

# 통기성을 갖는 막재료의 흡음특성

## Sound Absorption Characteristics of Permeable Membrane

정정호† · 김정중\* · 김규제\*\*

Jeong Ho Jeong, Jung Joong Kim and Ku Je Kim

**Key Words** : Membrane material(막재료), Sound absorption coefficient(흡음률), Air permeability(통기성)

### ABSTRACT

Sound absorption characteristics of membrane system which are used in stadiums and arenas were investigated. Theoretical studies on acoustic properties of single and double leaf permeable membrane conducted. Also, experimental studies on sound absorption characteristics of combined membrane system that is composed of outer and inner membrane material were conducted. In this study, sound absorption characteristics of each membrane were investigated by experiments in reverberation chamber. 4 types of permeable membranes and a non-permeable membrane were used for experiments. Air space behind membrane material and tension on the membrane was varied. Sound absorption performance of permeable membrane materials was confirmed. As increasing air space behind the membrane material, sound absorption coefficient was increased. In a resonance absorption frequency band sound absorption coefficient varied more dramatically. Sound absorption characteristics were flat in mid and high frequency range and sound absorption coefficient was from 0,3 to 0,5. Also sound absorption coefficient was increased by the increment of surface density and air permeability of membrane. However, over the certain value of air permeability, sound absorption coefficient was decreased. These results can be used as design factors and method for the room acoustic design of dome-stadiums and large free-form buildings.

### 1. 서론

막구조는 자유로운 형상 구현이 가능하고 경량이기 때문에 과거 월드컵 경기장, 대규모 실내 체육관의 경량구조형성 및 채광을 위해 적용되었다. 최근에는 막구조의 적용 범위가 넓어져 각종 야외 공연장, 전시장 등의 야외 구조물, 재래시장의 환경개선 사업 및 자유로운 형상을 갖는 다양한 건축물에 널리 적용되고 있으며, 관련 시장 규모 및 적용 범위는 지속적으로 증가되고 있다.

막구조의 적용범위가 증가함에 따라 막구조가 설치된 공간이 다양한 용도로 상용되어, 정온한 실내공간 구현 및 실내음향 제어에 대한 요구도 함께 증가되고 있다. 이와 같은 요구를 만족시키기 위해서는 막재료의 흡음성능 및 차음성

능 개선이 필요하다. 막재료의 흡음 및 차음성능 관련하여 이론적 연구와 함께 실제 경기장에 적용된 복합 막구조의 흡음 특성 연구가 수행되었으나, 막재료 자체의 흡음특성에 대한 실험적 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 막재료 자체의 흡음성능을 실험적으로 조사하고 배후 공기층 등 막재료의 흡음성능을 제어할 수 있는 인자를 도출하여 향후 막재료의 선정 및 개선에 활용하고자 한다.

### 2. 막재료의 음향성능 관련 연구

막재료와 관련된 기존의 연구는 실험적인 방법과 함께 이론적인 예측모델을 중심으로 수행되었다. Sakagami[1], Pierce[2]는 무한 단일막에 대한 이론 모델을 수립하여 흡음률을 예측하였으며, 이는 막의 질량과 공기층에 의한 공명현상을 흡음성능 관련 인자로 포함하였다. Takahashi[3]는 투과성이 있는 단일막의 흡음성능과 투과율을 예측하였으며, 막에 가해지는 장력, 밀도, 흐름저항 등에 의해 흡음

† 교신저자; 방재시험연구원  
E-mail : jhjeong@kfpa.or.kr  
Tel : (031) 887-6693, Fax : (031) 887-6680

\* (주)환경음향연구소

\*\* (주)타이가

과 투과율이 변화되는 것을 실험결과와 비교하였다. Hashimoto[4]는 대공간 구성에 사용되는 막재료를 무가질량체를 적용하였을 경우 5 ~ 11 dB의 차음성능이 향상되는 것을 이론 및 실험을 통해 확인하였다.

