

광대역 소음저감을 위한 다중사이드브랜치 배열 최적화에 대한 연구

Study on Optimization of Multiple Side Branch for Reducing Broad-band Noise

오진우[†] · 이상권^{*}
Jin Woo Oh[†] and Sang Kwon Lee^{*}

(Received November 6, 2023 ; Revised March 21, 2024 ; Accepted March 21, 2024)

Key Words : Side Branch(사이드브랜치), Optimal Array(최적배열), Noise Reduction(소음저감), Destructive Interference(상쇄간섭), Broad-band Noise(광대역소음)

ABSTRACT

In modern society, noise problems occur because of various noise sources. Road noise is a representative noise source having a wide range of 500 Hz ~ 1600 Hz. Sound absorbing materials are generally used as noise reduction measures for broadband noise, but this has side effects, such as risk to the human body and environmental problems (recycling). In this study, a side branch was applied as a noise reduction measure to replace sound absorbing materials. The principle of side branch is to reduce noise through destructive interference inducing a waveform of the opposite phase according to the structural shape with original noise. A side branch has a reduction effect at the narrow band only, but it is possible to reduce broadband noise by arranging multiple side branches. Multiple side branches were designed to reduce road noise and the 12-stage side branch arrangement was optimized through simulation and experiment. By applying this optimized design to the product (diffraction noise reducer), the noise reduction effect was confirmed to be improved from 3.1 dB(A) to 4.1 dB(A). We expect to apply multiple side branches to various noise reduction devices.

기 호 설 명

- A : 진폭 [m]
- c : 음속 [m/s]
- dB : 소음의 단위
- dB(A) : 사람의 청감 특성을 보정한 소음도
- f : 주파수 [Hz]
- k : Wave number(= $\frac{2\pi}{\lambda}$)
- l : 사이드브랜치의 길이 [m]

- λ : 파장 [m]
- w : 각진동수(= $2\pi f$)

1. 서론

우리는 다양한 소음에 노출되어있고 일반적으로 그러한 소음은 특정대역에 집중되지 않고 넓은 주파수 대역으로 이루어져 있다. 이러한 특성을 가진 소음을 광대역 소음이라고 하며 대표적인 소음원으로는

[†] Corresponding Author ; Member, NSV Co., LTD, Researcher
E-mail : ozinu78@gmail.com
^{*} Member, Dept. of mechanical Eng., Inha University, Researcher

[‡] Recommended by Editor Wan Ho Cho
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

도로소음이 있다. Yeom은⁽¹⁾ 도로에서 다양한 차종에 의한 소음특성을 연구하였으며 한국도로공사는 고속도로 포장에 따른 표준화된 소음경향을 Fig. 1과 같이 제시하고 있다. 이 연구에서는 한국도로공사의 소음 경향을 기준으로 흡음재를 사용하지 않는 소음감쇠기의 최적화 연구를 진행하였다.

한국도로공사의 표준화된 도로소음은 1 kHz 대역에서 최대이며 ±3 dB 구간이 500 Hz ~ 1600 Hz로 다양한 대역에서 나타난다.

이러한 광대역 소음의 저감은 흡음재를 통한 방법이 효과적일 수 있으나 비산에 의한 위해성 및 훼손, 마모, 오염 등에 의한 저감효과 하락, 폐기 시 환경문제를 동반하고 있어 설계 및 유지관리에 유의해야 한다. 흡음 소재의 대체방안으로써 간섭형, 공명형의 소음저감장치를 적용할 수 있으나 설계 주파수 대역에 한정되어 효과가 나타나는 한계가 있다. 이러한 사이드브랜치의 협소한 저감대역의 특성과 광대역 소음에 대한 저감효과를 위해서 Kwak et al.은⁽²⁾ 유압펌프에 의한 소음저감을 위해 사이드브랜치를 설계한 바 있으며 Lee et al.은⁽³⁾ 사이드브랜치의 다중 배열에 의한 저감가능 설계가 가능함을 연구하였다. 이전 연구에서 사이드브랜치의 깊이, 배열 등을 대상 소음원에 최적화하여 설계하면 광대역 소음에 대한 대책방안이 될 수 있음을 확인했으며 이러한 설계과정에서 적용 제품, 대상 소음원 등 목적과 대상에 따라 최적화된 설계안이 필요하다.

