

<논 문>

흡음재의 특성임피던스와 전파상수의 새로운 결정방법

A New Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Sound-Absorbing Materials

황 철 호* · 정 성 수* · 은 희 준*

Cheol Ho Hwang, Sung Soo Jung and Hee Joon Eun

(1997년 4월 2일 접수 ; 1997년 9월 20일 심사완료)

Key Word : Characteristic Impedance(특성 임피던스), Propagation Constant(전파상수), Flow Resistivity(유동비저항), Sound Absorption Coefficient(흡음계수)

ABSTRACT

A new method is presented to determine two fundamental acoustic quantities of sound-absorbing materials such as characteristic impedance and propagation constant. In this study, the surface acoustic impedances of sound-absorbing materials are measured using the impedance tube and the anechoic chamber to determine the above acoustic quantities. The measured results are given for two typical sound-absorbing materials(glass wool and urethane foam) in the frequency range between 150 and 1,600 Hz. The results are verified by other two known methods, which are Smith & Parrott method and Utsuno et al. method. The absorption coefficients calculated from the empirical models(Miki model for glass wool and Jung model for urethane foam) and two quantities by present method are in good agreement with the measured values.

1. 서 론

일반적으로 흡음재에 대한 실용적인 음향학적 평가량으로는 흡음계수(absorption coefficient)를 주로 사용하고 있으나, 기본적인 물리량은 흡음재 자체의 특성 임피던스(characteristic impedance)와 전파 상수(propagation constant)이다. 일반적으로 이들 두 양은 흡음재의 종류와 체적 밀도에 따라 다른 값을 가지게 된다. 흡음재의 특성 임피던스와 전파상수의 결정은 편의성과 안정성 차원에서 주로 임피던스관을 이용하여 결정하게 되는데 측정방법에 따라 다음과 같은 몇 가지 대표적인 방법들이 있다.

Scott⁽¹⁾는 임피던스관 내에서 반사음이 없도록 충분히 두꺼운 흡음재를 설치한 후, 검지 마이크로폰을 매질 내에 직접 삽입하고 위치에 따라 음의 감쇠와 위상 변화를 측정함으로써 특성 임피던스와 전파 상수를 구하였다. 그러나 이 방법은 시료가 두꺼워야 하고, 검지 마이크로폰을 시료 속에 설치해야 하므로 불편하다.

Yaniv⁽²⁾는 이러한 단점을 해소하기 위해 흡음재 속에 마이크로폰을 삽입하는 대신, 시료의 표면 임피던스를 측정함으로써 두 값을 구하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 흡음재 바로 뒤에 강체를 두는 경우와 흡음재와 강체 사이에 음 파장의 1/4배 두께인 공기층을 두는 경우에 대한 시료의 표면 임피던스를 각각 측정하여 두 값을 결정한다. 이 방법의 단점은 특정 주파수에 맞게 공기층의 두께를 변화시

* 정회원, 한국표준과학연구원 음향·진동그룹

켜야 한다는 점이다.

Smith와 Parrott⁽³⁾은 Yaniv와는 달리 두께가 다른 두 개의 시료에 대해 강제 앞에 부착한 경우에 대한 표면 임피던스 측정치로부터 두 값을 결정한다. 한편, 최근에 Utsumo등⁽⁴⁾은 시료와 강제 사이의 공기층을 자유로이 변화시키면서 두 양을 결정할 수 있는 새로운 방법을 제시한 바 있다. 이 방법은 Yaniv, Smith와 Parrott의 방법과는 달리 전달함수 방법^(5,6)을 사용하여 광대역의 주파수 분석이 가능하고 실험시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다. 지금까지 살펴본 몇 가지 방법들을 비교할 때 Smith와 Parrott 그리고 Utsumo등의 방법이 상대적으로 다른 방법들보다 손쉽고 안정되게 흡음재의 특성 임피던스와 전파상수를 결정할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 무향실을 이용하여 임피던스관에 설치된 시료에 음을 수직으로 입사하고, 시료 뒤를 자유공간에 노출시켜 음이 방사되는 조건하에서 시료의 표면 임피던스를 측정하여 시료에 수직방향으로 입사되는 음에 의한 시료의 특성 임피던스와 전파상수를 결정하였다. 유리솜(glass wool)과 우레탄 폼(urethane foam) 시료에 대하여 새로운 방법과 기존의 방법들 중 Smith와 Parrott 그리고 Utsumo등의 방법으로 이들 흡음재에 대한 특성임피던스와 전파상수를 측정하고 상호 비교하였다. 그리고 새로운 방법으로 구한 두 양의 측정값들을 유리솜의 경우는 Miki⁽⁷⁾의 이론적 예측식과 우레탄 폼의 경우는 정성수등⁽⁸⁾의 예측식과 비교하였다.

