

# 두 개의 마이크로폰을 이용한 흡음재의 음향특성 조사

A Study on the Acoustical Characteristics of the Absorbent Materials Using Two Microphones

정 성 수\* · 황 철 호\*

Sung-Soo Jung and Cheol-Ho Hwang

〈1996년 2월 28일 접수 ; 1996년 3월 27일 심사완료〉

## ABSTRACT

A free field method using two microphones is used for measuring surface impedance and absorption coefficient of the absorbent materials. It is shown that this method can be performed in a large non-anechoic room. Precise values of the surface impedance can be obtained by changing the spaces between the two microphones. Comparison between experimental values of the surface impedance of the glass wool and the mineral wool and Miki's empirical model shows agreement.

## 1. 서 론

각종 소음방지 목적으로 사용되는 여러 가지 흡음재에 대한 음향학적 연구는 오래 전부터 다양하게 이루어져 왔으며, 최근 생활수준의 향상과 사회적인 관심의 고조에 따라 그 중요성이 더욱 커지고 있다. 흡음재의 음향특성으로는 특성 임피던스와 전파상수, 표면 임피던스 및 흡음계수 등을 들 수 있는데 이들은 서로 밀접한 관계를 가지고 있으며, 특히 흡음재의 대표적인 특성으로서 사용되는 흡음계수는 흡음재의 유동저항(flow resistivity)에 크게 의존한다.

임의 두께의 흡음재에 대한 흡음계수를 예측하거나 높은 흡음율을 가지는 흡음재의 개발을 위해서는 흡음재에 대한 이론적인 해석이 요구되는데 이러한 연구는 이미 1940년대에 Zwicker와 Kosten<sup>(1)</sup>에 의해서 현상론적으로 해석되었고 Biot<sup>(2)</sup>, Lambert<sup>(3)</sup> 그리고 Allard 등<sup>(4)</sup>에 의해 발전되었다. 한편, 흡음재의 고유 임피던스와 전파상수를 유동저항을 사용하여 효과적으로 해석할 수 있는 예측식이 Delany와 Bazley<sup>(5)</sup>, Miki<sup>(6)</sup> 그리고 Allard와 Champoux<sup>(7)</sup> 등에 의해 제시되었는데 유동저항이 결정되면 임의 두

께의 흡음재에 대한 표면 임피던스와 흡음계수의 예측이 가능하다.

이러한 이론식을 검증할 안정된 실험방법도 꾸준히 개발되었는데 실험방법에 있어서는 표준으로서 전통적으로 사용되어 온 정상파 비 방법<sup>(8)</sup>과 최근들어 새로운 방법으로서 각광받고 있는 두 개의 마이크로폰을 이용한 스펙트럼밀도 방법<sup>(9)</sup>, Chung과 Blaser에 의한 전달함수 방법<sup>(10)</sup> 그리고 임펄스 방법<sup>(11)</sup> 등이 있다.

본 연구에서는 무향실과 같은 특수한 시설을 필요로 하는 자유음장법을 무향실이 아닌 일반 실험실에서 적용하여 비무향실에서 흡음재의 표면 임피던스 및 흡음계수의 측정 가능성을 알아보았다. 실험은 대표적 흡음재인 유리솜과 암면을 대상으로 전달함수 방법<sup>(10)</sup>을 이용하였으며, Miki의 예측식을 사용하여 표면 임피던스 및 흡음계수 측정값과 비교함으로써 본 실험에 사용된 시료들의 유동저항값을 구하였다.

## 2. 표면 임피던스의 측정 및 해석

시료의 표면 임피던스 값은 시료에 대한 음의 반사계수로부터 구할 수 있다. 시료의 반사계수를 측정하기 위한 대표적인 방법인 정상파 비 방법은 임

\*정회원, 한국표준과학연구원 음향진동그룹

피던스관을 사용하므로 관의 지름과 길이에 따라 측정 가능한 실험 주파수에 제약이 존재하게 되는 단점이 있다. 이 단점을 개선한 방법이 자유 음장법<sup>(12)</sup>으로서 주파수에 따른 제약은 없으나 임피던스관 방법에 비해 시료가 크고 무향설과 같은 특수 시설이 요구된다.

