

다목적 홀의 음향 최적화를 위한 개발 잔향가변장치의 흡음특성 평가

Evaluation of Sound Absorption Characteristics of the Developed Variable Reverberation Devices for Sound Optimization in a Multi-purpose Hall

정 광 민* · 김 신 태* · 김 명 준†

Kwang-min Jeong*, Sin-Tae Kim* and Myung-Jun Kim†

(Received August 18, 2022 ; Revised September 19, 2022 ; Accepted October 31, 2022)

Key Words : Variable Sound(가변음향), Reverberation Time(잔향시간), Sound Absorption Coefficient(흡음계수),
Sound Absorption Panel(흡음판넬)

ABSTRACT

The optimal reverberation time in a multi-purpose hall varies depending on the intended use (lecture, performance, etc.) and the type of performance (classical, musical, Korean traditional music, theater, etc.). In this study, devices for adjustable reverberation time (RT) were proposed. Sound absorption coefficients of four developed prototype devices in absorption and reflection modes were measured in the reverberation room according to the KS F 2805 and ISO 354. Additionally, to verify the variation range of RT developed device with the best reflection coefficient was installed in a small music practice room, and the variable range of RT was predicted and reviewed using a simulation tool. The results show that the sound absorption coefficient of device module-3 in absorption and reflection modes were 0.94 and 0.17 at 250 Hz, and 0.85 and 0.13 at 500 Hz, respectively. Additionally, the predicted results of the variable RT range between the two modes in an existing music practice room were 0.58 and 0.56 sec, at 250 and 500 Hz in octave band, respectively. An application of this is using developed devices in a multi-purpose hall for optimal reverberation environment.

1. 서 론

최근 사람들의 생활수준 향상과 여가 문화의 확대
로 다목적 홀 건립이 증가하고 있으며, 국공립 기관
및 일반 사기업의 다목적 홀에서도 음악공연 등 다양한
공연이 이루어지고 있다. 일반적으로 다목적 홀은 중

심주파수인 500 Hz에서 0.8~1.2초 정도의 잔향시간
으로 강연 및 세미나 등 음성을 위주로 하는 행사에
는 큰 문제가 없으나 음악관련 공연 시 관객뿐만 아
니라 연주자도 만족하지 못하는 경우가 많다. 반면에
다목적 홀에서 음악공연 용도 위주로 사용하기 위해
잔향시간을 1.6초 이상으로 설계한 경우 오히려 음성
명료도가 현저히 떨어져 다목적 홀 운영에 어려움이

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

* Member, Department of Architectural Engineering, Graduate School,
University of Seoul, Ph.D. Student

A part of this paper was presented at the KSNVE 2022 Annual
Spring Conference

‡ Recommended by Editor Yong Hee Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

생기는 경우도 나타나고 있다.

건축 음향적으로 잔향시간을 가변하는 방법은 진동 흡음커튼 및 이동식 패널을 사용하여 흡음면과 반사면을 가변하는 방식과 천정 반사판의 위치를 조정하여 실의 체적을 변화를 통해 잔향시간을 가변하는 방식이 주로 사용되고 있다.

Ortiz는⁽¹⁾ 벽체에 이동식 패널을 슬라이딩 도어방식으로 흡음모드 및 반사모드로 변화시키고, 객석 천정 반사판 높이를 조절하여 잔향시간을 가변하는 방식을 제안하였다. 벽체의 흡음률과 천정 반사판 높이를 조절하여 가변폭은 공식 시 125 Hz에서 0.04초, 250 Hz에서 0.3초, 500 Hz에서 0.53초 가변 되는 것으로 조사되었다. Aretz and Orlowski는⁽²⁾ Acoustic curtains을 통한 가변방식을 연구하였으며, 가변폭은 공식시 125 Hz에서 0.15초, 250 Hz에서 0.38초, 500 Hz에서 0.44초 가변 되는 것으로 조사되었다. Pieren는⁽³⁾ 흡음 커튼의 흡음성능을 밀도와 벽체와 떨어진 거리에 따라 흡음특성을 연구하였다. 500 Hz 이하의 흡음특성은 현저히 줄어드는 것으로 나타나고 있으며, 250 Hz에서는 평균적으로 0.2 정도의 흡음률을 보이고 있다.

국내의 경우 Kim 등^(4,5) 다목적홀에서 현수흡음체를 설치함으로써 이에 따른 음향특성 변화를 파악하였으며 연구결과 500 Hz에서 1.99초에서 1.82초로 0.17초 가변하는 것으로 제시하였다. Park 등⁽⁶⁾ 측벽체에 150.48 m² 크기의 배너가 설치된 공간을 측정한 결과 잔향시간 가변폭은 0.08초로 나타났다.

현재 대부분의 다목적 홀에서는 건축 음향적으로 상하로 움직이는 흡음배너 또는 회전도어 및 미닫이도어 형태로 흡음과 반사를 변화시키는 장치를 이용하여 중심주파수 500 Hz에서 0.2~0.4초 정도의 잔향시간 가변성능 분포를 보이고 있으며, 흡음특성을 살펴보면 흡음커튼의 경우 저음에 대한 가변 폭이 적은 것으로 나타났다. 또한 다목적 홀에서 홀의 사용 빈도는 강연 및 일반 행사가 많은 경우에는 대부분 잔향시간을 중심주파수 500 Hz에서 낮은 상태 0.8~1.2초로 유지하기 위해 커튼을 설치하고 운영해야 하며 이는 홀의 시각적 디자인 측면에서 만족스럽지 못한 경우가 대부분이다.

