

Impedance Tube 를 이용한 흡음재의 흡음율 측정

The Measurement of Absorption Coefficient of Acoustic Material by using Impedance Tube Method

* 김 명 수 (Kim, M. S.)
** 윤 석 왕 (Yoon, S. W.)
*** 박 흥 수 (Park, H. S.)

요 약

흡음 계수는 흡음재의 흡음 특성을 제시해 주는 기본적 물리량 이다. 본 연구에서는 일반적으로 흡음재로 사용되는 흡음재의 흡음 특성을 알기 위해 두께 18mm, 직경 105mm인 10종의 흡음재를 택하여 흡음재의 흡음 계수를 구했다. 이를 위해 impedance tube를 제작하여 관내에 흡음재를 넣은 후 관내에 만들어진 정상파의 최대 음압과 최소음압의 비, 정상파비(Standing Wave Ratio: SWR)를 이용하여 흡음 계수를 구했다. 그 결과 흡음재의 흡음 특성은 진동수, 흡음재의 재질, 두께 및 다공성에 크게 의존해 스펀지, 유리 섬유 등의 흡음 효과가 좋게 나타났으며 특히 같은 두께의 동일 흡음재일지라도 흡음재 뒷면의 공기층을 적절히 조절함으로써 특정 진동수 근처에서의 흡음 효과를 증대 시킬 수 있었다.

ABSTRACTS

The absorption coefficient of a material is highly important as a factor in determining its acoustical performance in various application. In this paper acoustical properties of ten materials are investigated by using impedance tube method. Their absorption coefficients are derived from the standing wave ratios measured in the impedance tube. The results show that the absorption coefficient of a material depends not only on its surface roughness, porosity but also on the frequencies used for the measurements. In particular the air gap behind the material increases very much its absorbing effect at a certain frequency.

* 경기대학교 물리학과

** , *** 성균관대학교 물리학과 교수

I. 서 론

실내 음향은 폐쇄된 공간에서의 소리의 생성, 전달 및 소멸에 관한 연구분야로 1922년 W. C. Sabine에 의해 처음으로 조직적 연구가 발표된 이래 K. Schuster, E. Watzman, F. V. Hunt 등의 많은 연구자에 의해 연구되어 왔다¹⁾.

실내에서의 소리의 전파는 방해물이 전혀없는 자유 음장과는 달리 항상 방해물에 의해 영향을 받게 된다. 그러므로 실내에서 측정된 음압 레벨(Sound Pressure Level)은 음원 뿐만 아니라 천장, 바닥, 벽의 재질 및 여러 주변 요인에 의해 영향을 받게 되고 따라서 실내의 잔향시간(Reverberation Time), 확산 음장(Diffuse Field), 울림(Echo) 등이 복직에 따라 적절히 사용되기 위해서는 음향 재료의 흡음 특성을 정확히 알아야 한다. 특히 주변 소음으로 인한 공해를 제거 하거나 실내 소리의 명료도를 높이기 위해서는 적절한 흡음율을 갖는 음향 재료의 선택이 중요하므로 흡음 특성은 실내 음향에서 음향 재료의 선택에 결정적인 역할을 하게 된다.

이러한 흡음 계수를 측정하기 위해 (1)균일한 음장에서 흡음재로 인한 음장의 변화²⁾ (2)잔향 실내에서 흡음재로 인한 잔향 시간의 변화³⁾ (3)톤 버스트(tone burst) 신호를 이용한 반사파의 음압측정⁴⁾ (4)Impedance tube를 이용한 정상파비(Standing Wave Ratio: SWR)의 측정⁵⁾⁶⁾ 등의 방법이 취해져 왔으며 각 측정 방법에 의해 측정된 흡음 계수는 측정 방법, 진동수, 입사각에 따라 변하므로 반드시 측정 방법 등이 제시되어야 한다. Impedance tube 방법은 관의 제작이 간편하고, 시료의 제작이 용이하며, 음장의 온도 변화, 공기 흐름 및 파의 소용돌이 현상으로 인한 오차 요인을 제거할 수 있는 잇점이 있으므로 본 연구에서는 네번째 방법인 Impedance tube 방법을 이용하여 여러 종류의 흡음재의

흡음 계수를 구하여 흡음재의 특성을 알고자 하였다.

