

1:50 다목적홀의 음향평가를 위한 축소모형재료의 선정

Selection of Scale Model Materials for Acoustical Evaluation of 1:50 Multipurpose Halls

전진용*, 김정준**, 김용희**

(Jin-Yong Jeon*, Jeong-Jun Kim**, Yong-Hee Kim**)

*한양대학교 건축공학부, **한양대학교 건축환경공학과

(접수일자: 2009년 7월 22일; 수정일자: 2009년 8월 19일; 채택일자: 2009년 10월 13일)

다목적홀의 음향을 1:50 축소모형으로 예측 및 평가하기 위해 필요한 모형재료의 구성과 흡음특성에 대해 연구하였다. 실제 홀에서의 반사면 및 가변음향요소, 객석의 설계요소별 흡음특성 (125Hz-1kHz 평균)을 기준으로 축소모형의 형상과 재질을 선정하였으며, 흡음율은 상사의 법칙과 ISO 354를 준용하여 측정하였다. 그 결과, 주벽체의 평균흡음율은 0.08로 레지 코팅된 MDF나 아크릴이 적합하며, 객석 의자, 관객 및 연주자 평균흡음율은 각각 0.64, 0.74와 0.45를 목표로 할 때 목재, 흡음천과 폼보드를 조합하여 흡음률을 재현하였다. 흡음커튼과 배너는 적용부위 및 단면설계에 따라 흡음재의 마운팅 방법을 선택하였으며, 배면공기층이 없는 상태 (A형 마운팅)에서의 평균흡음율이 0.42, 0.9 m배면공기층 조건에서 시료 양단이 고정된 상태 (E형 마운팅)에서는 0.47, 천상에 매단 상태 (G형 마운팅)에서는 0.45로 나타났다. 특히, 배면공기층의 증가에 의해 저주파 대역 흡음력이 증가하였다. 스테이지 하우스 내부는 평균흡음율 0.68의 Fiber glass board 시공을 예상하여 흡음재와 스피커방 원단을 조합하여 재현하였다. 본 연구에서 도출된 모형 재료의 형상과 흡음특성은 향후 1:50 축소모형으로 다목적홀의 형상에 의한 중주파 대역 이하의 음향예측에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

핵심용어: 흡음률, 다목적홀, 축소모형, 음향설계, 가변음향

투고분야: 건축음향 분야 (7,2)

The absorption coefficients of the materials used in a 1:50 scale model multipurpose hall were measured based on ISO 354 and related laws. The shape and materials for the scale model were evaluated based on reflective surfaces, variable acoustic elements and sound-absorbing quality (125Hz-1kHz average) of seats. The measured average absorption coefficients of audience seats, audience and orchestra were 0.64, 0.74 and 0.45, respectively, which were simulated with the combination of wood, absorption materials and foam board. Various mounting methods for absorption curtain and banner were considered according to the installation methods. The average absorption coefficient was measured as 0.42, 0.47 and 0.45 in the conditions of Type A mounting, E mounting with 0.9 m backing air cavity, and Type G mounting which is suspended at the ceiling, respectively. It was confirmed that the absorption coefficient was increased at low frequency by backing air gap. The finishing material of stage house was an absorption material covered with thin fabric, which aimed average absorption coefficient of 0.68 by using fiber glass board. Each part of the real materials was compared with those of 1:50 scale model and it was found that the absorption characteristics of both cases were similar.

Keywords: Sound Absorption Coefficient, Multi Purpose Hall, Scale Model, Acoustical Design, Variable Acoustics

ASK subject classification: Architectural Acoustics (7,2)

I. 서론

컴퓨터 시뮬레이션은 경제적이고 신속하지만 곡면벽

체 및 천장의 구현이 힘들고, 음의 회절, 확산현상과 같은 거동을 정확하게 예측할 수 없는 어려움이 있다 [1]. 축소 모형 실험은 실제 설계안을 모델로서 축소 제작하여 자연 음의 거동을 평가하는 방법으로 공간 및 재료의 크기, 형상에 의한 음향 특성을 정확하게 평가 할 수 있는 장점이 있다 [2-4]. 그러나 축소모형 실험의 재현성을 확보하기

위해서는 모형 재료의 흡음특성을 상사의 법칙에 따라 실제와 같이 구현해야하는 어려움이 있다.

축소모형에 대한 연구는 1968년 Reichard [5]에 의해 1:8 축척의 모형 실험결과가 발표되었고, 같은 해 Day [6]도 1:10 축척 모형을 사용하는 등 다양한 축척의 모형들이 사용되어져 왔다. 1:10 이하 축척의 모형은 실제의 흡과 같이 마감재료의 세부적인 구현이 가능하며 125 Hz에서 4 kHz까지의 주파수 대역으로 설계하는 실내음향에 있어서 거의 실제와 유사한 음향적 분포를 검토할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 규모와 크기 때문에 제작비용 및 공간이 요구되며 제작에 장시간이 소요되기 때문에 쉽게 선택할 수 없는 단점이 있다. 1:25 축척이나 1:50 축척의 모형은 측정 주파수 대역이 중주파수 대역까지로 제한되는 한계가 있으나, 상대적으로 다루기 쉽고 짧은 기간 안에 적은 비용으로 제작하여 음향설계에 활용할 수 있다. 1:50 축소모형은 Cardiff의 St. David's Hall 설계 [3] 및 Norway의 Oslo Opera House 설계 [7]에서도 활용했으며, 국내에서도 1,500석 규모의 클래식 전문공연장 설계 [8]에 활용된 바 있다.