이에 이 연구에서는 특히 기술을 기반으로 한 잔향 가변장치의 흡음성능을 분석하기 위해 4개의 시작품을 제작하여 KS F 2805 잔향실법 흡음률 측정방법에 따라 흡음률을 측정하고, 잔향 가변장치의 각 흡

음모드와 반사모드에서의 흡음률 차이를 분석하였다. 아울러 잔향시간 가변폭을 분석하기 위한 사례연구로써, 실제 소규모 음악연습실을 대상으로 실내 음장해석 프로그램을 이용하여 잔향 가변장치 적용시 잔향시간 가변폭을 분석·검토하였다. 이는 추후 중규모 및 대규모 공간으로 확대하여 분석적용 연구를 위한 기초자료로 활용하려고 한다.

2. 개발 잔향가변장치 개요 및 흡음률 실험

2.1 잔향가변장치 개요

잔향가변장치의 설계방향은 흡음과 반사를 조절할 수 있는 잔향시간 가변장치를 공간의 규모에 따라 잔향시간 가변 폭을 검토하여 여러 대의 가변장치를 벽체와 천정에 설치하고, 전자 제어시스템으로 개별 및 그룹별로 흡음과 반사를 조절할 수 있는 방식이다. Fig. 1은 잔향시간 가변장치의 개념 및 구조도를 나타낸다. 두 장의 다중 타공판과 배면에 다공성 흡음재로 구성되며 두 장의 다중 타공판 홀 위치가 일치하면 음을 흡음시키고, 홀 위치가 불일치하여 막히면 음을 반사하는 개념으로 10 mm~20 mm의 판넬 이동으로 흡음과 반사를 조절할 수 있다. 이를 통해 기존 잔향시간 가변방식에 비해 구동의 간편화 및 중저주파수 대역에 대한 흡음성능 향상과 실내엔지니어 디자인을 높일 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2는 잔향가변장치의 현장설치를 위한 절차이며 건축음향 설계와 디자인이 완료되면 마감 형태와 규격에 따라 금속 구조틀을 이용하여 수직 및 보강 프레임을 현장에 설치하고 공장에서 제작된 잔향시간 가변장치를 현장에서 조립하고 마지막으로 연결부위를 마감물딩으로 마감하는 방식이다.

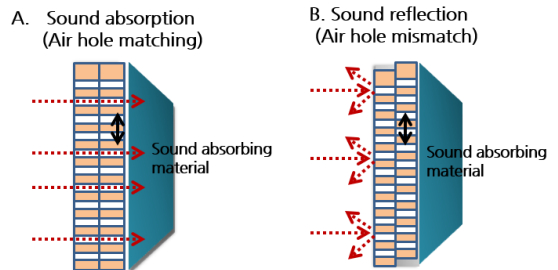


Fig. 1 Concept of the developed device for adjustable reverberation time

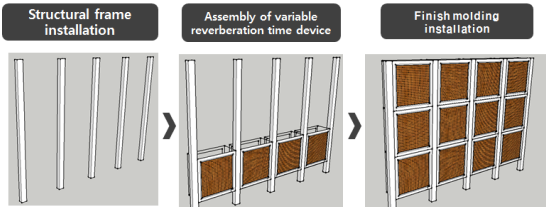


Fig. 2 Schematic diagram of installing the developed device for variable reverberation time

타공판 등을 갖는 흡음구조에 대한 다양한 연구가 있었다. Kim 등⁽¹¹⁾은 타공판의 개구율이 5% 미만인 경우에 헬름홀츠 공명기와 같은 특성으로 특정 주파수 대역의 흡음성능을 나타냈으며, 개구율의 증가에 따라 중고주파수대역에 흡음특성이 향상되는 것으로 연구되었다. Hur 등⁽⁸⁾은 단일 타공판에 비하여 다중 타공판으로 하였을때가 흡음계수의 피크값이 저주파수대역으로 이동하면서 흡음대역폭이 크게 확장됨을 제시하였다. Oh 등⁽⁹⁾은 흡음재의 두께와 마감구조에 따른 흡음률의 변화를 실험을 통해 분석하였으며, 두께별 흡음률은 50T와 100T는 큰 차이를 보이고 있으나 100T 이상에서는 많은 차이를 보이지 않는 것으로 연구되었다. Lee 등⁽¹⁰⁾은 기존 상용 폴리에스터 충전재에 알루미늄칩과 타공판을 복합화한 경우 흡음계수의 증가를 보였으며 이는 음파의 입사시 난반사를 유도하고 음파의 투과를 방해하며 매질을 통과하는 거리의 증가로 인해 흡음특성이 향상되는 것으로 분석하였다.

기존의 흡음구조 관련 연구와 달리, 이 연구에서는 하나의 구조에서 흡음모드와 반사모드를 가지도록 구성된 잔향가변장치의 흡음 특성에 관한 연구이며, 흡음모드에는 흡음특성을 높이고 반사모드에는 흡음성능을 최소화하는 복합구조 개발에 있다.

2.2 실험개요

(1) 잔향실 규격

개발 잔향가변장치의 다양한 모듈 개발을 위해 다중 천공판과 다공질흡음재가 조합된 흡음구조를 기본으로 두께와 구성이 다른 4개의 모듈을 제작하여 KS F 2805에 따라 잔향실에서 흡음률을 측정하였으며, 측정에 사용된 잔향실의 규격은 Table 1와 같다.

시험편 크기는 규격 10~12 m²에 적합하도록 모듈 (1.0 m × 1.0 m) 12개를 제작(12 m²)하고, 순차적으로 시험실 바닥에 설치하여 연결부위는 투명테이프로 고

Table 1 Specifications of a reverberation room

Structure	Reinforced concrete (wall thickness of 300 mm)
Shape	Amorphous heptahedron
Volume	209.7 m ³
Surface area	203.9 m ²
Diffuser	Ceiling type diffuser 15 m ²



Fig. 3 Measurement of sound absorption coefficient in reverberation room

정하였다. 그리고 잔향가변장치의 흡음률 시험장면은 Fig. 3에 나타내었다.