이중막의 음향특성의 이론적 연구는 Kiyama[5]에 의해 수행되었다. 이중막의 특성은 내표면 막의 밀도가 증가함에 따라 최대흡음량을 갖는 주파수 대역이 낮아지며, 배후 공기층이 증가함에 따라 최대 흡음특성을 갖는 주파수 대역이 낮아지는 것으로 나타났다. Sakagami[6]는 건축물의 천장 구조를 사용하는 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[7]는 막구조 흡음률 예측결과를 잔향실법 흡음률 측정결과와 비교하여 유사한 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Sakagami[6]는 이중막의 흡음률을 두 개의 잔향실이 연결된 공간에서 한쪽 잔향실에서는 음원을 발생시키고 반대편 잔향실에서는 전달되는 음향에너지와 막구조의 음향투과 손실과 막구조에서 흡수되는 음향에너지를 산출하여 예측하였다. 또한 Sakagami[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. 또한 테프론 막재료를 적용한 야회 공연장[9] 및 다목적 경기장[10]의 음향성능 개선한 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[11,12]의 연구에서는 다목적 경기장에 설치되는 복합 막구조(외막+내막)의 정량적인 흡음성능 평가를 위하여 잔향실 및 수직입사 흡음특성을 조사하였으나, 각각의 단일막의 흡음특성에 대한 연구를 수행하지 않아 이에 대한 보완이 필요하다.

본 연구에서는 이전의 이론적 연구와 실제 공간에서의 성능 검증에 보완하여 통기성이 있는 막재료 자체의 흡음성능을 잔향실법 흡음률 측정방법을 적용하여 조사하였다. 본 연구에 사용된 막재료는 총 5개 종류로 통기성이 있는 내막 4종과 통기성이 없고 밀도가 높은 외막재료 1종을 대상으로 실시하였다. 실험설계 인자로는 막재료 종류(공기투과도 및 밀도), 배후 공기층 및 막재료 설치시 적용되는 인장력에 의한 영향을 조사하였다.

### 3. 막재료 흡음성능

#### 3.1 막재료 흡음성능 측정

본 연구에서는 막구조의 흡음성능 평가를 위해 KS F 2805(잔향실법 흡음률 측정방법)을 기준으로 하여 잔향실의 표면에는 내막재료가 노출되도록 격벽(유로폼)을 300, 600, 900 mm 높이로 설치틀을 Fig. 1과 같이 구성하여 막재료를 설치하였으며, 막재료가 설치된 잔향실 내부에서 음원을 발생시키고 잔향시간을 측정하였다.

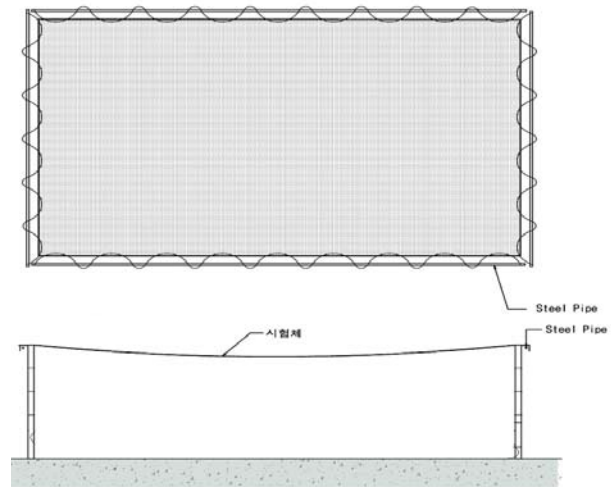


Fig. 1 Installation of membrane material with air gap in reverberation chamber

측정대상 막재료는 Table. 1과 같이 통기성이 없는 외막재료 1종과 통기성이 있는 내막재료 4종을 대상으로 실시하였다. 막재료의 공기투과도와 밀도는 Table. 1과 같다. 각각의 막재료별로 배후공기층을 300 mm, 600 mm, 900 mm으로 변화하여 흡음특성 변화를 조사하였다. 또한 막재료를 설치할 경우 인장력이 막표면에 적용될 경우의 흡음특성 변화를 조사하기 위하여 인장력의 정도를 2단계로 조정하여 측정하였다. 인장력 정도는 정량적인 측정에 한계가 있어 정확한 측정은 실시하지 못하였다.