II. 이론적 배경 및 실험 장치

1. 이론적 배경

일반적으로 평면파가 흡음재 표면에 입사할때 그 표면의 흡음 계수 α 는 아래와 같이 정의된다⁷⁾

$$\alpha = \frac{\int_s \vec{I}_P \cdot d\vec{s}}{\int_s \vec{I}_A \cdot d\vec{s}} \dots\dots\dots(1)$$

- \vec{I}_P : 흡음재에서 흡수되는 음향 세기
- \vec{I}_A : 흡음재 표면으로 입사하는 음향 세기
- $d\vec{s}$: 흡수 표면적 벡터

이와 같은 흡음재의 흡음 계수를 측정하기 위해 관의 끝에 스피커를 설치하고 다른 한쪽 끝에 측정하고자 하는 흡음재를 놓은 후 단일 진동수의 음파를 흡음재 표면에 수직하게 입사시킨다.

관내 흡음재 표면에 음파가 입사되면 흡음재 표면은 입사파의 음압 변화에 대응하여 움직이게 될 것이므로 경계면의 입자속도 \vec{U}_n 은 ~ ~ ~ ~ ~

$$\vec{U}_n = \vec{P}' / \vec{Z} \dots\dots\dots(2)$$

- \vec{P}' : 경계면에서의 음압
- \vec{Z} : 고유 음향 임피던스(Specific Acoustic Impedance)

로 나타낼 수 있고, 흡음재 앞의 음압 \vec{P} 는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{P} = A e^{-i\omega t} (e^{ikx} + \vec{R} e^{-ikx}) \dots\dots\dots(3)$$

$$P_{r.m.s}(x) = \frac{A}{\sqrt{2}} (1 + |\vec{R}|^2 + 2|\vec{R}|\cos 2$$

$$(Kx + \pi\sigma/2)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

- A; 입사파의 음압진폭
- \tilde{R} ; 입사파와 반사파의 복소 음압진폭비
- σ ; 반사파의 위상
- x; 시료면으로부터의 거리

그러므로, 관내의 정상파 $P_{r.m.s}$ 는 반사체로부터의 거리에 따라 변할 것이며 정상파의 최소 음압에 대한 최대 음압의 비로 주어지는 정상파비(SWR)는

$$SWR = |P_{max}| / |P_{min}| = (1 + |\tilde{R}|) / (1 - |\tilde{R}|) \dots\dots\dots (5)$$

이 되며 여기서 P_{max} , P_{min} 는 정상파의 최대, 최소 음압이다. 따라서 흡음 계수 α 는⁸⁾

$$\alpha = 1 - ((SWR - 1) / (SWR + 1))^2 \dots\dots\dots (6)$$

이 된다.

2. 실험장치

본 실험을 위해 10종의 시료가 선택되었으며 각 시료는 관내의 실험에 적합하도록 직경 105mm, 두께 18mm의 원판으로 제작되었으며 몇 종류에 대해서는 두께 및 흡음재 앞, 뒤의 공기층 변화에 따른 흡음 효과를 연구하기 위해 다양한 변화를 하였다. 사용된 시료는 <표 1>과 같다.

표 1 시료의 종류, 두께, 직경 및 밀도

종 류	두께(mm)	직경(mm)	밀도(g/cm ³)
스 치 로 폴	18~62	105	0.1490
양 탄 자	18~40.5	105	0.1431
스 폰 지	18~118	105	0.0155
유리섬유A	18~130	105	0.0153
유리섬유B	130	105	0.0320
코 르 크	18	105	1.1012
찰 A	70~130	105	0.7691
찰 B	130	105	0.7691
석 고	18	105	6.6790
고 무	18	105	9.8211
벽 돌	18	105	9.5702

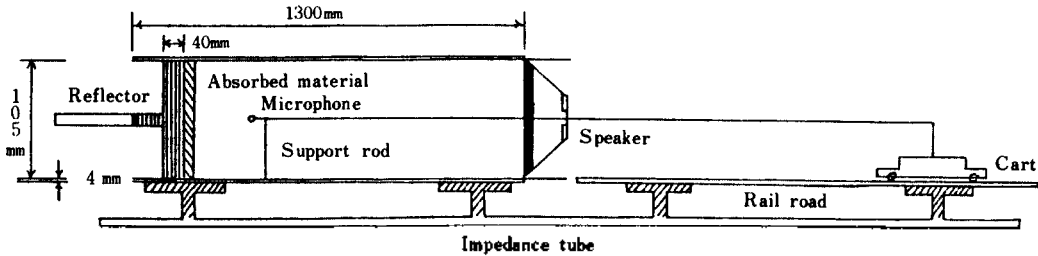


그림 1 Impedance tube 도면.

