음장제어용 막재료의 음향 및 단열특성

Sound Absorption and Thermal Insulation Characteristics of Membrane Used for Sound Field Control

정 정 호[†] · 김 정 욱^{*} · 정 재 군^{*} · 조 병 욱^{**}

JeongHo Jeong, JeongUk Kim, JaeGun Jeong and ByungWook Cho

(2011년 3월 25일 접수 ; 2012년 1월 31일 심사완료)

Key Words : Membrane Material(막재료), Sound Absorption(흡음), Thermal Insulation(단열), Sound Field Control(음장제어)

ABSTRACT

Nowadays membrane material is widely used for large indoor spaces and long spaces such as traditional market. Thermal insulation and sound field control performance is considered as a main properties for design of such buildings. In this paper sound absorption and thermal insulation properties of membrane material was investigated. Firstly, normal incidence sound absorption coefficient of 10 kinds of glass wool textiles showed that sound absorption coefficient was increased in proportion of thickness and surface density of textile. Sound absorption coefficient of 4 kinds of sound absorptive inner membrane with outer membrane was tested in the reverberation chamber. Sound absorption coefficient of mid frequency range was about 0.4 ~ 0.6. Also, sound absorption coefficient was changed by the air space behind the membrane material. Secondly, sound field control performance was investigated using mock-up space. By the installation of sound absorption membrane material, reverberation time was decreased and speech intelligibility was increased. Finally, thermal resistance and room temperature in two kinds of mock-up rooms were tested, simultaneously. Results of thermal properties showed thermal insulation properties were increased by adding inner membrane material underneath the outer membrane.

1. 서 론

대공간 건축물, 재래시장 환경 개선 및 각종 경기장 건설의 증가에 따라 해당공간의 음향성능 최적화에 대한 수요가 증가하고 있다. 재래시장과 경기장의 경우 해당공간의 음향제어를 위한 음향재료를 적용할 수 있는 주요 구조부위는 천장으로 제한

된다. 위와 같은 공간에 사용되는 음향재료는 경량의 재료이어야 하고 음향제어 뿐만 아니라 건축물 사용 에너지의 절감에도 효과적이어야 한다.

대공간의 천장 또는 지붕재료로는 철강재 지붕판, 폴리카보네이트, 아크릴 및 막재료 등이 있다. 위의 재료 중 경량이며 미려한 외관을 구현할 수 있는 재료는 막재료이며, 흡음성 내막을 설치하는 경우 흡음성능을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다.

과거 경기장 및 체육관에 설치되는 막재료의 음향성능 평가는 수행되었으나, 흡음 막재료 및 막구조에 대한 정량적인 음향성능 평가 및 설계 요소 도출에 관한 연구가 필요하다. 또한 막재료 설치시

[†] 교신저자; 정회원, 방재시험연구원

E-mail : jhjeong@kfpa.or.kr

Tel : (031)887-6693, Fax : (031)887-6739

^{*} 방재시험연구원

^{**} (주)타이가

단열성능 개선 및 실내 공간 열환경에 대한 연구가 부족하여 이에 대한 보완일 필요한 실정이다.

이 연구에서는 막재료의 밀도, 두께 등의 변화에 따른 흡음특성 변화를 조사하기 위하여 10종의 유리섬유 직조물을 대상으로 수직입사 흡음성능을 측정하였으며, 5종의 막재료를 대상으로의 잔향실법 흡음성능을 측정하여 비교하였다. 이를 통해 막재료의 음향성능과 관계가 깊은 요인을 도출하였으며, 음향성능이 우수한 흡음 막재료를 적용한 경우의 실내 열환경 특성도 함께 비교 평가하였다.

2. 막재료의 음향성능 관련 연구

막재료와 관련된 기존의 연구는 실험적인 방법과 함께 이론적인 예측모델을 중심으로 수행되었다. Sakagami 등⁽¹⁾, Pierce 등⁽²⁾은 무한 단일막에 대한 이론 모델을 수립하여 흡음계수를 예측하였으며, 이는 막의 질량과 공기층에 의한 공명현상을 흡음성능 관련 인자로 포함하였다. Takahashi 등⁽³⁾은 투과성이 있는 단일막의 흡음성능과 투과율을 예측하였으며, 막에 가해지는 장력, 밀도, 흐름저항 등에 의해 흡음과 투과율이 변화되는 것을 실험결과와 비교하였다. Hashimoto 등⁽⁴⁾은 대공간 구성에 사용되는 막재료에 부가 질량체를 적용하였을 경우 5 ~ 11 dB의 차음성능이 향상되는 것을 이론 및 실험을 통해 확인하였다.