(2) 기본 모듈 실험 case

기본 모듈 실험을 위해 Fig. 4, Table 2와 같이 6ø 16 pitch, 개구율 11%의 MDF 9T 타공판을 사용하였으며, 구조적인 안정성과 반사모드시에 밀도를 증가시켜 반사성능 향상을 위해 3Layer구조로 제작하고 배면에 폴리에스터 흡음재(50T 40K)를 설치하여 Fig. 5와 같이 흡음모드시에는 MDF 9T 타공판 3장이 관통공이 일치하도록 하고, 반사모드시에는 중간 타공판을 관통공 중심에서 다음 관통공 중심까지 거리의 중간 위치에 오도록 8 mm이동시켜 관통공이 불일치하도록 설치하였다.

Table 3에서 case 1은 3-layer 구조 흡음모드이고 case 2~3은 3-layer 구조 반사모드이다. 또한 case 1, 2는 압착기능이 없는 구조이며, case 3은 압착기능으로 나사 16개를 등분포하여 고정하였다.

실험 결과 Fig. 6과 같이 압착기능이 없는 흡음모드인 case 1과 반사모드인 case 2에서 흡음률 특성이 큰 변화가 이루어지지 않았으며, 반면에 16개의 나사로 고정한 반사모드 case 3과 비교하면 유효한 변화가 있는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 압착기능이 없을 경우 판넬 각각의 판진동의 영향으로 반사모드시 흡음률이 상승되어 반사성능이 저하 되는 것으로 분석되었다.

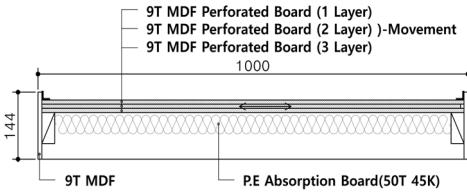


Fig. 4 Details of the base module

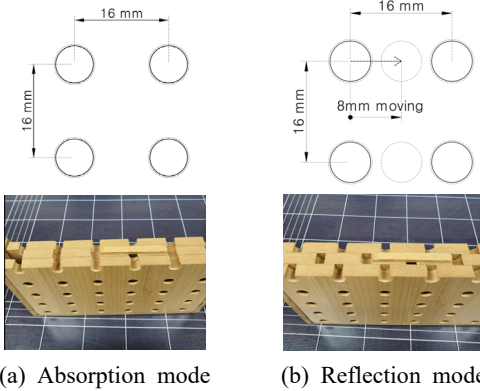


Fig. 5 Shape of the absorption mode and reflection mode

Table 2 Specifications of case 1 ~ 3

Case	Mode	Perforated plate (opening ratio %)	Sound absorbing materials	Thickness	Composition
1	Absorption mode	MDF 9T/450 kg (11 %) x3Ply	P.E 50T/45K	144 mm	-
2	Reflection mode				-
3	Reflection mode				16 screws

Table 3 Absorption coefficient of sound-absorbing material

Sound-absorbing materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz
Polyester 50 mm 45K	0.16	0.42	0.69	0.93	0.99
Polyester 50 mm 64K	0.15	0.45	0.79	1.06	1.13
Glass wool 50 mm 64K	0.22	0.77	1.10	1.11	1.03

한편 타공판 흡음재의 공명주파수는 식 (1)에 의해 계산할 수 있으며, 여기서 c 는 공기 중의 음속(m/s), p 는 천공의 개구율(= 타공면적 합계/ 판 전체면적), L 은 타공판에서 벽체까지의 공기층의 두께, t 는 판두께, δ 는 $0.8d$ (d 는 타공판의 구멍지름)이다.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{L(t + \delta)}} \tag{1}$$

기본 모듈 실험에서 사용한 타공판의 규격을 고려하여 다음의 값을 대입하면 $p=11\%$, $L=110\text{ mm}$, $t=27\text{ mm}$ (9T × 3Ply), $\delta=4.8\text{ mm}$ 이며, 공명주파수 f_0 는 304 Hz로 실험에 의한 최대 공명주파수인 315 Hz로 다소 차이가 나는 것은 3장의 타공판을 겹쳐서 실험하여 각각의 타공판들의 상호작용에 의한 것으로 판단된다. 그리고 폴리에스터 흡음재는 기본 모듈 실험을 통해 흡음률을 Table 4에 표시하였으며, 그라스울보드 50T 64K의 흡음률은 제조사의 시험성적서⁽¹¹⁾를 참고하였다.

(3) 시작품 제작 실험 case

시작품 제작시 기본모듈 실험결과를 고려하여 3-layer 구조로 하고 전체적으로 반사모드시에 반사성능향상을 위해 Figs. 7, 8과 같이 뒷면에 보강 구조틀을 설치하고 중간판넬을 이동시키는 구조로 제작하였으며, 가운데 15T MDF 판넬의 양면에 16개의 원형 마그네틱자석 (15Ø 4T)을 흡을 파서 등분포 되도록 매입하여 정면 및 후면 스틸 판넬과 자석의 끌어당기는 힘을 이용하여 3-layer 구조의 압착성능을 확보하고 모터의 토크의 힘으로 이동할 수 있는 구조로 설계하였다.

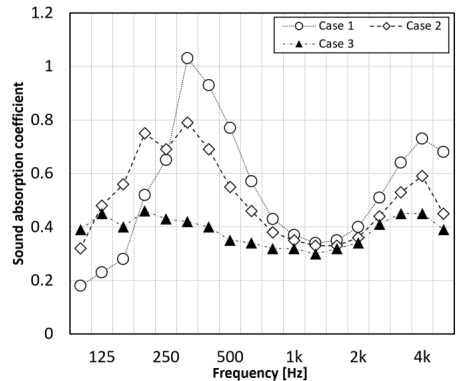
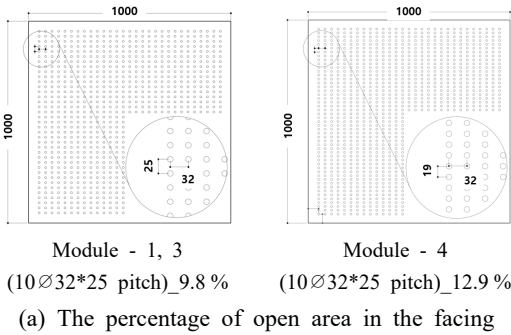


