

# 음향블랙홀 보를 이용한 비틀림 진동 감쇠기의 설계 및 실험적 확인

## Design and Experimental Validation of Torsional Vibration Damper Using Acoustic Black Hole Beams

이 두 호<sup>†</sup> · 배 시 완<sup>\*</sup> · 김 선 용<sup>\*\*</sup>  
DooHo Lee<sup>†</sup>, Si Wan Bae<sup>\*</sup> and Sun-Yong Kim<sup>\*\*</sup>

(Received January 10, 2022 ; Revised March 2, 2022 ; Accepted March 18, 2022)

**Key Words :** Torsional Vibration(비틀림 진동), Design of Vibrational Damper(진동 감쇠기 설계), Acoustic Black Hole(음향블랙홀), Experimental Validation(실험적 검증)

### ABSTRACT

In this study, a novel type of torsional vibration damper was proposed and experimentally verified. The torsional vibration damper is composed of acoustic black hole (ABH) beams arranged in the outward radial direction and a base structure to fix the root of the ABH beam. The effective frequencies of the proposed torsional vibration damper are not limited to a narrow frequency range but all frequency ranges beyond a cut-off frequency. The proposed torsional vibration damper was fabricated and examined on a test-bed for torsional vibration. The experimental results showed that the proposed torsional vibration damper reduces all vibrational peaks in the magnitude generated owing to torsional modes.

### 기 호 설 명

- $a$  : 두께 구배에서 보의 최소 두께
- $a$  : 보의 두께 구배 계수
- $h$  : 두께 구배에서 보의 두께
- $h_0$  : 음향블랙홀 보 기저부 보의 두께
- $m$  : 보의 두께 구배 지수
- $x$  : 보 끝 단에서의 거리

### 1. 서 론

모터나 터빈, 자동차의 구동계와 같이 회전축을 갖고 있는 동작하는 구조물에서 비틀림 진동을 최소화

하는 것은 구조물의 성능 및 안전성 측면에서 매우 중요한 일이다. 최근에는 내연기관, 하이브리드 또는 전기차에서의 구동계 비틀림 진동 현상은 활발히 연구가 진행되고 있는 분야이다<sup>(1-5)</sup>.

구조물의 진동을 제어하고자 하는 방법으로는 전통적으로 구동축에 비틀림 진동 감쇠기(torsional vibration damper, TVD)를 설치하여 수동적인 제어 시스템을 구축하거나 능동적인 제어도 수행되고 있다. 비틀림 진동 감쇠기로는 전통적으로 플라이휠(flywheel)을 이용할 수 있지만 구동계의 관성이 커져서 빠른 응답을 요구하는 구동계에는 적합하지 않아서 조정된 비틀림 진동 감쇠기(tuned TVD)<sup>(6,7)</sup>나 원심

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, Dept. of Mechanical Engineering, Dongeui University, Professor  
E-mail : dooho@deu.ac.kr

<sup>\*</sup> Energy & Machinery Korea CO., Senior Researcher

<sup>\*\*</sup> Member, Ulsan College, Professor

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Jin Woo Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

진자 흡진기(centrifugal pendulum vibration absorber, CPVA)<sup>(8-12)</sup>를 적용하고 있다. 조정 TVD의 경우 조정된 주파수 영역에서 효과를 갖는다는 제한점이 있고 CPVA의 경우는 구동축의 조화가진 주파수와 연계된 넓은 영역에서의 효과가 기대된다는 장점이 있다<sup>(10)</sup>.

음향블랙홀(acoustic black hole, ABH)<sup>(13-15)</sup>은 웨이브의 진행방향 구조물에 두께의 구배를 주어서 진행파가 반사가 없도록 고안된 구조물이다. 음향블랙홀은 이상적인 경우 주파수 영역의 제약이 없이 넓은 영역에서 구조물의 진동저감에 효과를 얻을 수 있어 최근 많은 연구가 진행되고 있다<sup>(16-18)</sup>. 음향블랙홀을 이용하여 구조물의 진동저감에 응용은 보 구조물에 대한 적용은 물론 많은 연구에서 평판 구조물에 대한 저감효과를 이론적/실험적으로 보이고 있으며, 다양한 형태의 음향블랙홀 구조가 제안되고 있다<sup>(19-21)</sup>. 하지만 음향블랙홀 구조를 이용한 비틀림 진동 구조물에 적용한 예는 발표된 문헌에서 찾을 수 없다.

