

축척모형을 활용한 개방형 천장의 흡음률 측정

Measurements of absorption coefficients of open-type ceilings using 1:25 scale model reverberation chamber

이혜미† · 김용희* · 전진용**

Hye Mi Lee, Yong Hee Kim, Jin Yong Jeon

Key Words : Open-type ceiling(개방형 천장), Scale model (축척모형), Absorption coefficient(흡음률)

ABSTRACT

This paper investigates acoustical characteristics of open-type ceilings using 1:25 scale model. The field survey in the existing 15 halls was carried out to figure out the ceiling structure. The components of the open-type ceiling were mainly steel truss structures, duct, catwalk and finishing surfaces. In order to investigate the absorption characteristics of the equipped ceiling, the absorption coefficient measurements were made using 1:25 reverberation chamber based on ISO 354. Results showed that the absorption coefficient of the empty ceiling structure (6m-height) with 50%-perforated covering plate was 0.2-0.3 at above 500 Hz. When steel structure was added inside the empty ceiling, absorption coefficient increased by 0.16 at 250-1kHz. Adding catwalk did not increase the absorption, but adding duct increased the absorption at 1-2kHz. NRC of the equipped ceiling was 0.39, and the absorption characteristics were mainly found at high frequencies. In addition, the opening size of the covering plate did not change the absorption coefficient of the equipped ceiling meaningfully.

1. 서론

공연장의 음향성능을 평가하는 중요한 지표인 잔향시간은 공연장 용적과 마감재의 흡음력의 영향을 받는다. 최근 개방형 천장은 다양한 목적에 맞는 음향 성능 구현 및 공간 제한에 따른 용적 확보 등의 목적으로 많이 설계되고 있다. 천장 마감은 목재나 각 파이프에 의한 루버 타입이나 천장 반사판으로 일부만 마감하는 방식 등으로 이루어진다. 하지만 개방형 천장 마감 방식은 유효한 반사면의 경계가 모호하여 객석부 용적 산정에 어려움이 있다. 이렇게 노출된 형태의 천장 내부 공간은 천장 내부의 공조, 조명, 기기 등의 설비 구성에 따른 변인이 크기 때문에 흡음 및 확산 특성을 예측하기 어렵다. 따라서 객석부의 정확한 음향 특성예측을 위하여 개방형 천장의 음향 특성에 대한 연구가 필요하다.

현재 천장에 대한 연구는 달 천장(Suspended ceiling)의 차음 제어 방법⁽¹⁾, 천장 마감재 흡음률 실험에서 시료 설치 방법의 영향에 대해⁽²⁾ 이루어지고 있다. 반면에 공연장 음향 설계 분야에서는 주로 객석 축소모형을 이용한 흡음특

성에 대한 연구⁽³⁾와 공연장 음향 성능 개선을 위한 천장 반사판 설계에 대한 연구⁽⁴⁾가 진행되었으나, 공연장 객석 천장의 흡음 및 확산 특성에 대한 연구가 진행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 개방형 천장의 음향 특성을 조사하기 위해 개방형 천장을 축소모형으로 제작하여 각 설비 구성요소의 변화에 따른 흡음력의 영향을 평가하고자 하였다. 국내 공연장의 현황조사를 통해 실험용 모델을 선정하였고, 축소모형 잔향실에서의 음향 측정을 통해 흡음률을 계산 하였다.

2. 공연장 현황 조사

개방형 천장의 시료모델은 다목적 홀의 개방형 천장을 대표할 수 있어야 하므로, 시료 선정을 위한 사전 조사가 이루어져야 한다. 현황 조사를 통해 공연장 천장 내부에 있는 설비 시설의 높이 및 면적 등을 산출하여야 하며, 산출한 결과를 바탕으로 한 시료 설계가 필요하다. 따라서 Table. 1과 같이 국내 공연장 현황 조사를 선행하였으며, 시료 설계를 위해 객석부 홀, 천장, 철골 구조, 덕트, 캐트워크와 관련된 지표들을 산출하였다. 공연장의 천장 높이는 1.2m에서 9.9m의 범위로 나타났으며, 객석 수가 많은 대규모의 공연장일수록 천장 높이는 크게 나타났으며, 15개의 평균 천장 높이는 6m로 나타났다.