Fig. 1에서 보는 것과 같이 시료를 강체 위에 설치한 후 시료 표면으로부터 적당히 떨어진 두 지점에 각각 두 개의 마이크로폰을 설치하고 이 두 마이크로폰을  $M_1, M_2$ 라고 하자. 시료면으로부터  $d$ 만큼 떨어진 곳에 음원을 설치하여 시료에 수직으로 음을 입사시키게 된다. 음원으로부터 마이크로폰까지의 거리가 충분히 멀다면 시료에 입사되는 음을 평면파로 취급할 수 있으나, 현실적으로는 거리를 충분히 멀게 하기 어려우므로 입사음을 구면파로 취급하게 된다. 이 경우 두 마이크로폰에서 측정되는 음압은 입사파와 반사파의 합으로서 시간항  $\exp(-i\omega t)$ 를 제외하면 각각 다음 식으로 쓸 수 있다<sup>(13)</sup>.

$$P_{M_1} = P_0 \left( \frac{e^{ik_0 r_1}}{r_1} + R_s \frac{e^{ik_0 r_{1I}}}{r_{1I}} \right), \quad (1)$$

$$P_{M_2} = P_0 \left( \frac{e^{ik_0 r_2}}{r_2} + R_s \frac{e^{ik_0 r_{2I}}}{r_{2I}} \right) \quad (2)$$

여기서  $r_1, r_2$ 는 음원으로부터 두 마이크로폰  $M_1, M_2$ 까지의 거리이고,  $r_{1I}, r_{2I}$ 는 영상음원(image sound source)으로부터  $M_1, M_2$ 까지의 거리이다.  $P_0$ 는 음원의 특성에 의존하는 상수이고,  $R_s$ 는 반사계

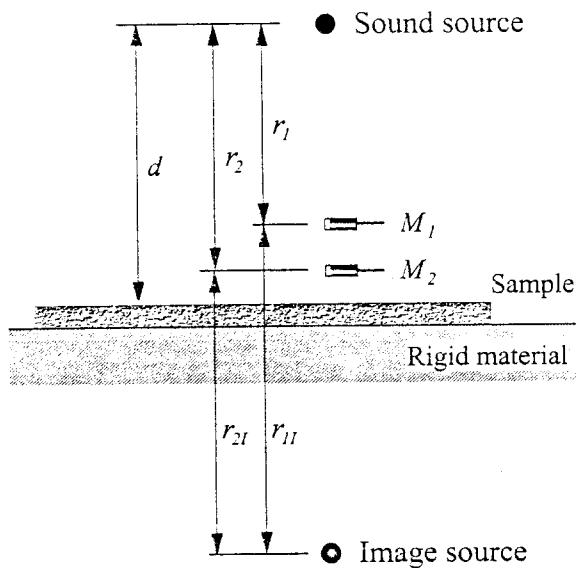


Fig. 1 The geometry of the sound source and the image source

수이며,  $k_0$ 는 공기 중에서의 음의 파수이다.

한편, 두 마이크로폰 신호사이의 전달함수  $H(w)$ 는 다음 식과 같다.

$$H(w) = \frac{P_{M_2}(w)}{P_{M_1}(w)} = \frac{\frac{e^{ik_0 r_2}}{r_2} + R_s \frac{e^{ik_0 r_{2I}}}{r_{2I}}}{\frac{e^{ik_0 r_1}}{r_1} + R_s \frac{e^{ik_0 r_{1I}}}{r_{1I}}}. \quad (3)$$

따라서 반사계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_s = \frac{\frac{e^{ik_0 r_2}}{r_2} - H(w) \frac{e^{ik_0 r_1}}{r_1}}{H(w) \frac{e^{ik_0 r_{1I}}}{r_{1I}} - \frac{e^{ik_0 r_{2I}}}{r_{2I}}}. \quad (4)$$

그러면 시료면에서의 표면 임피던스  $Z_s$ 와 흡음계수  $a$ 는 다음 식에 따라 구할 수 있다.

$$Z_s = \frac{1 + R_s}{(1 - R_s)[1 - 1/(ik_0 d)]}, \quad (5)$$

$$a = 1 - |(Z_s - 1)/(Z_s + 1)|. \quad (6)$$

이상과 같은 방법에 의해 구해진 측정값들에 대한 검증과 함께 유동저항 및 표면 임피던스 값의 예측을 위한 예측식의 도출이 필요하다. 흡음재의 특성 예측에는 Delany와 Bazley의 식이 주로 사용되어 왔으나, 저주파수 영역에서 표면 임피던스의 저항부(resistive part)가 음의 값을 갖는 경우가 발생하여 물리적인 해석이 곤란하다는 단점이 있다. Miki는 이 결점을 보완하여 다음과 같이 새로운 예측식<sup>(6)</sup>을 제안하였다.