2. 기본이론

흡음재의 음향학적 물리량인 특성 임피던스 Z_c 와 전파상수 γ 를 결정하기 위한 방법들 중 비교적 안정되고 손쉽게 측정할 수 있는 Smith와 Parrott의 방법, Utsumo의 방법 그리고 본 논문에서 제안하는 방법에 대해 살펴보기로 한다.

Smith와 Parrott⁽³⁾의 방법은 Fig. 1(a)와 같이 임피던스관 내에 두께가 d , $d_2(=2d)$ 인 두 개의 시료를 강제 바로 앞에 설치하여 각각에 대한 시료 표면에서의 임피던스를 측정하는데 각 경우에 대한 표면 임피던스는 다음 식과 같다.

$$Z_d = Z_c \coth(\gamma d) \quad (1)$$

$$Z_{d_2} = Z_c \coth(\gamma d_2) \quad (2)$$

위의 표면 임피던스 측정치들로부터 시료의 특성 임피던스 Z_c 와 전파상수 γ 를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

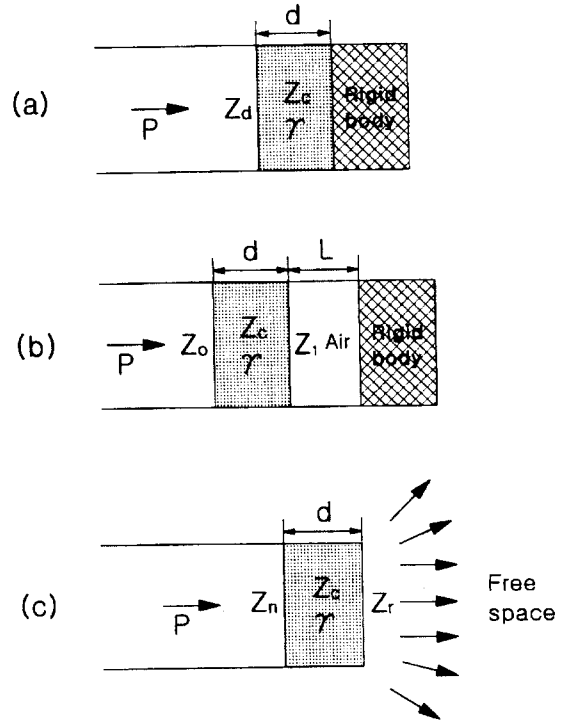


Fig. 1 Measurement configurations to measure the characteristic impedance and propagation constant of the sample in the impedance tube: (a) the sample is terminated in a rigid body; (b) the sample is backed by air space and rigid body; (c) the sample is exposed to an open space.

$$Z_c = [Z_d(2Z_{d_2} - Z_d)]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\gamma = \ln[(1+a)/(1-a)]/(2d) \quad (4)$$

여기서, $a = [(2Z_{d_2} - Z_d)/Z_d]^{1/2}$ 이다.

Utsumo등⁽⁴⁾의 방법에서 시료 바로 뒤에 강체를 두는 경우 시료 표면에서의 임피던스는 식 (1)과 같으며, Fig. 1(b)와 같이 시료와 강제 사이에 두께 L 의 공기층이 있는 경우에 대한 시료의 표면 임피던스 Z_o 는 다음식과 같다.

$$Z_o = Z_c \frac{Z_1 \cosh(\gamma d) + Z_c \sinh(\gamma d)}{Z_1 \sinh(\gamma d) + Z_c \cosh(\gamma d)} \quad (5)$$

여기서, Z_1 은 시료와 강제 사이의 공기층에 대한 임피던스로서 공기의 임피던스 Z_{air} 와 다음의 관계를 만족한다.

$$Z_1 = -jZ_{air} \cot(k_o L) \quad (6)$$

여기서, k_o 는 공기중에서의 음의 파수이다.