이중막의 음향특성의 이론적 연구는 Kiyama 등⁽⁵⁾에 의해 수행되었다. 이중막의 특성은 내표면 막의 밀도가 증가함에 따라 최대 흡음량을 갖는 주파수 대역이 낮아지며, 배후 공기층이 증가함에 따라 최대 흡음특성을 갖는 주파수 대역이 낮아지는 것으로 나타났다. Sakagami 등⁽⁶⁾는 건축물의 천장구조로 사용되는 이중 막구조의 이론 모델을 수립하여, 흐름저항, 면밀도, 배후공기층 등의 영향을 인자별로 조사하였다. 흐름저항의 경우 일정한 범위에서 흡음성능이 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 저주파대역의 흡음성능은 통기성을 갖는 내막의 밀도가 증가함에 따라 증가하지만 통기성이 없는 외막의 밀도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. Sakagami 등⁽⁷⁾은 막구조 흡음계수 예측결과를 잔향실법 흡음계수 측정결과와 비교하여 유사한 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Sakagami⁽⁶⁾는 이중막의 흡음계수를 두 개의 잔향실이 연결된 공간에서 한쪽 잔향실에서는 음원을 발생시키고 반대편 잔향실에서는 전달되는 음향에너지와 막구조의 음향투과손실과 막구조에서 흡수되는 음향에너지를 산출하여 예측하였다. 또한 Sakagami 등⁽⁷⁾의 연구에서는 잔향실 내에 막구조가 설치된 포스트를 세워서 이중막에 대한 실험과 예측을 수행하였다.

국내의 막재료 관련 연구는 월드컵 경기장 건설을 계기로 PTFE 막재료를 적용한 경기장의 음향성능 평가⁽⁸⁾가 수행되었다. PTFE 막재료를 적용한 야외 공연장⁽⁹⁾ 및 다목적 경기장⁽¹⁰⁾의 음향성능 개선에 관한 연구도 수행되었다.

이상의 연구결과 밀도가 높고 통기성이 없는 외막구조에 일정한 공기층을 확보하여 통기성이 있는 내막구조를 설치할 경우, 통기성이 있는 내막에 의해 음에너지가 흡수되어 경기장 및 공연장의 잔향시간이 감소하고 명료한 음성 전달이 가능한 것으로 나타났다. 김정중 등^(11,12)의 연구에서는 다목적 경기장에 설치되는 복합 막구조(외막+내막)의 정량적인 흡음성능 평가를 위하여 잔향실 및 수직입사 흡음특성을 조사하였으나, 단일막의 흡음특성에 대한 보완 연구는 필요하다.

이 연구에서는 이전의 이론적 연구와 실제 공간에서의 성능 검증에 보완하여 통기성이 있는 막재료 자체의 흡음성능을 임피던스 튜브를 이용한 수직입사 흡음계수 및 잔향실법 흡음계수 측정방법을 적용하여 조사하였다. 임피던스 튜브 실험의 경우 유리섬유 직조물 10종을 대상으로 하였으며, 잔향실법 실험에 사용된 막재료는 총 5개 종류로 통기성이 있는 내막 4종과 통기성이 없고 밀도가 높은 외막재료 1종을 대상으로 실시하였다. 실험설계 인자로는 막재료의 공기 투과도, 밀도 및 배후 공기층을 선정하여 흡음성능에 미치는 영향을 조사하였다.

3. 막재료 음향성능

3.1 유리섬유 직조물의 흡음특성

음장제어용 막재료의 특성 조사를 위해 총 10종의 유리섬유 직조물을 대상으로 수직입사 흡음계수(KS F 2814-2)를 측정하였다. 측정대상 시료는 유리섬유를 기본 재료로 하고 있으며, 단위 섬유

께, 직조방식, 단위 면적당 중량이 변화되었다. Sakagami 등^(1,6) 및 Pierce 등⁽²⁾의 연구에 의하면 막재료는 사용되는 조건별 배후공기층에 따라 흡음특성이 변화되는 것으로 나타나, 이 연구에서는 배후 공기층을 블라인드 및 커튼이 창호 또는 벽체로부터 이격되는 공간을 고려하여 50 mm로 설정하여 적용하였다. 수직입사 흡음계수는 직경 100 mm인 대형 시험체를 대상으로 100 Hz~1600 Hz 범위에서 측정된 후 1/3 옥타브 밴드로 분석하였다. 1600 Hz 이상 대역의 흡음특성은 재료 자체의 특성상 소형 임피던스 튜브에 설치하는 것이 어려워 측정대상 주파수 대역을 1600 Hz 이하 대역으로 하였다. 측정대상 유리섬유 직조물의 특성은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 측정대상 유리섬유 직조물 시험체의 모습이다.

Fig. 2는 10종의 유리섬유 직조물의 수직입사 흡음 특성 측정 결과이다. 시험체 배후 공기층을 50 mm로

Table 1 Material properties of glass wool textiles

No.	Thickness (mm)	Warp (density g/m)	Fill (density g/m)	Weight (g/m ²)	Air space (mm)
1	0.08	42	42	74	50
2	0.08	42	42	74	50
3	0.1	60	57	104	50
4	0.12	60	52	149	50
5	0.18	34	34	181	50
6	0.24	40	28	271	50
7	0.26	32	20	276	50
8	0.32	34	26	319	50
9	0.32	34	34	361	50
10	0.51	26	25	570	50

Fig. 1 Test samples of glass wool textile

설정하여 400 Hz 이하 대역의 흡음성능은 낮으나 100 Hz~1000 Hz 대역의 범위에서 주파수가 증가함에 따라 흡음성능이 증가하는 경향성을 갖는 것으로 나타났다. 2, 4, 6, 8 시험체의 경우 1250 Hz 및 1600 Hz 대역에서 흡음성능이 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 유리섬유 직조물의 직조 방법 등에 따른 고유주파수의 변화에 의한 것으로 판단된다.