그러나 1:50 축소모형을 구축하기 위한 모형의 재료 및 선정방법에 대한 기존 연구는 부족한 실정이다. 축소모형을 이용한 많은 논문이 서두에 모형 재현에 대한 내용을 언급하고 있으나, 연구자마다 선정기준과 측정결과가 상이하다. 특히 다목적홀에서는 가변요소로 다양한 음향환경을 조성하는데 이를 구현하는 흡음배너나 스테이지하우스 내부 흡음력 재현에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 1:50 축소모형을 활용한 설계요소에 따른 모형 재료의 흡음특성과 선정에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 1:50 다목적홀의 음향평가를 위한 모형 재료의 선정방법을 근사하였다. 모형재료는 실제 재료와 흡음특성이 유사한 재료를 선정해야 하나, 기존의 ISO에서는 모형에서의 흡음을 측정이 언급되어 있지 않다. 따라서 각 재료의 설계조건에 따른 흡음율을 효과적으로 측정하기 위한 방법론을 고찰하고, 벽체, 흡음배너와 같은 다목적홀의 각 설계요소에 따라 다양한 재료의 흡음률을 측정할 뒤, 실제 재료 및 일반적인 다목적홀의 시뮬레이션 모델에 입력하는 재료의 흡음율과 비교하였다.

II. 축소모형 재료의 흡음률 측정

축소모형은 실제공간을 축소한다는 가정 하에 진행되

므로 모든 물리적 현상이 상사의 법칙을 따르게 된다. 1:50 축소모형에서 음의 전달시간과 파장은 1/50로 줄어들고 주파수는 50배가 된다. 따라서 평가하고자 하는 주파수 대역을 축소모형에서 측정하기 위해서는 해당 주파수 대역의 축소비율의 역수만큼 급한 주파수 대역을 측정하여야 하며 상사율을 통한 일반재료들의 1:50 축소모형 재료 적용을 위해서는 예로써 1 kHz의 50배인 50 kHz대역을 측정하여야 한다.

각 부위별로 구분하여 최대한 실제 공연장의 음환경을 구현하기 위해 선별된 재료들의 흡음률은 ISO 354 [9]의 측정방법 (7장)에 준하여 측정하였다. 측정 시 온습도 환경에 따른 공기의 흡음률은 ISO 9613-1 [10]에 따라 다음 식 (1)-(3)과 같이 네 측정시의 공기흡음계수를 계산하여 측정결과를 보정하였다. 측정시의 온도는 22.0도에서 24.0도, 상대습도는 40%에서 60%의 범위로 분포하였다. 측정된 잔향시간의 반복성에 의한 상대표준편차는 ISO 354의 8.1장에 따라 계산한 결과 125 Hz에서는 0.013, 250 Hz에서는 0.011, 500 Hz와 1 kHz에서는 0.010으로 나타났으며 이에 따라 측정시료의 흡음률은 소수점 둘째 자리까지 계산하였다. 측정된 모든 흡음률은 실제축적으로 변환하여 기술하였으며, 시료의 치수 역시 실제 축적으로 환산하여 표기하였다. 또한 흡음률은 실제 적용되는 재료의 주파수 대역별 흡음률과 비교하였고, 최종 재료의 선정은 실제 재료와의 주파수 대역별 흡음율 특성과 평균 흡음율을 고려하여 최적 모형 재료를 선정하였다.

$$T = 0.161 \frac{V}{A} \quad (1)$$

$$A = \frac{55.3V}{cT} - 4mV \quad (2)$$

$$m = \frac{\alpha}{10 \log(e)} \quad (3)$$

여기서,

V : 실내 용적 [m³]

A : 흡음 면적 [m²]

c : 공기의 속도 (331+0.6t°C)에서 [m/s]

m : 공기흡음계수

a : 공기흡음 계산을 위한 순음감쇠계수

2.1. 측정 장비 및 위치

축소모형의 각 부위별로 적용될 각 재료들의 흡음률 측정을 위해 그림 1과 같은 축소 잔향챔버를 활용하였다.

고주파 대역에서 안정적이고 무지향적 특성을 가지고 있는 스파크 소스 [11] (Daelim ENG, DEH-A1)와 140 kHz영역까지 측정이 가능한 1/8인치 마이크로폰 (B&K- Type 4138)을 이용하여 시료 유무에 따른 잔향시간을 측정하였다. 잔향챔버 내부에 2개 위치의 스파크 소스와 4개 위치의 마이크로폰을 그림 1과 같이 이용하였으며 각 지점에서 3회씩 잔향시간을 측정하여 평균하였다. 그림 2는 시료유무에 따른 잔향챔버 내 스파크 음원의 감쇠곡선 특성을 나타낸다. 감쇠곡선상의 주파수 대역별 S/N비는 30 dB이상으로써, ISO 354에 규정되어 있는 잔향시간 (T20)을 계산하는데 충분한 감쇠특성을 보였다. 잔향챔버에서 측정된 잔향시간의 주파수 대역별 특징은 표 1과 같다.