Utsuno등의 방법에 의한 특성임피던스와 전파상수는 식 (1)과 (5)로부터 다음 식으로 결정된다.

$$Z_c = [Z_o(Z_d + Z_o) - Z_d Z_o]^{1/2}, \quad (7)$$

$$\gamma = \coth^{-1}(Z_d/dZ_c) \quad (8)$$

한편, 본 연구에서 제시하는 방법의 경우, 시료 뒤에 강체를 설치한 경우의 시료 표면 임피던스는 식 (1)과 동일하며, Fig. 1-(c)에서 보는 바와 같이 무향실내에서 시료 뒤를 자유공간에 노출시킨 경우 노출된 시료 표면에서의 임피던스는 방사 임피던스(radiation impedance) Z_r 과 같게 되므로 임피던스관 내의 시료 표면 임피던스 Z_n 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_n = Z_c \frac{Z_r \cosh(\gamma d) + Z_c \sinh(\gamma d)}{Z_r \sinh(\gamma d) + Z_c \cosh(\gamma d)} \quad (9)$$

여기서, Z_r 은 실험으로 측정하거나 플랜지(flange)가 없는 원통형 관에 대한 Levine과 Schwinger⁽⁹⁾의 이론식을 사용하여 구할 수 있는데, 본 실험에서 사용한 시료는 체적밀도가 낮아 기공률이 1에 가깝기 때문에 원통형 관에 대한 Levine의 이론식의 적용이 가능하므로 여기서는 이론식을 사용하였다.

식 (1)과 (9)로부터 Z_c 와 γ 는 각각 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$Z_c = [Z_n(Z_d + Z_n) - Z_d Z_n]^{1/2} \quad (10)$$

$$\gamma = \coth^{-1}(Z_d/dZ_c) \quad (11)$$

지금까지 Z_c 와 γ 를 결정하기 위한 세가지 실험 방법들을 살펴보았는데, Smith와 Parrott의 방법은 두께가 d 인 시료와 $2d$ 인 시료 두 개를 사용하므로 대부분 한 시료에 대해서 측정하고 다시 그 시료를 반으로 자르거나 같은 두께의 시료를 더 합쳐서 사용하게 되므로 시료가 동일하지 않는데 따른 오차 발생 소지가 있다. 그러나 Utsuno등의 방법이나 본 논문에서 제시한 방법에서는 같은 시료에 대하여 공기층을 두거나 시료 뒤의 강체를 제거하여 측정을 하기 때문에 Smith와 Parrott의 방법보다 더 안정적이라고 할 수 있다.

다음은 이들 두 양의 측정값을 잘 기술할 수 있는 이론적 예측치에 대한 모델을 살펴보겠다. 앞에서 구한 특성 임피던스와 전파상수로부터 유동비저항을 도출해냄으로써 임의의 두께의 흡음재에 대한 임피

던스와 전파상수 및 흡음계수를 예측할 수 있다. 현재 널리 사용되고 있는 대표적인 흡음재로는 유리솜과 암면, 우레탄 폼 등을 들 수 있는데, 유리솜과 암면은 실같은 섬유조직으로 구성되어 있는데 비해, 폼은 매질에 공기를 발포하는 방법으로 만들기 때문에 기본구조가 다르다. 따라서 이들 섬유류와 폼의 음향특성을 기술하는 식도 달라진다. 유리솜과 암면의 Z_c 와 γ 를 기술하는 대표적인 예측식으로는 Delany와 Bazley⁽¹⁰⁾의 식이 있으나, 이 식은 저주파 영역에서 특성 임피던스의 실수부 즉, 저항값이 음의 값이 되는 경우가 생기는 단점이 있다. Miki⁽⁷⁾의 모델은 이러한 단점을 보완한 것으로 정성수등⁽¹¹⁾은 유리솜과 암면에 대한 흡음계수의 측정값이 Miki의 모델로 잘 기술됨을 확인한 바 있다.

Miki⁽⁷⁾의 모델은 Z_c 와 γ 를 다음 식과 같이 주파수 f 와 유동비저항 σ 값의 지수식으로 표현한다. 즉,

$$Z_c/Z_{air} = 1 + 0.079 \xi^{-0.632} - j0.12 \xi^{-0.632} \quad (12)$$

$$\gamma/k_o = 0.18 \xi^{-0.618} + j[1 + 0.122 \xi^{-0.618}] \quad (13)$$

여기서, $\xi = f\rho_o/\sigma$ 이고 ρ_o 는 공기의 밀도이다.