각 시험체별 성능의 차이는 최대값을 기준으로 약 0.4~1 범위로 유리섬유 시험체의 특성에 따라 변화되었다.

Fig. 2 Normal incidence sound absorption coefficient of ten glass wool textiles

Fig. 3 Relationship between sound absorption coefficient and surface density of glass wool textile

Fig. 3은 유리섬유 직조물의 면밀도와 수직입사 흡음능의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3의 좌측상단의 그림은 100 Hz~1600 Hz 대역의 평균값과의 관계를 나타낸 것이며, 우측 상단은 315 Hz 이하 대역의 평균값을 나타낸 것이다. 좌측 하단의 그림은 400 Hz~1600 Hz 대역의 평균값과의 관계를 나타낸 것이다.

Table 2 Correlation coefficient between sound absorption coefficient and material properties of glass wool textile at each frequencies

Frequency (Hz)	Correlation coefficient		
	Thickness	Surface density	Flow resistivity
50	0.87	0.8	-0.52
60	0.73	0.1	-0.15
80	0.86	0.89	-0.34
100	0.87	0.92	-0.32
125	0.86	0.87	-0.29
160	0.89	0.93	-0.3
200	0.9	0.93	-0.31
250	0.92	0.96	-0.34
315	0.88	0.96	-0.39
400	0.77	0.95	-0.38
500	0.79	0.96	-0.38
630	0.72	0.96	-0.38
800	0.62	0.89	-0.23
1000	0.34	0.65	0.19
1250	0.24	0.61	0.32
1600	0.19	0.73	0.05

Fig. 4 Relationship between sound absorption coefficient and thickness of glass wool textile

우측 하단의 그림은 각 시험체별 흡음계수 최대값과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과는 Kiyama 등⁽⁵⁾의 연구결과와 같이 유리섬유 직조물의 면밀도가 증가됨에 따라 수직입사 흡음능이 증가되는 것으로 나타났다. 각 주파수 대역별 수직입사 흡음계수와 직조물의 면밀도와의 상관관계 분석 결과, Table 2에서와 같이 315 Hz 이하 대역의 평균값은 0.86으로 나타났으며, Fig. 3의 결과를 함께 고려하면 선형적인 변화 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 400 Hz 이상 대역의 상관계수 평균은 0.52로 나타났으나 일부 결과에서 선형 추세선에서 차이가 나타나는 것은 직조물의 흐름저항 등에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 직조물의 흡음능과 두께와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3의 면밀도와 흡음능 변화의 결과와 유사하게 직조물의 두께가 증가됨에 따라 흡음능도 증가되는 경향을 갖는 것으로 나타났다.

유리섬유 직조물의 흐름저항을 KS F ISO 9053 : 2005 다공성 음향 재료의 공기 흐름 저항 결정 방법 중 직접 공기 흐름 방식을 위한 원통형 측정 장치를 사용하여 측정하였다. Table 2는 유리섬유 직조물의 흐름 저항, 두께, 면밀도와 각 주파수 대역별 수직입사 흡음계수와의 상관계수를 배후공기층 50 mm 조건에서 측정하여 분석한 것이다. 두께의 경우 80 Hz~630 Hz 대역의 상관계수가 0.7 이상으로 나타났으며, 80 Hz~800 Hz 대역의 면밀도와 흡음계수 간 상관계수가 0.7 이상으로 나타나 상관성이 높은 것으로 판단된다. 흐름저항의 경우 선형상관분석 결과 상관성이 크지 않은 것으로 나타났다.

3.2 배후 공기층의 영향

배후 공기층 변화에 따른 수직입사 흡음계수 변화를 조사하기 위하여 10종의 유리섬유 직조물을 대상으로 배후공기층 20 mm, 100 mm 조건을 추가하여 분석하였다. 배후 공기층 조건은 실내의 블라인드 및 커튼이 설치되는 경우 창호 및 벽체로부터 이격되는 거리를 고려하여 선정하였다.

Fig. 5(a)~(c)는 흐름저항과 각 배후공기층 조건별 수직입사 흡음계수와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)~(c)에서와 같이 배후공기층이 증가함에 따라 막재료의 수직입사 흡음계수는 특정한 흐름저항 대역에서 가장 높은 흡음능을 나타내는 것으로 나타났

다. 이는 흐름저항이 적은 경우 막재료 표면으로 입사된 음에너지가 배후 공간에서 반사된 음에너지가 잘 투과되기 때문으로 판단된다. 또한 흐름저항이 높은 경우 음에너지가 막재료 내부로 입사되지 못하기 때문에 흡음능력이 저하되는 것으로 판단된다.