이 연구에서는 음향블랙홀 보 구조물을 이용하여 축의 비틀림 진동을 감쇠할 수 있는 감쇠기 구조를 제안하고 제작을 수행한 후, 가는 축으로 구성된 비틀림 진동계에 비틀림 진동 감쇠기를 적용하여 그 감쇠 성능을 실험적으로 평가한다.

## 2. 비틀림 진동 감쇠기의 설계 및 제작

### 2.1 음향블랙홀 보

음향블랙홀 보는 일반 보에 두께를 감소시키는 구배를 준 구조물을 말한다(Fig. 1). 보의 두께  $h$ 는 보의 끝단에서의 거리를  $x$ 라 할 때 식 (1)과 같이 변화하도록 조정한다.

$$h = ax^m + \alpha \tag{1}$$

여기서  $a$ ,  $m$ 과  $\alpha$ 는 상수이다.  $a$ 가 0인 경우  $m$ 이 2 이상이면 보를 이동하는 입사파는 보의 끝단으로 갈수록 점점 느려지고 끝단에서 속도가 0이 되어 반사되지

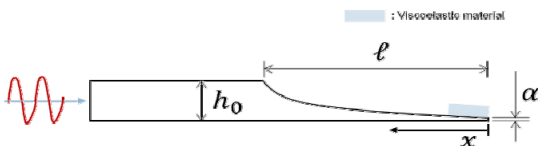


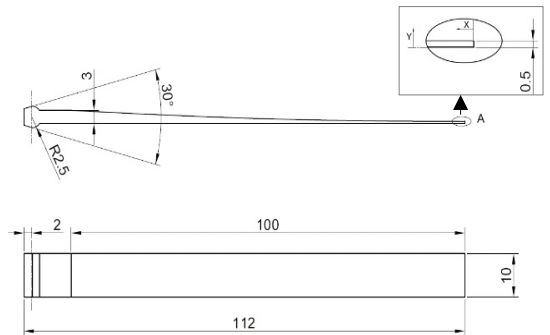
Fig. 1 Acoustic black hole beam

않는 것을 증명할 수 있다<sup>(15)</sup>. 실제 구조물을 제작하는 경우 보의 두께를 0으로 제작하기는 불가능하므로 제작 방법에 따라 최소 두께  $\alpha$ 를 부여하게 된다. 이 경우에도 보의 끝단에 감쇠물질을 이용하여 감쇠시키면 거의 동일한 효과를 얻을 수 있음이 알려져 있다<sup>(14)</sup>.

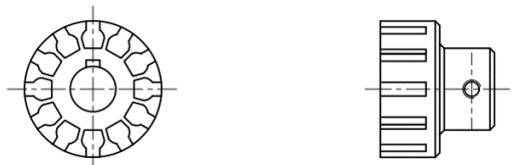
### 2.2 비틀림 진동 감쇠기의 설계

비틀림 진동은 축의 회전방향의 진동이므로 음향블랙홀 보를 이용하여 비틀림 진동 감쇠기를 설계하기 위해서는 축의 반경방향으로 음향블랙홀 보를 배치하는 것이 필요하다. 배치된 음향블랙홀 보는 축에 장착/탈착이 가능해야 하므로 비틀림 진동 감쇠기는 다수의 반경 방향 보와 이를 반경방향으로 배치한 후 축에 장착할 수 있는 허브 구조물(hub structure)로 구성하였다. 다수의 음향블랙홀 보가 허브 구조물에 장착된 비틀림 진동 감쇠기를 비틀림 진동 감쇠기 모듈이라고 정의하기로 한다.

허브 구조물에 장착될 음향 블랙홀 보는 Fig. 2와 같이 설계하였다. 음향 블랙홀 보는 허브에 고정될 기저부와 보의 두께 구배를 주는 부분으로 나뉘고 전체적인 형상은 Fig. 2(a)에 나타내었다. 두께 구배를 위한 식 (1)의 계수는 Table 1에 나타내었다.