본 실험을 위해 진동수 200~1900(Hz) 영역을 만족하는 Impedance tube를 제작하였고 이를(그림1)에 나타냈으며 이에 따른 실험 장치도물(그림2)에 나타냈다. 실험시 각 측정기기들의 전원 안정도를 유지하기 위해 전압 안정기를 사용하였고 스피

커의 정상 진동을 관찰하기 위해 저주파 발전기(Tr-io202-A)의 신호와 마이크로폰의 신호를 Dual Oscilloscope(Hitach: V-152)를 통해 비교 관찰하였으며, 측정실의 외부 요인으로 인한 변화량을 줄이기 위해 일정한 외부 조건을 유지하며 실험하였

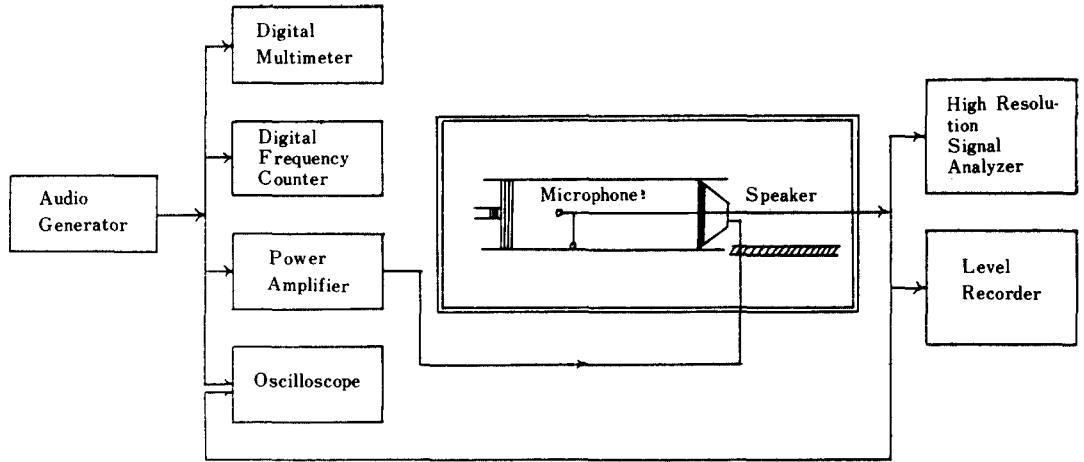


그림 2 실험장치도.

다. 음원(삼미 스피커 : FA-120SF13)으로부터 발생된 음이 흡음재물 통과한 후 완전 반사가 되도록 하기 위해 두께 40mm인 강철판을 반사벽으로 사용했다. 반사된 반사파는 입사파와 만나 정상파를 만들게 되며 실제 관내의 정상파 형성 유무를 확인하기 위해 마이크로폰(B&K: Type 4165)을 일정한 속도로 연속 이동시켜 관내의 음압 변화를 Level Recorder(B&K: Type 2307)로 기록하였다. 관내의 음압은 흡음재물로부터의 거리에 따라 변하므로 마이크로폰을 스피커 방향으로 이동시켜 진동수 영역 0~20KHz, 분석 가능 음압 정밀도 0.1dB를 갖는 High Resolution Signal Analyzer(B&K: Type 2033)를 이용하여 정상파의 최대, 최소 음압을 측정하였고, 최대, 최소 음압의 위치를 1mm까지 측정하였다. 또한 측정시 관내의 정상파비는 관과 관측면과의 상호작용으로 인한 에너지 손실로 인해(그림 3)과 같이 변하므로 아래와 같이 보정하였다⁹⁾.

$$a_0 = a_1 - \frac{1}{2} \cdot (a_2 - a_1) \dots\dots\dots (7)$$

a_0 : 시료면에서의 흡음 계수

a_1 : 첫 번째 최소 음압에서의 흡음 계수
 a_2 : 두 번째 최소 음압에서의 흡음 계수

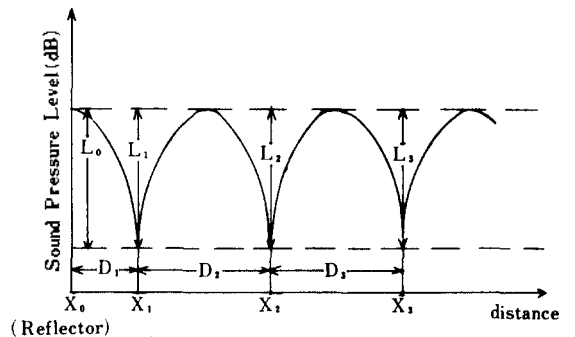


그림 3 시료면으로부터의 SPL.

III. 실험 결과 및 고찰

전술한 실험 방법 및 장치에 의해 온도 17°C, 기압 760.2mmHg, 습도 78% 일때 두께 18mm인 각 시료들의 흡음 계수를 [그림 4]로 나타냈다. 음파가 관내를 진행할 때 공기 매질에 의해 약 0.002%의 에너지 손실¹⁰⁾을 예측할 수 있으나 이는 본 실험에 영향을 주지 못하므로 이 손실을 무시했다.