Fig. 6 Comparisons of sound absorption coefficient between case 1 ~ 3



Fig. 7 Photos of prototype devices



(a) The percentage of open area in the facing

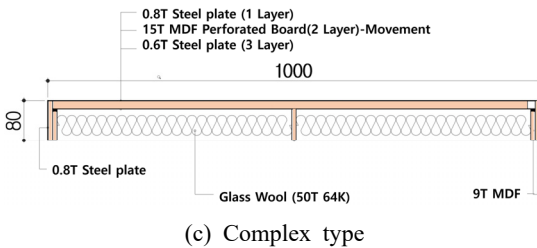
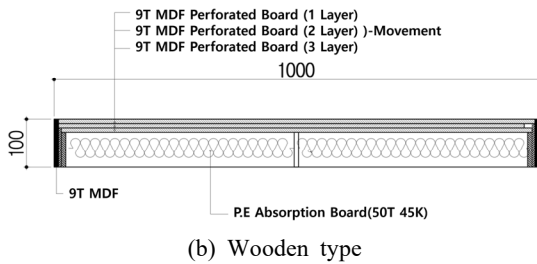


Fig. 8 Details of the developed devices

Table 4 Specifications of module 1 ~ 4

Mod-ule	Opening ratio (%)	Perforated plate	Sound absorbing materials	Thick-ness	Composi-tion
1	9.8	MDF 9T/450kg x3Ply	P.E 50T/45K	100 mm	Wooden type
2	15.3		P.E 50T/64K		
3	9.8	Steel 0.8T+MDF 15T+Steel 0.6T	G.W 50T/64K	80 mm	Complex type (metal+wooden)
4	12.9				

시작품의 제작은 일반적으로 다목적홀에서 많이 사용하고 있는 인테리어 필름지가 마감되어있는 MDF 9T 타공판 구조(목재타입)와 표면 두께가 얇은 steel plate 0.8 T(복합타입)로 2개 타입으로 고려하여(Fig. 7) 타입 별 2개 모듈, 총 4개 모듈을 제작하여 흡음 및 반사 모드를 실험하여 흡음 특성을 분석하였다. 잔향가변장치 디테일은 Fig. 8을 통해 나타냈으며, 목재 타입인 모듈 1~2는 MDF 타공판 9T 3장으로 겹쳐진 구조이며, 복합타입인 모듈 3~4는 steel plate 0.8T+MDF 15T + steel plate 0.6T로 겹쳐진 구조로 구성하였다.

모듈 1~4를 대상으로 흡음률을 측정 및 분석하였다. 시험편 크기는 규격에 시험편 면적 10 m² ~ 12 m² 규격에 적합하도록 모듈 1.0 m × 1.0 m 크기를 12개 제작(12 m²)하였다.

모듈 1~2의 타공판 규격은 MDF 9T/450 kg으로 동일하고 타공판의 개구율은 각각 9.8%와 15.3%로 구성하였으며, 내부 충전용 흡음재는 폴리에스터 보드로 규격은 모듈 1은 50T/45K, 모듈 2는 50T/64K이며 모듈 두께는 100 mm로 하였다.

모듈 3~4 타공판의 개구율은 각각 9.8%와 12.9%로 구성하였으며, 내부 충전용 흡음재는 그라스울 보드로 규격은 50T/64K이며 모듈 두께는 80 mm로 하였다 (Table 4).

3. 실험 결과 및 분석

3.1 개발 잔향가변장치 흡음률 분석

개발 잔향가변장치는 하나의 구조에서 흡음 및 반사 모드를 전자 제어장치로 가변할 수 있는 구조로 구성되었으며, 흡음모드 시 흡음률을 높이고 반사모드 시 흡음률을 최소화하여 중저주파수 대역에서 흡음률 차이를 높이는 것에 있다. 개발잔향가변장치 모듈 1~4

Table 5 Sound absorption coefficient for absorption mode and reflection mode (Module 1~4)

Module-1	1/1 octave band center frequency					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 k Hz	2 k Hz	4 k Hz
Absorption mode	0.34	0.88	0.56	0.32	0.36	0.59
Reflection mode	0.20	0.17	0.17	0.22	0.25	0.39
Gap	0.14	0.71	0.39	0.09	0.11	0.20
Module-2	1/1 octave band center frequency					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 k Hz	2 k Hz	4 k Hz
Absorption mode	0.29	0.87	0.81	0.50	0.54	0.73
Reflection mode	0.31	0.32	0.29	0.29	0.35	0.46
Gap	-0.02	0.55	0.52	0.21	0.19	0.27
Module-3	1/1 octave band center frequency					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 k Hz	2 k Hz	4 k Hz
Absorption mode	0.29	0.94	0.85	0.50	0.27	0.29
Reflection mode	0.22	0.17	0.13	0.11	0.12	0.07
Gap	0.07	0.77	0.72	0.39	0.15	0.22
Module-4	1/1 octave band center frequency					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 k Hz	2 k Hz	4 k Hz
Absorption mode	0.27	0.90	0.94	0.66	0.36	0.34
Reflection mode	0.29	0.23	0.16	0.12	0.12	0.08
Gap	-0.02	0.67	0.78	0.54	0.24	0.26

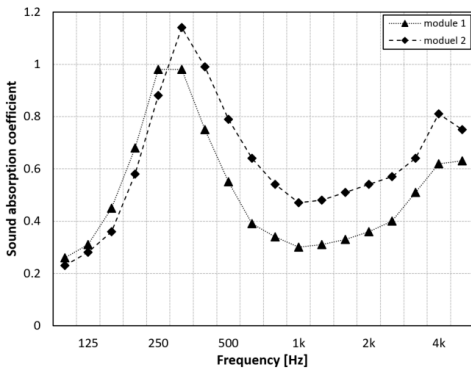


Fig. 9 Comparisons of sound absorption coefficient between module-1 and module-2 for absorption mode

의 1옥타브밴드 흡음률 측정결과 Table 5에 나타내었다.