(a) Acoustic black hole beam



(b) Hub structure

Fig. 2 Acoustic black hole beam and hub structure for torsional vibration damper

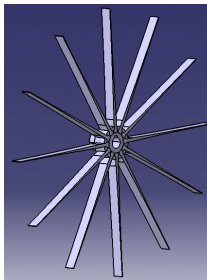
허브 구조물은 12개의 음향블랙홀 보를 장착할 수 있도록 구성하고 축에 고정을 위한 키와 고정볼트로 구성하였으며 자세한 형상을 Fig. 2(b)에 나타내었다. 음향블랙홀 보가 장착된 비틀림 진동 감쇠기 모듈을 Fig. 3(a)에 나타내었다.

2.3 비틀림 진동 감쇠기의 제작

2.2절의 비틀림 진동 감쇠기는 음향블랙홀 보의 정밀한 두께 조정을 금속 적층 제조(additive manufacturing, AM) 기법을 이용하여 제작하였다. 사용된 장비는 ConceptLaser™사의 MICUSING로 레이저 소결 적층 방식을 사용했다. 제작 장비의 작업공간은 최대 적층 두께는 20 μm ~ 80 μm였다. 파우더 재료는 CL20ES 스

Table 1 Coefficients for ABH beam thickness profile

Coefficient	Value
$l$ (mm)	100
$h_0$ (mm)	3
$\alpha$ (mm)	0.5
$m$	2.2
$a$	$2 \times 4.976 \times 10^{-5}$



(a) Assembled module



(b) Fabricated module

Fig. 3 Acoustic black hole module of torsional vibration damper

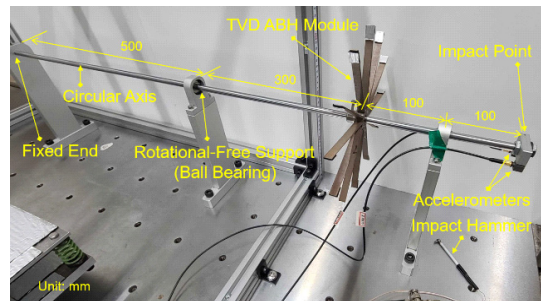
테인리스 스틸(stainless steel, SUS) 재료를 사용하였다. 음향블랙홀 보와 허브 구조물은 동시에 적층 제조하였으며 적층 제조 후 열처리를 수행하였다.

제작된 음향블랙홀 보와 허브 구조물은 연마 등의 후처리 작업을 거쳐 조립하였다. 조립시는 억지 끼워맞춤 상태이고 추가적인 작업을 수행하지는 않았다. 최종적으로 조립된 음향블랙홀 비틀림 진동 감쇠기 모듈을 Fig. 3(b)에 나타내었다.

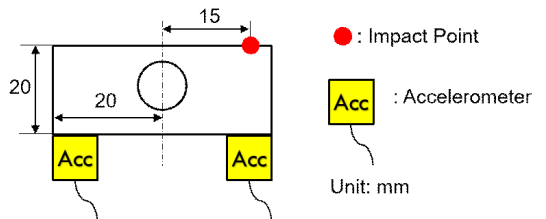
3. 비틀림 진동 감쇠기 성능 확인 실험

3.1 비틀림 진동계의 구성 및 대상 실험

제작된 비틀림 진동 감쇠기의 성능을 실험적으로 확인하기 위하여 가느다란 축으로 구성된 비틀림 진동계를 구성하였다. 10 mm 직경의 SUS로 1000 mm 길이의 원형 축을 수평으로 설치한 후 3곳에 지지대를 설치하고 철제 정반 위에 고정하였다. 보의 한 끝은 고정단 지지하여 회전이 불가하도록 하였다. 두 곳의 지지부는 볼베어링을 설치하여 회전 운동이 자유롭도록 하였다. 축의 자유단 끝단에는 40 mm 길이의 수평막대를 축에 고정하였다. 구성된 대상 실험장치를 Fig. 4(a)에 나타내었다.



