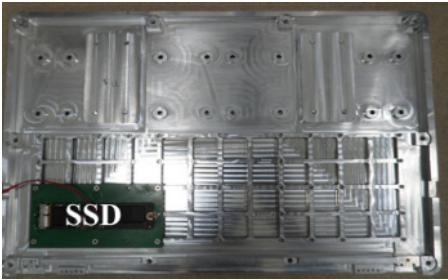
Fig. 1 SSD structure

의 좌측인 SSD의 앞부분은 전용 커넥터에 연결되며 뒷부분은 나사를 이용하여 고정된다. Fig. 2(a)는 SSD가 장착되는 노트북 컴퓨터를 모사한 지그를 보여준다.

키보드 및 접었다 펼치는 경첩을 구현하여 실제 노트북 컴퓨터를 모사하였으며 무게 또한 실제 제품과 동일하게 제작하였다. Fig. 2(b)와 같이 SSD를 실제 장착되는 위치와 동일하게 노트북 컴퓨터 지그에 고정하였다. 노트북 컴퓨터 지그에 가속도계를 부착하여 가속도를 측정하였으며 SSD에는 Fig. 3과 같이 변형이 가장 클 것으로 예상되는 부위에 strain gauge를 부착하여 변형률을 측정하였다. 노트북 컴퓨터 지그를 경량낙하시험기(DT-202)를 이용하여 50 cm 높이에서 자유 낙하시키면서 변형률을 측정하였다.



(a) Top view



(b) Bottom view

Fig. 2 Notebook computer jig with SSD

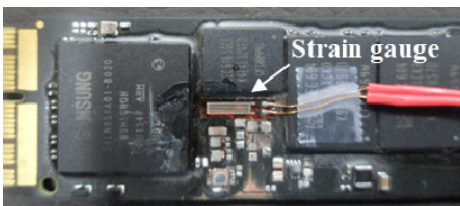


Fig. 3 SSD with strain gauge

## 2.2 유한요소 모델

유한요소 해석을 위하여 상용프로그램인 ANSYS APDL을 이용하여 SSD의 유한요소 모델을 개발하였다. PCB, NAND, DRAM, controller, solder ball 그리고 underfill을 구현하였으며 제작된 유한요소 모델은 경계조건과 함께 Fig. 4에 나타나 있다. 작은 수동소자의 경우 전체적인 거동에 영향을 미치지 않기 때문에 구현하지 않았다. 개발된 유한요소 모델은 50 406개의 8-절점 사각형 요소로 구성되어 있다. SSD가 장착된 노트북 컴퓨터의 윗면 덮개, mainboard, 아랫면 덮개를 구현한 노트북 컴퓨터의 유한요소 모델을 개발하였으며 80 375개의 4-절점 쉘 요소를 사용하였다. SSD가 장착된 노트북 컴퓨터의 유한요소 모델과 경계조건은 Fig. 5에 나타나 있으며 총 130 781개의 요소를 사용하였다. Mainboard와 윗면 덮개는 나사로 고정되어 있으며 SSD는 mainboard에 장착되어 있는 모습을 해석 모델로 구현하였다. 또한 윗면 덮개와 바닥면 덮개의 외각 절점들이 위, 아래로 함께 움직이도록 강체로 연결하여 단단한 노트북 컴퓨터의 외관을 구현하였다. PCB, NAND, DRAM, controller

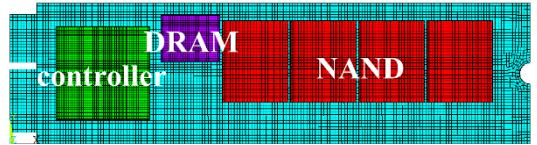


Fig. 4 Finite element model of SSD with boundary condition

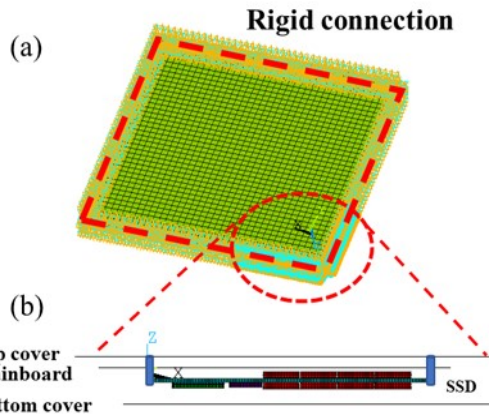


Fig. 5 Finite element model of a notebook computer jig with SSD: (a) quarter view (b) side view



그리고 underfill은 탄성 거동을 가정하였으며 각 부품들의 물성치는 이전 연구자들의 연구를 인용하였고 Table 1과 같다<sup>(13-15)</sup>. Solder ball은 SAC305 무연 solder이며 bilinear 탄소성 거동을 가정하였다. 이전 연구자의 연구를 인용하여 solder ball의 항복 응력은 33 MPa를 적용하였으며, 항복 응력을 넘어서는 구간에서 응력-변형률 곡선의 기울기인 접선 계수는 120 MPa를 적용하였다<sup>(16)</sup>.

### 2.3 유한요소 해석 방법

초기 연구자들의 낙하 환경 해석은 모든 낙하 과정을 구현하여 낙하하는 동안의 거동과 바닥 면과 충돌까지 해석하였다. 하지만 해석 모델이 크고 복잡해짐에 따라 이러한 해석들은 해석 시간이 기하급수적으로 증가하게 되었다. 이에 따라 새로운 해석 기법이 필요하게 되었고 다양한 연구가 진행되어왔다. 그 중에서 Luan 등은<sup>(17)</sup> Input G 방법을 고안하였고 실험과의 비교를 통하여 해당 해석 방법이 충분히 실험 상황을 대변할 수 있음을 확인하였다. Input G 방법은 대상체의 고정부의 절점에 큰 질량 요소를 더해준 후 질량 요소에 가속도를 입력하여 충격을 적용시키는 방법이다. Input G 방법의 높은 정확성, 빠른 해석시간, 해석의 유연성, 유용성, 편의성으로 많은 연구자들이 사용해 왔다<sup>(3,4,12,18,19)</sup>. 이 연구에서도 노트북 컴퓨터 외각부에 Input G 방법을 적용하였다. 해석에 사용된 solver는 ANSYS LS-DYNA를 이용하였다. LS-DYNA는 음해법을 이용하여 계산하기 때문에 해가 안정적으로 수렴하는 장점이 있다. 낙하 해석 같은 경우 충격 지속 시간이 매우 짧으므로 음해법이 양해법에 비하여 더욱 효율적이고 정확한 결과를 얻을 수 있으며 많은 낙하 연구에서 사용되고 있다<sup>(18,20,21)</sup>.

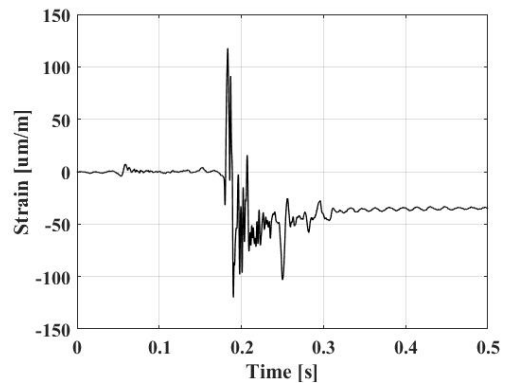
**Table 1** Material properties of a notebook jig with SSD

Component	Density	Young's modulus	Poisson's ratio
PCB, mainboard	2752	50 000	0.33
NAND, DRAM, controller	2138	13 000	0.40
Solder ball	7094	44 113	0.36
Underfill	1130	2990	0.3
Notebook cover	1800	45 000	0.35

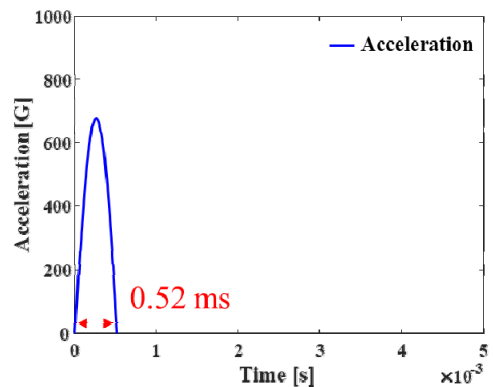
## 3. 노트북 컴퓨터에 장착된 SSD의 실험 및 해석 결과

### 3.1 실험 및 해석 결과

SSD를 포함한 노트북 컴퓨터 지그의 낙하 실험을 20회 반복 수행하였다. Strain gauge를 통하여 측정된 시간에 따른 변형률 선도의 예시는 Fig. 6과 같다. 노트북 컴퓨터 지그에서 측정된 평균 최대 가속도는 679 G였으며 평균 지속 시간은 0.52 ms로 나타났으며 Fig. 7과 같다. 측정된 가속도를 유한요소 해석 조건으로 적용하여 해석하였으며 Fig. 8과 같이 실제 strain gauge의 넓이에 해당하는 90개 요소의 평균 변형률을 계산하였다. 이때 해석을 통한 변형률은 120.7  $\mu\text{m}/\text{m}$ 으로 계산되었다. 해석과 실험의 변형률



**Fig. 6** Measured strain on SSD



**Fig. 7** Measured acceleration on a notebook computer jig

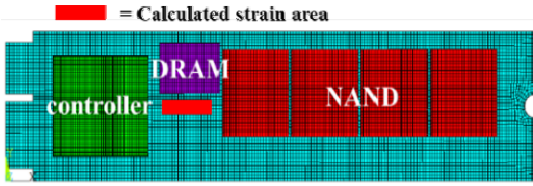


Fig. 8 Strain calculation area of SSD

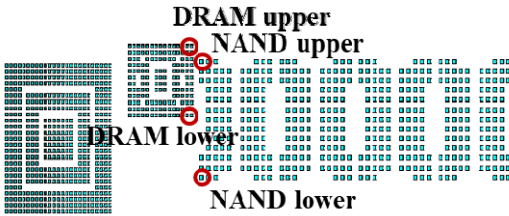


Fig. 9 Location of critical solder ball

결과를 비교하였으며 두 결과의 차이는 3.5%로 동등한 수준으로 나타났다. 이를 통하여 해석 모델의 정합성을 검증하였다.

Fig. 9는 응력이 가장 크게 발생한 네 개의 solder ball의 위치를 보여준다. 이 결과는 solder ball의 최외각에서 응력집중이 발생한다는 이전 연구자의 결과와 동일한 결과이다<sup>(13,22,23)</sup>. 해당 위치에서의 시간에 따른 응력은 Fig. 10과 같다. NAND 좌측 상단부, DRAM 우측 하단부, DRAM 우측 상단부, NAND 좌측 하단부 순서로 응력이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 외력에 의하여 발생하는 1차 충격 보다 이후 발생하는 최대 충격 구간이 존재하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 1차 충격 구간과 최대 충격구간에서 SSD의 변형 형상을 보여준다. 1차 충격 구간에서는 바닥면 덮개와 접촉이 일어나지 않았지만 최대 충격구간에서는 바닥면 덮개와 접촉하여 2차 충동이 발생한 것을 확인할 수 있다. 서로반대 방향으로 거동하는 SSD와 바닥면 덮개가 부딪혀 1차 충돌보다 큰 응력을 발생시킨 것을 확인하였다.