† 한양대학교 일반대학원 건축환경공학과 석사과정
E-mail: ymihoo@hanmail.net
Tel: (02) 2220-1795, Fax: (02) 2220-4794

* 한양대학교 일반대학원 건축환경공학과

** 한양대학교 건축대학 부교수

Table. 1 국내 공연장의 천장 현황

공연장	객석수	천장 마감	공조 방식	용도	홀 용적 [m ³]	홀 바닥 면적 [m ²]	홀 높이 (평균) [m]	천장 높이 (평균) [m]	철골 간격 [m]	철골 높이 [m]	캐트워크/바닥 면적 비율 [%]	덕트/천장 용적 비율 [%]	마감재 개구율 [%]
A	280	개방형	천장취출	다목적	2,700	360 (부대포함)	7	1.2	3	1.0			100
B	300	개방형	천장취출	다목적	1,030	166	7	3.2	3	1.7	52		100
C	354	폐쇄형	천장취출	클래식 전용	3,400	405	10	4.7	2.3	1.1	28		
D	427	폐쇄형	천장취출	다목적	4,500	399	11	5.9					
E	440	개방형	바닥취출	클래식 전용									60
F	443	개방형	바닥취출	클래식 전용	2,230	288	8	1.7	2.9	1.3			40
G	664	폐쇄형	천장취출	다목적	5,280	528					63		
H	1,103	개방형	바닥취출	다목적								0.9	50
I	1,449	폐쇄형	바닥취출	클래식 전용	9,800	696	15	6.6	8.0	3.8		0.9	
J	1,563	폐쇄형	천장취출	다목적	23,500	1,235	19	8.7					
K	1,775	개방형	바닥취출	다목적	15,610	1,036	20	7.9	4.5	3.8	10		80
L	1,804	폐쇄형	바닥취출	다목적	15,029	737	20	7.9	3.3	4.3	47	1.2	
M	2,340	폐쇄형	천장취출	다목적	22,700	1,474	21	7.9	6.0	2.9	4		
N	2,523	폐쇄형	천장취출	클래식 전용	25,800	1,670	20	9.9	3.2	5.4	23		
O	3,028	폐쇄형	바닥취출	다목적	28,920	1,640					16	0.8	
평균					12,346	1,233	14	6	4.0	2.8	30	0.9	

2.1 천장마감에 의한 분류

현황조사를 실시한 15개의 국내 공연장 중에서 설비시설(덕트, 투광실 등)이 천장의 유효 마감면(루버, 그릴, 반사판)에 의해 노출된 개방형 천장(Open-type ceiling)은 6개의 공연장에서 나타났다. 소규모 실험 극장과 같이 별도의 마감면 없이 모든 설비들이 노출된 타입과 잔향용적 증대를 위한 400석 이상의 중규모 클래식 전용 홀, 다양한 공연 목적에 따른 음향 성능 구현을 위한 1,000석 이상의 공연장이 있었다. 개방형 천장의 개구율은 40%에서 100%로 다양하게 나타났으며, 마감방식은 목재나 각 파이프로 일정한 간격으로 배열하는 방식, 천장 반사판을 설치하는 방식과 천장 전체를 어두운색으로 페인트 마감하는 방식으로 조사 되었다.

2.2 공연장의 공조 방식

천장 내부에 필수적으로 배치되는 것은 객석부 공조를 위한 덕트 시설 이므로 공연장의 공조 방식에 대한 조사가 필요하다. 공연장의 공조 방식은 천장 면에 노출형 디퓨저를 설치하여 취출한 후 천장이나 하부에서 흡입하는 천장취출 공조 시스템과 바닥에서 취출하고 천장에서 흡입하는 바닥취출 공조 시스템으로 구분 할 수 있다. 최근 리노베이션이나 새로 건립한 공연장의 경우 균일하고, 저속기류, 저소음 공조가 가능한 바닥 취출 공조 방식을 적용한 케이스가 많았다. 본 연구에서는 바닥 취출 공조 시스템을 적용하고 있는 공연장의 덕트 용적을 조사하였으며, 천장 용적 대비 덕트 용적의 비율을 산출한 결과 평균 0.9%의 용적을 차지하는 것으로 나타났다.

덕트는 아연도 강판위에 보온 및 차음재를 사용하며, 개방형 천장에서는 검은색 페인트나 그라스 크로스로 마감하여 보이지 않도록 하였으며, 폐쇄형 천장에서는 배파 배리어로 마감 되어 있었다.

2.3 그 외의 시설

천장 내부에는 덕트 설비 외에도 조명과 전기 설비를 보수 점검을 위한 캐트워크와 투광실이 있으며, 철골 구조 및 경량 철골 구조, 배선, 배관 등 다양한 시설들이 존재한다. 시료 설계에서는 점유율이 큰 철골 구조와 캐트워크를 고려하였으며, 철골 구조는 주로 트러스 형태로 평균 2.8m의 높이를 차지하였으며, 내화 처리를 위한 뿔칠 및 페인트 마감이 되어 있었다. 익스펜디드 메탈(Expanded metal)과 각 파이프로 구성된 캐트워크는 객석 바닥 면적 대비 30%를 차지하는 것으로 나타났다.