폼의 경우도 Miki의 모델과 비슷한 지수식으로 기술되는데 최근에 정성수등⁽⁸⁾은 유동비저항이 비교적 중간 크기(15,000 mks rayl/m) 이하의 값을 가지며, 내부 구조간 막이 거의 없이 잘 열려진 구조를 가진 폼에 대해 특성임피던스 Z_{uc} 와 전파상수 γ_u 를 다음 식과 같이 제시하였다.

$$Z_{uc}/Z_{air} = 1 + 0.12 \xi^{-0.618} - j0.0993 \xi^{-0.635} \quad (14)$$

$$\gamma_u/k_o = 0.161 \xi^{-0.614} + j[1 + 0.185 \xi^{-0.478}] \quad (15)$$

상기 실험식은 제시된 여러 실험식들 중에서 본 연구에서 사용한 낮은 체적밀도의 시료에 가장 적합할 것으로 기대되어 선택한 모델에 의한 것이다.

Smith와 Parrott의 방법, Utsuno등의 방법, 그리고 본 연구에서 제시한 방법으로 흡음재의 Z_c 와 γ 를 측정 후, 유리솜과 폼에 Miki와 정성수등의 모델을 각각 적용하여 시료의 유동비저항을 추정해 낼 수 있다. 즉, 각 유동비저항 값에 대해 Miki와 정성수등의 모델로부터 계산한 Z_c 와 γ 의 예측치와 측정치를 비교하여 오차가 가장 적을 때의 유동비저항 값을 시료의 유동비저항값으로 추정할 수가 있

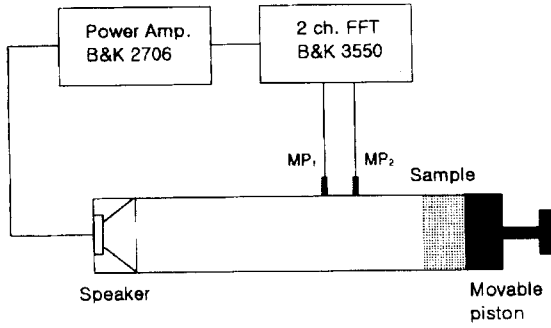


Fig. 2 Experimental setup.

다.

한편, 두께 d 인 시료 바로 뒤에 강체를 두는 경우 시료의 흡음계수 α 는 시료면에서의 임피던스 Z_d 와 다음 관계를 갖는다.

$$\alpha = 1 - |(Z_d - Z_{air}) / (Z_d + Z_{air})|^2 \quad (16)$$

3. 실험 및 결과분석

3.1 실험장치 및 방법

실험은 ASTM E1050-90 표준 방법으로 하였으며 실험장치는 Fig. 2와 같다. Fig. 2와 같이 내경이 10 cm, 길이 65 cm, 두께 3 mm인 스테인레스 스틸로 만든 임피던스관 내부에 최대출력이 95 dB인 확성기를 설치하고 그 반대편에 시료를 설치하였다. 시료는 두께 5 cm, 체적밀도 24 kg/m^3 인 유리솜과 두께 4.4 cm, 체적밀도 4 kg/m^3 인 우레탄 폼으로 하였다.

상호 위상보정된 두 개의 1/4-인치 마이크로폰 (B&K 2633)을 사용하여 시료면에서 5 cm 떨어진 지점에 첫 번째 마이크로폰을, 10 cm 떨어진 곳에 두 번째 마이크로폰을 각각 설치하였다. 신호 발생과 주파수 분석이 가능한 분석기(B&K 3550)를 사용하여 백색잡음(white noise)을 확성기를 통하여 시료에 수직 입사시키고 마이크로폰에서 측정된 음압을 분석하였다. 시료 뒤의 공기층 조절을 위해 조절가능한 스테인레스 스틸 봉을 설치하였다. 시료 뒤의 강체를 제거하고 자유공간에 노출시키는 방법의 경우는 무향실에서 실험하였다.