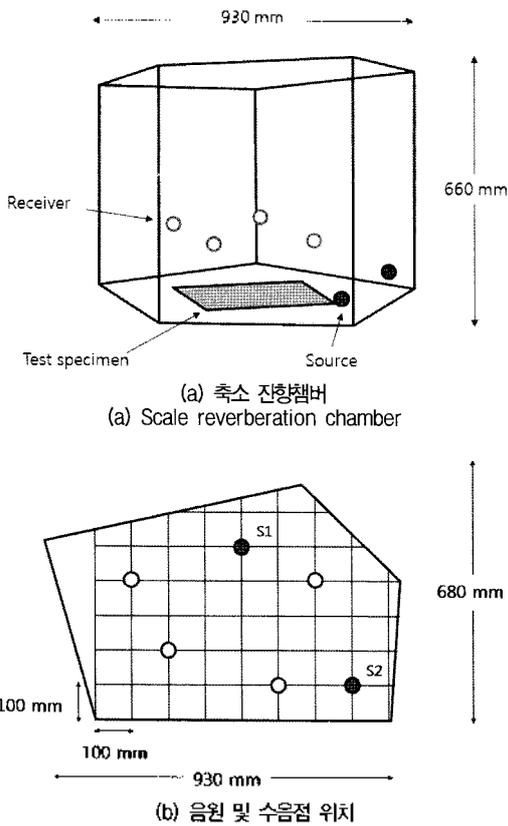


그림 1. 축소 잔향챔버와 음원 (●) 및 수음점 (○)의 위치. (상기 치수는 축소모형에서의 크기)

Fig. 1. Scale reverberation chamber and source & receiver positions (The above dimension indicates the scale model itself).

2.2. 시료 마운팅 방법

축소모형 재료들의 부위별 흡음특성을 정확히 평가하기 위해 그림 3과 같이 실제부위 및 단면선계에 적합한 마운팅 방법을 ASTM E 795 [12]의 기준에 고려하여 진행하였다. 그림 3의 (a)에서와 같이 A형 마운팅은 시료를 잔향챔버 바닥에 놓고 측정하며 그림 3 (b)의 A형 또는 B형 마운팅은 시료의 측면을 Metal Frame등으로 마감을 하고 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 흡음천을 A형 마운팅 방법으로 측정하여 마감 재료로 활용할 수 있도록 하였다. 축소모형의 측벽과 천장의 가변음향배너의 구현

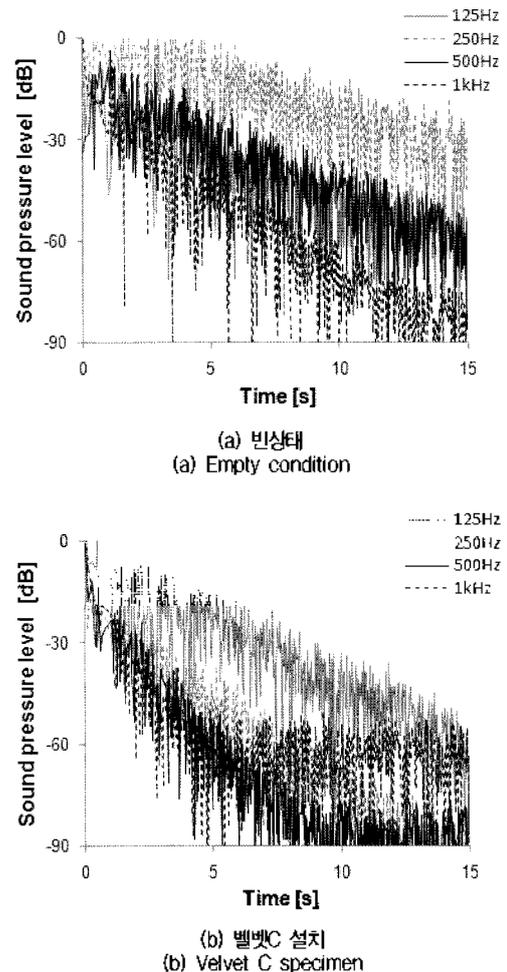


그림 2. 측정용 시료 유무에 따른 잔향챔버 내 스파크 음원의 감쇠곡선

Fig. 2. Decay curves of the spark source by presence of test specimen in the reverberation chamber.

표 1. 시료(벨벳C) 유무에 따른 잔향챔버의 주파수 대역별 잔향시간 비교 (T20)

Table 1. Comparison of reverberation time (T20) by frequency bands according to the presence of test specimen (Velvet C).

잔향시간 [s]	주파수 대역 [Hz]			
	125	250	500	1k
빈 상태	23.9	17.6	10.1	5.7
시료(벨벳C) 설치 후	14.1	10.0	6.7	4.3

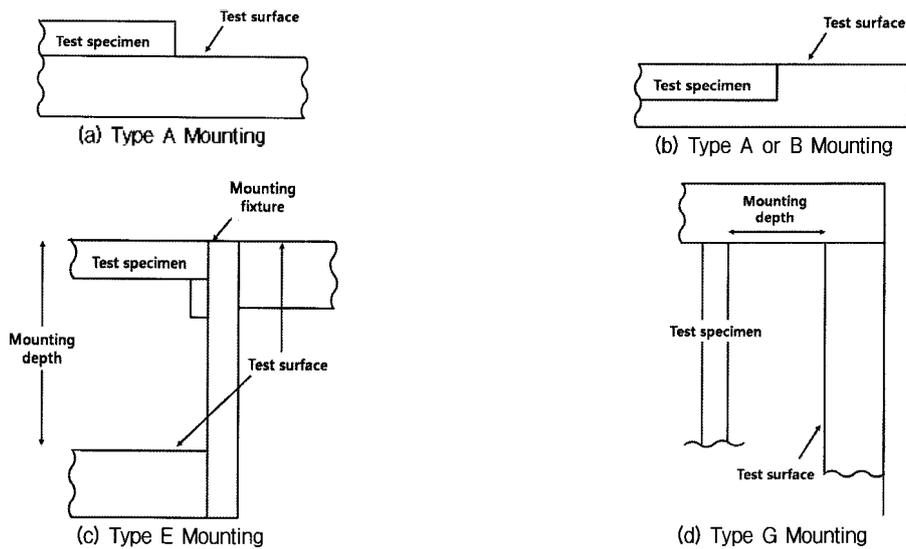


그림 3. 시료의 다른 경계조건에 따른 다양한 흡음률 측정 마운팅 방법 [11]
 Fig. 3. Various mounting types of absorption coefficient measurement by different boundary condition of test specimen [11].