3. 측정

3.1 시료 설계

개방형 천장의 구성 요소에 따른 음향 특성을 조사하기 위해 흡음률 측정을 위한 시료는 Fig. 1과 같이 1:25 축척으로 제작하였다. 공연장 현황조사 결과 나타난 천장 평균 높이인 6m를 기준으로 하여 시료를 설계하였으며, 철골 구조는 현황 조사 결과 평균 간격과 높이는 각각 4m, 2.8m 높이로 나타났으며, 이때의 철골 구조를 천장높이 6m로 가정하였다. 또한 바닥 면적의 30%를 캐트워크의 면적으로, 천장 용적의 0.9%를 덕트의 용적으로 설계하였으며, 마감재의 개구율은 20%, 50%, 77%, 100%를 적용하였다.

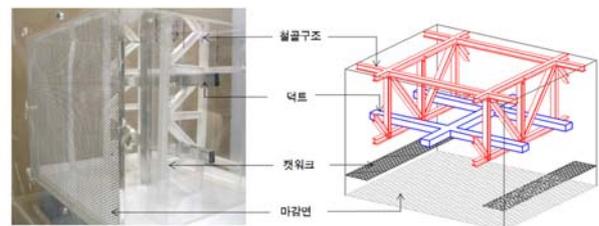
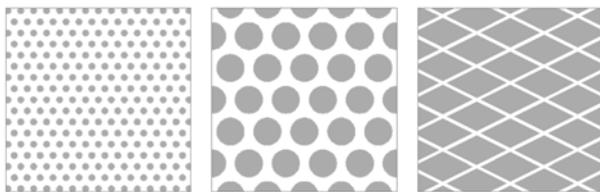


Fig. 1 개방형 천장 모델

시료 모형의 재료는 밀도와 흡음률을 고려하여 실제 재료의 특성을 재현할 수 있도록 고려하였다. 철의 밀도는 7833kg/m^3 ⁽⁵⁾으로 1:25 축척에서 철골구조의 강성을 충분히 재현할 수 있는 라이징 뮤지엄 보드(Rising museum board)를 사용하였다. 덕트의 주재료인 아연도 강판은 원재료인 철과 비교하여 밀도와 흡음률을 고려한 알루미늄 판 0.2mm로 재현하였다. 캐위크는 실제 재료인 익스펜디드 메탈과 77%의 유사한 개구율을 갖는 알루미늄 타공판을 이용하였다. 천장 마감재의 개구율 재현은 Fig.2와 같은 모양으로 20, 50, 77%의 개구율을 가지고 있는 알루미늄 타공판을 이용하였으며, 100%의 개구율은 별도의 마감재 하지 않았다.



(a) 20% (b) 50% (c) 77%
Fig. 2 알루미늄 타공판의 개구부 형상

3.2 시료 설치 및 측정

본 실험의 시료는 ASTM E795⁽⁶⁾에서 규정되어 있는 배후의 공기층이 있는 천장 마감재의 흡음률 측정 시료 설치 방법(Type E Mounting)에 따라 설치하였다. 목표한 시료의 단면 높이가 6m(1/25축척에서 240mm)로 매우 높았기 때문에 Fig. 3과 같이 잔향실의 한쪽 면에 시료를 매입하였다. 시료는 두께 3mm인 아크릴 판으로 잔향실 외부로 공기가 새지 않도록 수밀하게 고정하였으며 축척비를 고려할 때 이것은 ASTM 10.2.5항⁽⁶⁾의 재료기준을 만족한다.

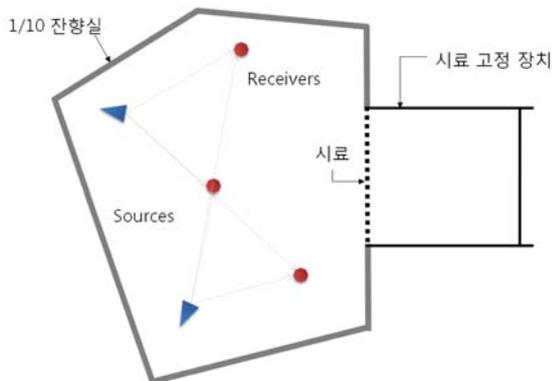


Fig. 3 시료 고정 장치 설치 개략도(평면)

시료의 흡음률 측정법은 ISO 354⁽⁷⁾를 준용하였다. 시료의 유무에 따른 잔향시간의 변화는 고압 전기 스파크 음원과 1/8"마이크로폰을 이용하여 측정하였다. 잔향시간의 차이를 이용해 등가흡음면적을 계산하여 시료의 면적으로 나누어 흡음률을 산출하였다.