모듈 1의 흡음모드와 반사모드에서의 흡음률 차이는 250 Hz에서 0.71로 가장 크고, 나머지 주파수대역에서는 0.09~0.39 정도의 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

모듈 2 실험결과 흡음률 차이는 250 Hz에서 0.57로 가장 크고, 나머지 주파수대역에서는 -0.02~0.52 정도의 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

모듈 3의 실험결과로 흡음률 차이는 250 Hz에서 0.77로 가장 크고, 나머지 주파수대역에서는 0.07~0.77 정도의 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

모듈 4 실험결과로 흡음률 차이는 500 Hz에서 0.78로 가장 크고, 나머지 주파수대역에서는 -0.02~0.67 정도의 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

Fig. 9에서 목재타입 모듈 1의 흡음모드시 250 Hz에서 가변폭이 다른 주파수 대역보다 상대적으로 높게 나타난 것은 3장의 판으로 구성된 판넬에서 공명 흡음의 효과가 증폭되는 것으로 사료된다.

목재타입 모듈 2는 모듈 1에서의 흡음률 특성 중 1000 Hz 이상 흡음률 가변폭을 증가시키기 위해 개구율을 9.8%에서 15.3%로 증가시키고 내부 충전 다공성 흡음재도 50T/45K에서 50T/64K로 변경한 것이다. 흡음 및 반사모드 시의 흡음률 차이를 분석하면, 250 Hz 및 500 Hz에서 0.55, 0.52로 다른 대역의 중심주파수보다 상대적으로 높게 나타났으며, 다른 주파수 대역보다 상대적으로 높게 나타난 것은 3장의 판으로 구성된 판넬에서 공명흡음의 효과가 증폭되는 것으로 사료된다. 하지만 125 Hz에서는 흡음모드 시보다 반사모드 시에 흡음률이 0.02초 높게 나타났다.

이러한 원인은 Fig. 9를 살펴보면 개구율 향상 및 다공성 흡음재의 밀도 증가에 따라 피크 공명 주파수가 오른쪽으로 이동하면서 모듈 1의 125 Hz 흡음률은 0.34에서 모듈 2의 125 Hz 흡음률은 0.29로 0.05 정도 줄어든 것으로 나타난다.

Fig. 10은 목재타입 모듈 1, 2의 반사모드의 흡음특성을 분석한 결과 전주파수 대역에서 흡음률이 상승한 것으로 다공성 흡음재를 50T/45K에서 50T/64K로 흡음성능 향상 및 개구율 향상에 따라 모듈 1의 125 Hz 흡음률은 0.2에서 모듈 2의 125 Hz 흡음률은 0.31로 0.11 향상된 것으로 나타났다.

Fig. 11은 복합타입 모듈 3,4의 흡음모드의 흡음특성을 분석한 결과 개구율을 9.8%에서 15.3%로 증가시켰을 때 250 Hz 이상에서 흡음특성이 향상되지만, 250 Hz

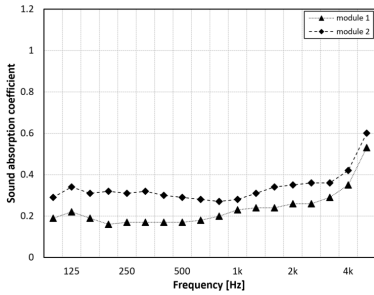


Fig. 10 Comparisons of sound absorption coefficient between module-1 and module-2 for reflection mode

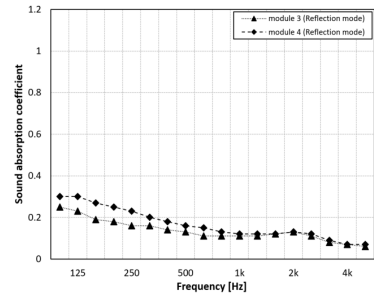


Fig. 12 Comparisons of sound absorption coefficient between module-3 and module-4 for reflection mode

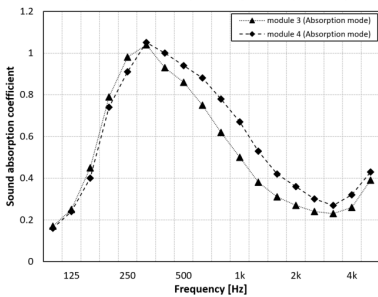


Fig. 11 Comparisons of sound absorption coefficient between module-3 and module-4 for absorption mode

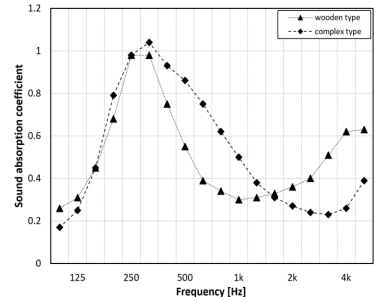


Fig. 13 Comparisons of sound absorption coefficient between module-1 and module-3 for absorption mode

이하에서는 변화 특성이 작은 것으로 나타났다.