Table. 1 Material properties of membranes

막 재료	공기투과도 [cc/cm/s]	밀도 [g/m <sup>2</sup> ]
Non-Permeable	0	1700
Permeable 1	64	118
Permeable 2	9	300
Permeable 3	8	483
Permeable 4	11.3	483

### 3.2 배후 공기층의 영향

5종의 막재료에 대한 잔향실법 흡음률 측정결과를 Fig. 2 ~ 6에 나타내었다. Fig. 2는 통기성이 없고 밀도가 높은 막으로 일반적으로 대기에 노출되는 외막재료로 사용되는 막재료이다. Fig. 2에서와 같이 외막재료의 경우 흡음성능이 매우 낮은 것으로 나타났다. 400 Hz 이상 대역에서 매우 평탄한 흡음특성이 확인되었다. 배후 공기층에 의한 영향으로 300 Hz 이하의 특성 대역에서 공명현상에 의한 흡음성능이 나타났다. 배후 공기층이 300 mm 간격으로 증가함에 따라 공명 흡음 주파수가 200 Hz, 160 Hz 및 100 Hz로 낮아지는 것으로 나타났다. 공명흡음 주파수가 낮아짐에 따라 평탄한 흡음특성을 갖는 주파수 대역의 범위도 함께 낮아지는 것으로 나타났다.

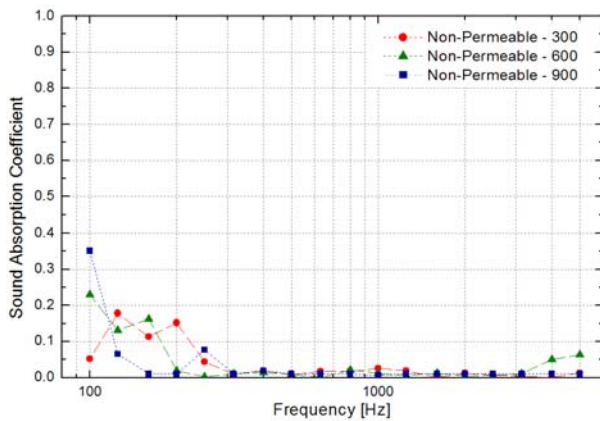


Fig. 2 Sound absorption characteristics of non-permeable membrane with different air gap

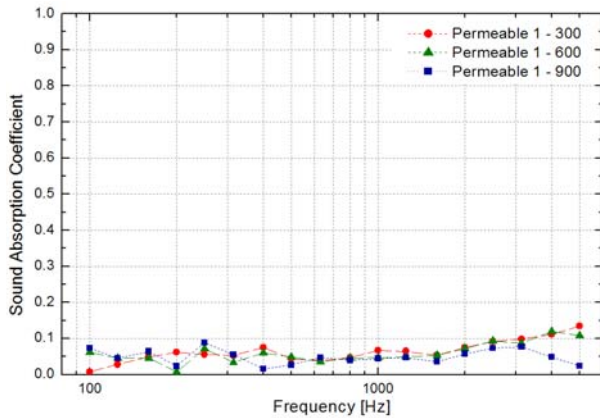


Fig. 3 Sound absorption characteristics of permeable 1 membrane with different air gap

Fig. 3은 통기성을 갖는 막재료 중에서 통기성이 가장 높고 밀도가 낮은 막의 흡음성능 측정결과이다. 통기성 내막 1의 경우 전주파수 대역에서 0.1 이하의 흡음률을 갖는 것으로 나타났다. 배후 공기층의 의해 공명 흡음현상도 명확

하게 나타나지 않는 것으로 나타났다. 통기성 내막 1의 경우 공기 투과율이 매우 높고 밀도가 낮아 막재료 표면으로 공기가 통과하여 장애물의 역할을 하지 못하고 밀도가 낮아 막의 표면 진동도 발생되지 않기 때문에 사료된다.