임피던스관의 내경이 10 cm이므로 관내 평면파의 한계 주파수를 고려하면 1,600 Hz까지는 안정된 실험이 가능하다. 그러나 저주파수에서는 음압의 공간상 변위를 크게 할수록 전달함수 방법에서는 오차를 줄일 수 있으므로 두 마이크로폰간의 간격을

크게 할수록 좋지만⁽¹²⁾, 본 실험에서는 간격을 5 cm로 일정하게 하였기 때문에 100 Hz 이하에서는 신뢰성을 보장할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성이 보장되는 주파수 구간인 150~1,600 Hz에 대해 실험을 하였다. 상호 잘 보정된 마이크로폰들이지만 계측기와 연계된 음압과 위상의 보정은 두 마이크로폰간의 위치 교환방법(sensor switching method)⁽⁶⁾으로 하였으며 측정오차를 줄이기 위하여 출력 스펙트럼을 100회 평균하였다. 측정된 신호의 스펙트럼은 Chung과 Blaser의 전달함수 방법을 이용하여 시료 표면에서의 특성 임피던스를 구하였다. 앞에서 언급한 대로 Smith와 Parrott의 방법은 두께가 다른 두 개의 시료를 사용하기 때문에 오차가 발생할 수 있으므로 이를 최소화하기 위해 유리솜과 우레탄 폼 시료를 여러 개 준비하고, 이들 중에서 흡음계수 측정값이 가장 비슷한 시료 두 개를 선택하여 측정하였다.

3.2 실험결과 및 분석

본 실험에서는 백색잡음을 사용하였으나 세가지 방법에 의한 실험 결과가 고주파수 영역에서 서로 겹치게 되어 구별하기 어려우므로 편의상 측정결과를 50 Hz 마다 기호로 표시하였다. Smith와 Parrott의 방법(\square), Utsuno등의 방법(\triangle), 그리고 본 연구에서 제안한 방법(\circ)으로 구한 유리솜과 우레탄 폼의 특성임피던스와 전파상수를 Fig. 3과 4에 나타내었다. Smith와 Parrott의 방법에서는 두께 5 cm인 시료와 이와 흡음특성이 거의 같은 두께 5 cm의 다른 시료 두 개를 합쳐서 두께를 두배로 하였기 때문에 시료에 의한 오차는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. Utsuno등의 방법에서는 역시 두께 5 cm인 시료를 사용하여 시료 뒤에 바로 강체를 두는 경우와 5 cm의 공기층을 두는 경우에 대해 각각 시료의 표면 임피던스를 측정하였다. 제안한 방법에서 사용한 무향실은 크기가 $4.5 \times 4.5 \times 7 \text{ m}$ 이며, 한계 주파수가 70 Hz 이하이므로 본 실험에서 대상으로 하고 있는 주파수 범위에는 영향을 주지 않는다.

Fig. 3과 4의 결과에서 알 수 있듯이 유리솜과 우레탄 폼 모두 300 Hz 이하를 제외하고는 세 가지 방법에 의한 결과가 모두 잘 일치하는데 이것은 본 연구에서 제안한 방법으로 시료의 특성임피던스와 전파상수를 안정되게 구할 수 있음을 확인해 주는 것이다. 한편, 시료 내에서의 음의 전파는 $\exp(-\gamma x)$ 형태가 되어 음의 흡수는 γ 의 실수부에 의존하게 된다. Fig. 3과 4의 전파상수의 실수부

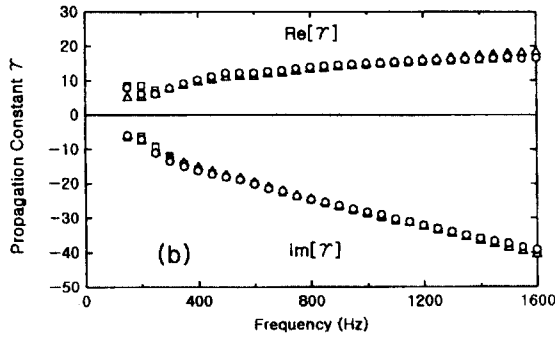
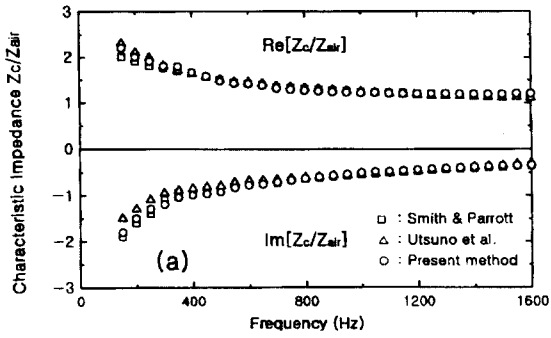


Fig. 3 (a) Comparison between characteristic impedances normalized by air obtained by the three methods of this study for a 5-cm-thick glass wool (volume density: 24 kg/m^3) ; (b) Comparison between propagation constants obtained by the three methods of this study for a 5-cm-thick glass wool (volume density: 24 kg/m^3): \square , Smith & Parrott method; \triangle , Utsuno et al. method; \circ , present method.