이 논문에서는 간섭형 원리를 적용한 사이드브랜치를 다중으로 배열하고 해석과 실험을 통해 광대역 소음원 소음저감을 위한 최적설계를 수행하여 이를 도로소음저감을 위한 제품(소음감쇠기)에 적용하고

공인기간 시험을 통해 소음저감을 위한 대책으로써 성능 검증을 하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 이론적 배경

(1) 음의 간섭

음의 간섭은 보강간섭과 상쇄간섭으로 나뉠 수 있으며 보강간섭은 두 파동의 위상차가 일치할 때 파동에너지가 증폭되는 현상이며 상쇄간섭은 위상차가 반대인 경우에 파동에너지가 서로 상쇄(소멸)되는 현상이다. 이중 상쇄간섭효과를 이용하여 소음을 저감시킬 수 있다.

(2) 상쇄간섭

Feynman은⁽⁴⁾ 음향파동방정식을 소개하고 있고 일반적인 파동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

식 (1)의 파동방정식의 해는 식 (2)와 같다.

$$y = A \sin(kx - \omega t + \phi) \tag{2}$$

위상차가 ϕ 인 두 파동이 있을 때, 두 파동은 식 (3)과 같이 표기할 수 있으며 두 파장의 합성식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} y_1 &= A \sin(kx - \omega t) \\ y_2 &= A \sin(kx - \omega t + \phi) \end{aligned} \tag{3}$$

$$y = 2A \cos \frac{\phi}{2} \cdot \sin(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}) \tag{4}$$

식 (4)에서 $2A \cos \frac{\phi}{2}$ 항은 진폭에 해당하며 위상차가 $180^\circ(\pi)$ 이면 진폭이 0이 된다.

(3) 사이드브랜치

사이드브랜치는 Fig. 2와 같이 트랜치와 유사한 형상을 가지고 있으며 소음저감원리는 사이드브랜치에 입사된 파동을 반사시켜 원 파동의 반대위상을 유도

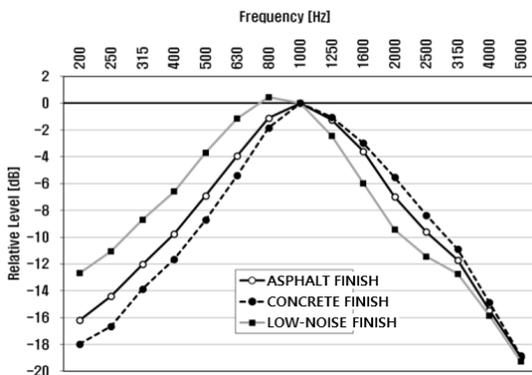


Fig. 1 Noise characteristic by road finish

함으로써 상쇄간섭효과를 발생시키는 것이다. 사이드 브랜치는 저감대상 주파수(f)에 따라 식 (5)와 같이 설계할 수 있다.

$$l = \frac{c}{4f} = \frac{\lambda}{4} \tag{5}$$

여기서, λ : 파장[m]

2.2 연구절차

이 연구는 기본설계, 덕트시험, 해석, 시제품제작 그리고 공인기관 평가 순서로 진행하였다.

(1) 다중배열 기본 설계

대상 소음원인 표준 도로소음의 주요 주파수 특성 대역을 고려하여 사이드브랜치 깊이를 다양하게 설계하였으며 초기 설계안은 Table 1과 같다.

최종 제품의 크기를 고려하여 12단계(stage)로 구성하였으며 주파수 특성에 맞춰 중주파 대역에 집중하여 사이드브랜치의 깊이를 설계하였다.

(2) 덕트 시험 시스템

최초 설계안의 실제 성능 확인과 보안을 위해 덕트 시험을 수행하였으며 시스템의 주요 제원은 Table 2, 시스템의 개요도는 Fig. 3과 같다.

소음측정지점은 시험시료(test sample) 하류에서 균등하게 분포한 덕트 내 3개 지점을 선정하였고 각 지점에서의 FFT 측정결과를 평균한 값으로 정리하였다.

다중 사이드브랜치 module은 3D PRINT를 이용하여 제작하였으며 시험시스템은 주변 환경에 대한 요소를 최소화하기 위해 당사 보유 무향실에 설치하였다. 시험장치와 sample 사진은 Fig. 4와 같다.