Fig. 4는 공기 투과율 9 cc/cm<sup>2</sup>/s와 300 g/m<sup>2</sup>의 밀도를 갖는 통기성 내막 2의 잔향실법 흡음률 측정결과이다. 통기성 내막 2의 경우 통기성 내막 1보다 통기성이 낮아 배후 공기층과 막 표면의 공기를 보다 잘 구분하며, 밀도가 높아 막재료의 표면진동이 더 잘 발생되었다. Fig. 2에서와 같이 400 Hz 이상 대역에서 0.2 ~ 0.3 수준의 흡음성능을 갖는 것으로 나타났다. 막재료 하부의 배후공기층 증가에 따라 공명흡음현상으로 인한 특정 대역의 흡음성능 증가현상이 나타났으며, 배후공기층 증가에 따라 공명흡음 주파수 대역은 315 Hz, 200 Hz, 100 Hz 순서로 낮아지는 것으로 나타났다. 배후공기층이 600 mm인 경우 공명흡음 주파수 대역이 200 Hz 이하 대역의 흡음률은 0.3 이상으로 다른 배후 공기층의 경우보다 높게 나타났다. 이는 배후공기층의 조절로 인해 통기성 내막의 흡음성능을 용도에 적합하도록 조절할 수 있음을 의미한다.

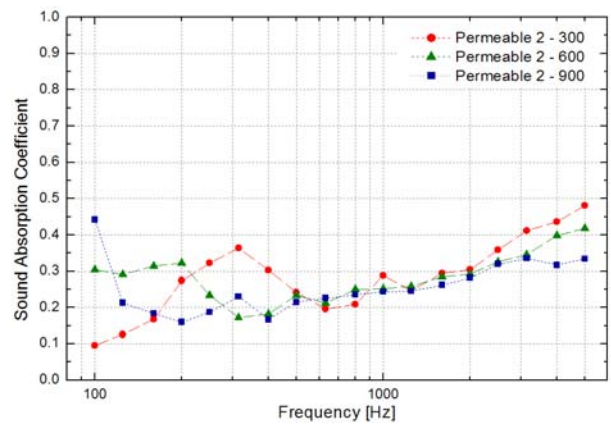


Fig. 4 Sound absorption characteristics of permeable 2 membrane with different air gap

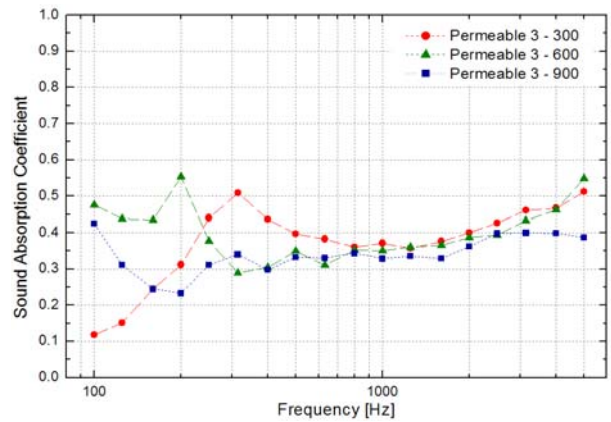


Fig. 5 Sound absorption characteristics of permeable 3 membrane with different air gap

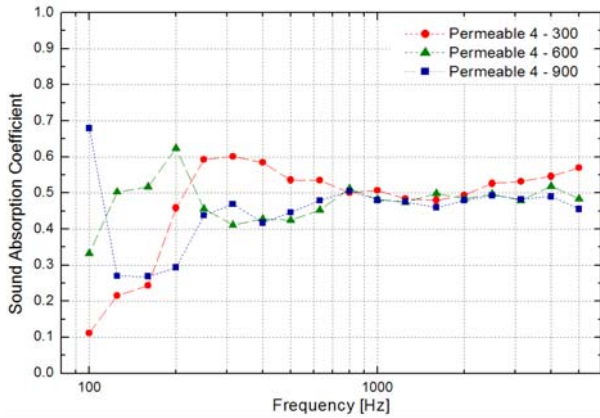


Fig. 6 Sound absorption characteristics of permeable 4 membrane with different air gap