을 위해 마운팅 방법을 각기 달리하여 측정을 진행하였다. E형 마운팅은 그림 3의 (c)와 같이 잔향챔버에 브라켓을 설치하여 시료를 고정하고 측정면으로부터 배면공기층의 깊이를 달리한 방법으로 공기층을 활용한 재료인 측벽의 흡음배너를 구현하도록 하였으며 G형 마운팅은 그림 3의 (d)와 같이 잔향챔버 벽에 브라켓을 설치하여 흡음천을 매달아 측정하는 방법으로 천장에 매달릴 배너를 구현할 수 있도록 하였다.

III. 다목적홀의 음향설계요소

다목적 홀은 각 공연 장르에 부합하는 다양한 음향 성능을 제공할 수 있는 공간이어야 하므로 설계 시 각 부위별 마감재료 이외에 스테이지하우스 및 천장과 측벽의 흡음배너 등 다양한 가변음향에 대한 검증이 필요하다. 따라서 축소모형에서 마감재료 및 가변음향적 요소들의 흡음특성을 검토하였다.

3.1. 반사면

공연장의 주 벽체는 무대로부터 오는 음을 공연장 전체의 공간으로 반사하여 충분한 잔향과 음압을 확보하여야 한다. 특히 무대와 가까운 측벽 및 천장 반사판 그리고 프로세니움 반사판, 발코니 소ffit 등은 객석으로 음을 전달하기 위한 1차 반사음을 생성하는 주요한 역할을 한다. 따라서 마감재는 주로 콘크리트, 콘크리트 위 무늬목 마감, GFRC (Glassfiber reinforced concrete), 석고보드

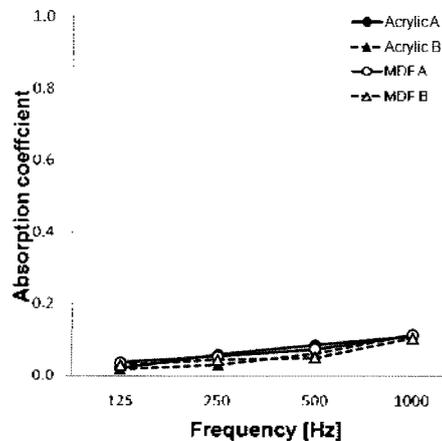


그림 4. 1:50 아크릴과 MDF의 주파수대역별 흡음률 (A: 모서리 노출, B: 모서리 매입)
 Fig. 4. Absorption coefficient of Acrylic and MDF in 1:50 scale (A: Edge exposure, B: Edge embedded).

등 반사재로 이루어지게 된다. 이들 축소모형에서 구현하기 위해 주 벽체이자 구조체로서 단단하고 매끈한 표면을 가진 아크릴과 래커 코팅이 된 MDF의 흡음률을 측정하여 주요 반사면의 재료로 선정하였다. MDF의 경우 표면에 약 3회, 모서리면에 약 7회의 래커칠을 하였으며 측정 시 모서리면의 노출 영향을 고려하기 위해 그림 3의 (a), (b)와 같이 각기 구분하여 측정을 진행하였다. 그 결과 그림 4와 같이 모서리 노출 영향은 거의 없는 것으로 볼 수 있으며 또한 표 2에서와 같이 실제홀에서 주요 반사면의 재료로 주로 사용되는 콘크리트 위 무늬목 마감된 재료의 흡음률과 비교하였을 때도 유사한 흡음 특성을 갖는 것으로 나타났다. 오케스트라 셸 및 피트는 주요 반사면이자 가변음향 요소로 활용된다. 오케스트라 셸의

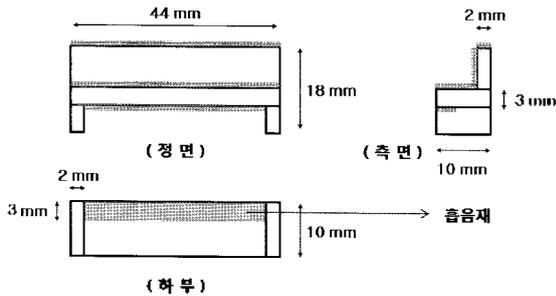
표 2. 주요 반사면의 실제 재료와 1:50 모형 재료의 흡음율

Table 2. Absorption coefficient of the real materials and 1:50 scale model materials for the main body.