(a) Experimental set-up



(b) Impact details

Fig. 4 Experimental set-up for torsional vibration damper

비틀림 진동응답을 측정하기 위하여 자유단에 설치된 수평막대의 한쪽 끝단을 충격망치로 가진하고 수평막대의 양쪽 하단에 각각 가속도계를 설치하여 가속도 응답을 측정하였다. Fig. 4(b)에 측정방향에서 본 가속도계의 부착과 충격점의 위치를 나타내었다. 응답의 측정은 SIEMENS Test.Lab™ 소프트웨어와 이동용 8채널 Scadas™ 프론트엔드(front-end)를 사용하여 진행하였고 주파수 응답 함수(frequency response function, FRF)를 수집하였다.

### 3.2 실험 결과 및 토론

앞 절에서 설명한 대상 실험장치를 이용하여 제안된 비틀림 진동 감쇠기의 감쇠 성능을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 정해진 위치에 제작된 음향블랙홀 비틀림 진동 감쇠기 모듈을 설치하고 FRF 측정 실험을 반복하였다. 첫 번째 실험은 모듈의 음향블랙홀 보의 끝단에 부착된 점탄성물질을 부착하지 않은 상태에서 충격점을 가진한 후 FRF를 측정하였다. 두 번째 실험은 모든 음향블랙홀 보의 끝단에  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 의 물성이 알려지지 않은 제진시트를 부착한 후 동일한 위치에서 FRF를 반복 측정하였다.

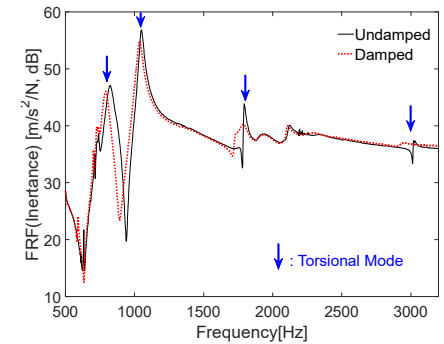
음향블랙홀 보의 끝단에 제진재를 부착하지 않은 경우는 입사파의 대부분이 반사하는 것으로 알려져 있다<sup>(22)</sup>. 이 연구에서 사용된 음향블랙홀 보의 경우도 제진재를 부착하지 않은 경우는 그 양은 주파수 의존적이지만 과반 이상이 반사되어 음향블랙홀 효과가 크지 않을 것으로 예상된다. 그러므로 첫 번째의 측정된 FRF를 비교 기준이 되는 비틀림 진동계로 가정하고 두 번째 상태의 FRF와 비교를 통하여 제안된 비틀림 진동 감쇠기의 효과를 확인한다. 두께변화를 주지 않은 보를 이용하여 비교구조물을 만들 수도 있으나 제진재를 부착한 경우와 동일한 질량 및 회전관성모멘트를 동시에 만족시키기 어렵고 달라진 보의 동특성으로 인한 변화는 제진재를 부착한 경우와의 비교보다 수월하지 않다. 제진재를 부착한 경우도 보의 동특성이 변화하지만 질량으로 인한 고유주파수의 저하와 일반적으로 음향블랙홀 효과의 관심영역을 벗어난 저주파에서의 효과로 나타나므로 효과의 예측이 가능하다.

실험장치에서 수평막대의 끝단을 가진하는 경우 측정응답은 축의 굽힘진동 모드와 회전진동 모드가 섞여서 나타나게 된다. 그러나, 가속도계로 측정된 응

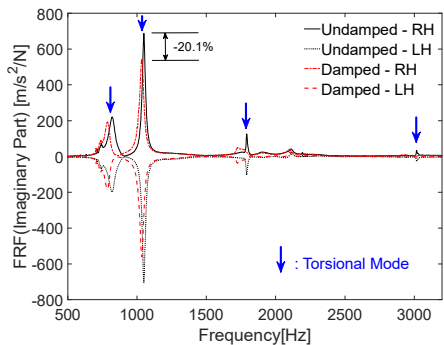
답의 위치는 수평막대에서 축의 중심에서 대칭 위치에 있으므로 비틀림 진동의 경우 왼쪽(left-hand, LH)과 오른쪽(right-hand, RH)의 응답이 반대방향 위상을 갖게 되어 구별이 가능하다.