Fig. 5는 통기성 내막 2와 통기투과율은 유사하지만 면 밀도가 1.5배 정도 높은 통기성 내막 3의 흡음성능 측정결과를 나타낸 것이다. 흡음률 측정결과 통기성 내막 2와 유사한 특성을 갖는 것으로 나타났지만, 흡음성능이 전주파수 대역에서 약 0.1정도 높게 나타났다. 또한 공명흡음 현상이 더욱 명확하게 나타나는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 통기성 내막 3의 면밀도가 통기성 내막 2에 비하여 높아 막진동을 발생시키는데 더욱 많은 음향에너지가 소모되기 때문인 것으로 판단된다. 이중막에 대한 Sakagami[6]의 연구에서도 공기투과율이 일정한 경우 밀도가 증가함에 따라 저주파수 대역의 흡음성능이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 통기성 내막 4에 대한 흡음률 측정결과를 나타낸다. 통기성 내막 4의 공기투과율은 11.3 cc/cm/s으로 통기성 내막 3보다 높으며, 밀도는 통기성 내막 3과 동일하다. 통기성 내막 4의 흡음특성은 약 0.4 ~ 0.5 수준으로 통기성 내막 3보다 약 0.1 정도 높은 것으로 나타났다. 300 Hz 이상의 대역에서 흡음특성은 매우 평탄한 것으로 나타나 경기장이나 공연장과 같은 대규모 공간의 실내음향 제어에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

배후공기층 증가에 의한 공명 흡음 주파수 대역의 변화는 유사한 것으로 나타났다. 통기성 내막 4와 3의 결과를 비교하면 공기투과도가 감소함에 따라 흡음성능이 증가되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7 ~ 9는 각 배후공기층별로 5종의 막재료 흡음특성을 나타낸 것이다. 배후 공기층이 300 mm인 경우 통기성이 없는 외막과 통기성이 매우 높은 내막 1을 제외하고는 200 Hz 이상 대역에서 0.3 이상의 흡음성능을 갖고 있었으며, 통기성 내막 2, 3, 4를 공기 투과도와 면밀도를 비교하면 공기투과도가 감소하고 면밀도가 증가할수록 흡음성능은 증가하는 것으로 나타났다. 복합 막구조에 대한 실험연구 [11,12] 결과에서는 최적의 흡음성능은 6 ~ 9 cc/cm/s 범위에서 나타났으며, 단일막의 특성에서도 동일한 경향성을 갖는 것으로 판단된다. 이는 외막과 내막을 함께 설치한 복

합 막구조의 경우 외막이 밀도가 높은 강체와 같은 역할을 하기 때문인 것으로 판단되며, Kiyama[5]의 연구에서도 외막의 밀도가 일정정도 이상으로 증가할 경우 Peak 특성이 변화되지 않는 것으로 나타난 결과와 유사한 것으로 나타났다. 이상의 결과에서 복합막구조의 흡음특성을 측정할 경우 내막과 외막 모두 설치하여 실제 구조를 평가하는 것이 정확하지만, 내막만을 잔향실 바닥과 같은 강체면에 공기층을 확보하여 측정하는 방법을 통해서도 신뢰성이 있는 측정 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