3.2 해석 결과를 이용한 SSD의 수명 예측

앞선 해석 결과를 토대로 NAND 좌측 상단부 외각 solder ball을 취약부로 판별하였으며 해당 solder ball의 수명을 예측하였다. 항복 응력 이하의 거동에서는 수명이 미치는 영향이 크지 않기 때문에 항복

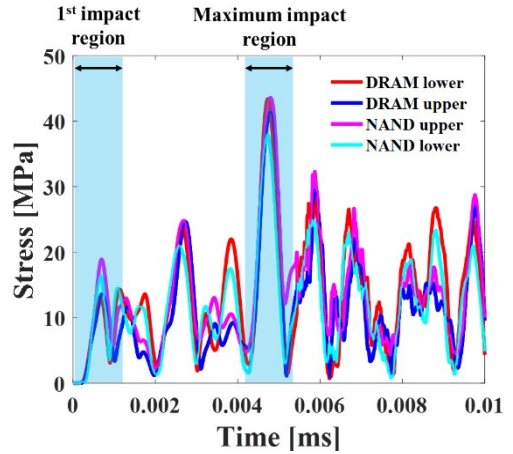
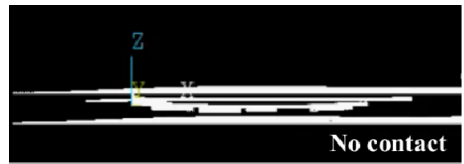
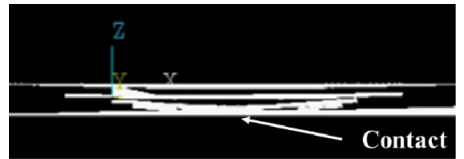


Fig. 10 Von Mises stress of critical solder balls



(a) Deformation in the 1st impact region



(b) Deformation in the maximum impact region

Fig. 11 Deformed shape of a notebook computer jig with SSD

응력 이상의 거동만 고려하였다. 최대 충격 구간을 제외하면 항복 응력을 넘어서지 않는 것을 해석 결과를 바탕으로 확인하였다. 최대 충격 구간에서 해당 solder ball에서의 소성변형률은 0.0889 m/m으로 나타났다. 100 000 cycle 미만의 피로 파괴에 대해서는 LCF(low cycle fatigue)를 표현하는 Coffin Manson 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\epsilon_p = \epsilon'_f (2N_f)^c \tag{1}$$

여기서  $\Delta\epsilon_p$ 는 소성변형률,  $N_f$ 는 파괴에 필요한 cycle,  $\epsilon'_f$ 는 fatigue ductility coefficient 그리고  $c$ 는 fatigue

ductility exponent이다.  $\epsilon_f$ 과  $c$ 는 재료의 종류에 따라 결정되는 상수들로 Zhou 등<sup>(24)</sup>의 논문에서 사용된 SAC305에 대한 값을 참고하였다. Coffin Manson 식에 계산된 변형률을 입력하여 예상 수명을 계산하였다. 계산 결과를 통해 동일한 하중을 87번 반복하였을 때 파괴가 발생할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 탁상 높이에 해당하는 50 cm 높이에서 노트북 컴퓨터의 낙하 환경에 대한 약 80회의 신뢰성을 보증할 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

이 연구를 통하여 실제 노트북 컴퓨터에 장착된 SSD의 환경을 고려한 낙하 실험과 해석을 수행하여 낙하 상황에서 SSD의 예상 수명을 계산하였다. 실험을 위하여 실제 노트북 컴퓨터를 대변할 수 있는 지그를 제작하였으며 이를 통하여 실제와 유사한 환경을 구현할 수 있었다. 낙하 실험을 통하여 가속도와 변형률을 측정하였으며, 해당 결과를 유한요소 해석에서의 외력 조건으로 사용하였다. 해석에서 계산된 변형률과 실험에서 측정된 변형률의 비교를 통하여 해석 모델의 적합성을 검증하였다. 해석 결과를 통하여 NAND 좌측 상단부 외각 solder ball이 최대 응력이 발생하는 것을 확인하였으며 해당 위치를 취약부로 판별하였다. 또한 취약부로 판별된 solder ball의 소성 변형률을 LCF를 나타내는 Coffin Manson식에 적용하여 87 cycle에 파괴가 발생할 것이라 예측하였다. 이로써 낙하 해석과 낙하 실험을 통하여 낙하 시 실제 제품에 장착된 SSD의 수명을 예측하였다. 향후, 노트북 컴퓨터의 설계 시 바닥면 덮개와 간격 증가시키거나 SSD를 추가적으로 고정하여 2차 충돌이 발생하지 않게 주의가 필요하다. 또한, 취약부로 판단된 DRAM 우측 상단, NAND 좌측 상단 위치의 solder ball을 전기적 연결 기능을 하지 않는 dummy solder ball로 변경하여 낙하 환경에서 SSD의 수명의 증가를 기대할 수 있다.

#### References

(1) JEDEC Solid State Technology Association, 2003, Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products, JEDEC Standard

JESD22-B111.

(2) Lee, S. M., Yoon, J.-W. and Jung, S.-B., 2016, Board Level Drop Reliability of Epoxy-containing Sn-58 Mass% Bi Solder Joints with Various Surface Finishes, *Materials Transactions*, Vol. 57, No. 3, pp. 466~471.

(3) Che, F. X. and Pang, J. H., 2015, Study on Board-level Drop Impact Reliability of Sn-Ag-Cu Solder Joint by Considering Strain Rate Dependent Properties of Solder, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 15, No. 2, pp. 181~190.

(4) Wang, W., Robbins, D. and Glancey, C., 2016, Simulation Model to Predict Failure Cycles in Board Level Drop Test, *IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference(ECTC): IEEE*, pp. 1886~1891.

(5) Wu, M. L. and Lan, J.-S., 2018, Reliability and Failure Analysis of SAC 105 and SAC 1205N Lead-free Solder Alloys During Drop Test Events, *Microelectronics Reliability*, Vol. 80, pp. 213~222.

(6) Sridhar, S., Raj, A., Gordon, S. et al., 2016, Drop Impact Reliability Testing of Isothermally Aged Doped Low Creep Lead-free Solder Paste Alloys, *15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm): IEEE*, pp. 501~506.

(7) Nguyen, T. T. and Park, S., 2011, Characterization of Elasto-plastic Behavior of Actual SAC Solder Joints for Drop Test Modeling, *Microelectronics Reliability*, Vol. 51, No. 8, pp. 1385~1392.

(8) Chung, S. and Kwak, J. B., 2020, Comparative Study on Reliability and Advanced Numerical Analysis of BGA Subjected to Product-level Drop Impact Test for Portable Electronics, *Electronics*, Vol. 9, No. 9, p. 1515.

(9) Yu, D., Kwak, J. B., Park, S. and Lee, J., 2010, Dynamic Responses of PCB under Product-level Free Drop Impact, *Microelectronics Reliability*, Vol. 50, No.7, pp. 1028~1038.

(10) Sharan, K. Lahoti, S. and Zhou, J., 2006, Dynamic Response of a Portable Electronic Product Subjected to An Impact Load, *Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems*,

ITHERM 2006: IEEE, pp. 1049~1055.

(11) Ong, Y., Shim, V., Chai, T. and Lim, C., 2003, Comparison of Mechanical Response of PCBs Subjected to Product-level and Board-level Drop Impact Tests, Proceedings of the 5th Electronics Packaging Technology Conference(EPTC 2003): IEEE, pp. 223~227.

(12) Yau, Y. and Hua, S. N., 2011, A Comprehensive Review of Drop Impact Modeling on Portable Electronic Devices, Applied Mechanics Reviews, Vol. 64. No. 2, 020803.

(13) Jang, J., Jang, G., Lee, J., Cho, Y. and Cinar, Y., 2016, Fatigue Life Estimations of Solid-state Drives with Dummy Solder Balls under Vibration, International Journal of Fatigue, Vol. 88, pp. 42~48.

(14) Hassan, S., Ho, K. and Gupta, M., 2004, Increasing Elastic Modulus, Strength and CTE of AZ91 by Reinforcing Pure Magnesium with Elemental Copper, Materials Letters, Vol. 58, No. 16, pp. 2143~2146.

(15) Cho, Y., Jang, J. and Jang, G., 2018, Sensitivity Analysis on the Fatigue Life of Solid State Drive Solder Joints by the Finite Element Method and Monte Carlo simulation, Microsystem Technologies, Vol. 24, No. 11, pp. 4669~4676.

(16) Xu, Z., Jiang, T., Song, F., Lo, J. C. and Lee, S. R., 2010, Modeling of Board Level Solder Joint Reliability under Mechanical Drop Test with the Consideration of Plastic Strain Hardening of Lead-free Solder, 2010 IEEE CPMT Symposium Japan: IEEE, pp. 1~4.

(17) Luan, J. E. and Tee, T. Y., 2004, Novel Board Level Drop Test Simulation Using Implicit Transient Analysis with Input-G Method, Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2004)(IEEE Cat. No. 04EX971): IEEE, pp. 671~677.

(18) Luan, J. E., Tee, T. Y., Pek, E. et al., 2006, Advanced Numerical and Experimental Techniques for Analysis of Dynamic Responses and Solder Joint Reliability During Drop Impact, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 29, No. 3, pp. 449~456.

(19) Zhou, J., Sharan, K. and Lahoti, S., 2006, Analytical and Numerical Analysis of Drop Impact

Behavior for a Portable Electronic Device, EuroSime 2006: 7th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems: IEEE, pp. 1~7.

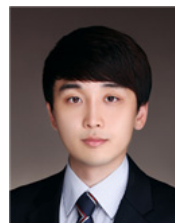
(20) Gil, G., Lee, S., Jeon, J., Cho, K. and Jo, Y., 2018, Acquisition the Property of Cushioning Material with the Drop Test and Verification with Finite Element Shock Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 5, pp. 526~533.

(21) Tee, T. Y., Luan, J. E., Pek, E., Lim C. T. and Zhong, Z., 2004, Novel Numerical and Experimental Analysis of Dynamic Responses under Board Level Drop Test, 5th International Conference on Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 2004 EuroSimE, pp. 133~140.

(22) Gu, J., Lin, J., Lei, Y. and Fu, H., 2018, Experimental Analysis of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu Solder Joint Board-level Drop/Vibration Impact Failure Models after Thermal/Isothermal Cycling, Microelectronics Reliability, Vol. 80, pp. 29~36.

(23) Lee, J., Jang, G. and Jang, J., 2015, Fatigue Life Estimation of Solid-state Drive due to the Effect of Dummy Solder Ball under Forced Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 176~183.

(24) Zhou, Y., Al-Bassiyouni, M. and Dasgupta, A., 2010, Harmonic and Random Vibration Durability of SAC305 and Sn37Pb Solder Alloys, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 33, No. 2, pp. 319~328.



**Yeungjung Cho** received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Yeungnam University, Korea in 2015. He is currently working toward the Ph.D. degree in Convergence Mechanical Engineering at Hanyang University, Seoul, Korea.

His research interests involve the mechanical reliability of electronic components.



**Gunhee Jang** received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Hanyang University, Seoul, Korea in 1984, the M.S. degree in Mechanical Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Seoul, Korea in 1986 and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from University of California, Berkeley, USA in 1993. He is a professor in the Department of Convergence Mechanical Engineering and the director of the Precision Rotating Electromechanical Machine Laboratory (PREM) in Hanyang University, Seoul, Korea. His current research is focused on the failure analysis and reliability of electronic components. He has authored or coauthored over 300 articles published in journals and conferences in his field and the holder of several international patents.



**Mibbeum Hanh** received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Konkuk University, Korea in 2016. He is currently working toward the Ph.D. degree in Convergence Mechanical Engineering at Hanyang University, Seoul, Korea. His research interests involve the structural analysis of electronic components.

# 텍스트 네트워크 분석을 이용한 바닥충격음 연구동향 분석

## Analysis of Floor Impact Sound Research Trend Using Text Network Analysis

김 경 우<sup>†</sup> · 신 혜 경\* · 박 상 희\*  
Kyoung-Woo Kim<sup>†</sup>, Hye-kyung Shin\* and Sang Hee Park\*

(Received October 22, 2021 ; Revised November 16, 2021 ; Accepted November 16, 2021)

**Key Words :** Network Analysis(네트워크 분석), Floor Impact Sound(바닥충격음), Text Mining(텍스트 마이닝), Topic Analysis(토픽 분석)

### ABSTRACT

Recently, there has been a growing interest in the collection and utilization of big data in various fields. Several studies are being conducted on the methods of utilization of the ever-increasing data. Big data appears in various forms, such as numbers, pictures, and text. The analysis of texts within social networks is being actively carried out. The research trends related to the floor impact sound targeting unstructured data in the abstract (text) of the research articles was examined in this study. The primary key words and areas of research related to floor impact sound were extracted and the fields were divided. The five extracted topics were 'evaluation of materials', 'frequency and mode analysis', 'floor structure and ceiling structure', 'vibration and frequency characteristics of slab structure', and 'impact sources characteristics and response evaluation'. Moreover, there is a requirement for extensive research on the psychological reactions, for instance, residents' auditory experiments and prediction of floor impact sound.

### 1. 서 론

바닥충격음은 공동주택에서 항상 고려되고 관심이 많은 소음이라 할 수 있다. 바닥충격음과 관련된 연구논문은 바닥충격음 영향요인에 대한 분석<sup>(1)</sup>과 재료 개발 연구<sup>(2)</sup> 및 거주자의 청감반응 연구<sup>(3,4)</sup> 등 많은 수의 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 연구들의 동향 파악은 연구의 흐름과 중심이 되는 분야를 파악하기 위해 필요한 작업이라고 생각된다. 그러나 많은 수의 논문을 대상으로 연구동향을 파악하기 위해서는 연구자가 모든 논문을 읽고 분류·분석하기에는 한계가 있

다. 바닥충격음 연구동향을 살펴본 선행연구<sup>(5)</sup>에서는 연구자가 자료를 하나하나 정리하고 내용을 분석하여 진행된 것으로 판단된다. 하지만 분석 대상 데이터 수가 많아지면 연구자가 내용을 모두 읽고 특징을 분류하기는 어려워진다.