복합 막구조(흡음 내막 + 외막)는 밀도가 높은 외막이 설치된 다음 경기장 내부의 음향제어 및 일상제어를 위해 내막을 설치한다. 외막과 내막이 공기층을 사이에 두고 설치되는 복합 막구조의 흡음성능을 조사하기 위하여 잔향실 내부에 외막을 설치한 후 공기층을 확보하기 위한 구조물을 설치한 후 잔향실 내부로 내막이 면하도록 설치하여 흡음성능을 측정하였다.

(a) 20 mm air space behind membrane material

(b) 50 mm air space behind membrane material

(c) 100 mm air space behind membrane material

Fig. 5 Relationship between flow resistivity and averaged normal incidence sound absorption coefficient

또한 배후 공기층의 변화에 따른 흡음성능 변화를 조사하기 위하여 외막재료와 4가지 흡음형 막재료를 대상으로 배후 공기층을 600 mm, 900 mm로 변화시켜 흡음성능을 측정하였다. 복합 막구조의 흡음성능 측정결과는 Figs. 6, 7과 같다.

단일막 실험결과 가장 높은 흡음성능을 갖는 것으로 나타난 흡음형 막재료 4의 600 mm 공기층의 경우 Fig. 6(b)에서와 같이 200 Hz 이상 대역의 흡음계수가 0.5 이상의 평탄한 특성을 갖는 것으로 나타났다. 공기층이 900 mm로 증가 될 경우 Fig. 7(b)에서와 같이 300 Hz 이상 대역의 흡음계수가 0.6 수준으로 증가되는 것으로 나타났으나 200 Hz 이하 대역의 특성은 공기층의 변화에 따라 주파수 대역별 특성이 변화되는 것으로 나타났다. 이는 배후 공기층의 변화에 따라 공명 흡음 주파수 대역이

(a) Inner membrane material⁽¹³⁾

(b) Inner membrane material with outer membrane

Fig. 6 Sound absorption coefficient of membrane structure consist of inner and outer membrane material; air space between two membranes is 600 mm

(a) Inner membrane material⁽¹³⁾

(b) Inner membrane material with outer membrane

Fig. 7 Sound absorption coefficient of membrane structure consist of inner and outer membrane material; air space between two membranes is 900 mm

변화에 의한 것으로 판단된다. 흡음형 막재료 2, 3의 경우 공기층 변화에 따른 특성은 크지 않은 것으로 나타났으나, 공기층 변화에 의해 400 Hz 이하 대역의 흡음특성은 변화되는 것으로 나타났다.

Figs. 6, 7의 단일막 측정결과⁽¹³⁾와 비교하였을 경우 주파수 대역별 흡음 특성은 유사한 것으로 나타났으나, 전체적인 흡음계수 값은 증가되는 것으로 나타났다. 이는 복합 막구조(흡음 내막 + 외막) 설치에 의한 시험체 설치틀 높이 증가 및 외막 하부의 공기층 및 대기 흡음을 고려한 흡음재 설치에 의한 것으로 판단된다.

4. 막구조 음향성능 측정 조건 선정

일반적으로 막구조 공간의 구성은 밀도가 높고

Fig. 8 Diagram on the sound field change considering atmospheric sound absorption by adding sound absorption materials on the wall and floor of lower reverberation chamber

Fig. 9 Installation of poly ester sound absorption blanket on the wall of lower reverberation chamber

단단한 외막재료로 구성된다. 최근 내부 공간의 음향 제어를 위해 내막을 설치하는 경우가 증가하고 있다. 이와 같은 복합 막구조의 흡음성능을 정확하게 측정하기 위해서는 실제 외막과 음향제어용 내막이 설치되는 조건이 실험실 조건에서 유사하게 재현되어야 한다. 실제 외막이 설치된 환경은 외막 배후에 대기에 의한 흡음이 존재하는 조건이다.

막구조가 설치된 실제 조건의 흡음성능을 정확하게 측정하기 위한 막구조 설치 조건을 선정하기 위하여, 실험실 실험 조건에서 외막 배후 공간을 확보하여 대기 흡음 조건을 구현한 경우와 흡음 구조를 적용하지 않은 조건에서의 흡음성능을 측정하여 비교하였다. 이를 위해 Fig. 8에서와 같이 부가공간의 흡음특성을 변화하였다. 부가공간의 흡음 특성

Fig. 10 Sound absorption coefficient change by the installation of sound absorption material in lower reverberation chamber

변화는 Fig. 9에서와 같이 배후공간의 벽체에 폴리에스테르 극세사 흡음재를 배후공기층 400 mm 공간을 확보한 후 설치하였다. 또한 배후공간의 바닥에 50 mm 두께의 글라스 울을 설치하여 흡음구조를 형성하였다.