$$Z_c(f)/Z_0 = 1 + 0.070(f/\sigma)^{-0.632} - i0.107(f/\sigma)^{-0.632}, \quad (7)$$

$$k_c/k_0 = 0.160(f/\sigma)^{-0.618} + i[1 + 0.109(f/\sigma)^{-0.618}] \quad (8)$$

여기서,  $Z_c$ 와  $k_c$ 는 시료의 특성 임피던스와 전파상수이며,  $\sigma$ 는 시료의 유동저항(flow resistivity: mks rays/m)이다. 이 식은 시료의 특성 임피던스와 전파상수를 주파수와 상수인 유동저항에 대해 지수법칙으로 표현한 식이다.

본 연구의 표면 임피던스 측정과 같이 두께  $b$ 인 흡음재 바로 뒤에 강체를 둔 경우에는 시료의 표면 임피던스  $Z_s$ 는 시료의 특성 임피던스  $Z_c$ , 전파상수  $k_c$ 와 다음 관계를 가지게 된다<sup>(14)</sup>.

$$Z_s = (Z_c/Z_0) \coth(k_c b). \quad (9)$$

이제 식 (7)과 (8)에서 유동저항값  $\sigma$ 를 변화시켜 가면서 식 (9)의 실험값이 최소 오차로 일치하도록 시뮬레이션하여  $\sigma$ 를 결정한다.  $\sigma$ 가 결정되면  $Z_c$ 와  $k_c$ 가 결정되므로 식 (6)과 식 (9)를 이용하여 흡음

재 특성을 예측할 수 있게 된다.

### 3. 실험방법

전체적인 실험장치는 Fig. 2와 같으며, 무향실이 아닌 일반 실험실( $8.3\text{ m} \times 12.6\text{ m} \times 3.6\text{ m}$ )에서 실험을 수행함으로써 비 무향실에서의 실험 가능성을 연구하였다. 시료는 유리솜(체적밀도 : 40,  $48\text{ kg/m}^3$ )과 암면(체적밀도 : 50,  $100\text{ kg/m}^3$ )으로서 두께는 모두 5 cm이다. 유리솜의 크기는 가로 2 m, 세로 1 m의 판 모양이므로 흡음재의 크기를 충분히 하기 위하여 5개의 유리솜을 바닥에 서로 잘 연결시켜 설치하였고, 암면의 경우는 유리솜 보다 작은 가로 1 m, 세로 0.5 m이므로 20개를 사용하여 같은 단면적을 유지하였다. 실험실 바닥은 잘 연마된 콘크리트 바닥으로 유리솜과 암면에 의해 임피던스가 상당히 크므로 강체로 가정해도 그다지 오차가 발생하지 않을 것으로 생각된다.

시료를 실험실 중앙 지점에 설치한 후 상호 잘 보정된 두 개의 1/4-in 콘덴서 마이크로폰을 시료 표면 위쪽에 설치하였다. 이때 마이크로폰은 가능한 한 흡음재 표면에 가깝게 설치하여 거리에 의한 음의 감쇠를 최소화하였다. 이론적으로는 마이크로폰을 유리솜 표면에 설치하는 것이 가장 좋지만 너무 가까이 설치하게 되면 유리솜 표면에서의 급격한 음장의 변화로 측정값에 오차가 발생하게 되므로 실험을 통하여 적절한 위치를 설정하였다.

음원은 확성기의 전면에 지름 2.5 cm, 두께 5 mm, 길이 30 cm의 원통형 관을 부착하여 접음원

특성을 나타내도록 하고 시료 위에 설치된 마이크로폰들과 수직선상에 위치하도록 설치하였다. 무향실이 아닌 일반 실험실에서 실험을 하므로 음원과 마이크로폰간의 간격을 가깝게 하여 상대적으로 주변의 반사음에 의한 간섭을 최소화하였다. 간격을 너무 크게 하면 신호 대 잡음비가 좋지 않게 되며, 너무 작게 하면 음장의 근거리 영역에 들어가게 되어 오차의 원인이 되므로 간격을 변화시키면서 안정된 영역을 조사하였다.