(그림 4)에서 보는 것과 같이 흡음재의 흡음계수는 동일한 시료에서도 진동수에 따라 많은 차이가 있으나 대부분의 흡음재는 저 진동에서 고 진동으로 진동수가 증가함에 따라 흡음 계수가 점차 증가하는 것을 볼 수 있었으며 또한, 같은 두께의 시료 일지라도 유리 섬유, 스펀지와 같은 다공성이 큰 시료는 고무, 석고 등과 같이 다공성이 적은 시료에 비해 흡음 계수가 월등히 높은 것을 볼 수 있었다. 그러나 스티로폴의 경우 다공성에도 불구하고 흡음 계수가 무척 낮은데 이는 스티로폴과 유리섬유의 다공성의 구조적 차이에 의한 것으로 스티로폴의 다공성은 시료 표면에서 유리되었거나 개방되었다고 해도 인접한 흡수공과 독립적으로 배열되었기 때문이다. 반면에 유리 섬유의 다공성은 시료 표면에서 개방되었고 인접한 흡수공과 서로 서로 연결되어 있어 음파가 시료 내부로 진행함에 따라 흡음재와 많

은 충돌을 일으켜 에너지 손실이 많은 것에 기인한다.

양탄자와 스펀지의 흡음 효과를 비교해 볼 때 스펀지의 다공성이 양탄자의 다공성보다 많아 좋은 흡음 효과를 기대했으나 양탄자의 흡음 효과가 월등히 좋은 것으로 나타났다. 이는 흡음 효과가 다공성 뿐만 아니라 흡음재의 재질에도 크게 영향을 받는다는 것을 보여주는 것이며 이런 효과는 특히 시료의 두께가 얇을 때 두드러지게 나타났다. 따라서 흡음재의 흡음 효과는 흡음재의 재질과 다공성을 모두 생각해야 할 것으로 보였다.

흡음재의 두께 변화에 따른 흡음 계수를 (그림5) ~ (그림 9)에 나타냈다. 그림에서 보는 것과 같이 유효 다공성이 적은 스티로폴은 그 두께를 증가시켜도 그 증가폭은 적었다. 반면에 유효 다공성이 큰 스펀지, 유리 섬유는 두께를 증가시키에 따라 흡음 계수가 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나(그림 6), (그림 7)에서와 같이 유리 섬유의 두께가 100mm, 스펀지의 두께가 65mm 이상이 되면 1250Hz

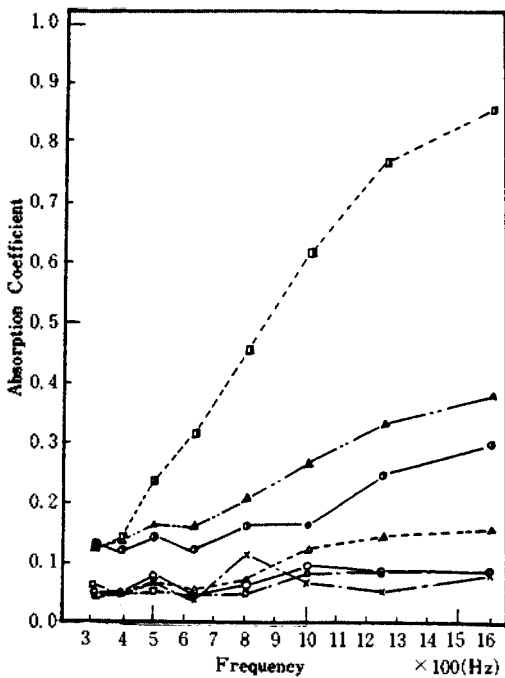


그림 4 흡음재의 진동수에 대한 흡음계수(□: 양탄자, ▲: 유리섬유, △: 코르크, ●: 스펀지, ○: 고무, □: 스티로폴, ×: 석고)

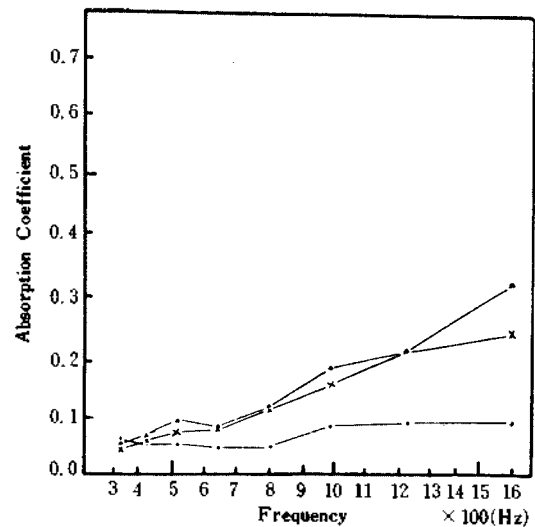


그림 5 두께가 다른 스티로폴의 진동수에 대한 흡음계수(●: 18mm, ×: 44mm, △: 62mm).