부가 공간 흡음특성 변화에 따른 흡음특성 변화 실험은 흡음형 막재료 4를 대상으로 실시하였다. 또한 막표면에 가해지는 장력은 41.25 kg/m 조건에서 실시하였다. 부가 공간 흡음특성 변화에 의한 흡음 성능 측정결과는 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10에서와 같이 부가 공간의 흡음구조 유무에 따라 막구조의 흡음성능 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 부가 공간 전체에 흡음구조가 있는 경우 500 Hz 이상 대역의 흡음계수가 0.4 이상 0.5 수준으로 분포되는 것으로 나타났다. 흡음구조가 적용되지 않은 경우의 흡음성능은 500 Hz 이상 대역에서 0.3~0.4 수준으로 나타났다. 실제 흡음 내막재료를 적용하여 평가한 Fig. 12의 결과와 비교할 경우 부가 공간 전체에 흡음구조를 적용한 경우의 흡음성능 측정 결과가 실제 성능과 유사한 것으로 나타났다.

5. 음향제어 성능

막재료가 실제 설치된 조건에서의 음향성능을 검증하기 위하여 밀폐된 공간에 흡음성능이 우수한 막재료를 설치하여 설치 전후의 잔향시간, 초기감쇠 시간 및 다양한 음향 지표를 측정하여 비교하였다.

측정대상 실의 크기는 $2.4 \text{ m} \times 3.8 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 이었다. 실의 마감은 철강재 벽판으로 측벽과 지붕을 마감

Fig. 11 Measurement setup for sound filed control performance of membrane material

하였으며, 흡음형 막재료 설치 유무에 따라 실내 음향 지표를 측정하였다. 실내음향 측정은 Fig. 11에서와 같이 무지향성 스피커를 이용하여 Sweep-sine 신호를 발생하였다. Sweep-sine 음원은 현장 측정시 발생할 수 있는 외부 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 사용하였다⁽¹⁴⁾. 무지향성 스피커에서 1.5 m 이상 이격한 여러 지점에서의 실내음향 지표를 무지향성 마이크로폰을 통해 수음하여 분석하였다.

측정된 실내음향 지표는 잔향시간(RT, reverberation time), 음압레벨(SPL, sound pressure level), 명료도(C80, clarity) 및 음성명료도(D50)이다. 잔향시간은 음원이 정지된 후 60 dB 감쇠되는데 소요되는 시간으로 정의되며, 공간의 울리는 정도를 의미하며 일반적인 실내음향 지표로 가장 널리 사용되고 있다. 음압레벨은 해당 공간에서 발생하는 소리의 크기를 나타내며, 동일한 크기로 막재료 설치 전후로 측정하여 흡음 내막에 의한 소음 저감 효과를 의미한다. 명료도(C80)는 소리가 얼마나 명료하게 들리는 가를 의미하는 지표로 공연장 설계 등의 경우 음악이 명료하게 들리는 정도를 나타내는데 활용된다. 음성명료도는 명료도(C80)과 달리 음성이 얼마나 명료하게 전달되는가를 의미하는 지표로 강연의 용도로 사용되는 공간 또는 경기장 등의 음성 전달 정도의 평가에 사용된다.

막재료의 설치시 막재료 후면의 공기층은 블라인드 및 커튼이 설치되는 경우 및 시험체 설치를 고려하여 10 cm조건으로 설치하여 음향성능을 측정하였다. 막재료에 의한 음향제어 성능 평가결과 Fig. 12에서와 같이 막재료 설치 전후로 실내음향 지표들이

Fig. 12 Room acoustic parameters changed by addition of sound absorptive membrane material

개선되는 것으로 나타났다. 잔향시간의 경우 막재료 설치 전의 경우 200 Hz 이상 대역에서 1.5 s~1.8 s 수준이었으나, 막재료 설치로 인해 250 Hz 대역은 0.9 s 500 Hz 이상 대역은 0.3 s 이하 수준으로 개선되는 것으로 나타났다. 500 Hz 이상 대역을 중심으로 흡음능력이 나타난 것으로 판단된다. 100 Hz 대역까지의 흡음능력 확장을 위해서는 막재료 배후의

Fig. 13 Sound absorption coefficient based on the measurement of RT in test space

공기층을 증가하는 방안이 필요하다. 음압레벨의 경우도 주요 흡음능력이 나타나는 500 Hz 이상 대역의 경우 막재료의 흡음에 의해 실내로 전파되는 음 에너지가 감소하게 된다. 실내 흡음 막재료 적용에 의해 실내에서 발생하는 각종 소음에 대한 소음 저감 효과가 Fig. 12에서와 같이 약 10 dB 정도로 나타났다. 125 Hz 이하 대역의 경우 오히려 막재료 설치로 인해 음압 레벨이 증가된 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 막재료 설치로 인해 만들어진 배후 공기층에 의한 공명에 의한 현상으로 판단된다.

명료도 측정결과 막재료 설치에 의해 C80 지표가 0 dB에서 28 dB 수준으로 높아지는 것으로 나타났다. 이는 소리가 매우 많이 울려 명료한 전달 및 대화가 매우 어려운 수준에서 소리가 매우 명료하게 전달되는 수준으로 변화된 것을 의미한다. 또한 D-50지표의 경우 막재료 설치 전은 30~40 수준으로 대화내용의 30%~40%만이 전달되는 것을 의미한다. 막재료 설치에 의해 500 Hz 이상 대역의 D-50은 95이상으로 매우 높게 나타나, 대부분의 대화 내용이 명료하게 전달될 수 있음을 의미한다.