음의 발생은 백색잡음 발생기 대신에 더 안정된 신호를 얻을 수 있는 단일 주파수 신호 발생기(LFG 1300, LEADER사)를 사용하였다. 두 마이크로폰에서 측정된 신호는 디지털 오실로스코프(HP 54502 A)에서 신호의 안정성을 확인하고 내장기능을 이용하여 약 200회 정도 신호를 평균한 후 그 결과를 개인용 컴퓨터로 전송하였으며, 컴퓨터에서 이 데이터를 분석하였다.

### 4. 실험결과 및 분석

실험 결과 시료와 시료면에 가까이 설치된 마이크로폰과의 거리는 약 1.5~3 cm 정도에서 안정된 신호를 얻을 수 있었으며, 확성기와 시료면과의 거리는 30~40 cm 정도가 안정된 신호를 얻을 수 있는 구간으로 25 cm 미만의 거리에서는 실험값이 이론값으로부터 많이 벗어나 규칙성이 없는 분포를 나타내었으며, 50 cm 이상에서는 S/N 비가 좋지 않았다.

실험에 있어서 가장 중요한 사항중의 하나인 두 마이크로폰 사이의 간격은 실험값에 결정적인 영향을 미치게 되는데 저주파수 영역에서는 마이크로폰 사이의 간격이 넓어야 흡음재의 음향 임피던스를 정확하게 측정할 수 있으며 고주파수 영역에서는 간격이 좁아야 임피던스의 측정이 신뢰성을 가지게 된다.

Fig. 3은 마이크로폰 간격을 5 cm로 설정하여 체적밀도  $48\text{ kg/m}^3$ 인 유리솜의 표면 임피던스를 구하고 공기의 임피던스로 정규화한 것을 나타낸 것이다. 이 그림에서 ▲와 \*는 측정값으로서 각각 저항과 리액턴스를 나타내며, 실선은 앞에서 언급한 바와 같이 예측식과 측정값이 가장 잘 일치하도록 유동저항  $\sigma$ 를 결정하여 구한 표면 임피던스를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수 구간 400 Hz에서 2,600 Hz 부근까지는 비교적 안정된 결과를 얻을 수 있었으나 그 이상의 주파수 영역에서는 측정값들이 이론값에서 많이 벗어나 분포되어 있음을

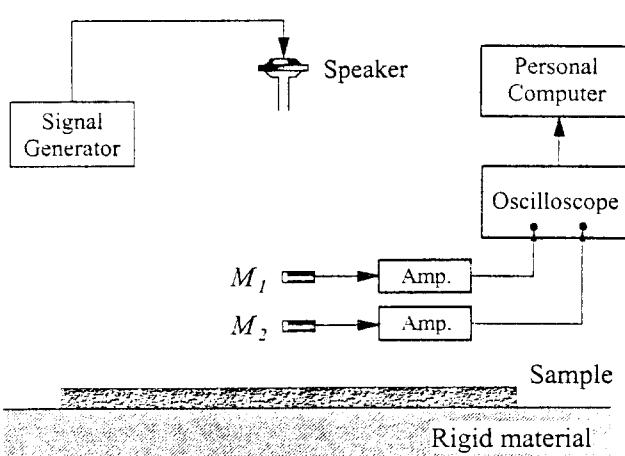
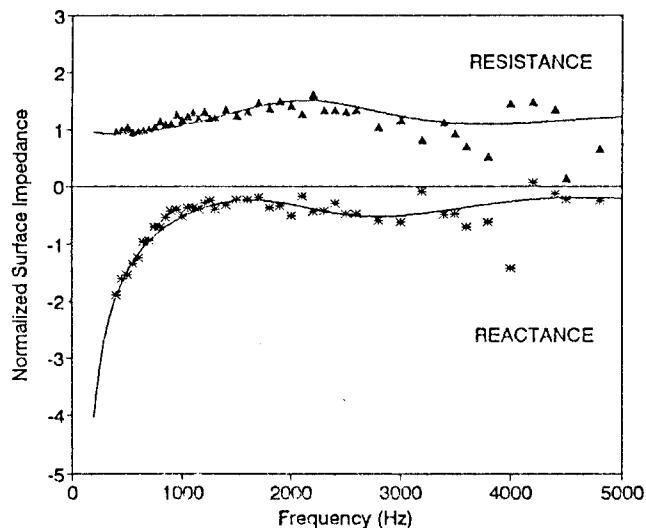


Fig. 2 Experimental set-up for measuring the surface impedance of the absorbent materials