측정된 응답을 Fig. 5에 크기와 허수부를 비교하였다. 허수부의 응답에서 수평막대 양단의 응답을 살피므로써 비틀림 진동 모드를 구별하였고 이를 그림에 표시하였다. 그림을 살펴보면 비틀림 진동 모드의 경우 제안한 비틀림 진동 감쇠기가 진폭을 효과적으로 줄이고 있음을 알 수 있고, 그 감소폭은 주 피크에서 20% 이상임을 볼 수 있다. 감쇠가 일어나는 주파수 영역을 살펴보면 측정된 모든 비틀림 진동 모드가 크게 감소하고 있어서 음향블랙홀 보의 특성을 잘 보여주고 있음을 알 수 있다.

이 연구에서는 음향블랙홀 보를 이용한 비틀림 진동 감쇠기의 개발에 중점을 두고 간단한 대상 확인 실험만을 목적으로 하고 있어서 실제 비틀림 진동계



(a) Magnitude



(b) Imaginary part

Fig. 5 Frequency response functions measured on the experimental set-up

를 구성하고 있는 관성의 크기에 따른 감쇠 효과를 관찰하기에는 제한적인 면이 있다. 또한, 회전축계의 회전운동시 효과도 관찰할 수 없는 한계가 있지만, 음향블랙홀 보를 이용한 비틀림 진동 감쇠기의 개발 타당성을 확인하는 데는 충분하다고 판단되며 복잡 비틀림 진동계에의 적용을 추후 연구로 추진하고자 한다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 음향블랙홀 보를 이용한 비틀림 진동 감쇠기를 설계하고 제작하여 간단한 비틀림 진동계에서의 대상 확인 실험을 통하여 그 성능을 확인하였다. 제안된 비틀림 진동 감쇠기는 다수의 음향블랙홀 보와 이를 반경방향으로 배치하고 축상에 설치할 수 있는 허브 구조물로 이루어져서 회전 진동계의 축에 고정하여 비틀림 진동을 감쇠하기 위한 장치이다. 정지 상태에서 수행한 비틀림 대상 시험 결과를 보면 제안한 비틀림 진동 감쇠기는 넓은 주파수 영역에서 비틀림 진동을 효과적으로 감쇠시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

향후 연구로 제안한 비틀림 진동 감쇠기를 회전하는 복잡 비틀림 진동계에 적용하여 그 효과를 검증하고 여러 변형된 감쇠기 형상의 영향도 평가하는 것을 계획하고 있다.

#### 후 기

이 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2021R1H1A2094395), 이에 감사드립니다.

#### References

(1) Lee, H. J. and Shim, J. K., 2022, Multi-objective Optimization of a Dual Mass Flywheel with Centrifugal Pendulum Vibration Absorbers in a Single-shaft Parallel Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Torsional Vibration Reduction, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 163, No. p. 108152.

(2) Sezgen, H. Ç. and Tinkir, M., 2021, Optimization of Torsional Vibration Damper of Cranktrain System Using a Hybrid Damping Approach, *Engineering Science*

and Technology, *An International Journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 959~973.

(3) Meli, M. I. T., Yemélé, D. and Leutcho, G. D., 2021, Dynamical Analysis of Series Hybrid Electric Vehicle Powertrain with Torsional Vibration: Antimonotonicity and Coexisting Attractors, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 150, p. 111174.

(4) Brancati, R., Rocca, E. and Russo, R., 2019, Gear Rattle Reduction in an Automotive Driveline by the Adoption of a Flywheel with an Innovative Torsional Vibration Damper, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, Vol. 233, No. 4, pp. 777~791.

(5) Lee, H. and Yoon, H.-S., 2020, Torsional Vibration Analysis of a Planetary Gear Type Antiresonant Vibration Isolator Using Transfer Matrix Method, Part II: Application to Automotive Powertrain, *Journal of Mechanical Science & Technology*, Vol. 34, No. 3, pp. 1005~1012.

(6) Nerubenko, G., 2013, Tuned Torsional Vibration Damper, *SAE Technical Paper*, No. 2013-01-1897.