Fig. 12는 복합타입 모듈 3, 4의 반사모드의 흡음특성을 분석한 결과 개구율을 9.8%에서 15.3%로 증가시켰을 때 2000 Hz 이하에서 흡음특성이 향상되는 것으로 나타났으며, 중저주파수 대역에서 반사성능 향상을 위해서 개구율 10% 이하로 하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

Fig. 13은 개구율이 같은 목재타입의 모듈 1과 복합타입의 모듈 3을 흡음모드시의 흡음특성을 비교한 결과 250 Hz이하에서는 비슷하며, 250 Hz ~ 1500 Hz에서는 복합타입의 흡음특성이 향상되었으며, 이러한 이유는 다공성 흡음재를 밀도 45 K에서 밀도 64 K로 증가하여 흡음특성이 향상된 것으로 판단되며, 1500 Hz 이상에서는 목재타입의 흡음특성이 향상되는 것은 타공판의 목두께가 금속타입 16.4 mm에서 목재타입은 27 mm로 길어져서 MDF 판넬 타공 부위 단면적이 커져서 일종의 edge effect와 유효흡음면적 증가로 흡음특성이 향상되는 것으로 나타났다. Edge effect란 잔

향실에서 흡음률을 측정하는 잔향실법 즉 난입사 흡음률 측정방법으로 측정하여 계산 시, 시료의 면적으로 나누어주게 되는데 이때 고려되는 시료면적이 음원방향으로 노출된 면의 면적만을 적용하여 실제 흡음력에 영향을 주는 흡음면적을 고려하지 않기 때문에 발생하는 효과를 말한다.

Fig. 14는 개구율이 같은 목재타입의 모듈 1과 복합타입의 모듈 3을 반사모드시의 흡음특성을 비교한 결과 복합타입의 반사성능이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 이유는 모듈 1은 MDF 타공판 9T 3장으로 겹쳐진 구조이며, 복합타입인 모듈 3은 steel plate 0.8T + MDF 15T + steel plate 0.6T로 겹쳐진 복합구조로 구성되고 3장의 layer의 두께와 재질을 다르게 하여 판진동에 의한 판넬 상호간 공진을 최소화하여 전주파수 대역에서 반사성능이 높은 것으로 판단된다. 또한 목재타입은 목재 다층 타공판의 각각의 개별 타공 단면부위가 표면에 노출되어 edge effect와 유효흡음면적 증가로 고음 영역대에서 흡음특성이 향

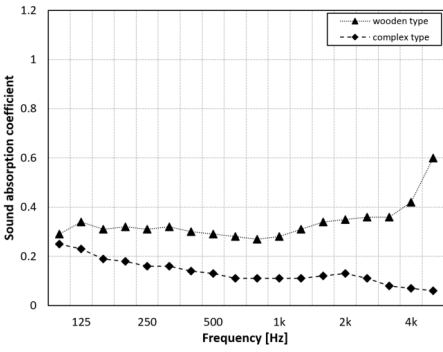


Fig. 14 Comparisons of sound absorption coefficient between module-1 and module-3 for reflection mode

상되는 것으로 나타났다. 특히 4 K Hz 영역대에서 목재타입은 흡음특성이 높고 복합타입은 흡음특성이 낮은 것은 목재 타공판의 다중 타공 부위가 확산구조의 특성으로 흡음능력이 향상되고, 또한 개구판의 공명 특성으로 인해 향상되는 것으로 판단되며, 이에 대한 연구는 더 필요할 것으로 사료된다.

시작품 4개 모듈 중 복합구조인 모듈 3에서 전주과 수대역에서 0.07 ~ 0.77 정도의 흡음률 차이를 보이며, 500 Hz 흡음모드에서 0.85, 반사모드에서 흡음률 0.13으로 4개의 모듈 중 반사모드시에 흡음률이 가장 낮은 값으로 나타났다.

3.2 적용 및 시뮬레이션 평가

추후 연구에서 실제 개발잔향가변장치를 현장적용 평가 할 소규모 음악연습실을 대상으로 잔향시간 가변폭을 어느 정도 확보할 수 있는지 실내음장 해석 프로그램을 활용하여 검토하였다. 개발 잔향가변장치 중 반사성능이 가장 우수한 모듈 3에서 파악된 흡음률 데이터를 적용하였으며, 잔향가변설계를 시행할 경우 확보 가능한 주파수별 잔향시간 가변폭을 분석하였다.

대상 음악연습실의 크기와 수음점 및 음원의 위치는 Fig. 15와 같다. 측정은 무지향성 스피커를 이용한 건축 음향 측정방법은 ISO에서 제안하는 무지향성 스피커 음원(sound source)을 무대에서 출력하여 각 수음점 바닥에서 1.2 m 높이에 있는 마이크로폰으로 수음하도록 측정하였다.

측정 결과 대상 음악연습실의 잔향시간은 Table 6 과 같이 나타났다. 대상 음악연습실의 강연용도에 알맞은 잔향시간을 확보하였으나 공연용으로 사용되기

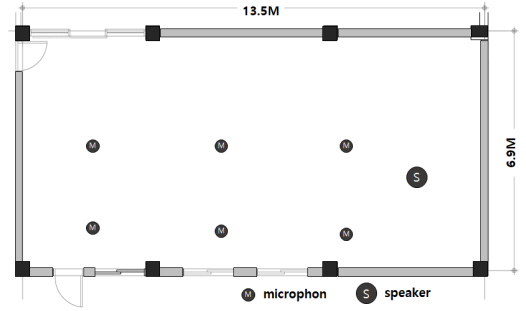


Fig. 15 Measurement points of reverberation time in music practice room

Table 6 Reverberation time in music practice room

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000
Reverberation time	0.49	0.54	0.48	0.53	0.52

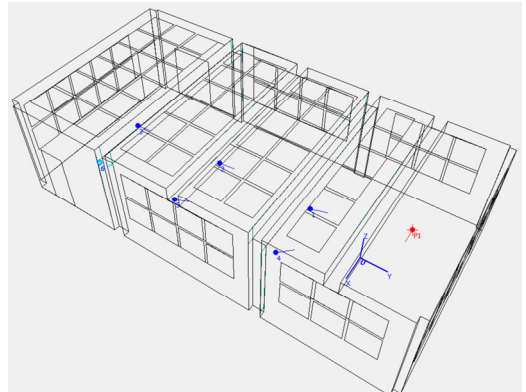


Fig. 16 Computer simulation model

Table 7 Simulation driving conditions

Input variable	Set value
Number of late rays	1000
Max reflection order	10 000
Impulse response length	1200
Humidity	50 %
Active surface area	324 m ²
Estimated volume	314 m ³