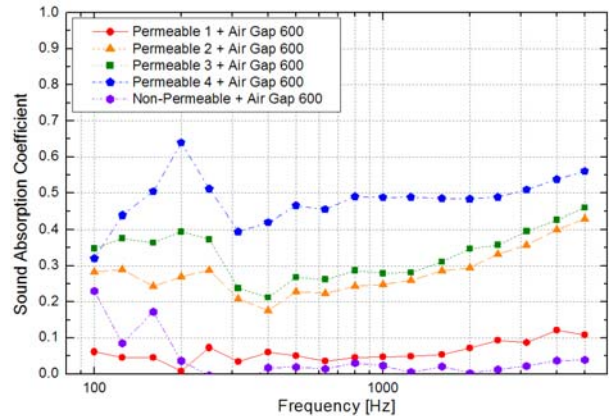


Fig. 7 Sound absorption characteristics of membrane with 600 mm air gap

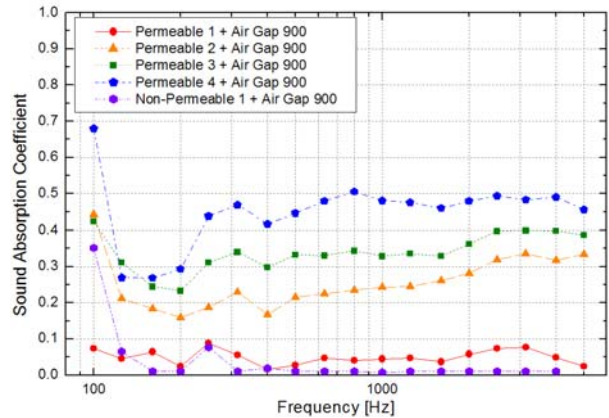


Fig. 8 Sound absorption characteristics of membrane with 900 mm air gap

Fig. 7과 8은 공기층이 600 mm, 900 mm인 경우의 막재료별 흡음특성을 나타낸 것이다. 공기층의 증가에 따라 공명흡음 대역이 일정하게 변화되는 것으로 나타났으며, 평탄한 흡음 특성을 갖기 시작하는 주파수 대역의 한계도 공기층의 증가에 따라 낮아지는 것으로 나타났다.

### 3.3 장력의 영향

Takahashi[3]의 연구에서는 막재료의 표면에 형성되는



장력이 증가됨에 따라 흡음능은 다소 향상되며, 차음능은 낮아지는 것으로 나타났다. 막재로 표면에 형성되는 장력의 영향에 의한 흡음특성 변화를 조사하기 위하여 막재로 설치시 장력에 변화를 2단계로 조절하여 측정하여 비교하였다. 막재로 표면에 형성되는 장력을 정확히 측정하는 데는 한계가 있어 단순히 장력의 많고 적음에 따라 상대적인 흡음특성 변화만을 조사하였다.

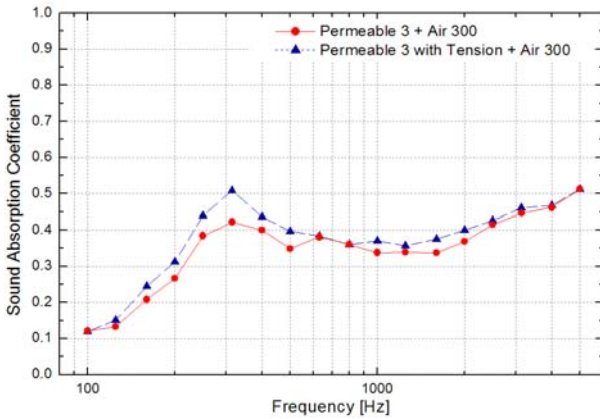


Fig. 9 Sound absorption characteristics of membrane 3 with and without tension (300 mm air gap)

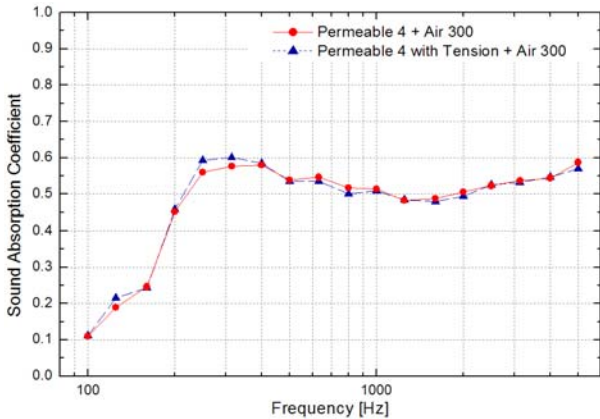


Fig. 10 Sound absorption characteristics of membrane 4 with and without tension (300 mm air gap)