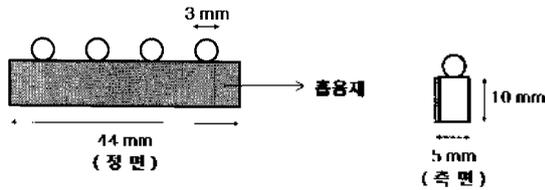
구분	재료명	미운팅	주파수 대역 [Hz]				평균
			125	250	500	1k	
실제홀	콘크리트 위 무늬목 마감*	A	0.04	0.04	0.07	0.07	0.05
1:50 축소 모형	Acrylic board 12T**	모서리 노출(A)	0.02	0.06	0.08	0.11	0.07
		모서리 매입(B)	0.02	0.03	0.06	0.12	0.06
	Lacquered MDF 12T**	모서리 노출(A)	0.04	0.05	0.07	0.11	0.07
		모서리 매입(B)	0.03	0.04	0.05	0.10	0.06

* L. Beranek "Concert Halls and Opera Houses", 1996

** 축소모형재료의 두께



(a) 4인 객석 모형
(a) Chair model for 4 persons



(b) 4인 관객 모형
(b) Audience model for 4 persons

그림 5. 4인용 1:50 관객 및 객석 모형 (상기 치수는 축소모형에서의 크기)

Fig. 5. 1:50 Scale audience and seat model for 4 persons (The above dimension indicates the scale model itself).

경우 면반도가 높은 중량 구조로 부대에서 발생하는 음을 객석으로 충분히 반사시킬 수 있도록 계획하여 최대잔향 및 음압을 확보할 수 있도록 하며, 오케스트라 피트의 경우 피트 내부에서 발생하는 음을 공연장 내부로 충분히 반사시킬 수 있는 구조로 한다. 축소모형 적용 시 오케스트라 셀과 피트의 재료는 음원의 반사에 대한 부분에 초점을 두어 주요 반사면의 재질과 같게 하였다.

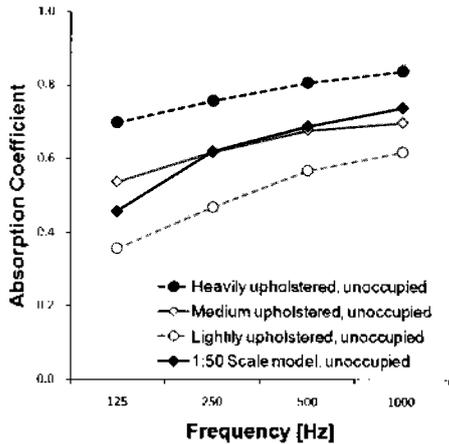
3.2. 객석

객석은 실제 홀 뿐 아니라 축소모형에서도 가장 넓은 면적과 높은 흡음력의 비중을 차지하는 부위중 하나이다 [13-15]. 모형 객석은 실제 치수와 형상에 근접하도록 그림 5의 (a)와 같이 높이는 900 mm를 50배 축소한 18 mm

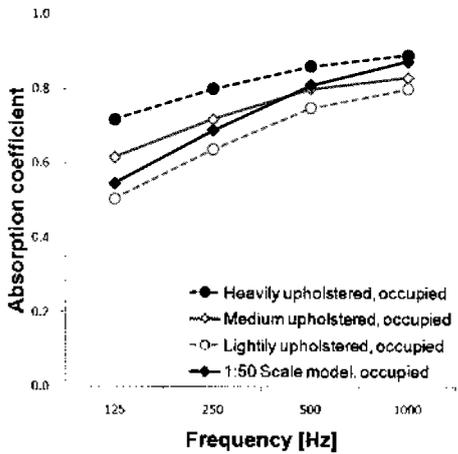
로 앉는 부분의 간이는 500 mm를 1/50한 10 mm로 제작하였으며, 등받이 및 다리부분은 2 mm두께의 목재를 좌석 부분은 3 mm두께의 목재를 각기 적용하였고 또한 쿠션부분의 구현을 위한 흡음재로 표 2의 벨벳A를 부착하였다. 각 좌석의 폭은 11 mm (실제축척 550 mm)로 설계하였다. 객석은 19 mm (실제축척 950 mm)의 열간격으로 600석 (15열x40석)을 설치하였으며, 이때의 배치면적은 0.12 m²이다. 관객의 모형은 그림 5의 (b)와 같은 치수로 두께 5 mm의 폼보드를 몸체 재료로 앞면에 흡음재로 2 mm두께의 부직포를 부착하였으며 관객의 머리 부분은 직경 3 mm의 플라스틱 구를 활용하였고 폭은 객석과 동일하게 제작하였다. 객석 흡음력은 Beranek [14]의 Medium upholstered를 목표치로 하여 흡음률 측정을 진행하였다. 그 결과 표 2 및 그림 6과 같이 각 주파수 대역 뿐만 아니라 전체적으로도 유사한 흡음력을 갖는 것으로 나타났다. 모형객석의 목표 흡음 특성은 부착된 흡음재의 양을 가감함으로써 Heavily upholstered 또는 Lightly upholstered로 조정 가능할 것으로 사료된다.

3.3. 오케스트라

실제 공연장에서 공연 시 객석의 흡음력 뿐 아니라 오케스트라 연주자에 대한 흡음력도 무시 할 수 없는 부분이다. 연주자의 배치 및 점유면적은 Beranek [14]의 데이터를 참조하여 무대 및 피트에서 오케스트라 연주자 1인당 약 1.85 m²의 면적을 차지하는 것으로 계산하였으며 1:50 축소모형의 적용을 위해 5명을 기준으로 하여 제작하였다. 크기는 아래의 그림 7과 같이 폭 50 mm에 높이 16 mm를 적용하였고 재료는 관객 모형과 동일하게 적용하였다. 또한 흡음력의 구현을 위해 수차례에 걸친 흡음재 부착 및 흡음률 측정결과 앞면 전체와 뒷면의 뒷부분에 뒷면 전체의 50%에 해당하여 면적만큼 흡음재를 부착하여 제작하게 되었으며 그 결과는 그림 8과 같다.