Fig. 13은 실제 설치된 막재료 음향제어 성능 측정결과를 바탕으로 흡음계수를 계산한 것이다. 음압 감쇠 구간별 잔향시간을 달리 분석하여 계산한 것으로 초기 감쇠에 대한 흡음능력이 우수한 것으로 확인할 수 있다. 흡음계수 계산결과 500 Hz 이상 대역의 흡음계수는 잔향실법 흡음계수 측정결과와 유사한 0.5 수준으로 나타났다.

이상의 결과에서와 같이 막재료 설치에 따른 음향제어 성능 평가 결과, 실내음향 제어 성능은 우수한 것으로 나타났다. 400 Hz 이하 대역에서의 음향

제어를 위해서는 막재료 배후의 공기층 확보를 통해 구현이 가능할 것으로 판단된다.

6. 단열성능

흡음형 막재료에 의한 열부하 차단 효과를 평가하기 위하여 열관류 저항 및 흡음형 막재료 설치에 의한 실내 온도 분포 변화를 측정하였다. 단열성능 평가대상 막재료는 음향성능 평가 결과에서 흡음성능이 가장 우수한 것으로 나타난 막재료 4를 대상으로 실시하였다.

단열성능 평가는 총 3가지 방법으로 수행하였다. 세가지 실험의 구성은 흡음형 막재료 사용에 따른 실내 온도 변화를 비교하기 위한 소형 시험체를 이용한 실험, 실대규모 공간을 구성하여 활용한 실대규모 실험 및 막재료의 단열성능을 정량적으로 평가하기 위한 열관류저항 평가 실험으로 구성하였다.

소형 시험체를 이용한 실험 방법으로 Fig. 14에서와 같이 공간박스로 작은 공간을 구획하고 두 개 공간의 외부에는 외막을 설치한 후 한 시험체는 외막 하부에 300 mm 공간을 확보하도록 한 후 흡음 내막을 설치하였다. 두 개의 시험체는 외기온이 Table 3에서와 같이 20 °C 정도 기온의 천공 조건에서 지표에 의한 복사 등의 영향이 없는 잔디 상부에 단열재를 설치한 후, 그 위에 시험체를 설치하였다. 시험체 내부의 온도는 일정시간 일사에 노출된 이후에 측정하였다.

소형 시험체를 이용한 일사부하 실험 결과 Table 3에서와 같이 측정시 외기온은 19.4 °C ~ 21.7 °C 분포를 나타내었다. 외막만을 설치한 시험체 내의 온도는 일사 노출 시간이 증가함에 따라 약 24.0 °C ~ 27.7 °C의 분포를 갖는 것으로 나타났다. 외막과 흡음형 막재료를 동시에 설치한 경우 23.6 °C ~ 27.0 °C 분포를 갖는 것으로 나타나 외막만을 설치한 경우 보다 0.4 °C ~ 1.3 °C 정도 낮게 나타났다. 이는 흡음형 막재료의 설치로 인해 실내로 전달되는 일사부하가 차단되어 실내 온도가 낮게 유지됨을 의미한다.

위의 소형 시험체를 이용한 일사부하 실험 결과를 바탕으로 실대 공간 크기에서의 흡음 내막의 일사부하 차단정도를 실험하였다. 일사부하 차단실험은 Fig. 15에서와 같이 지붕은 외막으로 설치된 공간을

Fig. 14 Solar radiation insulation experiment using small specimen

Table 3 Small specimen experiment results

No. (time)	Air temperature [°C]	Outer Temperature [°C]	Outer + Inner Temperature [°C]
		Temperature [°C]	Temperature [°C]
1 (13:30)	21.7	24.0	23.6
2 (14:00)	20.0	27.7	27.0
3 (15:15)	19.4	27.5	26.2

Fig. 15 Solar radiation insulation experiment using large scale specimen and data logger

단열성능이 높은 샌드위치 패널(EPS)로 공간을 구성한 후, 단열재(EPS, 50 mm)로 동일한 크기의 2개 공간으로 분할한 후 한쪽은 외막만 설치하였으며, 다른 한쪽은 흡음성능이 높은 것으로 나타난 막재료 4를 외막 하부에 추가로 설치하였다. 측정대상 공간의 온도는 T형 열전대(thermo couple)를 이용하여 Fig. 15의 데이터 로거를 이용하여 두 개의 공간의 온도와 외기온도를 동시에 측정하였다. 측정시간은 오전 11시부터 오후 4시 까지 일사부하가 높은 시간대를 선택하여 측정하였다. 일사부하 측정시 천공은 천공공에 가까웠으며, 시험대상 공간에 직접 일사가 전달되는 조건으로 유지되었다.

Fig. 16은 실대공간 일사부하 실험을 위해 외막, 외막 + 흡음 내막이 각각 설치된 공간을 나타낸 것이다. 실내 온도분포 측정은 Fig. 16에서와 같이 막재료가 설치된 하부 공간과 동일한 높이에서 두 공간의 온도를 동시에 측정하였다.