최근 빅 데이터를 활용한 분석 연구<sup>(6,7)</sup>를 쉽게 찾아 볼 수 있다. 광범위한 데이터 속에서 의미를 찾고 분석하는 방법은 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 인공지능을 활용하여 그 가능성은 더욱더 무궁무진해지고 있다. 특정한 문장이나 글에는 어떤 의미가 내포되어 있으며, 이러한 의미를 파악하고 분석하는 것은 사회과학 연구 분야에서는 일반적인 연구방법이

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Research Fellow  
E-mail : kwmj@kict.re.kr

\* Member, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Researcher

‡ Recommended by Editor Byung Kwon Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

다. 키워드 분석은 정형화되지 않은 텍스트 문서나 데이터베이스에서 의미 있는 정보를 찾는 과정을 텍스트 마이닝(text mining) 이라하며, 추출된 단어들의 관계성을 파악하여 의미 있는 정보를 도출하여 상호간의 관계(network) 또한 분석할 수 있다.

이 연구는 공동주택 소음 중에서 가장 관심이 높은 바닥충격음 분야에 대한 연구동향 파악 및 어떤 연구가 중점적으로 수행되었는지 등을 텍스트 네트워크 분석을 통하여 살펴보았다.

## 2. 연구 방법

바닥충격음 연구동향을 살펴보기 위해서 한국과학기술정보연구원에서 제공하는 ‘과학기술 지식인프라 원문제공서비스(ScienceON)’에서 연구문헌을 추출하였다. 검색 대상은 국내논문으로 한정하여 ‘바닥충격음’, ‘층간소음’, ‘청감실험’, ‘중량충격음’, ‘경량충격음’, ‘고무공’ 검색어로 문헌을 검색하였다(Table 1). 검색기간은 1980년부터 2021년까지로 설정하였으며, 우선 검색된 결과에서 중복되거나 타 분야 논문인 경우를 제외하고 총 379편의 논문으로 정리하였다. 모든 문헌들이 국문초록을 제공하는 것은 아니었으며, 프로시딩이 아닌 저널에 실린 논문은 국문초록 없이 영문초록만으로 구성되는 경우가 많았다. 국문초록보다 영문초록을 제공하는 논문 수가 더 많은 관계로, 이 연구는 영문초록 232편을 대상으로 키워드 추출과 네트워크 분석을 실시하였다.

의미 없는 단어(다른, 많은, 끝 등)나 바닥충격음과 관련된 연구동향 분석이기 때문에 ‘바닥충격음’ 단어는 키워드 분석에서 제외하였다. 아울러, 자료의 전처리를 통하여 일반적인 단어로 구분될 수 있다고 판단한 ‘level’, ‘noise’, ‘study’, ‘result’, ‘sound’ 등의 단어는 제외시켰다. 키워드 분석을 위해서 1 글자 단어도 제외하였으며, 빈도수가 3회 이상 출현한 키워드

만을 분석대상으로 하였다.

수많은 텍스트에서 중요 단어를 추출하고 가공하기 위해서 분석 프로그램을 사용하며, 이 연구에서는 텍스트 마이닝과 네트워크 분석이 가능한 넷마이너(NetMiner 4.4.3)를 사용하였다. 기간별 연구 논문 수와 키워드 빈도, 네트워크 분석, 토픽분석을 수행하였다.

## 3. 분석

### 3.1 기본 분석

#### (1) 기간별 논문 수

논문발표 기간을 10년 단위로 구분하여 ‘1980 ~ 1989’, ‘1990 ~ 1999’, ‘2000 ~ 2009’, ‘2010 ~ 2019’, ‘2020 ~ 2021’ 5개 기간별 논문수를 분석하였다. 논문 편수 분석은 총 379편을 대상으로 하였다. Fig. 1과 같이 2000년대에 발표된 논문이 가장 많은 수를 차지하는 것을 알 수 있다. 2000년대는 바닥충격음 성능기준 도입과 바닥충격음 차단구조 인정제도 시행된 기간에 해당됨에 따라 관련 연구도 증가한 것으로 판단된다.

논문발표가 가장 많은 2000년대를 년도 별로 구분하여 논문 편수를 Fig. 2에서 분석하였다. 2002년과 2004년에

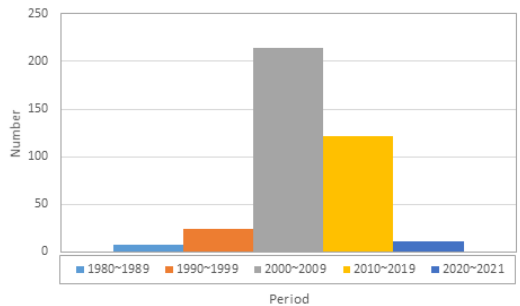


Fig. 1 Number of papers by periods

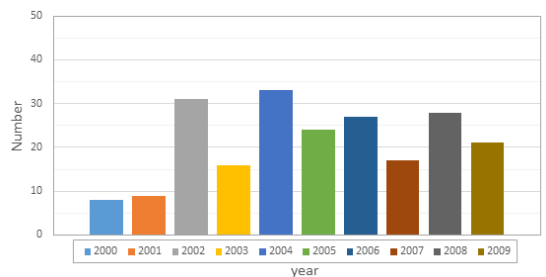


Fig. 2 Number of papers by year (2000 ~ 2009)

Table 1 Data collection conditions

Periods	Search words	Web site
1980 ~ 2021	- Floor impact sound - Inter floor noise - Auditory experiment - Heavyweight floor impact sound - Lightweight floor impact sound - Rubber ball	<a href="https://scienceon.kisti.re.kr/main/mainForm.do">https://scienceon.kisti.re.kr/main/mainForm.do</a>

논문 수가 많았는데 2002년은 바닥충격음 성능기준 마련 연구<sup>8)</sup>를 통해 바닥충격음에 대한 관심 증대가 논문수에 반영된 것으로 보이며, 2004년은 바닥충격음 성능기준(중량: 50 dB 이하, 경량: 58 dB 이하)이 적용되는 시점에 해당된다.

(2) 키워드 빈도

텍스트(영문초록)에서 도출된 키워드(단어)가 해당 문서에서 자주 등장하게 되면 키워드의 중요도가 높아지게 된다. 단순히 단어가 등장하는 빈도에 따라 키워드의 중요도를 평가하는 것으로 일반적으로 Fig. 3과 같이 워드 클라우드로 간단히 표현할 수도 있다. 그림에서 단어의 크기가 크게 표시된 것이 빈도수가 높음을 의미하며, 개략적인 중요한 단어를 확인할 수 있다. Table 2는 빈도수가 높은 키워드를 1위부터 30위까지 나열한 것으로 ‘slab’, ‘apartment’, ‘material’, ‘system’ 순서로 분석되었으며, ‘rating’, ‘factor’ 단어도 순위에 포함되었다.

3.2 네트워크 분석

네트워크 분석은 중요도(TF-IDF)와 연결중심도(degree centrality), 위세 중심도(figenvector centrality)로 분석하였으며, Table 3에 나타내었다.

(1) 단어빈도-역문서빈도(TF-IDF)

문장에 출현하는 빈도수와 함께 키워드의 중요도를 분석하기 위해서 단어빈도-역문서빈도(TF-IDF)가 사용된다. 단순히 빈도수만으로 중요도를 분석하게 되면 모든 문서에 나타나는 흔한 단어의 경우에 중요도가 높아져 중요 단어인지 아닌지 구분하기 어려워진다. 단어빈도-역문서빈도는 모든 문서에서 나타나는 흔한 단어를 추출하여 특정 단어의 중요도를 측정하는 것으로 문서 내의 단어 빈도(term frequency)와 문서빈도의 역수인

역문서빈도(inverse document frequency)를 곱하여 특정 단어가 가지는 중요도를 분석한다. 특정 문서에서 단어출현 빈도가 높을수록, 전체 문서 중에서 해당 단어가 등장한 문서가 적을수록 값은 높아진다<sup>9)</sup>. 분석결과는 Table 3과 같다. 가중치가 높은 순서로 정렬하여 30위까지의 키워드를 나타내었다. TF-IDF가 높은 단어는 ‘chip’, ‘masking’, ‘SBR(styrene-butadiene rubber)’, ‘hanok’, ‘aperture’, ‘joint’ 순으로 나타났다.

(2) 연결 중심도(degree centrality)

연결 중심도는 키워드 간의 네트워크에서 다른 단어와 연결되는 선이 많을수록 중요성이 높다고 평가하는 것으로 이웃된 노드에 연결된 선이 많게 되면 해당 키워드를 통해 다른 단어와 연결되는 역할을 하게 됨으로 중요한 단어로 평가하게 된다. 단어 간 연결선이 특정한 방향성이 존재하는 네트워크의 경우에는 in degree와 out degree로 구분이 가능하지만, 이 연구의 단어는 단어 간의 상호관계를 나타내는 것으로 방향성이 in degree와 out degree가 동일한 네트워크이다. 연결 중심도 분석결과와 네트워크 전체의 중심도는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 단어의 노드(원형 아이콘)가 클수록 중심도가 높은 단어로 분석된다. 특정 단어를 중심으로 모여 있는 형태를 확인하기 어려웠으며, 중심도 지수(degree centralization index)도 13.5%로 높지 않았다. 많은 단어가 상호 관련을 맺고 있는 복잡한 관계를 보여주고 있다. Table 3과 같

Table 2 Frequency of key words (rank.1 ~ 30)

No.	Key word	Freq.	No.	Key word	Freq.
1	Slab	234	16	House	106
2	Apartment	231	17	Vibration	102
3	Material	219	18	Ceiling	88
4	System	203	19	Characteristic	79
5	Performance	185	20	Thickness	78
6	Structure	169	21	Pressure	77
7	Rubber ball	152	22	Effect	76
8	Method	148	23	Stiffness	75
9	Insulation	146	24	Wall	64
10	Source	133	25	Bang machine	63
11	Frequency	127	26	Isolation	59
12	Building	123	27	Rating	58
13	Reduction	120	28	Factor	58
14	Measurement	116	29	Weight	57
15	Room	107	30	Field	52

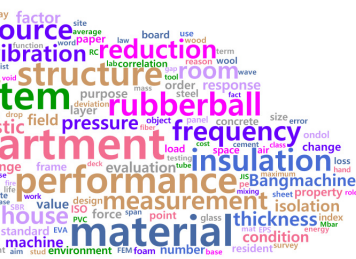


Fig. 3 Word cloud



이 연결 중심도가 높은 단어는 ‘slab’, ‘material’, ‘system’, ‘apartment’, ‘measurement’ 순서로 나타났으며, ‘rubber ball’, ‘bang machine’, ‘stiffness’ 단어도 포함되었다. ‘slab’는 중량충격음 저감을 위한 주요 기술개발 적용 대상이 되는 부분이기 때문에 중심도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

(3) 위세 중심도(eigenvector centrality)

위세 중심도는 중심이 되는 단어를 확인하는 방법 중에 하나이다. 연결 중심도(degree centrality)와 같이 이웃된 단어와 연결이 많은 단어의 중심도를 높게 평가하는 개념에서 해당 단어와 직접 연결된 인접 단어를 포함하고 인접 단어와 이웃된 단어까지 고려하여 연쇄적으로 이웃이 많은 이웃과 연결되는 단어의 중심도를 높게 평가하는 개념이다.