(a) 모형객석 공석시 흡음률
(a) Absorption coefficients of empty model chair



(b) 모형객석 민석시 흡음률
(b) Absorption coefficient of model chair with audience

그림 6. 1:50 모형객석의 흡음률
Fig. 6. Absorption coefficients of 1:50 model seats and audience.

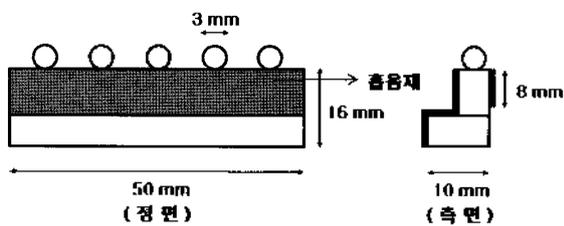


그림 7. 5인용 1:50 오케스트라 연주자 모형 (상기 치수는 축소모형에서의 크기)

Fig. 7. 1:50 Scale model of orchestra player for 5 persons (The above dimension indicates the scale model itself).

3.4. 흡음커튼 및 배너

가변음향적 요소인 흡음커튼 및 배너를 사용하게 되는 다목적홀은 콘서트, 오페라, 연극, 뮤지컬 등 음향적 요구 상황이 상당히 다른 다양한 장르의 공연을 수용 할

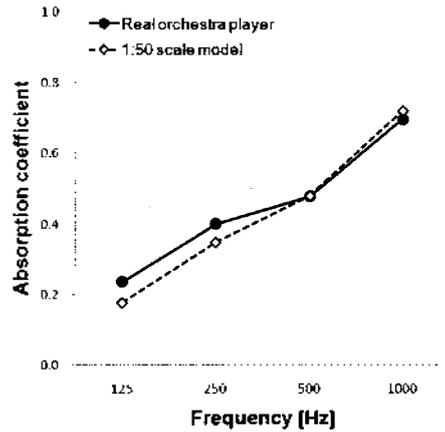


그림 8. 1:50 오케스트라 연주자 모형 1인당 흡음력
Fig. 8. Absorption power of a orchestra player model in the 1:50 scale model.

수 있어야 한다. 이러한 요구에 따라 축소모형에서 더욱 정밀한 음향적 가변을 구현하기 위해 가변배너의 흡음률을 검증하고자 하였다. 일반적인 재료들을 가변음향 요소로 사용하기 위해서는 기본적인 재료에 대한 흡음률이 필요하며 기본 흡음률을 검토함으로써 각 마운팅 방법에 따른 배면공기층의 영향뿐 아니라 각 부위 및 조건에 따라 요구되는 흡음률의 변화 폭을 유도해야 할 것으로 판단되었고 따라서 기본적인 흡음특성을 알기 위해 A형 마운팅 방법으로 측정을 진행하였다. 본 연구에서 모형 배너는 천이라는 특성으로 다른 재료들에 비해 다루기 쉽고 경제적이라는 장점을 활용할 수 있도록 하였다.

3.4.1. Type A mounting

천 소재는 벨벳, 스피커망 원단, 면 등으로 구분하여 A형 마운팅 방법으로 측정된 결과 표 3과 같다. 흡음천들은 고주파수에서 흡음률이 증가하는 경향을 보이며, 다소 흡음률이 낮은 면밀도 0.25 kg/m²의 벨벳A의 경우 실제 공연장에서 사용되는 벨벳 [16]과 가장 유사하게 나타났다. 벨벳A는 100%폴리에스테르이며 기모의 길이는 약 1 mm 정도이다.

3.4.2. Type E/G mounting

다목적 홀에서 가변음향 재료는 각 모드별 가변 잔향을 확보할 수 있어야 하며 특성상 주파수 대역별 고른 흡음 특성을 요구하므로 배면의 공기층을 활용 [17, 18]하였다. 천장에 매달린 흡음배너의 구현을 위해 G형 마운팅으로 측정을 진행하였으며 측벽 배너의 구현을 위해 E형 마운팅으로 측정을 진행하였다. 배면에 공기층을 두었을

표 3. 1:50 흡음천의 A형 마운팅 시의 흡음률

Table 3. Absorption coefficient of 1:50 scale fabric materials using Type A mounting.

실제 흡	면밀도 [kg/m ²]	주파수 대역 [Hz]				평균
		125	250	500	1k	
벨벳[15]	0.85	0.20	0.40	0.60	0.75	0.49
1:50 축소모형	면밀도* [kg/m ²]	주파수 대역 [Hz]				평균
		125	250	500	1k	
벨벳A	0.25	0.19	0.35	0.48	0.65	0.42
벨벳B	0.28	0.32	0.61	0.77	0.90	0.65
벨벳C	0.26	0.42	0.62	0.73	0.83	0.65
벨벳D	0.35	0.40	0.66	0.78	0.89	0.68
스피커망 원단A	0.15	0.06	0.14	0.20	0.32	0.18
스피커망 원단B	0.09	0.09	0.15	0.21	0.32	0.19
스피커망 원단C	0.18	0.22	0.36	0.46	0.45	0.37
면A	0.37	0.25	0.52	0.68	0.81	0.57
면B	0.26	0.22	0.45	0.76	0.99	0.61

* 모형 재료의 면밀도는 실제 재료와 비교할 수 없는 상대 값

표 4. 1:50 흡음천의 E/G형 마운팅 시의 흡음률

Table 4. Absorption coefficient of 1:50 scale fabric materials using Type E/G mounting.