Fig. 16 Inner view of each test condition outer membrane(left) and outer + inner membrane (right)

Fig. 18 Thermal resistance test facility(left) and membrane test specimens with(center) and without(right) inner membrane

Fig. 17 Air temperature difference between two large scale test spaces

Fig. 17은 실대공간 일사부하 실험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 17에서와 같이 외막만 설치한 공간의 온도는 $27.5^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ 정도로 나타났으며, 이때 외기온도는 $24.2^{\circ}\text{C} \sim 27^{\circ}\text{C}$ 범위에서 변화된 것으로 나타났다. 외막을 설치한 공간의 온도가 외기온도 보다 높은 것은 외막 설치로 인해 온실효과가 발생되었기 때문으로 판단된다. 외막과 함께 흡음형 내막을 설치한 경우의 실내 온도는 $23.3^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ 범위에서 변화되는 것으로 나타나, 외기온도 보다 $3^{\circ}\text{C} \sim 1^{\circ}\text{C}$ 정도 낮게 분포하는 것으로 나타났다. 외막을 설치한 공간과 비교할 경우 $3.3^{\circ}\text{C} \sim 3.7^{\circ}\text{C}$ 정도 낮은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 흡음형 내막이 재래시장과 같은 공간의 하절기 실내 온도 증가를 방지할 수 있으며, 하절기 냉방부하를 최소화할 수 있음을 의미한다.

흡음형 막재료 유무에 따른 열관류저항을 측정하였다. 열관류저항 측정은 KS F 2277 : 건축용 구성재의 단열성능 측정방법 - 교정 열상자법 및 보호 열상자법에 따라 실시하였다. Fig. 18은 열관류저항

Table 4 Thermal resistance test results

Outer membrane	Outer + inner membrane	Acryl
$0.17 \text{ m}^2\text{/}^{\circ}\text{C/W}$	$0.40 \text{ m}^2\text{/}^{\circ}\text{C/W}$	$0.09 \text{ m}^2\text{/}^{\circ}\text{C/W}$

측정 장치와, 열관류저항 측정용 카트리지에 설치된 흡음 내막과, 외막을 나타낸 것이다.

Table 4는 흡음형 막재료 설치 유무에 따른 열관류저항 측정결과를 나타낸 것이다. 외막만을 설치하였을 경우의 열관류 저항은 $0.17 \text{ m}^2\text{/}^{\circ}\text{C/W}$, 외막과 흡음형 막재료를 모두 설치하였을 경우는 $0.40 \text{ m}^2\text{/}^{\circ}\text{C/W}$ 로 나타났다.

흡음형 막재료 추가설치로 인해 열관류 저항이 증가되었으며, 이는 단열성능이 증가됨을 의미한다. 위의 일사부하 측정결과가 하절기의 일사부하 차단으로 인한 냉방부하 감소를 의미한다면, 열관류 저항의 증가는 동절기에 외부로 손실되는 열량이 작음을 의미한다. 또한 일반적으로 재래시장 개선사업의 지붕재료로 사용되는 아크릴의 열전도 저항을 고려하여 열관류저항을 계산한 결과와 비교하였을 경우도 외막과 흡음형 막재료를 설치한 경우의 열관류 저항이 우수한 것으로 나타났다.

7. 결 론

이 연구에서는 최근 경기장, 체육관 및 재래시장 현대화 사업 등 대공간 구성에 사용이 증가되고 있는 막재료를 대상으로 공간 내부의 음향제어 및 일사부하 차단을 위한 흡음 내막재료의 흡음성능 및 일사차단성능에 대하여 진행하여 다음과 같은 결과를 확인하였다.

(1) 막재료로 활용 가능한 유리섬유 직조물 등에

대하여 수직입사 흡음계수 실험과 흐름저항을 실시한 결과 수직입사 흡음성능은 직조물의 흐름저항이 증가함에 비례하여 증가하였으며, 일정범위 이상 증가할 경우 오히려 감소되는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 또한 직조물 또는 막재료의 밀도 및 두께가 증가함에 따라 수직입사 흡음성능은 증가되는 것으로 나타났다. 막재료 배후공기층의 변화에 따라 흡음성능의 주파수 특성이 변화되는 것으로 나타났으며, 이상의 결과를 통해 막재료의 두께, 밀도 및 흐름저항을 고려하여 막재료를 선정할 경우 용도에 맞는 흡음성능을 확보할 수 있다.

(2) 막재료의 흡음성능을 정량적으로 평가하기 위하여 막재료 종류별로 배후 공기층을 변화하여 잔향실법 흡음계수 측정방법(KS F 2805)를 적용하여 측정하였다. 막재료 종류에 따라 흡음성능의 차이는 0.1~0.6 범위로 매우 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 수직입사 흡음성능 측정결과에서와 같이 막재료의 밀도, 두께 및 흐름저항에 의한 것으로 판단된다. 또한 막재료 배후의 공간의 변화에 따른 실험결과 동일한 막재료에서 배후 공간의 크기가 증가할수록 흡음성능이 평탄한 특성을 보이는 주파수 대역이 저주파수 대역으로 이동하는 것으로 나타났다.