4. 결 과

4.1 구성 요소의 영향

개방형 천장(50% 개구율의 타공판+철골+덕트+캐위크+공기층)과 천장 내부의 각 구성 요소 조합별 주파수 대역 흡음률은 Fig. 4와 같다. 천장 높이 6m에서 50% 개구율의 타공판으로 시료를 덮었을 때는 고주파 대역에서 0.20이상의 흡음률이 증가하여, 타공판 형상에 의해 고주파대역의 음이 흡음된 것으로 보인다. 반면 시료내부에 철골 구조를 설치하였을 때 125Hz와 2kHz에서 흡음률의 차이가 0.07 이내로 영향이 적었으며, 250Hz에서 1kHz에서는 평균 흡음률이 0.16이상 증가를 보였다. 이것으로 철골구조의 형상에 의해 중주파 대역에서 흡음이 된 것으로 사료된다. 또한 캐위크는 흡음률의 영향이 나타나지 않아, 타공판으로 재현한 캐위크의 형상에 의해 음의 흡음효과가 나타나지 않은 것으로 보인다. 반면 덕트를 설치하였을 때는 500Hz까지는 흡음률의 영향이 매우 낮았으나, 1kHz와 2kHz에서 흡음률이 0.10에서 0.16 증가하였다. 이들 구성으로 천장 높이 6m인 개방형 천장의 흡음률은 125Hz에서 0.11로 매우 낮았으며, 500Hz에서 2kHz까지는 0.37에서 0.51로 나타났다. 개방형 천장은 고주파로 갈수록 흡음률이 증가하는 경향이 나타났다.

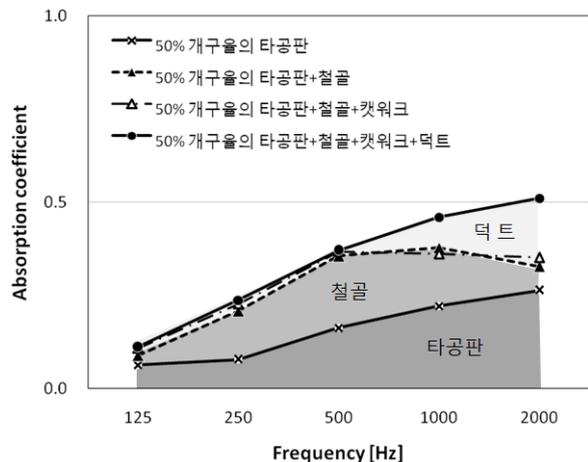


Fig. 4 개방형 천장의 주파수 대역별 흡음률

4.2 개구율의 영향

시료가 없는 빈상태의 잔향실과 천장높이 6m에서 내부구성요소가 있는 개방형 천장 모형 시료에서 다양한 개구율

을 가진 타공판을 설치한 잔향실의 잔향시간을 측정하여 개방형 천장의 흡음률을 산출하였다. 개구율에 따른 개방형 천장의 흡음률 측정 결과는 Fig. 5와 같이 나타났으며, 고주파로 갈수록 흡음률이 증가하는 개방형 천장의 흡음률 특성은 동일하였다. 저주파에서는 개구율이 높을수록 흡음률이 다소 낮게 나타나는 경향을 보였으나 500Hz에서는 77%의 개구율을 가진 타공판이 다소 높게 나타났다. 또한 고주파에서는 개구율에 따른 흡음률의 경향은 나타나지 않았으나, 50%의 개구율을 가진 타공판일 경우 흡음률이 다른 개구율에 비해 0.09 낮게 나타났다. 개방형천장의 흡음률 차이는 0.1이내로 개구율의 큰 영향은 나타나지 않은 것으로 사료된다. 배후의 공기층을 고려했을 때 20%, 50% 타공판의 유효주파수 대역은 52~79Hz⁽⁸⁾로 실내음향에서 고려하는 주파수대역에서 제외되어 주파수 대역별 특성이 나타나지 않은 것으로 판단된다.