재료명	배면 공기층 두께* [m]	마운팅 방법	주파수 대역 [Hz]				평균
			125	250	500	1k	
벨벳A	0.9	G	0.33	0.43	0.47	0.57	0.45
	0.9	E	0.34	0.35	0.50	0.67	0.47

표 5. 스테이지하우스 내부 마감재의 흡음률

Table 5. Absorption coefficient of interior finishing materials inside stage house.

구분	재료명	주파수 대역 [Hz]				평균
		125	250	500	1k	
실제 흡	Fiber glass board, foil reinforced kraft (FRK) faced, 50 mm, A-mount	0.51	0.65	0.86	0.71	0.68
1:50 축소모형	벨벳C (0.26 kg/m ²) + 스피커망 원단A (0.15 kg/m ²)	0.48	0.76	0.74	0.79	0.69

배 저주파 대역의 흡음률이 증가하는 것으로 나타났으며, 그 결과 표 4와 같다.

3.5. 스테이지 내부

오페라 공연 시에는 스테이지 하우스 내부 흡음력이 객석부의 음향에 크게 영향을 미친다. 실제 공연장에서 스테이지하우스는 높은 흡음력을 가지고 있으며 특히 플리타워는 각종 무대장치, 배튼 등의 실비들로 흡음력이 높다.

스테이지 하우스 내부 흡음력 구현을 위해 주파수 대역별로 평탄한 흡음 특성을 갖는 재료로 선정하고자 하였으며, 이에 따른 검토 결과 일반적인 흡음재는 고주파수에서 흡음력이 높은 경향이 있어서 표 5와 같이 저주파수와 고주파수의 차이가 비교적 적은 흡음재료인 Fiber glass board, foil reinforced kraft (FRK) faced, 50mm 를 마감재료로 활용하였다. 본 연구에서는 FGB, foil

faced의 흡음률을 축소모형에서 구현하기 위해 측정을 실시하였고 다양한 재료들을 조합하여 측정한 결과 표 5와 같이 벨벳C (0.26 kg/m²)+스피커망 원단A (0.15 kg/m²)의 조합이 가장 유사한 흡음특성을 가지는 것으로 나타났다. 벨벳C는 100% 폴리에스테르이며 기포의 길이가 약 3 mm이고 스피커망 원단은 100% 폴리에스테르에 높은 부과율을 가지는 일반적으로 스피커망으로 사용되는 천이다.

IV. 축소모형재료의 흡음률

흡음률 측정을 통해 축소모형 재료를 선정하고, 실제 재료의 흡음률 데이터와 1:50 공연장 축소모형재료를 최

종적으로 비교검토 하였다. 실제 홀에서 사용될 재료의 흡음률은 문헌 [14, 16, 19]의 자료를 활용하였으며 흡음률은 실제 및 모형재료 모두 125 Hz-1 kHz까지의 평균으로 비교하였다. 그 결과는 표 6과 같이 각 적용부위 별로 평균흡음률이 유사한 것으로 나타났다. 따라서 1:50 축소 모형 실험의 정확도를 향상시키기 위한 재료의 선정은 본 연구와 같이 실제재료와 비교하였을 때 부위별 적용 형태와 마감 재질, 평균흡음률이 유사한 재료를 선정해야 한다.

V. 토의 및 결론

다목적홀 음향설계에서 1:50 축소모형의 재료흡음률을 구현하기 위해 각 요소별로 구분하고 모형재료의 흡음률을 측정하였다. 실제 공연장에서 사용되는 재료의 흡음률과 비교, 검토하였으며 최종적으로 내부 마감재를 제시하였다. 주요 반사재는 측벽과 기타 반사 마감 재료로 구분 할 수 있으며 공연장에서 흡음요소로 작용하는 좌석과 관객, 가변음향 적용시 사용될 배너, 무대 및 오케스트라 피트의 오케스트라 연주자 모형으로 구분 적용하

였다. 또한 흡음재로 활용될 소재의 천들을 각기 마운팅 방법을 달리하여 적용하였다.

가변음향요소인 천장과 측벽 배너는 E, G형 마운팅, 스테이지 하우스 내부 벽체 마감 재료는 A형 마운팅으로 측정한 흡음률을 각기 부위별로 적용할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 제시하는 축소모형 재료의 각 부위별 흡음률 데이터들을 실제 재료의 흡음률 데이터와 비교 고찰한 결과 마감재료의 흡음 특성을 충분히 구현하고 있으며, 각 재료들을 이용하여 1:50 축소모형 실험에서의 활용 시 실제 공연장과 유사한 음장을 구현할 수 있을 것으로 사료된다.

1:50 축소모형은 1kHz까지 측정이 가능하고, 홀 형상 변화를 저비용과 작은 공간으로 신속하게 반영하여 평가할 수 있기 때문에, 초기 단계의 음향설계에서 중주파수 대역 이하의 음향특성을 예측하는데 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 모형 측정시 수반되는 오차를 최소화하기 위해서는 축소모형의 각 부위별 면적 및 배치와 마감에 있어서 흡음율 특성 및 재료 표면의 디테일을 고려한 세심한 재료의 선정 과정과 사전계획이 필요하다.

표 6. 실제재료와 축소모형재료의 홀 적용부위별 평균 흡음률 비교
Table 6. Comparison of average absorption coefficient of the real materials and 1:50 scale model materials by hall elements.