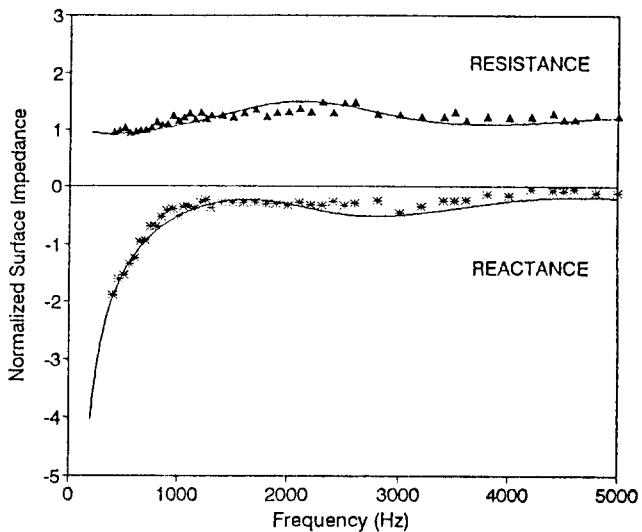
알 수 있다. 반대로 마이크로폰 간의 간격을 2 cm로 설정한 경우는 Fig. 4에 나타낸 것처럼 800 Hz 이하의 저주파수 영역에서 이론값으로부터 많이 벗어나 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 두 마이크로폰간의 간격을 주파수 영역

에 따라 적절히 바꾸면서 실험해야 하며, 특히 400 Hz 이하의 주파수 영역에 대해서는 마이크로폰 간격을 상당히 크게 해야 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있다<sup>(15)</sup>.

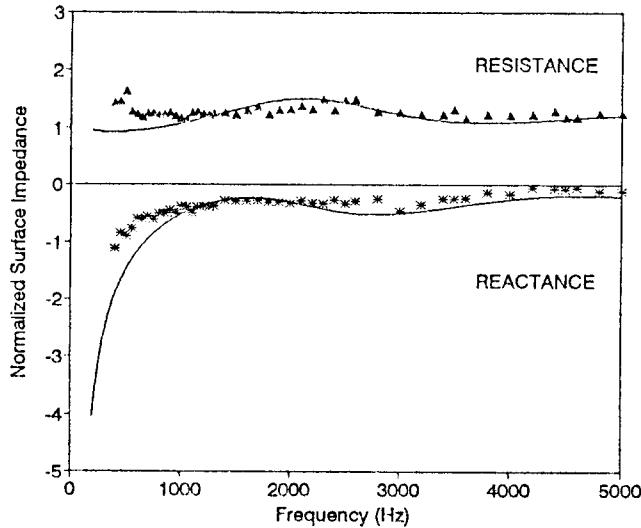
본 연구에서는 400 Hz에서 5 kHz까지의 주파수 대역에 대해 표면 임피던스를 측정하였으며, 두 마이크로폰 사이의 간격은 1,300 Hz를 기준으로 하여



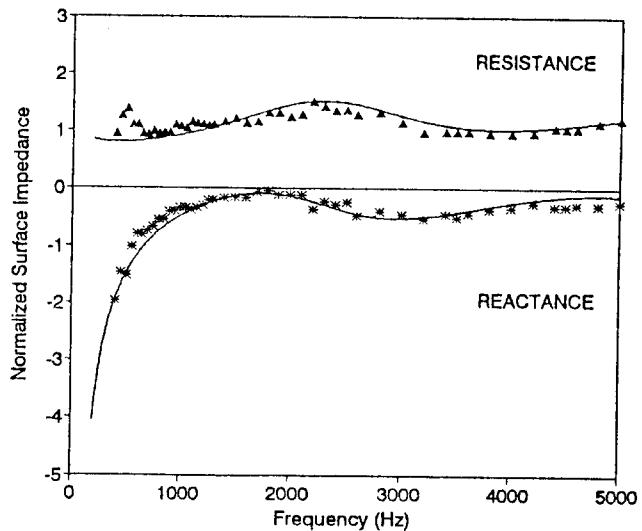
**Fig. 3** Normalized surface impedance of the glass wool (bulk density  $48 \text{ kg/m}^3$ ) with 5 cm microphone space. Comparison of resistance( $\blacktriangle$ ) and reactance(\*) of the surface impedance and theoretical values(solid line)



**Fig. 5** Normalized surface impedance of the glass wool (bulk density  $48 \text{ kg/m}^3$ ). Comparison of resistance ( $\blacktriangle$ ) and reactance (\*) of the surface impedance and theoretical values(solid line)