즉, 단어 ‘A’와 단어 ‘B’에 각각 연결된 단어 개수가 10개로 동일한 경우에는 연결 중심도는 같은 값을 가지지만, 단어 ‘A’와 ‘B’에 이웃한 10개 단어들이 다시 이웃한 단어 개수가 많을수록 해당단어의 중요도를 높게 평가한다. 위세 중심도가 높은 단어는 ‘apartment’, ‘house’, ‘building’, ‘performance’, ‘insulation’ 순서로 나타났으며, ‘high rise’, ‘site’ 단어가 낮은 값을 보였다. 연결 중심도 단어들과 다른 단어들이 도출되거나 순위가 바뀌어 도출되었음을 알 수 있었다. 이러한 분석결과는 위세 중심도는 해당단어의 이웃과 그 이웃과 이웃된 단어의 관계까지 확대하여 평가하는 것이기 때문에 단순 연결 관계만을 보는 연결 중심도의 순서와 차이를 보이게 된다. 어떤 분석 지표를 적용하느냐에 따라 분석결과가 차이이기 때문에 적절한 분석지표 선정과 의미분석이 필요하다. 연결중심도가 높은 ‘slab’

Table 3 Results of network analysis

No.	TF-IDF		Degree centrality		Eigenvector centrality	
	Key word	Weight	Key word	Degree	Key word	Degree
1	Chip	1.8	Slab	0.1504	Apartment	0.6859
2	Masking	1.8	Material	0.1328	House	0.5392
3	SBR	1.8	System	0.1253	Building	0.4018
4	Hanok	1.7	Apartment	0.1153	Performance	0.1324
5	Aperture	1.6	Measurement	0.1153	Insulation	0.1032
6	Joist	1.6	Structure	0.1153	Slab	0.1009
7	Uncertainty	1.6	Ceiling	0.0952	Structure	0.0719
8	Cork	1.6	Method	0.0927	Ceiling	0.0701
9	Deformation	1.6	Performance	0.0927	System	0.0661
10	Gap	1.5	Vibration	0.0927	Housing	0.0485
11	Pallet	1.5	Rubber ball	0.0902	Characteristic	0.0385
12	Strain	1.5	Characteristic	0.0727	Thickness	0.0380
13	Modifier	1.5	Reduction	0.0727	Construction	0.0355
14	Pad	1.5	Source	0.0677	Material	0.0347
15	Butyl	1.5	Thickness	0.0677	Room	0.0342
16	FRP	1.5	Room	0.0652	Frame	0.0340
17	Speech	1.5	Wall	0.0652	Problem	0.0333
18	Elevator	1.5	Frequency	0.0627	Reduction	0.0331
19	Deck	1.5	Construction	0.0576	Resident	0.0322
20	Void	1.5	Effect	0.0576	Isolation	0.0308
21	Capability	1.5	Factor	0.0526	Balcony	0.0258
22	Tube	1.5	Insulation	0.0526	Wall	0.0249
23	Tower type	1.5	Building	0.0501	Source	0.0233
24	Module	1.5	Condition	0.0501	Vibration	0.0200
25	Annoying	1.5	House	0.0501	Neighbor	0.0189
26	Intelligibility	1.5	Field	0.0476	Tower type	0.0188
27	Block	1.5	Order	0.0476	Condition	0.0181
28	Plastic	1.5	Bang machine	0.0451	Percentage	0.0174
29	Mini laboratory	1.5	Stiffness	0.0451	High rise	0.0173
30	Hall	1.5	Addition	0.0426	Site	0.0160

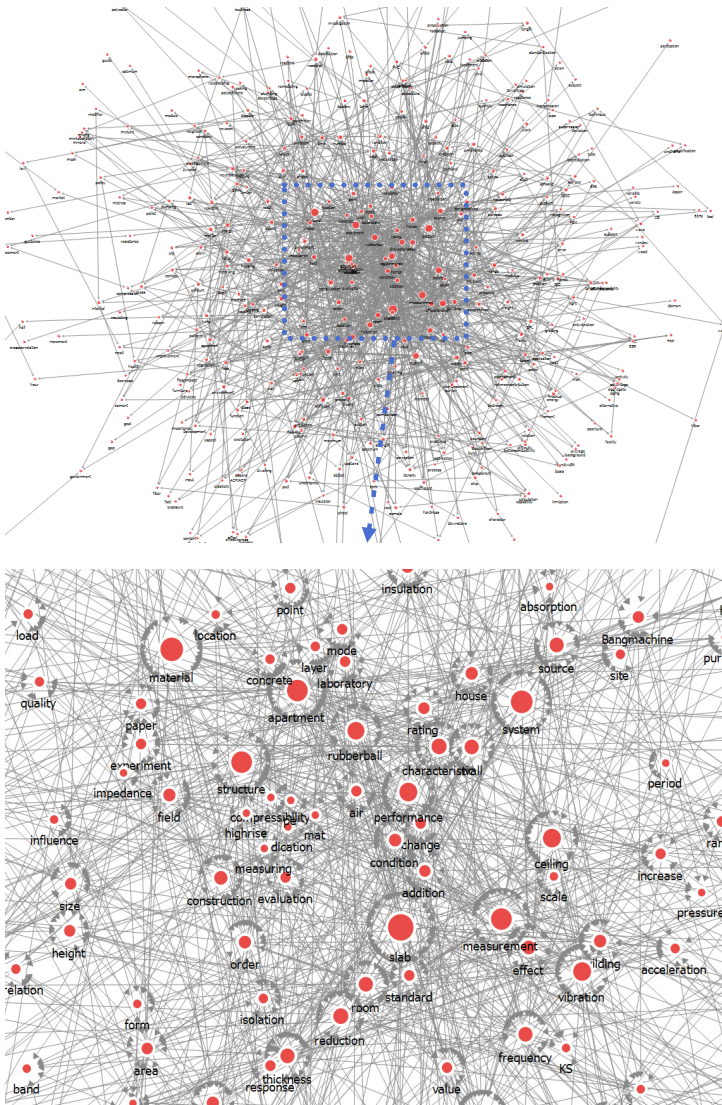


Fig. 4 Figure of degree centrality

단어와 함께 ‘ceiling’ 단어 또한 위세 중심도 8번째로 나타나 리모델링 주택이나 준공 후 성능개선 방안으로 검토<sup>(10)</sup>되고 있기 때문에 ‘ceiling’ 단어 중심도도 높은 것으로 판단된다.

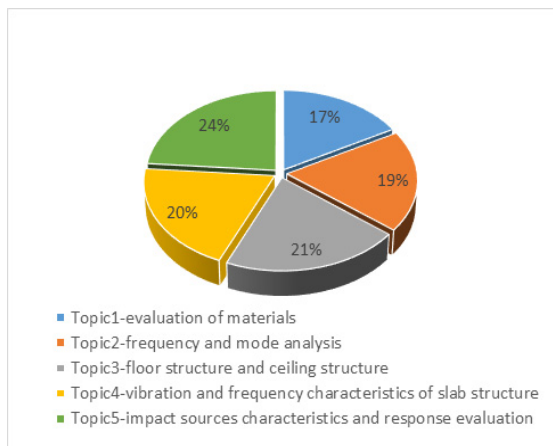
### 3.3 토픽 분석(Topic analysis)

토픽 분석은 문서의 집단에서 추상적인 주제를 도출하기 위한 통계적 모델이며, 텍스트 본문에 숨겨진 의미를 찾기 위해 사용되는 분석기법이다. 토픽 분석을 위한 방법인 LDA(latent dirichlet allocation, 잠재

디리클레 할당)는 대표적인 알고리즘으로 문서들은 토픽들의 혼합으로 이루어져 있고, 토픽들은 확률분포를 토대로 단어들을 생성한다고 가정하여 토픽의 개수에 따라 단어들을 구분하여 도출한다. 토픽 개수는 연구자가 해당 분야의 특성을 고려하여 정해줘야 하며, 토픽별로 구분된 단어들을 보고 토픽의 이름을 정해야 주어야 한다. 이 연구에서는 샘플링 반복횟수를 1000번으로 설정하여 토픽 수를 3개부터 10개 까지 선정 후 분석하여 최종적으로 관련 연구를 잘 해석할 수 있는 5개 토픽 분석 결과를 사용하였다. 분석결과

**Table 4** Topic analysis

No.	Topic1	Topic2	Topic3	Topic4	Topic5
1st	Material	Method	Apartment	Slab	Rubber ball
	0.147	0.077	0.098	0.144	0.107
2nd	Reduction	Measurement	Performance	System	Source
	0.073	0.076	0.097	0.122	0.095
3rd	Stiffness	Room	Insulation	Structure	Bang machine
	0.051	0.072	0.081	0.069	0.044
4th	Isolation	Frequency	Ceiling	Vibration	Characteristic
	0.025	0.059	0.056	0.061	0.042
5th	Layer	Pressure	House	Apartment	Building
	0.022	0.05	0.039	0.044	0.035
6th	Property	Rating	Structure	Wall	Machine
	0.019	0.039	0.035	0.038	0.035
7th	Mortar	Mode	Construction	Thickness	Experiment
	0.017	0.03	0.027	0.038	0.032
8th	Factor	Band	Factor	House	Effect
	0.015	0.029	0.019	0.027	0.027
9th	Concrete	Field	Problem	Building	Response
	0.015	0.029	0.019	0.026	0.027
10th	Load	Number	Building	Weight	Force
	0.015	0.022	0.018	0.02	0.026
Title	Evaluation of materials	Frequency and mode analysis	Floor structure and ceiling structure	Vibration and frequency characteristics of slab structure	Impact sources characteristics and response evaluation



**Fig. 5** Proportion by topic

Table 4와 같이 5개의 토픽에 할당된 단어들을 첫 번째 단어부터 10번째 단어까지 표현하였으며, 할당 확률이 높게 나타난 순서이다. 각 해당 토픽은 분석된 단어를 토대로 토픽명칭을 부여하여야 한다.

토픽1은 ‘material’, ‘stiffness’, ‘reduction’ 등으로 구성되어 있어 ‘재료 특성 평가’에 대한 토픽으로 명명하

였으며, 토픽2는 ‘measurement’, ‘frequency’, ‘mode’ 등의 단어로 구성되어 ‘주파수 및 모드분석’과 관련된 토픽으로 구분하였다. 토픽3은 ‘바닥구조 및 천장구조’에 대한 주제로 분석하였고, 토픽4는 ‘슬래브 구조의 진동, 주파수 특성평가’, 토픽5는 ‘충격원 특성 및 반응평가’에 대한 토픽으로 구분할 수 있을 것이다.

바닥충격음 연구논문 수를 기준으로 각 토픽별 비중을 Fig. 5에서 살펴보았다. 토픽들의 비율은 전반적으로 유사하게 분포하였으며, 그 중 충격원에 대한 특성과 반응 연구가 전체의 24%로 가장 높았다.

토픽 분석을 통하여 완충재료, 바닥 및 천장 등에 대한 성능평가(개선정도) 연구가 이루어졌으며, 표준 충격원의 특성에 대한 검토가 진행된 것을 알 수 있었다. 그리고 충격음에 대한 주파수분석과 모드 분석을 통한 접근도 진행된 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

바닥충격음 연구 동향을 분석하기 위해서 텍스트 네트워크 분석이 가능한 프로그램을 활용하여 발표된

논문들의 영문초록을 대상으로 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

(1) 바닥충격음 관련 연구는 2000년대 가장 많은 논문이 발표되었으며, 2010년대에는 대략 절반정도로 논문수가 감소하였다. 바닥충격음 성능기준 도입전, 후 시점에 많은 연구가 진행되었다.

(2) 논문초록에 가장 많이 등장하는 단어는 ‘slab’, ‘apartment’, ‘material’, ‘system’ 등이며 ‘rubber ball’ 도 빈도가 7번째로 높은 것으로 나타났다.

(3) 네트워크 분석을 통해 TF-IDF은 ‘chip’, ‘SBR’, ‘FRP (fiber reinforced plastics)’ 등 재료를 의미하는 단어의 가중치가 높은 것을 알 수 있다. TF-IDF은 다른 문서에서 출연빈도가 낮고 특정 문서에서 많이 등장하는 경우에 가중치가 높아지기 때문에 특정 재료에 대한 연구의 단어 가중치가 높게 평가되는 한계가 있었다.

단어 간의 연결 중심도는 ‘slab’, ‘material’이 높은 값을 가졌으며, 위세 중심도는 ‘apartment’, ‘house’ 등이 높은 값을 가졌다. 공동주택의 슬래브와 적용되는 저감재료, 바닥구조성과 재료의 성능에 대한 검토가 중요한 부분으로 분석되었다. 공동주택 바닥충격음 성능에 관련된 것으로 여러 개의 군집으로 구분되지 못하고 복잡하게 연결되어 나타나기 때문에 상기 단어들이 높은 중심도를 보이게 된 것으로 판단된다.

(4) 영문초록들을 대상으로 토픽 분석을 실시한 결과 ‘재료 특성 평가’, ‘주파수 및 모드분석’, ‘바닥구조 및 천장구조’, ‘슬래브 구조의 진동, 주파수 특성평가’, ‘충격원 특성 및 반응평가’로 토픽을 구분하였다.

최근 물리적 성능 향상이 아닌 사회심리학적 접근과 같이 층간소음과 사람의 심리반응의 관계에 대한 연구<sup>(11-13)</sup>와 바닥충격음 예측에 대한 연구<sup>(14,15)</sup>도 진행되고 있으나 이 연구의 토픽 분석에는 포함되지 않았다. 해당 분야에 보다 많은 연구자들의 연구가 필요해 보인다.

텍스트 네트워크 분석은 소셜 네트워크를 통해 시민들의 의식이나 관계 등을 주로 파악해 왔으나, 많은 데이터의 축적과 분석기술 고도화로 다양한 분야에서 의미 파악에 적용되고 있다. 이러한 분석 기법을 활용하여 건축음향 분야의 연구 특성을 파악하고 필요한 연구 방향 등을 도출할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 연구비지원(20210639-001)에 의해 수행되었습니다.