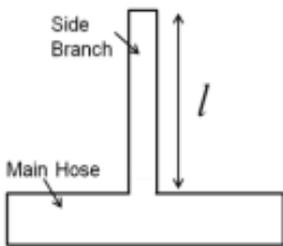


Fig. 2 The shape of side branch

(3) Simulation

다중 배열 최적화를 통한 제품설계를 위해 덕트시험 결과를 feed-back하여 추가 대책안을 설계하였으며 공인 성능시험 조건에 부합하도록 모델링하여

Table 1 Initial design of multi-side branch

Stage	Target band [Hz]	Depth [mm]*
1	1250	70
2	1000	73
3	1000	77
4	1000	82
5	1000	90
6	800	95
7	800	100
8	630	130
9	630	147
10	500	155
11	1250	200
12	1250	210

* Depth of side branch = $\frac{\lambda}{4}$

Table 2 Specification of duct test system

Item	Use	Specification
Duct	Path of noise	acryl
Anechoic room	Room for measurement	Amb.noise: 33 dB(A)
Speaker	Generating noise	over 89 dB(A)
Amplifier	Signal amplification	-
FFT analyzer	Noise measurement	B&K Type2250

* FFT Range: 350 Hz ~ 1250 Hz

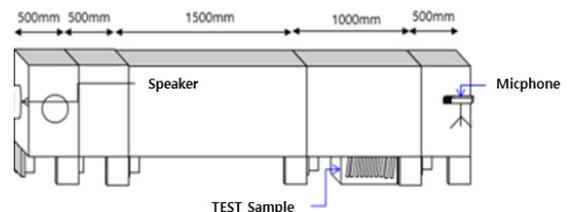


Fig. 3 Design of duct test system

simulation S/W(simcenter acoustic FE)를 통해 최적안을 검토하였다.

(4) 공인기관 시험

배열 최적화를 적용한 소음감쇠기 시제품을 제작하였으며 이를 국내 유일한 공인기관인 도로교통연구원(KECRI)에 감음성능 시험을 의뢰하였다.

공인기관 시험시설 및 측정위치는 Fig. 5와 같으며 시험품은 시설의 방음벽 상단부에 설치하여 가시선 하부 9개 지점에서 제품 설치 전과 후의 소음도 차이로 성능을 평가한다.

3. 연구 결과

3.1 다중배열 덕트시험

12단계의 사이드브랜치 배열을 변경하며 4개의 시험 module을 Table 3과 같이 제작하여 덕트시험을 수행하였다. 각 module 별 설계 방향은 다음과 같다.

- Module 1: 표준형상의 사이드브랜치 배열
- Module 2: 사이드브랜치 반사면(하부면) 구배를



Fig. 4 Figure of duct test system & test sample

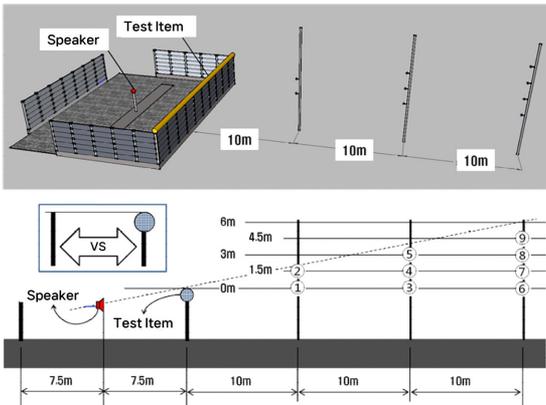


Fig. 5 Noise reduction test facility(KECRI)

통해 주파수 확장 효과 유도

Module 3: 사이드브랜치를 15° 경사 설계하여 입사면의 구배를 통한 주파수 확장 효과 유도

Module 4: 유사한 설계주파수를 가진 사이드브랜치를 이격배치하여 간섭효과 최소화

각 module별 덕트시험 결과는 module 설치 전과 후를 비교한 삽입손실(insertion loss)로 분석하였다.

(1) Module 1

측정결과는 Fig. 6과 같다. 저감효과는 1 kHz 미만에서 -5 dB(A) 이하로 크지 않으나 사이드브랜치의 다중배열을 통해 넓은 대역에서 저감효과가 나타나는 것을 확인하였다.