**Fig. 4** Normalized surface impedance of the glass wool (bulk density  $48 \text{ kg/m}^3$ ) with 2 cm microphone space. Comparison of resistance( $\blacktriangle$ ) and reactance(\*) of the surface impedance and theoretical values(solid line)



**Fig. 6** Normalized surface impedance of the glass wool (bulk density  $40 \text{ kg/m}^3$ ). Comparison of resistance ( $\blacktriangle$ ) and reactance (\*) of the surface impedance and theoretical values(solid line)

저주파수 영역에 대해서는 5 cm로, 고주파수 영역에 대해서는 2 cm로 설정하여 측정하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 체적밀도가  $48 \text{ kg/m}^3$ ,  $40 \text{ kg/m}^3$ 인 유리솜에 대한 표면 임피던스 분석 결과이며, Fig. 7과 Fig. 8은 체적밀도  $100 \text{ kg/m}^3$ ,  $50 \text{ kg/m}^3$ 인 암면에 대한 분석 결과이다. 그럼에서 보는 바와 같이 실험 값이 이론값 곡선을 잘 따라가고 있는데 이것은 무

향실이 아닌 일반 실험실 조건에서도 음원과 시료면과의 거리를 적절히 함으로써 자유 음장법의 적용이 가능함을 보여주는 것으로 Allard와 Champoux<sup>(13)</sup>도 앞서 비슷한 결과를 얻은 바 있다.

한편, 각 시료에 대한 적절한 유동저항 값을 찾은 결과 체적밀도  $40 \text{ kg/m}^3$ 과  $48 \text{ kg/m}^3$ 인 유리솜의 경우 각각  $16,000(\text{mks rayls/m})$ 과  $20,000(\text{mks rayls/m})$ , 체적밀도  $50 \text{ kg/m}^3$ 과  $100 \text{ kg/m}^3$ 인 암면은 각각  $15,000(\text{mks rayls/m})$ 과  $25,000(\text{mks rayls/m})$ 이었다. 이 값들을 보면 같은 종류의 시료에 대해서는 체

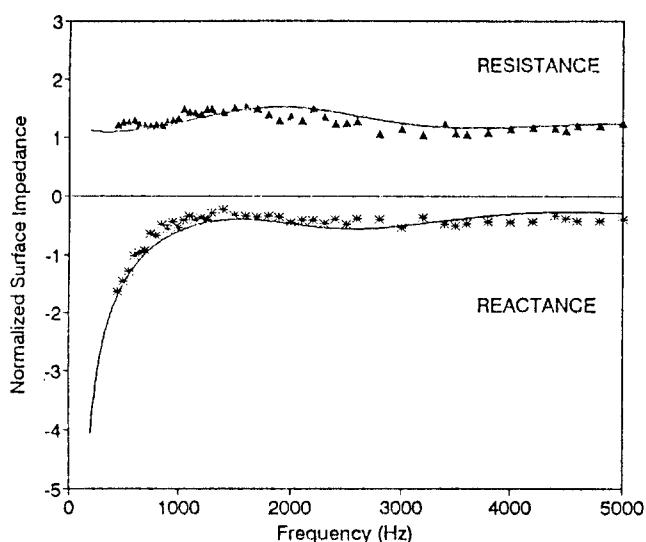


Fig. 7 Normalized surface impedance of the mineral wool (bulk density  $100 \text{ kg/m}^3$ ). Comparison of resistance( $\blacktriangle$ ) and reactance( $*$ ) of the surface impedance and theoretical values(solid line)

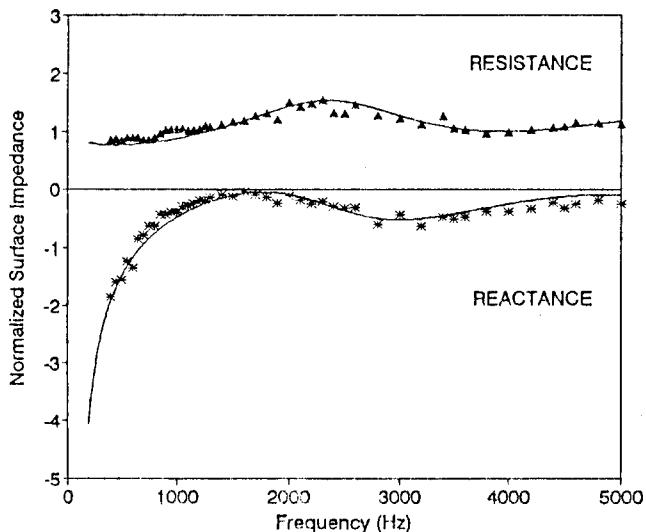


Fig. 8 Normalized surface impedance of the mineral wool (bulk density  $50 \text{ kg/m}^3$ ). Comparison of resistance ( $\blacktriangle$ ) and reactance ( $*$ ) of the surface impedance and theoretical values(soild line)