## References

- (1) Kim, T. M., Bae, J. Y. and Yang, H. S., 2020, The Study on Characteristic of Floor Impact Noise Using the Structural Vibration on Floor Slab : Effective Plate, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 276~285.
- (2) Song, G. G., Park, J. H. and Lee, S. M., 2018, Floor Impact Sound Reduction of Resilient Materials with Polyolefine, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p 121.
- (3) Ryu, J. K. and Jeong, M. J., 2016, Difference in Subjective Magnitude between Heavy-weight Floor Impact Sources Using Auditory Experiment, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 304.
- (4) Park, S. H., Shin, H. K. and Kim, K. W., 2021, VR Experiment on Indoor Noise Perception and Moderation Effects of Outdoor Sounds, Visual Environment and Noise Sensitivity, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 279~288.
- (5) 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.
- (6) Lee, C. H., Kang, K. H., Kim, Y. H., Lim, H. N., Ku, J. H. and Kim, K. H., 2021, A Study on the Factors of Well-aging through Big Data Analysis: Focusing on Newspaper Articles, Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 22, No. 5, pp. 354~360.
- (7) Won, D. S. and Park, H. W., 2021, Examining Economic Activities of Disabled People Using Media Big Data: Temporal Trends and Implications for Issue Detection, Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 22, No. 2, pp. 548~557.
- (8) Kim, H. S., Kim, H. G., Kim, M. J. and Cho, C. G., 2001, The Criteria of Floor Impact Sound Insulation

for Apartment Houses, Housing & Urban Research Institute, Korea National Housing Corporation.

(9) Kim, S. M. and Kim, Y. J., 2020, Research Trend Analysis on Living Lab Using Text Mining, *Journal of Digital Convergence*, Vol. 18, No. 8, pp. 37-48.

(10) Shin, H. K. and Kim, K. W., 2020, Sound Absorbing Ceiling to Reduce Heavy Weight Floor Impact Sound, *Building and Environment*, Vol. 180, 107058.

(11) Im, D. K., Kim, S. H. and Choi, J. E., 2017, A Study on the Social Psychological Studies of Floor Noise, *Joint Conference by KSNVE, ASK and KSME(DC)*, p. 165.

(12) Jeong, J. H. and Lee, P. J., 2018, Questionnaire Survey on Annoyance and Disturbance of Floor Impact Sound, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 685-693.

(13) Ha, J. M., Lee, T. K. and Shin, E. Y., 2015, Social Inter-floor Noiseproof Measures According to Experiences of Conflict in Multi-family Housing, *Journal of the Korean Housing Association*, Vol. 26, No. 6, pp. 1-8.

(14) Kim, T. M. and Yang, H. S., 2020, Prediction of Heavy-weight Floor Impact Sound with Different Impact Sources and Indices Using a Finite Element Method, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 169-178.

(15) Kim, J. H., Mun, D. H., Jeong, G. C. and Park, H. G., 2017, Influence of Floor Dimension and Resilient Material on Heavy Impact Noise of Floating Floor

System, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 434-443.



**Kyoung-Woo Kim** received Ph.D. in architecture engineering from Hanyang university in 2009. He is working at KICT (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology) as a Research Fellow. His research interests are floor impact sound, vibration, insulation and absorption in architecture environment.



**Hye-Kyung Shin** is Research Specialist at KICT (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology). She received the M.S. degree in Dept. of architectural engineering from University of Seoul in 2015. Her research interests are architectural acoustic and environmental noise.



**Sang Hee Park** has completed her Ph.D. at the University of Liverpool. She is currently working at the KICT (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology). Her research involves exploring measures to promote human well-being in built environments.

# 풍잡음 저감용 방풍망 특성에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Characteristics of a Windscreen for Reducing Wind Noise

이 영 진\* · 이 진 우†  
Young Jin Lee\* and Jin Woo Lee†

(Received October 22, 2021 ; Revised November 16, 2021 ; Accepted November 16, 2021)

**Key Words :** Windscreen(방풍망), Wind Noise(풍잡음), White Noise(백색 소음), Equivalent Sound Level(등가 소음도), PPI(인치당 공극 개수)

### ABSTRACT

An experimental study was carried out to identify the characteristics of a windscreen to reduce wind noise. Five different windscreens were used to measure noise reduction, and the windscreen covered the microphone. They have different shapes, sizes, and pores per inch. First, the capability of each windscreen to block wind was studied, and then the effects of noise source, source magnitude, and wind speed on noise reduction, due to a windscreen, were investigated. The measured noise levels were examined in the 1/3 octave band. In the low frequency range (< 50 Hz), noise levels were severely distorted for all windscreens. In the high frequency range (> 6300 Hz), the largest windscreen showed more noise reduction than the other windscreens. In addition, an on-site experiment confirmed that noise measurement was possible for wind speeds up to 5 m/s.

### 1. 서 론

소음 측정시 마이크로폰에 바람이 인입(引入)될 때 발생하는 소음을 풍잡음(wind noise)이라고 한다. 환경 소음과 같은 외부 소음을 측정할 때 발생하는 풍잡음은 측정된 소음의 정확도에 영향을 미친다. 환경 소음을 측정하기 위해 사용하는 소음계에는 풍잡음을 줄이기 위해 다양한 방풍망(windscreen)이 마이크로폰에 장착된다. David와 Hessler<sup>(1)</sup>의 연구에 따르면, 풍속이 3 m/s, 5 m/s, 8 m/s 일 때 방풍망 없이 측정된 50 dB(A), 70 dB(A), 83 dB(A) 크기의 소음이 일반형

방풍망을 사용한 경우에 각각 25 dB(A), 39 dB(A), 52 dB(A)로 측정된 바 있다. 일반적으로 환경 소음은 환경부의 「소음·진동 관리법」 및 「소음·진동 공정 시험기준」<sup>(2)</sup>에 따라 소음 측정이 이루어지고, 사용되는 소음계는 환경부의 형식 승인을 받고 장비별 정도 검사나 검/교정을 주기적으로 받게 되어 있다. 그러나, 방풍망의 경우 각 제조사에서 제공하는 것을 별다른 검증 과정 없이 사용되고 있다.

「소음·진동 공정 시험기준」<sup>(2)</sup>에 따르면 소음 측정시 풍속이 2 m/s 이상인 경우, 소음계의 마이크로폰에 방풍망(windscreen)을 부착하여 사용하도록 되어 있고, 5 m/s 이상인 경우 측정을 금지하고 있다. 그러나,

† Corresponding Author ; Member, Ajou University, Professor  
E-mail : jinwoolee@ajou.ac.kr  
\* Member, Ajou University, Student

# A part of this paper is presented at the KSNVE 2021 Annual Autumn Conference  
‡ Recommended by Editor Deuk Sung Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

현장에서 순간적으로 불어오는 바람의 속도를 지속적으로 계측하기 어렵고 풍속계에 대한 기준이 없어 실외 측정시에는 무조건 방풍망을 부착하여 사용하고 있다. 그런데, 국내에 유통되는 방풍망은 각 소음계 및 마이크로폰 제조사에서 제공하며, 제조사에 따라 종류 및 크기가 다양하다. C사<sup>(3)</sup> 소음계를 제외하고는 방풍망 설치시 소음에 대한 보정을 적용하는 경우는 거의 없는 실정이다. A사<sup>(4)</sup>의 경우 방풍망에 의한 풍잡음 저감 성능을 성능표로 제공하고 있으나 소음계에 적용하는 방법에 대한 설명이 충분하지 않다. 따라서, 방풍망 설치시 발생하는 측정 소음 크기의 오차가 어느 정도인지 확인할 필요가 있다. 그러나, 불행히도 대부분의 소음계에서는 그런 기능이 소음계에 존재하지 않거나, 있다 하더라도 대부분 실험실에서의 연구결과로서 제공하고 있을 뿐 실제 현장 소음 측정시 보정 과정에 사용되지 못하고 있다. 따라서, 실제 현장에서 풍속이 다양하게 변화할 때 방풍망이 풍잡음에 미치는 영향에 대해서 체계적인 연구가 필요하다.

방풍망의 풍잡음 효과에 대한 연구<sup>(5-21)</sup>는 무향실에서 강제 송풍되는 바람에 의해 수행되는 것이 대부분으로 실제 소음이 발생하는 현장에서 진행되는 경우는 드물다. 특히 대부분의 민원 대상이 되는 도로와 철도 소음이 발생하는 현장에서 풍잡음이 포함된 소음에 대한 연구가 부족한 실정이다. 예컨대, 소음기의 투과 손실 측정시 바람이 있는 상태와 없는 상태의 소음의 주파수 특성이 달라지는 경험을 고려할 때, 무향실에서 순수한 바람만이 있을 때와 도로 및 철도 소음이 포함될 경우 방풍망의 성능이 주파수에 따라 달라질 수 있을 것이라는 것을 유추할 수 있다. 따라서, 방풍망 설치시 방풍망 내부로 바람이 전달되는 정도와 소음 측정방법 등에서 제안하고 있는 소음 측정의 한계 풍속이 5 m/s가 합당한 것인지 확인할 필요가 있다.

이 연구에서는 방풍망의 종류에 따른 풍잡음 저감 효과를 정량적으로 확인하고, 소음원에 따른 풍잡음 저감 변화를 확인하였다. 이를 위해, 첫째, 국내에서 사용되고 있는 5개의 방풍망에 대하여 방풍망의 지름, 각 방풍망에 대한 PPI(pore per inch) 등을 조사한다. 둘째, 외부 풍속별로 방풍망 내부의 풍속 변화를 확인하였다. 셋째, 자유 음장에서 강제 풍속을 발생시켜 풍속별 풍잡음 저감량, 소음원에 따른 풍속별 소음의 변화량을 확인하였다. 넷째, 실제 자연 바람이






발생할 때 도로 주변에서 소음 측정을 수행하여 방풍망에 의한 소음 저감 정도를 확인하였다.

## 2. 방풍망과 실험방법








국내에서 사용되고 있는 소음계 및 마이크로폰의 직경은 대부분 1/2 inch이므로, 빈번히 사용되는 1/2 inch 용 방풍망 5종을 Table 1과 같이 선정하였다. Model I은 A사의 지름 9.5 cm, 40 PPI의 특성을 가지는 방풍망으로 가장 흔히 사용된다. Model II는 B사의 소음계에서만 사용되는 타원형 방풍망으로 단축 5 cm, 장축 7 cm, 60 PPI의 특성을 가지고 있다. Model III는 C사에서 높은 풍속에서도 사용할 수 있도록 특수 제작한 방풍망으로 지름 20 cm, 8 PPI의 특성을 가지고 있으며, Model IV는 A사 소음계의 몸체와 연결되도록 제작된 방풍망으로 타원형의 단축이 7 cm, 장축이 10 cm, 30 PPI의 특성을 가지고 있다. 마지막으로 Model V는 C사에서 흔히 사용하는 지름 7 cm, 20 PPI의 특성을 가지고 있는 방풍망이다.

실험에 사용된 장비는 Table 2에 정리하였다. 먼저 소음계(01 dB, Solo)는 현장에서 소음 측정시 사용하였으며, 마이크로폰(PCB, 378B02), 스피커(Cesva, BP012), 파워앰프(FALM, PA-1000), 대형 선풍기(한

**Table 1** Specifications of 5 windscreen models used in the work

Item	Maker	Characteristic			Picture
		Diameter (short × long)	Shape	PPI*	
Model I	A	9.5 cm	Sphere	40	
Model II	B	5 cm (5 cm × 7 cm)	Oval	60	
Model III	C	20 cm	Sphere	8	
Model IV	A	7 cm (7 cm × 10 cm)	Oval	30	
Model V	C	7 cm	Sphere	20	

**Table 2** Specification of experimental equipment

Item	Maker	Model	Class	Characteristic
Sound level meter	01dB /France	 SOLO	Class 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standard : CEI 61672-1 (2002)</li> <li>Dynamic range : 30~137dB(A)</li> <li>Weight : A, B, C, Z</li> <li>Frequency : 1/3 octave (12.5~20 kHz)</li> </ul>
Microphone & Preamplifier	PCB /USA	 378B02	Class 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Microphone : 377B02</li> <li>Preamplifier : 426E01</li> <li>Nominal microphone diameter : 1/2"</li> <li>Frequency response characteristic : Free-field</li> <li>Frequency range: (<math>\pm 2</math> dB)3.75 to 20000 Hz (3.75 to 20000 Hz)</li> <li>Dynamic range: 137 dB re 20 <math>\mu</math>Pa</li> </ul>
Micro Vane Anemometer	Schiltknecht /Germany	 MiniAir60	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Range 20 m/s : 0.6~20 m/s</li> <li>Accuracy : <math>\pm 1.0</math> %FS <math>\pm 3.0</math> % reading</li> <li>Operating temp : -10 to +80 °C</li> <li>Power supply : 4.5~5.5vDC</li> <li>Head dimensions : <math>\phi</math> 11<math>\times</math>15 mm</li> <li>Access opening : 16 mm</li> <li>Probe length : 165 mm</li> </ul>
Data Aquisition & Post processing	Siemens PLM Software	 Scadas Mobile	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ultra-quiet operation, no fan cooling, ideal for acoustic measurements</li> <li>Up to 204.8 kHz</li> </ul>
Omnidirectional Speaker	Cesva /Spain	 BP012	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lightweight: 14.5 kg</li> <li>Complete omni-directional radiation diagram</li> <li>123 dB (PWL)</li> <li>Carrying case as a trolley to facilitate the BP012 mobility</li> </ul>
Power Amplifier	FALM /Germany	 PA-1000	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Power amplifier 1000 W</li> <li>Integrated noise generator</li> <li>High pass filter</li> <li>Low pass filter</li> <li>Radio remote control</li> <li>Weight 4 kg</li> </ul>
Large Fan	Hans electronics	 SFMC-750T	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Power : 220 V</li> <li>Size : 930<math>\times</math>900<math>\times</math>320</li> <li>Weight : 19 kg</li> <li>Wind type : direct</li> <li>Wind volume : 10930</li> </ul>

스전자, SFMC-750T)는 덕트 실험에 사용하였다. 또한 풍속 센서(schiltknecht)는 초당 풍속을 측정할 때 사용하고, 측정된 데이터는 Scadas Mobile에서 주파수 분석을 수행하였다.