Table 3 Side branch alignment for duct test

Module	Design	Remark
1	Depth [mm] 70 73 77 82 90 95 100 107 115 120 210	Standard
2	Depth [mm] 70 73 77 82 90 95 100 107 115 120 210	Slope at bottom
3	Depth [mm] 70 73 77 82 90 95 100 107 115 120 210	Slope alignment
4	Depth [mm] 70 73 77 82 90 100 147 205 73 82 95 130 155 210	Separation by group

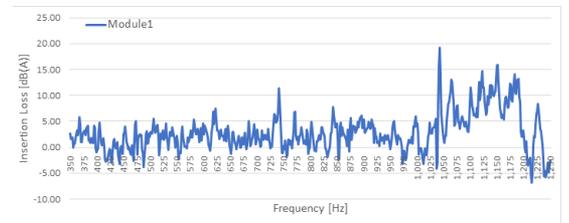


Fig. 6 Duct test result of module 1

저감효과 발생대역과 설계주파수와의 오차범위는 약 1% 수준으로 선행연구와 같이 설계주파수에서의 저감효과를 확인할 수 있었다. 저감효과는 주파수마다 상이하기는 하나 주요 대역에서 -4 dB(A) ~ -19 dB(A) 수준으로 측정되었다.

(2) Module 2

측정결과는 Fig. 7과 같으며 module 1과 비교하였다. 확장되는 주파수 범위는 2 Hz ~ 12 Hz 수준으로 가청대역의 주파수 대역을 고려하면 큰 효과는 나타나지 않았다. 저감효과는 module 1에 비해 일부 대역을 제외하고 전반적으로 상승하는 경향(그래프 표기 대역)이 측정되었다.

(3) Module 3

측정결과는 Fig. 8과 같으며 구배위치에 따른 분석

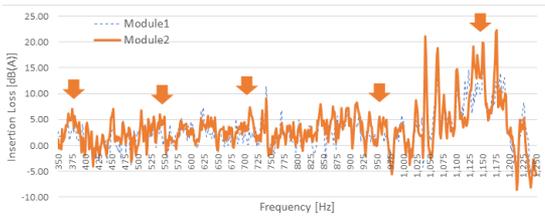


Fig. 7 Duct test result of module 2

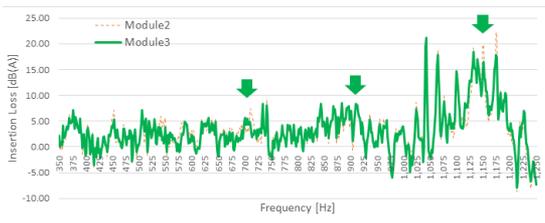


Fig. 8 Duct test result of module 3

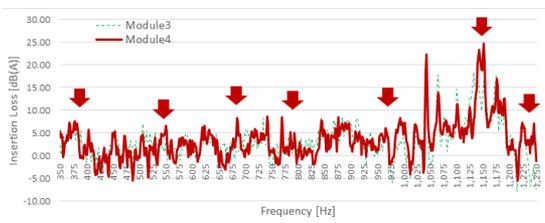


Fig. 9 Duct test result of module 4

을 위해 module 2와 비교하였다. module 2와 유사한 경향을 보이나 대역별 저감효과에서 증감의 변동이 상대적으로 감소(그래프 표기 대역)하여 소음원 특성이 변경되는 상황에서 안정적인 저감효과를 확보할 수 있었으며 module 1에 비해서는 1 kHz 대역 일부를 제외하고 전반적으로 개선된 저감효과가 측정되었다.

(4) Module 4

측정결과는 Fig. 9와 같으며 module 3에 비해 저감효과가 뚜렷하게 증가하는 구간(그래프 표기 대역)이 확인되었다. 특히, 1 kHz 대역의 설계 주파수에서 5 dB(A) 이상의 저감효과 상승이 측정되었다.

이는 유사한 설계 주파수를 가진 사이드브랜치가 인접한 경우 상호 간섭효과가 발생하여 저감효과가 감소한 것으로 판단된다.

결과적으로 저감효과와 소음원의 편차에 대한 안정적인 저감을 유지할 수 있는 module 4를 시제품 기본 설계안(standard)으로 선정하였다.

3.2 Simulation 최적화

Module 4의 결과를 바탕으로 최적화 방향을 수립하였고 Table 4와 같이 4개의 추가 배열을 설계하여 simulation을 수행 하였다.