Fig. 10과 11은 통기성 내막 3과 4의 장력변화에 따른 흡음특성을 비교한 것이다. 통기성 내막 3의 경우 막표면에 가해지는 장력을 더욱 크게 한 경우, Takahashi[3]의 연구에서와 유사하게 흡음률이 증가하는 것으로 나타났으며, 공명흡음 주파수 대역인 315 Hz를 중심으로 흡음능이 증가되는 것으로 나타났다. 공기 투과율이 높은 통기성 내막 4의 측정결과 공명흡음대역을 중심으로 흡음능이 다소 증가한 것으로 나타났으나, 나머지 주파수 대역에서는 유사한 것으로 나타났다. 이상의 결과에서와 같이 막 표면에 가해지는 장력이 증가될 경우 공명 주파수 대역을 중심으로 흡음능이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 막표면에 가해지

는 장력의 증가에 따라 막 진동이 더욱 잘 발생되기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

경기장 및 대규모 야외 공연장에 사용이 증가되고 있는 막구조를 대상으로 흡음특성을 조사하였다. 기존의 연구에서는 이론적인 해석 및 실제 경기장에 적용된 복합 막구조를 대상으로 막구조의 흡음특성을 연구하였다. 본 연구에서는 막재로 자체의 흡음특성을 조사하기 위하여 통기성 내막재로 4종과 통기성이 없는 외막재로 1종을 대상으로 배후 공기층 및 막재로 표면에 가해지는 장력을 변화시켜 잔향실법 흡음률을 측정하였다.

막재로의 흡음능은 통기성이 있는 내막재로에서 확인되었으며, 배후공기층의 변화에 따라 공명흡음주파수 대역에서 높은 흡음능을 갖는 것으로 나타났으며, 공명 흡음 주파수 대역보다 높은 주파수 대역에서는 0.3 ~ 0.5 수준의 비교적 평탄한 흡음특성을 갖는 것으로 나타났다. 또한 배후 공기층이 증가됨에 따라 공명흡음 주파수 대역도 낮아지는 것으로 나타났다.

통기성 흡음 내막은 서로 다른 공기투과율과 면밀도를 갖도록 구성되었으며, 공기투과율과 면밀도가 증가됨에 따라 공명 흡음 주파수 대역을 중심으로 증가되는 것으로 나타났다. 그러나 공기투과율이 일정하게 이상으로 증가될 경우 오히려 흡음능이 낮아지는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 이전의 이론적 연구[5] 및 복합 막구조에 대한 연구[12]에서와 유사한 것으로 나타났다.

최근 돐구장 건설 및 자유로운 형태를 갖는 대규모 공간의 건설이 증가함에 따라 공간내부의 실내음향 제어에 대한 수요가 증가하고 있다. 막구조는 이와 같은 수요에 매우 유용하게 적용될 수 있으며, 통기성이 없는 외막과 함께 통기성이 있는 내막을 적용할 경우 공간내부의 음향제어가 가능한 것을 확인하였다. 또한 내막재로의 공기투과율, 밀도, 배후 공기층 및 표면 장력 등을 변화시킬 경우 공간 용도에 맞는 최적의 흡음구조를 형성할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 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 double-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) 김정중, 손장열, 2005, "PTFE(Teflon) 막 구조를 갖는 다목적 경기장의 음향성능 분석 연구", 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제25권, pp.3~6.

(9) 박혜나, 김정중, 손장열, 2005, "테프론 막구조의 야외공연장의 건축음향 특성분석에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술발표대회논문집, pp.200~204.

(10) 김정중, 손장열, 2009, "PTFE 막구조를 갖는 다목적 경기장의 음향특성 연구", 한국생활환경학회논문집, 제16권, 제2호, pp.143~153.

(11) 김정중, 정정호, 손장열, 2007, "테프론 막재료의 흡음 특성 및 적용효과 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제17권, 제4호, pp.342~349.

(12) Jung Joong Kim, Jeong Ho Jeong and Jang-Yeul Sohn, 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.