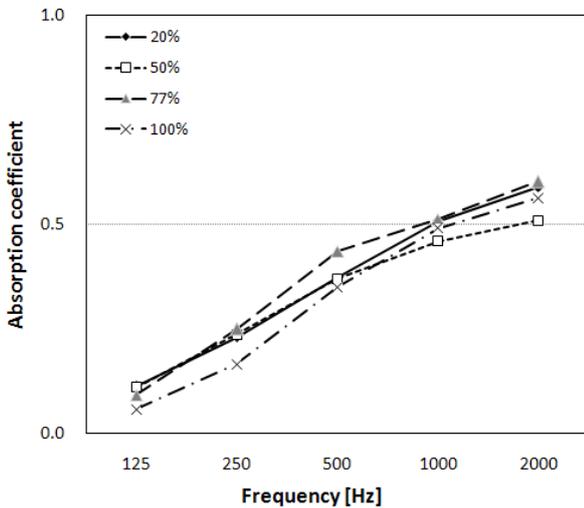


Fig. 5 개구율에 따른 개방형 천장의 흡음률

5. 토의 및 결론

본 연구에서는 공연장의 음향 성능 및 기능적 목적으로 설계되고 있는 개방형 천장을 조사하고 음향 특성을 알아보 고자 하였다. 국내 공연장 현황 조사를 통해 개방형 천장의 1: 25 축척 모형 시료를 설계 하였고, 실험을 통해 흡음률의 변화를 알아보 고자 하였다.

천장 높이 6m에서 50%개구율을 가진 마감재료만 마감 을 하고 내부 구성요소가 없는 경우에는 평균 흡음률이 0.4로 나타났다. 50%개구율의 마감재에 내부 구성 요소가 있을 경우 각 조합에 따라 250Hz에서 2kHz의 평균흡음률은 0.18 에서 0.39의 범위로 나타났다. 개방형 천장의 흡음률은 고주 파로 갈수록 흡음률이 높은 경향이 나타나며, 내부 구성요소 에 의해 흡음 현상이 나타나는 것으로 사료된다. 특히 철골 구조는 중주파 대역의 음향 성능과 영향이 있을 것으로 생각

되며, 덕트와 타공판에 의해 2kHz에서 흡음률의 증가하였 는데 반사재질인 알루미늄 판에 의한 영향이 큰 것으로 사료된 다. 공연장의 천장 마감재는 스틸 및 목재 등 다양한 재료로 사용되고 있으므로, 실제 표면마감재의 흡음특성에 따라 개 구율을 가진 마감재의 흡음률 영향은 다소 차이가 있을 것으 로 예측된다. 그리고 개구율에 따른 개방형 천장의 흡음률 변화는 나타나지 않았다. 따라서 실제 공연장 표면 마감재 설계 시 실내음향에서 고려하는 주파수 대역에서 유효한 주 파수가 나오는 개구율 과 마감재의 간격 및 크기 설계가 필 요하다고 사료된다.

공연장이 다목적의 기능이 요구 될수록 가변 흡음 배너나 가변 반사판이 설계 되고 있으며, 음향 설계 시 천장 내부 의 음향 특성 예측에 대한 필요성이 요구되고 있다. 따라서 개방형 천장에서 흡음배너의 영향에 따른 흡음특성과 개구 부 형상에 따른 흡음특성에 대한 연구가 필요하다. 또한 천 장 높이가 변화하였을 때 흡음특성의 변화를 알아보고, 더 나아가 실험 결과로 얻은 개방형 천장의 흡음률을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 검증하는 연구가 진행되어야 할 것이 다. 또한 실내음향 성능 예측 시 필요한 천장의 확산율 측 정 방법 및 시뮬레이션 적용 방법에 대한 연구를 진행하여 야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) R. E. Halliwell and J. D. Quirt, 1991, "Controlling Interoffice Sound-Transmission through a Suspended Ceiling." Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 90, pp. 1446~1453.
- (2) M. Godoy, P. J. Barry and S. R. Bistafa, 2006, "A study of the influence of mounting conditions on the measured sound absorption in laboratory tests of suspended ceilings(L)", Journal of Acoustical Society of America. Vol. 119, No. 1, pp. 33~36.
- (3) L. L. Beranek and T. Hidaka, 1998, "Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces." Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 104, pp. 3169~3177.
- (4) J. H. Rindel, 1991, "Design of New Ceiling Reflectors for Improved Ensemble in a Concert Hall." Applied Acoustics. Vol. 34, pp. 7-17.
- (5) L. K. Irvine, R. L. Richards, 1998, "Acoustics and noise control handbook for architects and builders", KRIEGER PUBLISHING COMPANY
- (6) ASTM E795, 2000, "Standard Practices for Mounting Test Specimens During Sound Absorption tests"
- (7) ISO 354, 2003, "Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room"
- (8) 박병전, 1989, "건축음향", 기문당