덕트 시험결과와 제품적용시 simulation 결과는 일부 차이가 있으나 전반적인 예측결과는 측정결과

Table 4 Simulation case for optimization

Stage	Case				
	Standard	1	2	3	4
1	70	73	73	73	70
2	73	77	77	82	77
3	77	82	82	93	90
4	82	90	90	100	100
5	90	93	93	147	147
6	95	95	95	200	200
7	100	100	100	77	73
8	130	147	120	90	82
9	147	155	147	95	95
10	155	170	155	120	130
11	200	200	200	155	155
12	200	210	210	210	210

* Values means the depth [mm] of side branch

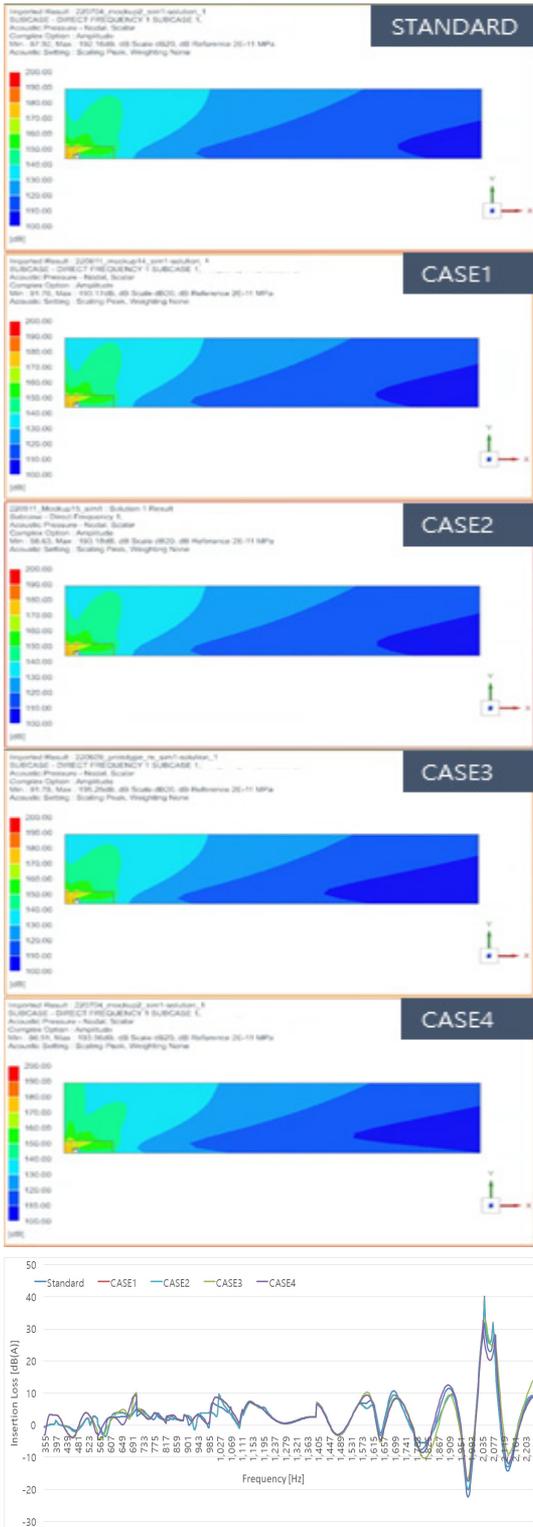


Fig. 10 Simulation result(5 cases)

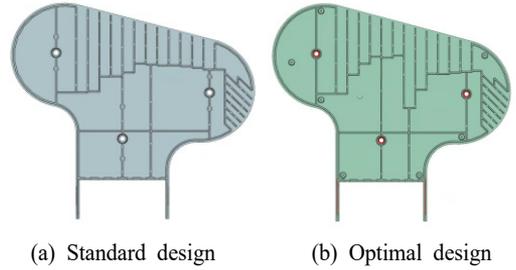


Fig. 11 Product applied multiple side branch

Table 5 Specification of test system

Road	Standard design	Optimal design
Asphalt	3.1 dB(A)	4.1 dB(A)
Concrete	3.4 dB(A)	4.2 dB(A)

와 유사한 경향성을 확인할 수 있었으며 case 간 예측결과의 차이는 크지 않으나 도로소음에 적용하였을 때, case 3의 경우 standard 대비 저감효과가 -0.3 dB(A) ~ -0.5 dB(A) 개선되어 case 중 최대 소음저감효과가 예측되었다.