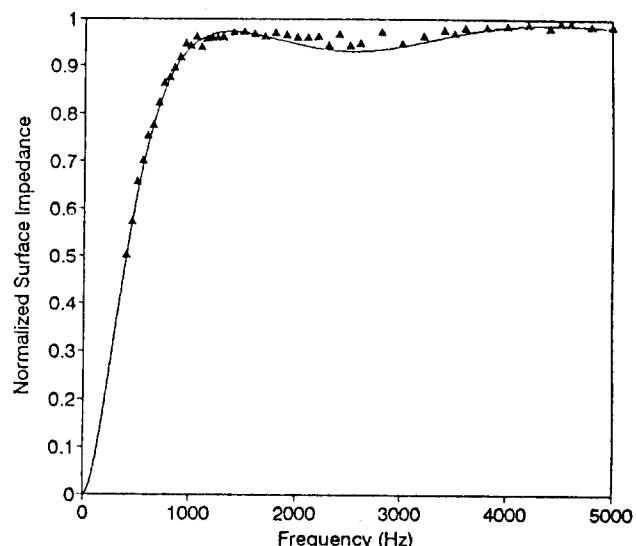


Fig. 9 Absorption coefficient of the glass wool (bulk density  $48 \text{ kg/m}^3$ )

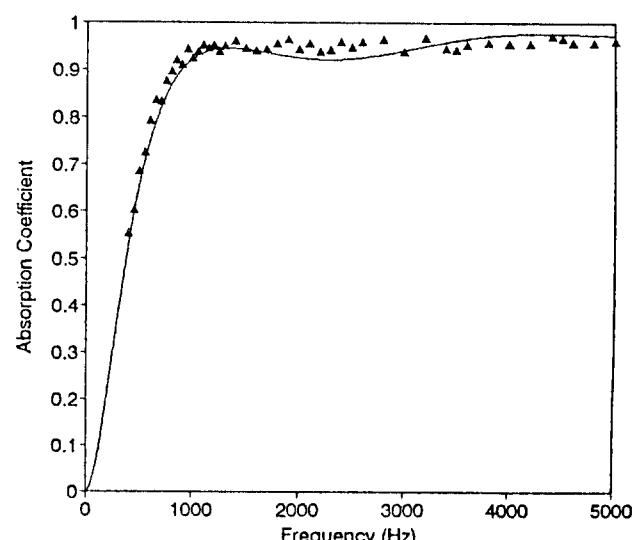


Fig. 10 Absorption coefficient of the mineral wool (bulk density  $100 \text{ kg/m}^3$ )

적 밀도가 증가할수록 유동저항 값이 증가하지만 유리솜과 암면을 비교하면, 체적밀도  $50 \text{ kg/m}^3$ 인 암면의 유동저항은 체적밀도  $40 \text{ kg/m}^3$ 인 유리솜의 유동저항 값보다도 오히려 작은 값을 가지고 있다. 따라서 유동저항은 체적밀도 뿐만 아니라 시료 자체의 특성에도 의존함을 알 수 있다. 시료의 유동저항은 실제로 흡음계수에 결정적인 영향을 미치는 변수로서 저항이 너무 작으면 음이 시료입자들과 별다른 마찰없이 그대로 진행하게 되어 흡음률이 낮게 되며 반대로 저항이 너무 커도 시료 표면에서 음이 대부분 반사되어 시료내로 들어가지 못하게 되므로 역시 흡음률이 낮게 된다.