(7) Rana, R. and Soong, T., 1998, Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers, *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, pp. 193~204.

(8) Jang, Y., Jayachandran, S. K. and Lee, S., 2019, Study on Centrifugal Pendulum DMF Performance in Automotive Application during the Driving, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 27, No. 10, pp. 771~776.

(9) Song, S.-Y., Shin, S.-C. and Kim, G.-W., 2016, Torsional Vibration Isolation Performance Evaluation of Centrifugal Pendulum Absorbers for Clutch Dampers, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 436~442.

(10) Abouobaia, E., Bhat, R. and Sedaghati, R., 2016, Development of a New Torsional Vibration Damper Incorporating Conventional Centrifugal Pendulum Absorber and Magnetorheological Damper, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27, No. 7, pp. 980~992.

(11) Borowski, V., Denman, H., Cronin, D., Shaw, S., Hanisko, J., Brooks, L. et al., 1991, Reducing Vibration of Reciprocating Engines with Crankshaft Pendulum Vibration Absorbers, *SAE Transactions*,

Vol. 100, pp. 376~382.

(12) Taylor, E., 1936, Eliminating Crankshaft Torsional Vibration in Radial Aircraft Engines, SAE Transactions, Vol. 31, pp.81~89.

(13) Chong, B. M. P., Tan, L. B., Lim, K. M. and Lee, H. P., 2017, A Review on Acoustic Black-holes (ABH) and the Experimental and Numerical Study of ABH-featured 3D Printed Beams, International Journal of Applied Mechanics, Vol. 9, No. 6, p. 1750078.

(14) Krylov, V. V., 2004, New Type of Vibration Dampers Utilising the Effect of Acoustic 'Black Holes', Acta Acustica United with Acustica, Vol. 90, No. 5, pp. 830~837.

(15) Mironov, M., 1988, Propagation of a Flexural Wave in a Plate Whose Thickness Decreases Smoothly to Zero in a Finite Interval, Soviet Physics Acoustics-USSR, Vol. 34, No. 3, pp. 318~319.

(16) Kim, S.-Y. and Lee, D., 2018, Numerical Analysis of Wave Energy Dissipation by Damping Treatments in a Plate with Acoustic Black Holes, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, No. 8, pp. 3547~3555.

(17) Zhao, L. and Semperlotti, F., 2017, Embedded Acoustic Black Holes for Semi-passive Broadband Vibration Attenuation in Thin-walled Structures, Journal of Sound and Vibration, Vol. 388, No. pp. 42~52.

(18) Shepherd, M. R., McCormick, C. A., Conlon, S. C. and Feurtado, P. A., 2017, Modeling and Optimization of Acoustic Black Hole Vibration Absorbers, The Journal of the Acoustical Society of

America, Vol. 141, No. 5, pp. 4034~4034.

(19) Zhou, T. and Cheng, L., 2022, Planar Swirl-shaped Acoustic Black Hole Absorbers for Multi-directional Vibration Suppression, Journal of Sound and Vibration, Vol. 516, p.116500.

(20) Kim, S.-Y. and Lee, D., 2020, Numerical Simulation of Characteristics of Wave Propagation and Reflection Coefficient in a Helix-acoustic Black Hole, Journal of Vibration and Control, Vol. 28, No. 5-6, pp. 615~625.

(21) Lee, J. Y. and Jeon, W., 2017, Vibration Damping using a Spiral Acoustic Black Hole, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 141, No. 3, pp. 1437~1445.

(22) Krylov, V. V. and Tilman, F. J. B. S., 2004, Acoustic 'Black Holes' for Flexural Waves as Effective Vibration Dampers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 274, No. 3~5, pp. 605~619.



**Dooho Lee** received the B.S. degree from Seoul National University, Korea in 1988, M.S. degree from KAIST, Korea in 1990, and the Ph.D. degree from KAIST, Korea in 1994. He had worked for Samsung Motors, Inc.(1995-99), and is currently a professor in Donggeui University. His research focuses on design optimization of structural-acoustic systems, uncertainty propagation in dynamic problems, and sound transfer characteristics in human hearing system.