(3) 이상의 실험실 실험결과를 검증하기 위하여 실대 구조의 장방형 공간을 구성한 후 흡음 내막재료 설치 전후로 음향성능을 평가하였다. 음향성능 평가결과 막재료 설치(배후 공기층 100 mm)로 인하여 잔향시간은 감소하였으며, 명료도 지표들도 증가하는 것으로 나타났다. 막재료 설치 전후의 잔향시간을 활용하여 막재료의 흡음계수 산출결과 실험실 실험결과와 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

(4) 막재료의 일사부하 차단성능을 조사하기 위하여 소형 및 실대구조에서 흡음형 내막 설치 유무에 따른 실내 온도 분포를 조사하였다. 하절기 외기온도가 20℃~25℃ 정도인 천공조건에서 측정하였을 경우 소형 실험에서는 약 1℃ 정도의 온도차이가 발생하였으며, 실대 구조에서는 약 3℃~4℃ 정도의 온도차이가 발생하였다. 외기온과 비교하였을 경우 흡음형 막재료를 적용하지 않은 경우는 외기온보다 실내온도가 높았으나, 적용하였을 경우는 외기온도보다 약 2℃ 정도 낮은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 하절기 일사부하 차단 효과

가 있으며, 이는 냉방부하 감소효과이며 실제 냉방에 사용되는 에너지 저감에도 효과적인 것으로 판단된다.

막구조의 열관류저항을 정량적으로 평가한 결과 외막만을 적용한 경우보다 흡음 내막을 적용한 경우의 열관류 저항이 큰 것으로 나타났다. 이는 흡음 내막의 설치시 단열성능이 크게 증가됨을 의미하며, 동절기 난방부하 저감에도 효과적임을 의미한다.

참 고 문 헌

- (1) Sakagami, K., Takagahi, D., Gen, H. and Morimoto, M., 1993, Acoustic Properties of an Infinite Elastic Plate with a Back Cavity, *Acustica*, Vol. 78, pp. 288~295.
- (2) Pierce, A. D., 1981, *Acoustics, an Introduction to Its Physical Principles and Applications*, McGraw-hill, New York.
- (3) Takahashi, D., Sakagami, K. and Morimoto, M., 1996, Acoustic Properties of Permeable Membranes, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 99, pp. 3003~3009.
- (4) Hashimoto, N., Katsura, M., Nishikawa, Y., Katagihara, K., Torii, T. and Nakata, M., 1996, Experimental Study on Sound Insulation of Membranes with Small Weights for Application to Membrane Structures, *Applied Acoustics*, Vol. 48, pp. 74~84.
- (5) Kiyama, M., Sakagami, K., Tanigawa, M. and Morimoto, M., 1998, A Basic Study on Acoustic Properties of Sound-leaf Membranes, *Applied Acoustics*, Vol. 54, pp. 239~254.
- (6) Sakagami, K., Kiyama, M. and Morimoto, M., 2002, Acoustic Properties of Double-leaf Membranes with a Permeable Leaf on Sound Incidence Side, *Applied Acoustics*, Vol. 63, pp. 911~926.
- (7) Sakagami, K., Uyama, T., Morimoto, M. and Kiyama, M., 2005, Prediction of the Reverberation Absorption Coefficient of Finite-size Membrane Absorbers, *Applied Acoustics*, Vol. 66, pp. 653~668.
- (8) Kim, J.-J. and Shon, J.-R., 2005, In Teflon Acoustic Measuring of the Multipurpose Grounds that have Structure Just Analysis Research, *Proceedings*

of the Architectural Institute of Korea, Vol. 25, pp. 3~6.

(9) Park, H.-N., Kim, J.-J. and Shon, J.-R., 2005, A Study on Architectural Acoustic Characteristics of an Open Air Performance Hall with the Membrane Structure, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 200~204.

(10) Kim, J.-J. and Shon, J.-R., 2009, Comparison of Acoustical Properties of the Membrane Stadiums with PTFE Structural Membrane, Journal of the Society of Living Environmental System Korea, Vol. 16, No. 2, pp. 143~153.

(11) Kim, J.-J., Jeong, J.-H. and Shon, J.-R., 2007, Sound Absorption Characteristics and Application Effect of PTFE Membrane Material, Transactions of

the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 342~349.

(12) Kim, J. J., Jeong, J. H. and Sohn, J.-Y., 2009, Sound Absorption Characteristics of PTFE Membrane Material and Their Application to a Multi-purpose Stadium, Building Serv. Eng. Res. Technol. 30, pp. 213~226.

(13) Jeong, J.-H., Kim, K.-J. and Kim, J.-J., 2010, Sound Absorption Characteristics of Permeable Membrane, Journal of the Society of Living Environmental System Korea, Vol. 17, No. 6, pp. 766~773.

(14) ISO 3382-2 Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters – Part 2 : Reverberation Time in Ordinary Rooms.