### 3. 방풍망의 바람 차단 성능 실험

일정한 속도로 부는 바람이 방풍망 내로 유입되는

정도를 파악하는 실험을 수행하였다. 바람의 원활한 순환을 위해 창문 및 출입구를 개방한 실내에서, 선풍기를 일정한 속도로 가동시켰다. 바닥에서 0.6 m, 선풍기에서 1.2 m 떨어진 거리에 풍속 센서(anemometer)를 설치하여 풍속을 측정하였다.

먼저, 방풍망이 없을 경우 선풍기를 가동하여 평균 풍속이 6가지 경우(1 m/s, 1.9 m/s, 2.9 m/s, 4.0 m/s, 5.0 m/s, 5.9 m/s)가 되는 선풍기 회전 속도를 측정하였



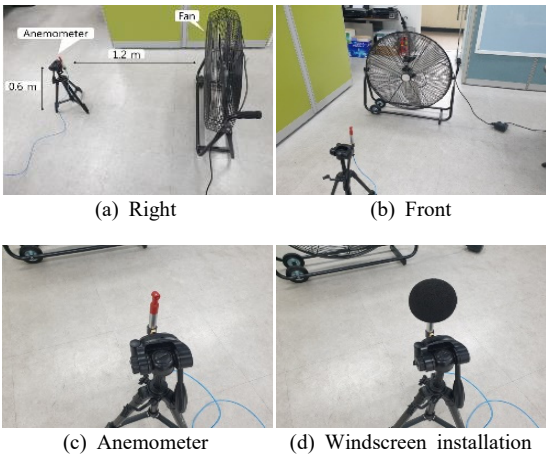


Fig. 1 Experimental set up to identify the capability of a windscreen to block a wind

Table 3 Wind speed measured inside the windscreen

Fan wind speed [m/s]	1.0	1.9	2.9	4.0	5.0	5.9	
Wind screen inner [m/s]	Model I	0.0	0.0	0.0	0.8	0.9	1.1
	Model II	0.0	0.0	0.0	0.8	0.9	1.1
	Model III	0.0	0.0	0.0	0.8	0.9	1.2
	Model IV	0.0	0.0	0.8	1.1	1.3	1.5
	Model V	0.0	0.0	0.9	1.1	1.4	1.7

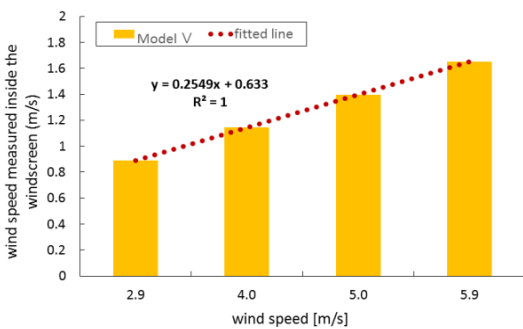


Fig. 2 Wind speed measured inside the windscreen depending on wind speed in Model V

다. 각 경우에 방풍망 종류별 내부 풍속을 측정된 결과를 Table 3에 정리하였다. 풍속이 1.9 m/s(약 2 m/s) 일 때까지는 모든 방풍망이 바람의 유입을 잘 막았지만,

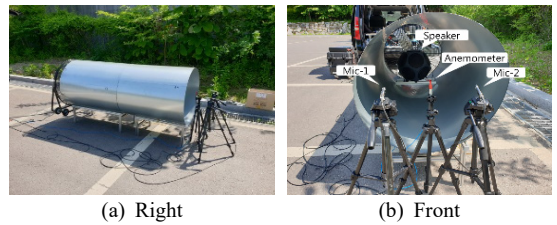


Fig. 3 Experimental set up to forced wind test in the free field

2.9 m/s(약 3 m/s)에서 Model IV와 Model V는 각각 0.8 m/s, 0.9 m/s의 풍속이 측정되었다. 또한 4 m/s 이상에서는 모든 방풍망 내부로 바람이 유입되고 있음을 알 수 있었으며, 5 m/s에서는 Model V에서 최대 1.4 m/s의 풍속이 측정되었다.

측정되는 소음과 풍잡음의 차이가 10 dB(A) 이상 차이 나면, 풍잡음이 측정 소음 크기에 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다. David와 Hessler<sup>(1)</sup>가 수행한 풍속에 따른 풍잡음 실험결과(순수한 바람에 의한 소음)를 고려하면, 풍속이 5 m/s일 때 Model V의 풍잡음이 약 30 dB(A) 내외로 추정된다. 따라서, 소음 크기가 40 dB(A) 이상의 소음이 발생하는 현장에서 풍속이 5 m/s이라면, 이 방풍망을 취부하여 소음 측정할 수 있다. Fig. 2는 Model V의 추세선으로 분석한 결과이다. Model V의 경우 풍속이 7 m/s 일 때 방풍망 내부에서는 약 2 m/s 정도로 추정할 수 있다. David와 Hessler<sup>(1)</sup>가 수행한 풍속에 따른 풍잡음 실험결과를 고려하면, 풍잡음은 약 40 dB(A)로 확인되었다. 따라서 측정 대상이 되는 소음의 측정 소음도가 50 dB(A) 이상일 때는 이 방풍망을 사용하여 측정하는 것이 무난할 것으로 판단된다.

#### 4. 자유 음장에서의 강제 송풍 실험

인적이 드물고 암소음(background noise)이 크지 않은 정온한 장소를 선정하여, 자유 음장(콘크리트 바닥, 자연 바람의 유속이 1 m/s 이하인 상태)에서의 강제 송풍 실험을 실시하였다. 실험 방법은 Fig. 3과 같이 원형 덕트의 입구측에 대형선풍기와 무지향성 스피커를, 출구측에 마이크로폰과 풍속계를 바람이 수직 입사가 되는 방향으로 설치하여 실험을 수행하였다. 3 종류의 음원(백색잡음, 도로소음, 철도소음)을 사용하였고, 대형선풍기에 의한 바람의 세기(풍속)는 3가지 경우로 조절(출구측에서 각각 무풍(자연상태, 1 m/s 이내),

2 m/s, 5 m/s) 하였다. 출구측에 2개의 마이크로폰을 설치하는데, 한 개는 방풍망을 설치하지 않은 기준 마이크로폰(reference microphone)인 Mic-1이고 다른 하나는 방풍망을 설치한 Mic-2이다. 각 마이크로폰에서 약 60초 동안 측정된 평균 등가소음도(Leq)를 비교한다. 실험에는 파워 앰프에 내장된 백색 잡음, 경부고속도로 변에서 녹음한 도로 소음, 무궁화호와 전

철 1호선이 통과하는 경부선 변에서 녹음한 철도 소음을 사용하였다(Fig. 4 참조). 철도 소음의 경우, 녹음하는 동안(약 1분) 총 4대의 열차가 통과하였다.

4.1 소음원에 따른 방풍망에 의한 소음 저감

먼저 강제 송풍을 하지 않는 상태(자연상태 풍속 0 m/s ~ 1 m/s)에서 소음원의 종류에 따른 소음 변화를 확인하였다. Table 4는 Mic-1과 Mic-2를 비교하여 그 차이를 전체(overAll) 소음 크기로 나타낸 것이다. 먼저 Mic-1과 Mic-2의 마이크로폰에 모두 방풍망을 설치하지 않은 상태에서의 소음차(Mic2-Mic1)를 기준으로 Mic-2에 방풍망을 설치한 후의 차이를 비교하여 분석하였다. Model III에 대하여, 백색 잡음(white noise)인 경우 소음이 가장 많이 감소하였고 도로소음과 철도소음 순인 것으로 나타났다. 소음 변화량에서는 Model III를 제외하고 ±0.3 dB 이하로 소음의 변화가 크지 않은 것으로 보아 소음원에 따른 전체 소음 크기의 변화는 크지 않은 것을 알 수 있다.

소음원 종류에 따라 주파수별 차이를 확인하기 위해 1/3 옥타브(1/3 octave frequency) 분석을 수행하였다. Fig. 5는 도로 소음의 중심주파수별 소음 변화량을 방풍망의 종류에 따라 나타낸 것이다. Model III(지름이 큰 방풍망)를 제외하고 방풍망 설치에 따른 주파수별 소음의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

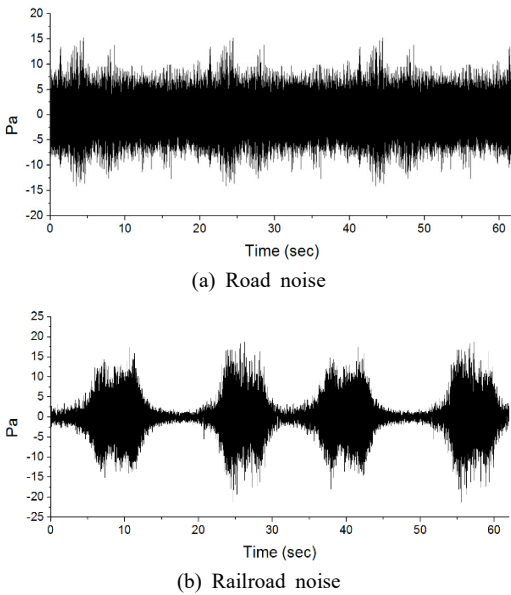


Fig. 4 Noise sources used for test

Table 4 Noise reduction due to windscreen depending on noise source

Source		Section											
		None		Model I		Model II		Model III		Model IV		Model V	
		Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2
Road	OL	95.67	96.56	95.36	96.25	94.96	95.96	95.15	95.50	95.21	95.83	93.39	94.37
	Mic2-Mic1	0.89		0.89		1.00		0.35		0.62		0.98	
	Difference <sup>※</sup>	-		0.00		0.11		-0.54		-0.27		0.09	
Rail road	OL	82.20	84.38	82.96	84.99	82.98	85.09	81.94	84.06	81.76	83.87	81.91	83.97
	Mic2-Mic1	2.18		2.04		2.11		2.12		2.11		2.06	
	Difference <sup>※</sup>	-		-0.14		-0.07		-0.05		-0.07		-0.12	
White noise	OL	98.63	99.78	98.32	99.29	98.80	100.04	98.34	98.51	98.59	100.04	98.67	99.77
	Mic2-Mic1	1.15		0.97		1.24		0.17		1.45		1.09	
	Difference <sup>※</sup>	-		-0.18		0.09		-0.98		0.30		-0.05	

※ Difference : [Model I, II, III, IV, V(Mic2-Mic1)] - [None (Mic2-Mic1)]

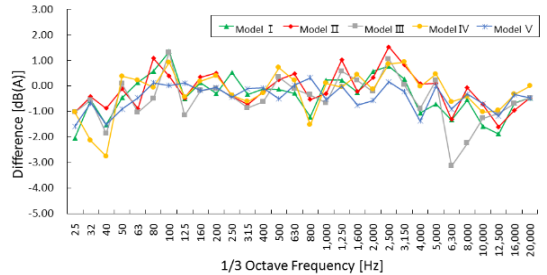
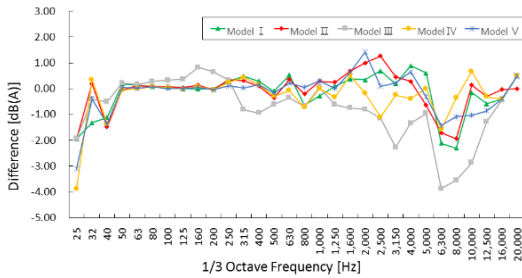
다만, Model III의 경우 6300 Hz 이상의 고주파수 대역에서 소음 감소량이 크게 나타났다. 이는 방풍망의 지름이 큰 것에서 기인한 것으로 추정되므로 고주파가 많은 현장의 경우는 지름이 큰 방풍망을 사용하는 것을 지양해야 할 것으로 판단된다.

**4.2 소음 크기에 따른 방풍망에 의한 소음 저감**

소음원의 크기에 따른 풍잡음 변화를 확인하였다. Table 5는 소음원의 크기를 70 dB(A)~100 dB(A)로 변화하였을 때 방풍망 설치 여부에 따른 소음 차이를 전체(overall level: OL) 소음값으로 나타내었다.