적용부위	실제 마감재료	평균흡음률	축소모형 마감재료	평균흡음률
객석(만석)	Audience, seats fully occupied (Medium upholstered)	0.74	1:50 축소모형 객석 및 모형관객	0.73
객석(공석)	Seats unoccupied (Medium upholstered)	0.64	1:50 축소모형 객석	0.63
오케스트라	Orchestra player	0.45	1:50 연주자 모형	0.43
벽면흡음커튼	Absorption banner with backing air cavity	0.41	벨벳A (0.25 kg/m ²)	0.47
천장흡음배너	Velour (0.85 kg/m ²)	0.49	벨벳A (0.25 kg/m ²)	0.49
스테이지 하우스 벽면	Fiberglass board, foil reinforced kraft(FRK) faced, 50mm, A-mount	0.68	벨벳C (0.26 kg/m ²) + 스파커맘 원단A (0.15 kg/m ²)	0.69
반사면	측벽	Concrete, wooden panel	이크릴, MDF(합성목재) + 표면 래커코팅마감	0.07
	복도	Carpet, thin, cemented to concrete		
	천장 반사판	Plywood on battens fixed to solid backing		
	발코니프론트	Wood paneling		
	발코니소ffit	Smooth concrete, painted		
	무대바닥	Multi-layered wood floor (27 mm over airspace, 17kg/m ²)		
	무대전면	Plaster, on lath		
	피트레일	Wood paneling		
	피트내벽	Wood paneling		
	피트바닥	Linoleum on concrete		
	주요 반사면 흡음율			

참고 문헌

1. M. Barron, "Acoustic Scale Modeling for enclosed spaces", *Building Technical File*, vol. 18, no. 1, pp. 51-56, 1987.
2. M. Barron, "Auditorium Acoustic Modeling Now", *Applied Acoustics*, vol. 16, no. 4, pp. 279-290, 1983.
3. M. Barron, C. B. Chinoy "1:50 scale acoustic models for objective testing of auditoria", *Applied Acoustics*, vol. 16, no. 5, pp. 361-75, 1979.
4. A. Cocchi et al, "Reliability of Scale-Model Researches a Concert Hall Case", *Applied Acoustics*, vol. 30, no. 1, pp. 1-13, 1990.
5. Reichard W, "Raumakustische Modelluntersuchungen mit dem Impuls-Schall-Test beim Neubau des Kongress und Konzertsales im 'haus des Lehrers' am Alexanderplatz, Berlin, Acoustica", *Berlin Acoustica*, vol. 20, no. 3, pp. 149-58, 1968.
6. Day BF, "A tenth-scale model audience", *Applied Acoustics*, vol. 1, no. 2, pp. 121-35, 1968.
7. J. Newton, R. Harris, Arup Acoustics, "The acoustic design of oslo opera house", *Proc. ISRA, Sevilla, 2007*.
8. 전진용, 류종관, 유병철, "콘서트홀의 음향 예측을 위한 1:50 스케일 모델의 활용", *대한건축학회 논문집*, 19권 1호, pp. 217-224, 2003.
9. ISO 354, "Measurement of sound absorption in a reverberation room"
10. ISO 9613-1, "Attenuation of sound during propagation outdoors"
11. Rendell R, Torres, U. Peter Svensson, and Mendel Kleiner, "Computation of edge diffraction for more accurate room acoustics auralization", *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 109 no. 2, pp. 0001-4966, 2001.
12. ASTM E 795, "Standard practices for mounting test specimens during sound absorption tests"
13. L. Beranek, T. Hidaka "Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces", *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 104 no. 6, pp. 3169-3177, 1998.
14. L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses*, Springer, 1996.
15. M. Barron, S. Coleman, "Measurements of the absorption by auditorium seating—a model study", *J. Sound Vib.*, vol. 239 no. 4, pp. 573-587, 2001.
16. C. M. Harris, *Handbook of acoustical measurements and noise control*, American Institute of Physics, 1991.

17. C. Pilon, R. Panneton, "Effects of circumferential air gaps on the measurement of the absorption coefficient of poroelastic materials", *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 115 no. 5, pp. 2383-2383, 2002.
18. J. Kang, H. V. Fuchs, "Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space", *J. Sound Vib.*, vol. 220 no. 5, pp. 905-920, 1999.
19. 일본음향재료협회, *소음 진동대책 핸드북*, 집문사, 1983.
20. J. Y. Jeon, J. K. Ryu, Y. H. Kim, S. Sato, "Influence of absorption properties of materials on the accuracy of simulated acoustical measures in 1:10 scale model test", *Applied Acoustics*, vol. 70, no. 4, pp. 615-625, 2009.
21. R. Pompoli, N. Prodi, "Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: Procedures and validation", *J. Sound Vib.*, vol. 232 no. 1, pp. 281-301, 2000.

저자 약력

• 전진용 (Jin-Yong Jeon)



1982년 2월: 한양대학교 건축공학과 (공학사)
 1991년 8월: Univ. of Sydney Building Science (석사)
 1994년 5월: Univ. of Sydney Acoustics (박사)
 1998년 3월~현재: 한양대학교 건축공학부 교수
 ※ 주관심분야: 건축음향, 심리음향, 소음 및 진동, 사무
 □ 스케이트

• 김정준 (Jeong-Jun Kim)



2007년 8월: 부산대학교 건축학부 (공학사)
 2008년 3월~현재: 한양대학교 건축환경공학과 (석사과
 장)
 ※ 주관심 분야: 건축음향, 공연장음향, 음장 시뮬레이션

• 김용희 (Yong-Hee Kim)



2005년 2월: 한양대학교 건축공학부 (공학사)
 2005년 3월~현재: 한양대학교 건축환경공학과 (박사수
 료)
 ※ 주관심분야: 실내음향, 공연장 음향설계, 확산, 무대
 음향