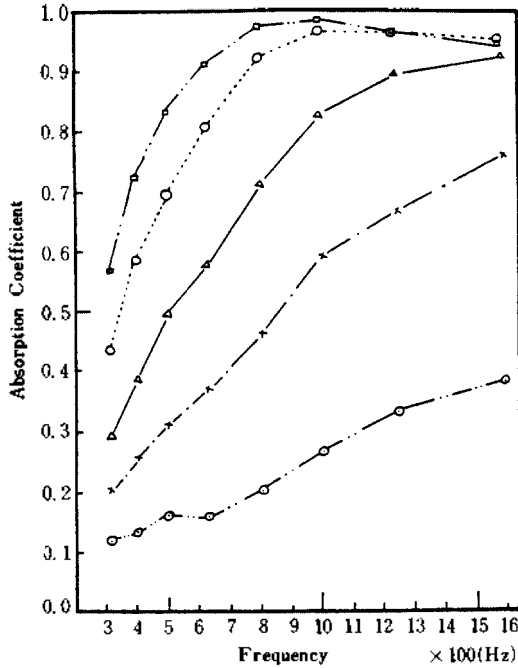


그림 6 두께가 다른 유리섬유 A의 진동수에 대한 흡음 계수 (◎ : 13mm, × : 50mm, △ : 70mm, ○ : 100mm, □ : 130mm).

이상의 고 진동은 흡음계수가 더 이상 증가하지 않고 1250Hz 이하의 진동수 영역에서만 흡음 계수가 증가하는 것을 볼 수 있었는데 이것은 흡음재의 두께가 증가함에 따라 장 파장의 음파가 시료 내부로 진행되는 경로가 길어져 흡음재 내부에서 충돌이 많아져 에너지 손실이 증대되었고 또한 시료 두께가 파장의 $\frac{1}{4}$ 인 부분에서 입자 속도가 최대로 되므로 흡음재의 두께를 증가시킴에 따라 저진동 영역에서 흡음율이 증가하는 것으로 사료된다¹¹⁾

관의 중축과 나란한 방향으로 배열한 질(A)의 두께 변화에 따른 흡음 계수를 [그림 8]에, 양탄자의 두께 변화에 따른 흡음 계수를 [그림 9]에 나타냈다. [그림 8]과 같이 질(A)의 흡음 계수는 질의 길이 증가시킴에 따라 고 진동에서 저 진동으로 흡음 효과가 이동하는 것을 볼 수 있는데 이는 시료의 질이 증가함에 따라 공진 주파수가 감소되기

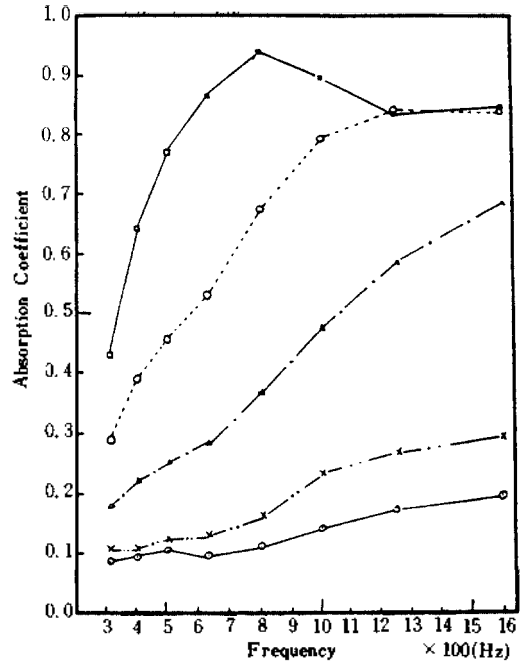


그림 7 두께가 다른 스펀지의 진동수에 대한 흡음계수 (◎ : 16mm, × : 18mm, △ : 44mm, ○ : 65mm, □ : 118mm).

때문이다. 양탄자의 흡음 계수는 [그림 9]와 같이 두께를 증가시킴에 따라 1000Hz 이상의 진동수에서 흡음 계수가 점차 감소하는 것을 볼 수 있었으며 두께가 27mm 이상이 되면 1000Hz 근처에서 가장 높은 흡음 계수를 갖는데 이는 두께가 증가함에 따라 양탄자의 유효 질량이 증가하고 이때 막 진동 특성이 나타나기 때문이다.