Model I, II, IV, V의 경우는 방풍망 설치에 따른 풍잡음 변화가 최대 ±0.4 dB 전후로 크지 않은 것으로 나타났으나 Model III의 경우 최대 -0.98 dB로 소음원의 크기가 증가할수록 방풍망에 의한 소음변화량이 감소하는 것으로 나타났다.

또한 소음원의 크기에 따른 측정된 소음 변화가 주파수별로도 발생되는지 확인하기 위해 1/3 옥타브 (1/3 octave) 분석을 수행하였다. Fig. 6은 중심주파수별 소음 변화량을 방풍망의 종류에 따라 나타낸 것이다. 그 결과 Model III을 제외하고 소음원의 크기가 변하더라도 방풍망 설치에 따른 주파수별 소음도의



**Fig. 5** Noise reduction due to windscreen for road noise

**Fig. 6** Noise reduction due to windscreen for white noise (70 dB(A))

**Table 5** Noise reduction due to windscreen depending on the magnitude of white noise

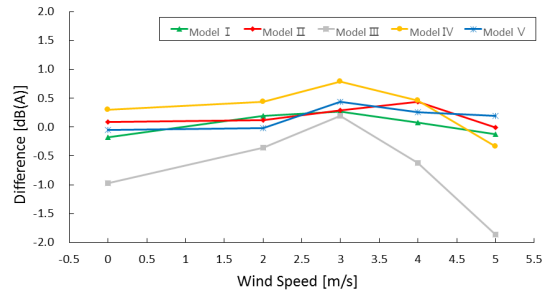
Magnitude		Section											
		None		Model I		Model II		Model III		Model IV		Model V	
		Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2
70 dB(A)	OL	68.66	70.72	68.42	70.06	68.42	70.60	68.24	69.99	68.44	70.84	68.74	70.40
	Mic2-Mic1	2.06		1.64		2.18		1.75		2.40		1.66	
	Difference*	-		-0.42		0.12		-0.31		0.34		-0.40	
80 dB(A)	OL	79.71	81.67	79.78	81.60	79.61	81.85	79.45	81.06	79.70	81.68	79.55	81.71
	Mic2-Mic1	1.96		1.82		2.24		1.61		1.98		2.16	
	Difference*	-		-0.14		0.28		-0.35		0.01		0.20	
90 dB(A)	OL	89.44	91.44	89.60	91.24	89.25	91.53	89.29	90.59	89.40	91.60	89.32	91.42
	Mic2-Mic1	2.00		1.64		2.28		1.30		2.20		2.10	
	Difference*	-		-0.37		0.28		-0.70		0.20		0.10	
100 dB(A)	OL	98.63	99.78	98.32	99.29	98.80	100.04	98.34	98.51	98.59	100.04	98.67	99.77
	Mic2-Mic1	1.15		0.97		1.24		0.17		1.45		1.09	
	Difference*	-		-0.18		0.09		-0.98		0.30		-0.05	

\* Difference : [Model I, II, III, IV, V(Mic2-Mic1)] - [None (Mic2-Mic1)]

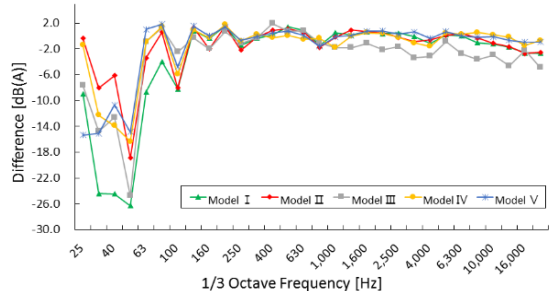
차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 대상 소음이 70 dB(A) 이상인 환경에서는 일반적으로 많이 사용하는 지름이 10 cm 이하의 방풍망을 사용한다면 소음 측정결과에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

**4.3 풍속에 따른 풍잡음의 변화**

백색 잡음(white noise)을 음원으로 이용하여 풍속이 변화할 때 방풍망별 소음 차이를 확인하기 위해 출구측에서 2 m/s ~ 5 m/s가 발생되도록 선풍기의 회전 속도를 조절하였다. 측정된 소음 결과(Table 6과 Fig. 7)를 살펴보면, 풍속이 3 m/s 일 때까지 상대적으로 풍잡음이 증가하다가 4 m/s 이상으로 올라가면 오히려 풍잡음이 감소하는 것으로 나타났다. 다만 Model II 방풍망은 4 m/s까지 소음이 증가하였다. Fig. 8은 5 m/s의 바람이 불 때의 측정된 소음을 1/3옥타브(1/3 octave)로 분석한 결과를 나타내고 있다. 바람이 불지 않을 때와 비교하여, 모든 방풍망에서 50 Hz 이하의 저주파대역에서는 방풍망에 의한 풍잡음 저감이 컸다.



**Fig. 7** Difference in noise due to changes in wind



**Fig. 8** Frequency characteristics of windscreens for wind speed of 5 m/s

**Table 6** Noise reduction due to windscreen depending on the wind speed

Wind speed of fan	Section	Section											
		None		Model I		Model II		Model III		Model IV		Model V	
		Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2	Mic-1	Mic-2
0 (0~1)	OL	98.63	99.78	98.32	99.29	98.80	100.04	98.34	98.51	98.59	100.04	98.67	99.77
	Mic2-Mic1	1.15		0.97		1.24		0.17		1.45		1.09	
	Difference※	-		-0.18		0.09		-0.98		0.30		-0.05	
2	OL	99.33	100.85	98.93	100.65	98.96	100.59	99.12	100.28	98.90	100.85	99.30	100.80
	Mic2-Mic1	1.52		1.71		1.64		1.16		1.95		1.50	
	Difference※	-		0.19		0.12		-0.36		0.44		-0.02	
3	OL	99.10	100.30	99.24	100.71	99.19	100.69	98.78	100.18	99.08	101.07	99.19	100.84
	Mic2-Mic1	1.21		1.47		1.49		1.40		1.99		1.65	
	Difference※	-		0.27		0.29		0.20		0.78		0.44	
4	OL	99.03	100.38	99.15	100.58	99.16	100.95	99.38	100.10	99.19	101.01	99.18	100.79
	Mic2-Mic1	1.35		1.43		1.79		0.73		1.82		1.61	
	Difference※	-		0.08		0.44		-0.63		0.46		0.26	
5	OL	99.15	100.83	99.19	100.75	99.33	101.00	99.22	99.04	99.56	100.90	99.00	100.88
	Mic2-Mic1	1.68		1.56		1.68		-0.18		1.35		1.87	
	Difference※	-		-0.12		0.00		-1.86		-0.33		0.19	

※ Difference : [Model I, II, III, IV, V(Mic2-Mic1)] - [None (Mic2-Mic1)]

### 5. 실제 현장에서의 풍잡음 실험

도로에 차량이 정상적으로 통과하고 풍속이 발생하는 현장에서 소음을 측정하였다. 도로 끝단으로부터 20 m 거리, 도로 지면으로부터 4 m 높이에서 측정하였으며, 소음계(sound level meter) 2개와 풍속 센서를 설치하여 초당 데이터를 취득하였다. 해당 도로는 제한 속도가 80 km/h인 왕복 4차선(주행 차선 기준) 아스콘포장 도로이다. Fig. 9는 현장 측정시 구성한 실험 장치의 설치 사진이다.

실제 차량이 통행하고 있고 풍속이 랜덤하게 발생할 때 소음을 측정하였다. 방풍망을 설치한 소음계와 설치하지 않은 소음계를 동시에 약 30분 이상 계속하여 초당 및 분당 등가소음도( $L_{Aeq}$ , 식 (1) 참조), 순간 및 평균 풍속을 분석하였다. 먼지 차량이 통과하지 않거나 멀리서 차량 소리가 들리는 경우(방풍망이 설치된 소음계의 초당 소음도가 50 dB(A) 이하)의 데이터를

이용하여 방풍망과 풍속의 관계를 추정하였다. Table 7과 Table 8, 그리고 Fig. 10에서 방풍망을 설치하고 측정한 소음과 방풍망을 설치하지 않고 측정한 초당 소음의 차이를 계산하여 풍잡음의 추세선을 도출하고 풍속별 방풍망의 영향을 추정하였다. 그 결과 방풍망 유무에 따라 풍속이 5 m/s인 경우 13.5 dB(A)~15.6 dB(A), 7 m/s인 경우 20.5 dB(A)~23.1 dB(A) 소음이 저감한 것으로 추정되었다. 이는 바람에 의한 풍잡음이 그만큼 증가한다는 의미이고, 방풍망의 효과로 볼 수 있다: 등가소음도

$$L_{Aeq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \right) \int 10^{L_A(t)/10} dt \tag{1}$$

다음으로 방풍망을 설치한 소음계와 방풍망을 설치하지 않은 소음계의 분당 등가소음도 차를 풍속별로 비교하고 추세선으로 식을 도출하였다. Table 9와 Table 10, 그리고 Fig. 11에서 방풍망별 풍잡음 추세선을 도출하고 풍속별 방풍망의 효과(방풍망

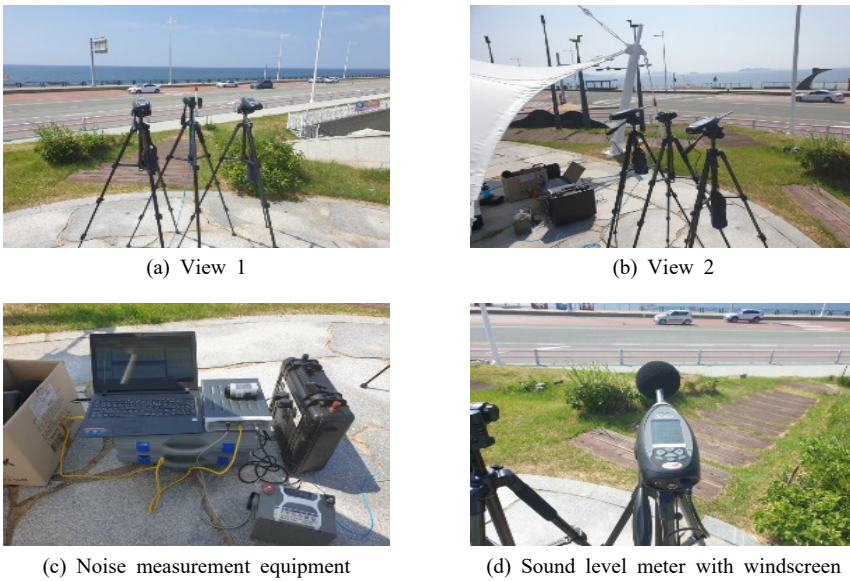


Fig. 9 Experimental setup to measure road noise in the real field

Table 7 Trend line of noise level (SPL<sub>s,ls</sub>) under 50 dB(A) in the outdoor noise test

	Windscreen				
	Model I	Model II	Model III	Model IV	Model V
Trend line	$Y = 3.0011X + 0.4536$	$Y = 3.0058X - 0.5226$	$Y = 3.7839X - 3.3678$	$Y = 4.0125X - 6.5917$	$Y = 3.1254X - 1.3727$

※ X = Wind speed, Y = SPL (sound pressure level)

**Table 8** Noise difference (SPL<sub>1s</sub>) due to windscreen depending on wind speed in the outdoor noise test

Wind speed [m/s]	Windscreen				
	Model I	Model II	Model III	Model IV	Model V
4	12.5	11.5	11.8	9.5	11.1
5	15.5	14.5	15.6	13.5	14.3
6	18.5	17.5	19.3	17.5	17.4
7	21.5	20.5	23.1	21.5	20.5
8	24.5	23.5	26.9	25.5	23.6

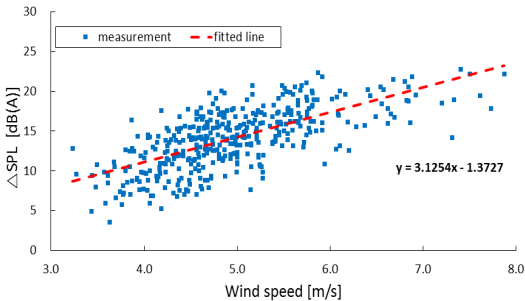
**Table 10** Noise difference ( $\Delta Leq_{1min}$ ) due to windscreen depending on wind speed in the outdoor noise test

Wind speed [m/s]	Windscreen				
	Model I	Model II	Model III	Model IV	Model V
4	0.1	0.1	2.0	0.3	0.9
5	2.0	2.2	3.4	2.2	2.2
6	4.0	4.2	4.9	4.1	3.6
7	6.0	6.3	6.4	6.0	5.0
8	7.9	8.4	7.8	7.9	6.4

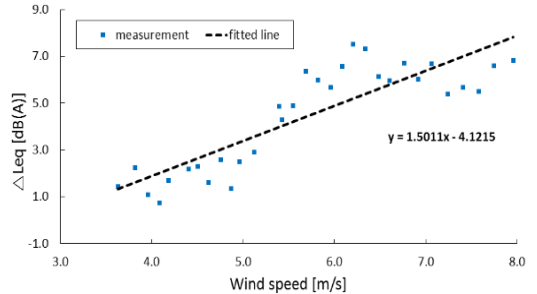
**Table 9** Trend line of noise level ( $\Delta Leq_{1min}$ ) in the outdoor noise test

	Windscreen				
	Model I	Model II	Model III	Model IV	Model V
Trend line	Y = 2.012X - 8.0708	Y = 2.0807X - 8.2389	Y = 1.5011X - 4.1215	Y = 1.9856X - 7.7882	Y = 1.3789X - 4.6478

※ X = Wind speed, Y = SPL (sound pressure level)



**Fig. 10** Noise difference (SPL<sub>1s</sub>) due to windscreen (Model I) depending on wind speed in the outdoor noise test



**Fig. 11**  $\Delta Leq_{1min}$  of outdoor noise test – Model III

미설치된 소음계의 등가소음도와 방풍망 설치된 소음계의 등가소음도 차)를 산정한 결과 소음도 차이는 평균 풍속이 5 m/s 정도일 때는 2.0 dB(A) ~ 3.4 dB(A), 7 m/s 정도일 때는 5.0 dB(A) ~ 6.4 dB(A)로 나타났다. 즉, 등가소음도가 60 dB(A) ~ 70 dB(A) 정도의 현장에서는 방풍망의 풍잡음 저감 효과는 풍속이 5 m/s 정도일 때 약 3 dB(A) 내외, 7 m/s 정도일 때 약 6 dB(A) 내외임을 알 수 있다. 즉, 순간적인 풍속에 따른 풍잡음은 크게 발생되나 평균적인 풍잡음은 상대적으로 크지 않은 것으로 분석되었다.