Case별 simulation 결과는 Fig. 10과 같다.

3.3 최종모델 시험결과

사이드브랜치의 배열을 제품에 적용한 최종모델(시제품)은 Fig. 11과 같다.

해당 배열을 반영한 시제품을 제작하여 공인기관인 도로교통연구원에서 시험하였으며 기본설계(standard design)와 최적설계(optimal design)의 감음성능 성적서 결과는 Table 5와 같이 포장재에 따라 0.8 dB(A) ~ 1.0 dB(A) 개선됨을 검증하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 광대역 소음원에 대한 대책으로 흡음재를 대체하기 위해 다중 사이드브랜치의 최적화 설계를 수행하고 공인기관 시험을 통해 소음개선효과를 확인하였다. 최적설계를 위해 덕트 시험과 simulation을 수행하였으며 다양한 배열 조합을 검토한 결과 배열 최적화를 통해 기본설계안에 비해 3.1 dB(A)에서 4.1 dB(A)로 저감성능이 상승하여 약 25% 수준의 소음저감성능이 개선되었으며 이는 흡음재를 적용한 제품대비 동등이

상의 성능에 해당한다.

이 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 사이드브랜치는 협대역 소음에 유효한 소음저감장치이나 대상소음원의 주파수 특성을 고려한 다중 배열 설계를 통해 흡음재를 대체하여 광대역 소음원에 대한 대책으로 적용가능할 것으로 판단된다.

(2) 사이드브랜치를 경사 설계하여 주파수 확장효과 및 전반적인 소음저감효과의 개선을 확인하였다. 주파수 확장 효과는 최대 12 Hz 정도로 제한적이나 확장효과에 대한 효과는 확인할 수 있었다.

(3) 사이드브랜치 배열 설계 시 유사한 저감주파수를 가진 사이드브랜치가 인접하는 경우 간섭효과로 인해 저감효과의 감소가 측정 및 예측되어 가급적 이격된 배열로 설계하는 것이 효과적이다.

사이드브랜치 배열 설계 시 최적의 성능을 얻기 위해서는 소음원에 대한 정확한 특성파악이 선행되어야 가능하다. 변동성이 높은 소음에는 특성의 변동에 따른 저감성능의 변동성 또한 증가될 수 있어 이 연구의 기대 성능보다 낮은 성능을 나타낼 수 있으나 소음원의 다양한 특성을 고려한 다중 배열 설계를 통해 목적과 상황에 맞춰 기존 방음장치를 대체 또는 병행 적용하여 폭넓게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 한국환경산업기술원의 ‘2022 중소환경기업 사업화 지원사업’의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

(1) Yeom, D. I., 2008, A Study on the Propagation Characteristics of Road Traffic Noise in High-rise Apartment, Doctoral Dissertation, Chosun University, Gwangju.
 (2) Kwak, H. T., Kang, K. H. and Kim, J. H., 2014,

Introduction of Hydraulic Noise Reduction for Hydraulic Excavator with Side Branch, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 123.

(3) Lee, S. Y. and Lee, J. S., 2020, Analytic Model and Transmission Reduction Performance of Duct-type Acoustic Metamaterials based on Multiple Side-branch Resonators, Transactions of KSME, Vol. 44, No. 10, pp. 707~716.

(4) Feynman, R. P., 2013, Sound, the Wave Equation, The Feynman Lectures on Physics, Volume I, Chapter 47, California Institute of Technology, Pasadena, CA, United States.



Jin Woo Oh received his B.S and MS degrees in Environmental Engineering from University of Seoul in 2003 and 2005. He is working as a researcher in R&D department at NSV Co., LTD and studying as a Ph.D. candidate in mechanical engineering at Inha University.



Sang Kwon Lee studied in the Department of Mechanical Engineering at the Pusan National University, Pusan, Korea for B.S. In 1998, he received a Ph.D. degree in signal processing at the ISVR(Institute of Sound and Vibration Research) of the University of Southampton in U.K. He has continued the sound and vibration research in the department of mechanical engineering inha University since 1999. He worked in Hyundai Motor Company between 1984 and 1994 and researched Samsung Motor Company on 1998.