두께 130mm, 밀도 0.0320g/cm³인 유리 섬유를 표면 처리한 시료와 배열을 달리한 질의 흡음 계수를 [그림 10]에 나타냈다. [그림 10]과 같이 유리 섬유 표면에 0.18mm 두께의 얇은 천을 씌운 유리 섬유 B-2와 표면처리를 하지 않은 유리 섬유 B-1은 흡음 계수가 거의 변하지 않았으나 유리 섬유 B-1의 표면에 0.5mm로 풀을 먹인 천을 씌운 유리 섬유 B-3는 500Hz 부근에서 높은 흡음 계수를 갖었는데 이는 시료 표면의 풀 먹인 천으로 인해 시료 표

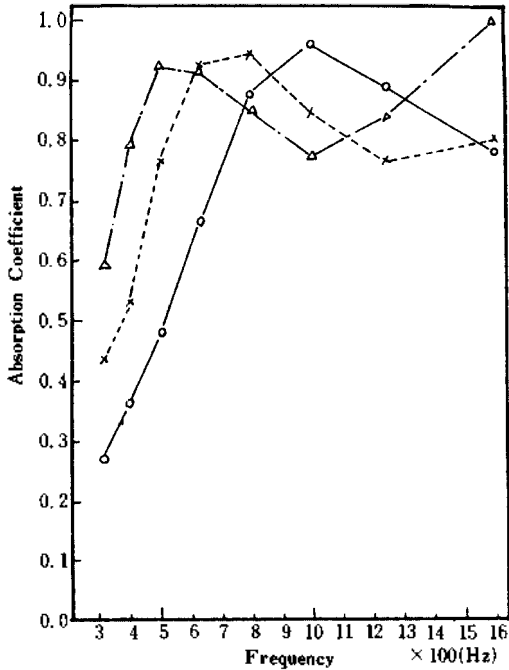


그림 8 두께가 다른 질 A의 진동수에 대한 흡음계수 (○ : 70mm, × : 100mm, △ : 130mm).

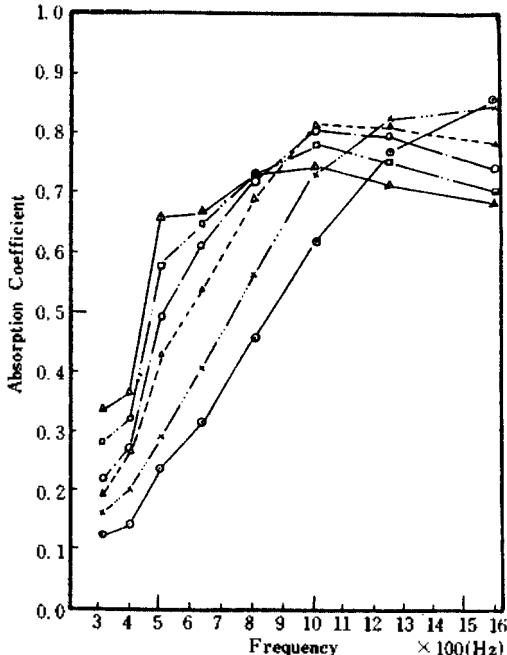


그림 9 두께가 다른 양탄자의 진동수에 대한 흡음계수 (◎ : 18mm, × : 22.5mm, △ : 27mm, ○ : 31.5mm, □ : 36mm, △ : 40.5mm).

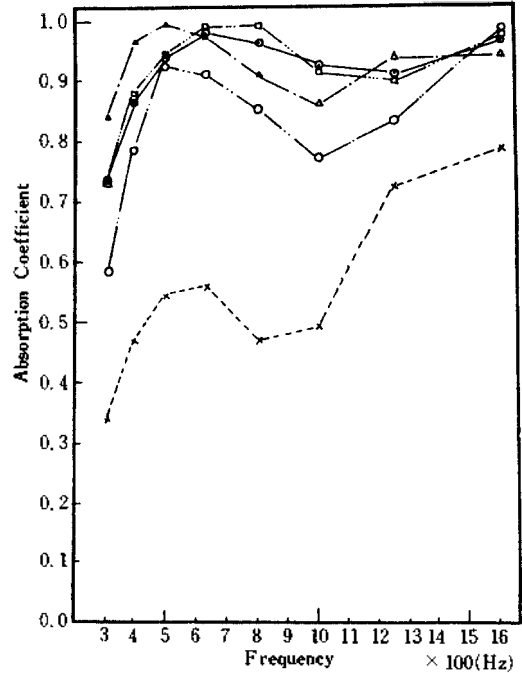


그림 10 표면처리한 유리섬유 B 및 배열을 달리한 질의 진동수에 대한 흡음계수 (○ : 질 A, × : 질 B, ◎ : 유리섬유 B-1, □ : 유리섬유 B-2, △ : 유리섬유 B-3).