## 6. 결 론

방풍망의 풍잡음 저감효과를 확인하기 위해 다양한 실험을 진행하였다. 먼저 방풍망 내부에 전달되는 풍속을 확인한 결과 풍속이 1.9 m/s(약 2 m/s)일 때까지는 방풍망이 바람의 유입을 잘 막았지만, 4 m/s 이상에서는 모든 방풍망 내부에 풍속이 계측되어 바람이 방풍막 내부로 충분히 유입되고 있음을 알 수 있었다. 문헌자료의 풍잡음 실험결과와 비교하였을 때 모든 방풍망은 풍속이 5 m/s일 때 측정소음도가 40 dB(A) 이상이 되는 조건에서 소음 측정이 가능함을 확인하였다. 또한 방풍망의 지름 및 PPI의 사양에 따라 그

성능이 다르다는 것을 확인하였다. 다만, 이 실험은 실내에서 수행되어 벽체와 실내 내장품 등에 의한 바람 반사가 포함되어 있는 한계가 있기에, 방풍망의 특성을 파악하는 기초 자료라 할 수 있다.

다음으로 강제 송풍 실험을 실시하였다. 소음원의 종류(백색 잡음, 도로 소음, 철도 소음)에 따라 소음도 변화를 확인한 결과 지름이 20 mm인 Model III 방풍망을 제외하고 일반적으로 사용되고 있는 Model I, II, IV, V 방풍망은 소음원의 종류에 따른 풍속 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 소음원의 크기를 70 dB(A)~100 dB(A)로 변화하였을 때, 풍속에 따른 소음 변화도 5 m/s 이내에서는 전체 소음 값에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 다만, 주파수 분석을 통해 확인한 결과 50 Hz 이하의 저주파 대역에서 방풍망에 의한 소음 저감이 크게 발생한다는 것을 알 수 있었고, 지름이 큰 Model III 방풍망은 6300 Hz 이상에서 소음 저감이 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다.

마지막으로 차량이 빈번히 통행하는 현장에서 초당 소음도 및 분당 등가소음도를 측정하여 풍속에 따른 방풍망 효과를 확인하였다. 그 결과 등가소음도가 60 dB(A)~70 dB(A)가 되는 현장에서는 풍속이 5 m/s 정도일 때 순간적인 소음은 13 dB(A) 이상 증가하나 평균화된 등가소음도( $L_{eq}$ )는 3 dB(A) 정도 증가하는 것으로 확인되어 시간 평균된 등가소음도의 증가는 순간적인 바람에 의한 소음의 증가만큼 크게 측정되지 않는 것으로 나타났다. 다만, 실제 현장에서의 실험은 풍속의 변화 뿐만 아니라 빈도, 강도, 방향, 대기 상태 등 다양한 조건이 변화되어 결과의 도출에 한계가 있으므로 값의 정확성을 가지기 보다는 경향을 파악하는데 주 목적이 있다고 하겠다.

국내에서는 대부분의 소음 측정에서 등가소음도( $L_{eq}$ )를 평가 단위로 선정하고 있고, 측정시 제한 풍속을 5 m/s로 하고 있다. 5 m/s를 초과할 때 방풍망 내부로 들어오는 풍속이 증가하여 풍잡음을 일으키는데, 실제 외부 현장에서는 풍속과 소음이 계속해서 변화하므로 등가소음도( $L_{eq}$ )에 대한 보정값을 산정하기에는 한계가 있음을 확인하였다. 따라서, 풍속이 5 m/s를 초과할 경우 소음 측정은 지양하는 것이 타당하며, 옥외에서는 방풍망을 설치하여 측정을 수행하여야 측정의 정확성을 유지 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 향후 이러한 현장 특성(풍속과 소음의 지속적인 변화)을 고려하여 무향실에서의 실험을

수행한다면 현장에서 적용할 수 있는 정확한 풍잡음 특성을 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- (1) David, M. Hessler, P. E. and INCE, 2009, Wind Tunnel Testing of Microphone Windscreen Performance Applied to Field Measurements of Wind Turbines, Third International Meeting on Wind Turbine Noise, pp. 5-9.
- (2) Kim, J. S., 2012, Noise Vibration Engineering, Vol. 3, Sejinsa, Seoul, South Korea, pp. 180-192.
- (3) Rion, Technical Notes Sound Level Meter NL-42/NL-52, Japan, pp. 32-35.
- (4) 01dB, Wind Noise Experimental Tests Results, France, pp. 1-8.
- (5) Lee, J. W., Kwon, M. H., Kim, S. M. et al., 2017, Study on Improvement of Prediction and Measurement Method for Noise by a Wind Power Plant, pp. 16-19.
- (6) Sipei, Z., Matthew, D and Eva, C, Xiaojun Q., Ian, B. and Jacob, L., 2017, On the Wind Noise Reduction Mechanism of Porous Microphone Windscreens, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 142, No. 4, pp. 2454-2463.
- (7) David, M. and Hessler, P. E., INCE, 2009, Wind Tunnel Testing of Microphone Windscreen Performance Applied to Field Measurements of Wind Turbines.
- (8) Lee, J. W., Kang, Y. K., Park, H. K. et al., 2018, Analysis of Wind Noise Control Performance of the Windscreen According to Wind Speed, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 184.
- (9) Jung, I. L., 2020, Influence and Countermeasures of Noise, Vol. 1, Donghwakisu, Paju, South Korea, pp. 305-307.
- (10) Jung, I. L., Kim, J. Y., Yoon, S. C. and Lee, T. H., 2009, Latest Noise, Vibration, Sinkwangmunhwasa, Paju, South Korea.
- (11) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 2000, Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, John Wiley & Sons.
- (12) Lee, J. W., 2020, Engineering Vibration Interpretation, Kyobomunko, Seoul, South Korea.
- (13) Kim, Y. H. and Nam, K. Y., 2013, Lecture Notes on Acoustics, Vol. 2, Cheongmungak, Paju, South Korea.
- (14) Kim, C. H., Kang, H. J. and Jang, T. S., 2018,

Pass-by Noise Considering for Highway Noise Debaterments, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 184.

(15) Kim, K. M., Kang, W. U. and Lee, J. E., 2018, A Study on Comparative the Assessment Method of Highway Traffic Noise, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Abstracts of the KSME Annual Conference, pp. 1224~1228.

(16) Kim, W. J., Lee, W. and Choi, J. S., 2017, Study on Shear Layer Correction of Microphone Array Measurement in the Wind Tunnel Test, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 92~96.

(17) Kim, B. S., Chi, C. H. and Choi, H. C., 2007, A Study on Examination of Propriety about Leq24 in Road Traffic Noise Environment Standard Evaluation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 274~281.

(18) Kim, C. H., Kang, H. J., Jang, T. S. and Kim, J. H., 2019, Considerations of Road Noise Estimation Method for Traffic Noise Mitigation, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 304.

(19) Kim, K. M., Hong, J. H., Lee, C. H. et al., 2019, The Error Analysis of Highway Surface Measurement Noise, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 329.

(20) Jung, S. S., Jung, B. S., Seo, J. G. and Jun, S. J., 2009, Evaluation of the Acoustical Characteristics of a Windscreen for Various Wind Speeds, New Physics: Sae Mullik, Vol. 59, No. 4, pp. 343~348.

(21) Tachibana H., Yano, H. and Fukushima, A., 2013, Assessment of Wind Turbine Noise in Immission Areas, 5th International Conference on Wind Turbine Noise.



**Young Jin Lee** received the B.S. degrees in mechanical engineering from Suncheon University in 2004. Currently, he is a graduate student at Ajou University and a noise and vibration PE. He is now working as a noise and vibration engineer at

Korea Noise and Vibration Institute.



**Jin Woo Lee** has been a Professor of Mechanical Engineering at Ajou University since 2009. His research interests are in the area of vibrations, acoustics, acoustic and vibration metamaterial, topology optimization based design and fluid-structure interactions of microcantilevers for RF-MEMS and AFM. His Ph.D. is from the School of Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University in South Korea in 2003. He worked with Samsung Electronics Company from 2003 to 2006 and studied as a post-doctoral research associate at Seoul National University from 2006 to 2007. From 2007 to 2009, he was a postdoctoral research associate of Mechanical Engineering at Purdue University, West Lafayette, IN, USA.



## 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 인정한 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<sup>(1)</sup>...  
(2) ... solved by the Rayleigh-Ritz method<sup>(2)</sup>.
- (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.

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 저작권이 사단법인 한국소음진동공학회에 속함을 표시하여야 한다.
- (2) 논문을 상품화하기 위하여 논문에 대한 권리를 영리단체에 양도할 수 없다. 단, 1(1)의 권리를 행사하는 경우에는 그렇지 아니하다.

3. 저작권의 소유 및 서명에 대한 기타 조건

- (1) 저자 중 1인(논문에 대한 책임을 질 수 있는 저자)이 모든 저자와 이들 저자가 속한 기관 또는 단체의 저작권 담당자를 대표하여 본 저작권 양도 동의서에 서명하여야 한다.
- (2) 본 저작권 양도 동의에도 불구하고 대한민국 정부 또는 연구비를 지원한 기관 및 단체가 본 논문에 대한 저작권을 행사하고자 하는 경우에는 그 행사를 제한하지 아니한다.
- (3) 본 저작권 양도 동의서에 서명함으로써 저자는 본 논문이 학술대회에서의 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 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 윤리식을 가지고 권위, 명예, 위업을 지킬 수 있도록 정직하고 공정하게 행동한다.

Authorship | 저자의 자격

It is recommended for every author including the first and corresponding author that authorship be based on the following 4 criteria : 1. Substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; AND 2. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content; AND 3. Final approval of the version to be published; AND 4. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved. | 논문의 저자가 되기 위해서는 아래 4개의 기준을 모두 충족하여야 한다. 이 기준은 제1저자, 교신저자를 포함한 모든 저자를 대상으로 한다. 1. 연구 논문의 구상, 설계, 데이터의 획득과 분석, 해석에 실제로 기여한 자, 2. 논문의 초안을 작성하거나 논문의 주요 내용을 학술적으로 개선한 자, 3. 최종 원고의 출판에 동의한 자, 4. 논문 내용의 정확성과 진실성에 대한 의문이 있을 경우 대응 책임에 동의한 자

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. 한국소음진동공학회논문집에 게재된 논문은 이후 타 잡지에 투고 또는 발표를 금한다.

Plagiarism | 표절

Authors must not have presented portions of another's work or data as their own under any circumstances. | 타인의 연구나 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 논문 원고는 편집팀(편집위원장, 편집이사)의 판단하여 적정성을 검토하여 채택불가 또는 논문 심사위원 3인을 선정하고, 해당편집이사는 접수 일로부터 10일 이내에 논문 심사위원에게 서류를 갖추어 논문심사를 의뢰한다. 의견교환 등 심사과정에 대한 전반적인 사항은 편집팀의 책임하에 논문 심사에 3인을 의뢰하여 논문 심사위원 중 2인 이상의 의견을 받아 최종판정 한다.

- The reviewer's name should not be disclosed during review process. If reviewers ask for exception, it might be accepted only under the editing team's decision. | 심사위원의 성명은 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, 학술대회발표논문 무료)를 납부해야 한다.



사단  
법인

한국소음진동공학회

The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

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