체적밀도  $48 \text{ kg/m}^3$ 인 유리솜과 체적밀도  $100 \text{ kg/m}^3$ 인 암면에 대한 흡음계수를 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었는데 두 시료 모두  $800\text{Hz}$  이상에서는 흡음계수가 0.9 이상의 높은 흡음률을 보이고 있다. 이것은 두 시료 모두 기공도(porosity)가 0.95 이상이면서 내부가 잘 열려진 구조를 하고 있어서 흡음재 내로 들어간 음이 사방으로 잘 진행할 수 있으며, 진행시 시료를 구성하는 원통형 모양의 입자들과의 마찰로 인한 열에너지로의 손실 그리고 내부구조물들의 진동 및 굽힘 등으로의 에너지 교환으로 인해 음 에너지의 손실이 크게 발생함으로써 높은 흡음률을 나타내는 것이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 비무향실에서 두 개의 마이크로폰을 사용한 전달함수 방법을 이용하여 자유음장법에 따라 시료의 표면 임피던스와 흡음계수에 대한 분석을 하였다. 유리솜과 암면에 대한 측정 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 비교적 큰 비무향실에서는 음원과 시료와의 거리를 가깝게 함으로써 충분히 자유 음장법의 적용이 가능함을 확인할 수 있었다. 따라서 경제적으로 무향실을 설치하기 힘든 경우 일반 실험에서도 자유음장법에 따라 실험할 수 있을 것으로 기대된다. 본 실험에서는 음원과 시료와의 거리를  $30\sim40\text{ cm}$  정도로 유지하여 안정된 결과를 얻었다.

(2) 두 마이크로폰 사이의 간격은 주파수 구간  $400\sim1,300\text{ Hz}$ 에서는  $5\text{ cm}$ ,  $1,300\text{ Hz}$  이상에서는  $2\text{ cm}$  이하로 설정하여 측정한 후 두 측정결과로부터 시료의 표면 임피던스 측정값을 상호 보완하였다.

(3) 유리솜과 암면이 높은 흡음계수를 가지는 것을 확인하였고, 같은 종류의 시료에 대해서는 체적

밀도가 증가할수록 유동저항 값도 증가하였으나 다른 종류인 경우는 체적밀도 뿐만 아니라 시료를 구성하는 입자들의 고유 특성에도 의존하는 것으로 사료된다.

(4) Delany와 Bazley의 실험식을 개선한 Miki의 모델로 측정값을 잘 기술할 수 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Zwikker, C. and Kosten, C. W., 1949, Sound Absorbing Materials, Elsevier, New York.
- (2) Biot, M. A., 1958, "Theory of Propagation of Elastic Wave in a Fluid Saturated Porous Solid," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, pp. 169~178.
- (3) Lambert, R. F., 1982, "Propagation of Sound in Highly Porous Open-Cell Foams," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 73, pp. 1131~1138.
- (4) Allard, J. F., Aknine, A. and Depollier, C., 1986, "Acoustical Properties of Partially Reticulated Foams with High and Medium Flow Resistance," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 79, pp. 1734~1740.
- (5) Delany, M.E. and Bazley, E. N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials," Applied Acoustics, Vol. 3, pp. 105~116.
- (6) Miki, Y., 1990, "Acoustical Properties of Porous Materials-Modifications of Delany-Bazley Models-," J. Acoust. Soc. Jpn(E), Vol. 11, pp. 19~24.
- (7) Allard, J. F. and Champoux, Y., 1992, "New Empirical Equations for Sound Propagation in Rigid Frame Fibrous Materials," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 91, pp. 3346~3353.
- (8) ASTM C 384-90a, 1990, "Standard Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method" (American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1990).
- (9) Seybert, A. F. and Ross, D. F., 1977, "Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-Microphone Random-Excitation Technique," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 61, pp. 1362~1370.
- (10) Chung, J. Y. and Blaser, D. A., 1980, "Transfer Function Method of Measuring in-duct Acoustic Properties. I. Theory," J. Acoust. Soc. Am., Vol.

- 68, pp. 907~913.
- (11) Davies, J. C. and Mulholland, K. A., 1979, "An Impulse Method of Measuring Normal Impedance at Oblique Incidence," *J. Sound Vib.*, Vol. 67, pp. 135~149.
- (12) Allard, J. F. and Sieben B., 1985, "Measurements of Acoustic Impedance in a Free Field with Two Microphones and a Spectrum Analyzer," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 77, pp. 1617~1618.
- (13) Allard, J. F. and Champoux, Y., 1989, "In Situ Two-Microphone Technique for the Measurement of the Acoustic Surface Impedance of Materials," *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 32, pp. 15~23.
- (14) Yaniv, S. L., 1973, "Impedance Tube Measurement of Propagation Constant and Characteristic Impedance of Porous Acoustical Material," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 54, pp. 1138~1142.
- (15) Chu, W. T., 1986, "Transfer Function Technique for Impedance and Absorption Measurements in an Impedance Tube Using a Single Microphone," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 80, pp. 555~560.