면 유효 질량이 증가하여 막 진동 특성이 일어나기 때문이다^{4) 11)} 이런 현상은 주로 저 진동 영역에서 나타나며 시료의 두께, 시료 표면 유효 질량, 시료의 다공성을 변화시킴으로써 최대 흡음 주파수를 결정할 수 있으리라 생각한다. 배열을 달리한 질의 경우 불규칙적인 배열을 한 질 B가 규칙적 배열을 한 질 A 보다 500Hz 부근에서 약 0.38 정도 낮은 흡음계수를 갖는데 이것은 질의 불규칙한 배열로 시료 표면의 유효 흡수공 수가 감소하였기 때문이다.

두께 60mm인 스펀지와 유리 섬유와의 전후 공기층을 변화 시킴으로써 나타나는 흡음 계수 변화를(그림 11)~(그림 14)에 나타냈다. (그림 11), (그림 13)에서와 같이 시료앞에 0.2mm 두께의 얇은 천으로 만들어진 공기층은 공기층의 변화에 대해 흡음계수의 변화가 크게 나타나지 않는데 이는 시료앞의 얇은 천이 공기층 내의 공진을 만들어 주지 못하기 때

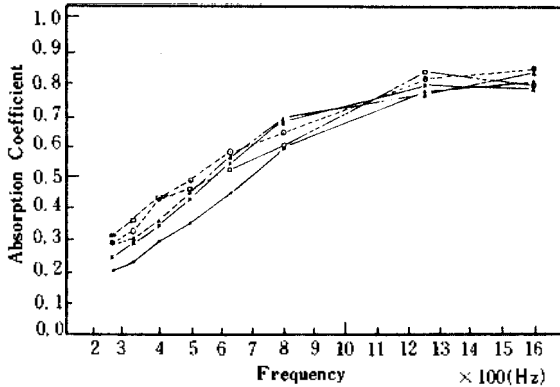


그림 11 6cm 두께 스펀지의 앞면 공기층 변화시 진동수에 대한 흡음계수 (· : 스펀지, × : 3cm 공기층, △ : 6cm 공기층, ⊙ : 9cm 공기층, □ : 12cm 공기층).

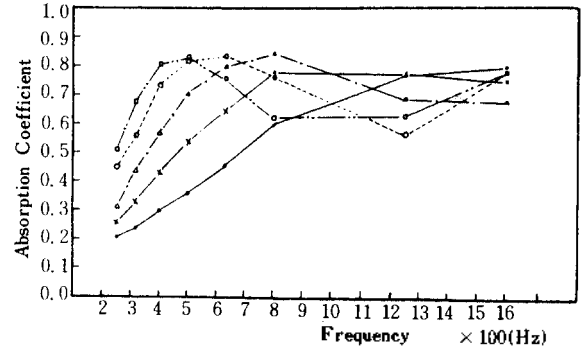


그림 14 6cm 두께 유리섬유 A의 뒷면 공기층 변화시 진동수에 대한 흡음계수 (· : 유리섬유, × : 3cm 공기층, △ : 6cm 공기층, ⊙ : 9cm 공기층, □ : 12cm 공기층).

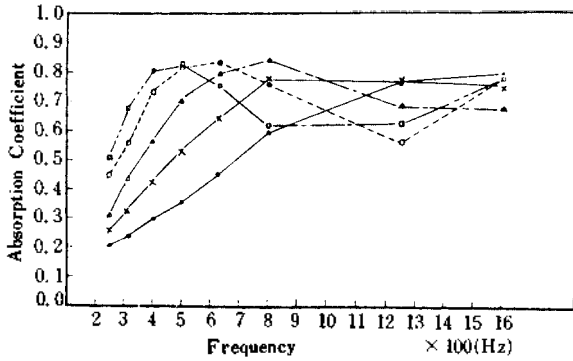


그림 12 6cm 두께 스펀지의 뒷면 공기층 변화시 진동수에 대한 흡음계수 (· : 스펀지, × : 3cm 공기층, △ : 6cm 공기층, ⊙ : 9cm 공기층, □ : 12cm 공기층).