에는 짧은 잔향조건을 가지고 있는 것으로 나타났다. 실내음향 해석 시뮬레이션 프로그램(odeon com-

Table 8 Absorption coefficients by finishing material (before improvement)

Division	Finishing material /area (m ²)		Frequency (Hz)				
			125	250	500	1000	2000
Floor	Terrazzo (artificial stone)	90	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Ceiling	Gypsum board/paint	8	0.15	0.08	0.07	0.05	0.06
	Tectum board	82	0.08	0.11	0.18	0.35	0.36
Wall	Gypsum board/paint	55.7	0.15	0.08	0.07	0.05	0.06
	Wood perforated plate (no absorption board)	73.81	0.45	0.31	0.31	0.30	0.30
	Steel door	1.89	0.29	0.26	0.13	0.08	0.07
	Glass	12.6	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03

Table 9 Absorption coefficients by finishing material (after improvement)

Division	Finishing material /area (m ²)		Frequency (Hz)				
			125	250	500	1000	2000
Floor	Terrazzo (artificial stone)	90	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Ceiling	Module-3 (absorption)	37.3	0.25	0.98	0.75	0.5	0.27
	Module-3 (reflection)		0.23	0.16	0.13	0.11	0.13
	Gypsum board/paint	44.7	0.15	0.08	0.07	0.05	0.06
	Molding (MDF/film)	8.0	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06
Wall	Gypsum board/paint	90.4	0.15	0.08	0.07	0.05	0.06
	Module-3 (absorption)	40.5	0.25	0.98	0.75	0.5	0.27
	Module-3 (reflection)		0.23	0.16	0.13	0.11	0.13
	Molding (MDF/film)	5.8	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06
	Steel door	1.89	0.29	0.26	0.13	0.08	0.07
	Glass	5.4	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03

bined ver. 15.0)을 이용하여 Fig. 16과 같이 대상 음악연습실에 대한 시뮬레이션 모델을 생성하였다.

시뮬레이션의 구동 조건은 Table 7과 같으며 대상 모델의 마감재별 흡음률은 무대부 및 객석부에 대해 각각 개선 전은 Table 8, 개선 후는 Table 9와 같이 설정하였다.

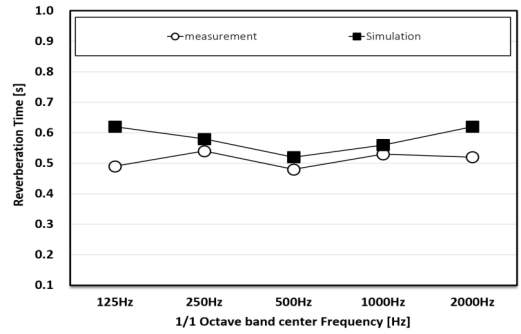


Fig. 17 Simulation reliability review

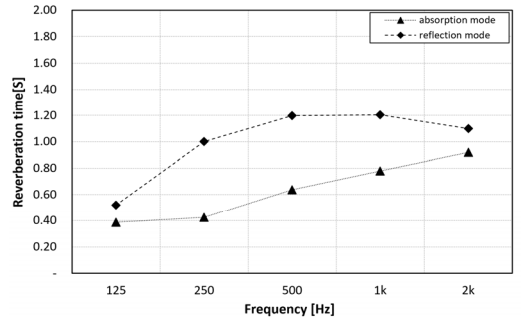


Fig. 18 Reverberation time in music practice room

시뮬레이션 결과 및 실측 결과는 Fig. 17과 같으며 시뮬레이션 모델의 신뢰성 확인을 위해 MAPE(mean absolute percentage error) 분석을 사용하였으며, MAPE는 퍼센트 값을 가지면 0에 가까울수록 회귀 모형의 성능이 좋다고 해석할 수 있으며, 10% 미만 매우정확, 20% 미만 우수, 50% 미만 합리적, 50% 이상 부정확한 것으로 판단된다. 신뢰성 검토 결과 13.4%로 우수한 모델로 판단할 수 있다.

각 모듈의 흡음률 데이터를 대상 음악연습실의 벽면 및 천장에 적용하기 이전 대상 음악연습실의 가용면적을 확인하였다. 출입문 및 창호부를 제외한 벽체의 면적은 40.5 m²였으며 천장의 경우 전체 면적은 90 m²로 나타나지만 조명 및 시공상 고려사항을 반영해 면적의 41%인 37.3 m²에 적용 가능한 것으로 판단하였다.

각 모듈을 가용면적에 최대 적용 시 흡음모드 및 반사모드에서 주파수별 최대 가변폭을 음향 시뮬레이션을 사용하여 검토하였다.

검토 결과 모듈 3을 적용한 경우 대상 음악연습실의 잔향시간 가변폭은 Fig. 18과 같이 나타났다.

주파수 대역별로는 125 Hz 대역에서 0.13초, 250 Hz 대역에서 0.58초, 500 Hz 대역에서 0.56초, 1000 Hz 대역에서 0.42초, 2000 Hz 대역에서 0.18초 등으로 중저음대 음역에서 비교적 큰 잔향시간 가변폭을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 2000 Hz 이상의 고음영역에서는 상대적으로 부족한 것으로 판단된다. 이러한 원인은 개발 잔향 가변장치가 공명기형 흡음재를 기본으로하고 있어 고음영역대에 대한 흡음특성이 부족한 것으로 사료된다. 이에 대한 개선 방향은 타공판의 개구율을 증가시키는 방법이 있으나, 반면에 반사모드시에 반사성능이 저하되는 특성이 있어 향후 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다. 그리고 향후 실내음향 평가 지표 중 명료성과 공간감에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

이 연구에서는 특허 기술을 기반으로 한 개발 잔향 가변장치의 흡음성능을 분석하기 위해 기본모듈 3개, 시작품 4개를 제작하여 KS F 2805 잔향실법 흡음률 측정방법에 따라 흡음률을 측정하여 개발 잔향 가변장치의 흡음특성을 분석하였고, 추후 연구에서 현장 시공 평가할 소규모 음악연습실에 적용하여 컴퓨터 예측 시뮬레이션을 통해 잔향시간 변화특성을 분석하고 추후 현장시공평가 결과 값과 비교 평가하여 중규모 및 대규모 공간에 적용연구를 위한 기초자료로 활용하려고 한다.