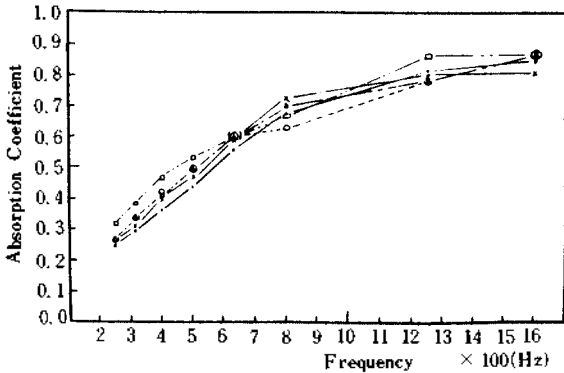


그림 13 6cm 두께 유리섬유 A의 앞면 공기층 변화시 진동수에 대한 흡음계수 (· : 유리섬유, × : 3cm 공기층, △ : 6cm 공기층, ⊙ : 9cm 공기층, □ : 12cm 공기층).

문이다.

반면에 (그림12), (그림14)와 같이 시료면 뒤의 공기층 변화는 공기층의 두께를 증가시키에 따라 흡음 효과가 고 진동에서 저 진동으로 점차 이동하는 것을 볼 수 있었는데 이는 시료 뒤의 공기층에서 공진 현상이 일어나 공진 주파수 근처에서 높은 흡음 효과가 나타나는 것이다. 따라서 저 진동의 경우 공기층의 두께를 증가함으로써도 흡음재의 두께를 증가시키에 따른 흡음 효과를 얻을 수 있으며 또한 흡음재 뒷면에 적절한 공기층을 만들어 줌으로써 특정 주파수 근처에서 좋은 흡음 효과를 기대할 수 있으리라 사료된다.

IV. 결 론

Impedance tube를 이용 흡음재의 흡음 계수를 측정하여 주파수, 흡음재의 유효 다공성, 두께, 재질, 밀도 및 일련의 공기층 변화에 따른 흡음재의 흡음 특성 변화를 고찰하였다.

유효 다공성이 좋은 유리 섬유 및 스펀지는 흡음재의 두께를 증가시키에 따라 흡음 효과가 좋아지나 유효 다공성이 적은 스티로폴의 경우 두께를 증가시켜도 낮은 흡음 효과를 보여 흡음재 보다는 오

히려 소리 차폐용으로서 사용이 적절함을 알 수 있었다. 또한 흡음재의 재질에 의해 흡음 효과가 좋았던 양탄자는 두께를 증가 시킴에 따라 저 진동의 흡음 효과는 좋아지나 고 진동의 흡음 효과는 낮아지는 것을 볼 수 있었으며 유리 섬유를 표면처리함으로써 흡음 특성이 저 진동으로 이동함을 볼 수 있었다. 특히 흡음재 전후의 공기층 변화시 흡음재 뒤의 공기층 두께가 증가 할수록 최대 흡음 효과가 점차 저 진동으로 이동함을 볼 수 있어 저 진동의 경우 공기층을 두껍게 함으로써도 시료의 두께를 증가 시킴에 따른 흡음 효과를 볼 수 있었다. 그러나 본 연구에서 측정된 흡음계수는 입사파의 입사각이 시료면에 대해 수직인 경우에 한한 것이므로 입사파가 경사 입사할 때의 흡음 계수는 입사각의 변화에 따른 측정으로 결정되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. R.B. Lindsay, "The Story of Acoustic" J. Acoust. Soc. Am. 39, 629 (1966)
2. G. Porjes, *Applied Acoustics*, (Edward Arnold,

- London, 1977), p.94.
3. A. Warnock, "Some practical aspects of absorption measurements in reverberation room" J. Acoust. Soc. Am. 74, 1422 (1983).
4. L. Cremer and H. Muler, *Principles and Application of Room Acoustics*, (Applied science publishers, London and New York, 1982), Vol 1, p.145, Vol 2, p.190.
5. M. Kathuriya and M. Munjal, "Accurate method for the experimental evaluation of the acoustical impedance of a black box" J. Acoust. Soc. Am. 58, 451 (1975).
6. W. Koidan, G. Hruska, and M. Pickett, "Wedge Design for National Bureau of Standards Anechoic Chamber," J. Acoust. Soc. Am. 52, 1071 (1972).
7. American Institute of Physics Handbook, (McGraw-Hill, N. Y., 1970), 3rd Ed, pp. 3-144.
8. Samuel Temkin, *Element of Acoustics*, (John Wiley and Sons, New York, 1981), p.88.
9. H. Sabine, "Notes on Acoustic Impedance measurement," J. Acoust. Soc. Am. 13, 143 (1942).
10. C. Harris, "Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature," J. Acous. Soc. Am. 40, 148 (1966).
11. 차일환, 소음진동, (세림사, 1980), p. 100~116.