이 연구를 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 잔향가변장치는 하나의 구조에서 흡음 및 반사모드를 전자 제어장치로 가변할 수 있는 구조로 구성되었으며, 흡음모드 시 흡음률을 높이고 반사모드 시 흡음률을 최소화하여 중저주파수 대역에서 흡음률 차이를 높이는 것에 있다. 이러한 관점에서 가장 중요한 것은 첫째, 개발 잔향가변장치의 3-Layer 구조 특성상 각각의 판들의 저주파 공진에 의해 반사모드시 흡음률이 높아지는 것을 자석에 의한 압착구조로 최소화하였다. 둘째, 복합구조로 표면에 얇은 steel plate의 타공판을 사용하여 반사모드시 목재타입의 단점인 유효흡음면적 증가로 흡음률이 높아지는 것을 최소화하였다.

- 최종 개발된 시작품 중 목재타입(모듈 1)의 흡음 및 반사모드의 흡음률은 각각 250 Hz에서 0.88/0.17,

500 Hz에서 0.56/0.17로 최대 흡음률 차이는 각각 0.71/0.39로 도출되었다.

- 금속 및 목재 복합타입(모듈 3)의 흡음 및 반사모드의 흡음률은 각각 250 Hz에서 0.94/0.17, 500 Hz에서 0.85/0.13으로 최대 흡음률 차이는 각각 0.77/0.72로 도출되었다.

- 반사성능이 가장 우수한 모듈 3의 흡음률 데이터를 기존 음악연습실에 적용 예측한 결과, 주파수 대역별로는 125 Hz 대역에서 0.13초, 250 Hz 대역에서 0.58초, 500 Hz 대역에서 0.56초, 1000 Hz 대역에서 0.42초, 2000 Hz 대역에서 0.18초 등으로 중저음대역에서 비교적 큰 잔향시간 가변폭을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.

- 개발 잔향 가변장치가 공명기형 흡음재를 기본으로하고 있어 2000 Hz 이상 고음영역대에 대한 흡음특성이 상대적으로 부족한 것으로 나타났으며, 이에 대한 개선 방향은 타공판의 개구율을 증가시키는 방법이 있으나, 반면에 반사모드시에 반사성능이 저하되는 특성이 있어 향후 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다. 그리고 향후 실내음향 평가 지표 중 명료성과 공간감에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 연구(과제번호 21TBIP-C162642-01)비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Ortiz, S. M., 2016, Auditorio 400 at the 'Museo Reina Sofia' in Madrid : Use of Variable Systems for Acoustic Improvements, Building Acoustics, Vol. 23, No. 3-4, pp. 159~179.
- (2) Aretz, M. and Orlowski, R., 2010, Balancing Sound Strngth and Reverberation Time in Small Concert Halls by Means of Variable Acoustics, Noise & Vibration Worldwide, Vol. 41, No. 8, pp. 11~24.
- (3) Pieren, R., 2018, Sound Absorption of Textile Curtains - Theoretical Models and Validations by Experiments and Simulations, Textile Research Journal, Vol. 88, No. 1, pp. 36~48.

(4) Kim, N. D., Kim, D. G. and Kim, J. S., 2008, Architectural Acoustic Design of Multipurpose Hall with Acoustic Variable System, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 28, No. 1, pp. 715~718.

(5) Kim, D. G., Kim, N. D. and Kim, J. S., 2008, Evaluation of Architectural Acoustic Performance for Multipurpose Hall with Acoustic Variable System, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 28, No. 1, pp. 599~602.

(6) Park, H. C., Seo, R., Seo, C. K. and Jeon, J. Y., 2019, Effects of Changes in Banner Size on Acoustic Environments in Multipurpose Halls for Broadcasting, The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 38, No. 5, pp. 558~567.

(7) Kim, K., Kim, S. and Park, J., 2013, Investigation of Sound Absorbing Characteristics of the Railway Noise Barrier by Changing the Configuration of the Front Perforated Panel and Absorbing Material, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 575~580.

(8) Hur, S. C., Lee, D. H. and Kwon, Y. P., 2002, A Study on the Sound Absorption Performance of Multiple Layer Perforated Plate Systems, Proceedings of the KSME Conference, pp. 688~693.

(9) Oh, J. W., Lee, J. H., Kim, H. S., Lee, J. H., Lee, S. H. and Kim, H. S., 2015, The Study on Shift of Absorption Coefficient by Finishing Layer, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 477~481.

(10) Lee, Y. J., Kim, D. G., Park, K. H. and Kim, Y. D., 2009, Absorption Characteristics of Sound Proof Wall by Scrap Aluminum and Perforated Plate, Korean Journal

of Materials Research, Vol. 19, No. 7, pp. 382~385.

(11) Disaster Prevention Test Researcher “Test Report_GK2020-0032”, International Laboratory Accreditation Cooperation (2020).



Kwang-Min Jeong received M.S. from Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul in 2015. He is a Ph.D. student at the Dept. of Architecture Engineering, University of Seoul. His research interests are in the area of acoustic performance in multi-purpose hall.



Sin-Tae Kim received the M.S. in Dept. of architectural engineering at University of Seoul, Seoul, Korea in 2020. He is currently a Ph.D. candidate in University of Seoul. His research interests are in the area of floor impact noise and sound in-sulation in buildings.



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

University of Seoul. His research interests are in the area of architectural acoustics and sound insulation in buildings.