($Re(\gamma)$)를 비교해보면 유리솜이 우레탄 폼보다 더 큰 값을 가지며, 단위 거리에 대한 음 에너지의 흡수가 더 크므로 유리솜의 흡음력이 우레탄 폼보다 더 좋을 수 있다.

새로 제안한 방법에 의한 유리솜(\bullet)과 우레탄 폼(\circ)의 특성임피던스와 전파상수 측정값에 대해 식 (12)와 (13), 식 (14)와 (15)로부터 계산한 유리솜(실선)과 우레탄 폼(점선)의 이론값이 가장 근접할 때를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 유리솜과 우레탄 폼의 이론값은 유동비저항이 각각 $13,000 \text{ mks rayl/m}$ 와 $1,250 \text{ mks rayl/m}$ 일 때이다. 따라서 본 실험에 사용된 유리솜과 우레탄 폼의 유동비저항을 $13,000$ 과 $1,250 \text{ mks rayl/m}$ 로 추정할 수 있다. 이러한 추정의 타당성은 이미 Woodcock과 Hodgson⁽¹³⁾이 암면에 대하여 직접

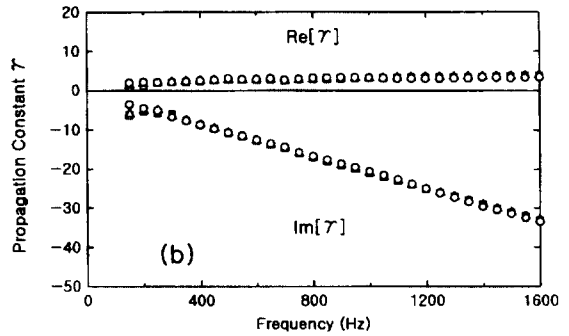
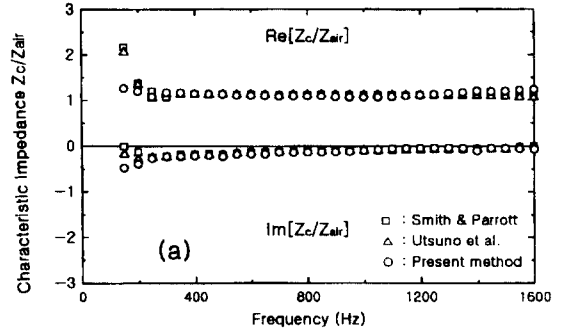


Fig. 4 (a) Comparison between characteristic impedances normalized by air obtained by the three methods of this study for a 4.4-cm-thick urethane foam (volume density: 4 kg/m^3) ; (b) Comparison between propagation constants obtained by the three methods of this study for a 4.4-cm-thick urethane foam (volume density : 4 kg/m^3): \square , Smith & Parrott method; \triangle , Utsuno et al. method; \circ , present method.

측정한 유동비저항 값과 Delany와 Bazley의 이론 모델로부터 구한 추정치를 비교한 결과 서로 잘 일치함을 확인한 바 있다.

다음은 앞서의 유리솜과 우레탄 폼에 대한 특성임피던스와 전파상수 측정값과 Miki와 정성수등의 모델에서 구한 예측치와의 비교로부터 추정한 유동비저항 값을 흡음계수 예측에 응용하였다. Fig. 6에 두께가 5 cm와 10 cm인 두 개의 유리솜 시료 바로 뒤에 강체가 있는 경우에 대해 흡음계수 측정치(\circ , 두께 5 cm; \bullet , 두께 10 cm)와 유동비저항을 $13,000 \text{ mks rayl/m}$ 로 하여 Miki 모델로부터 구한 흡음계수 예측치(실선)를 비교하였다. 그림에서 두 값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 흡음재의 두께가 증가함에 따라 저주파수 영역의 흡음이 크게 향상됨을 알 수 있다.

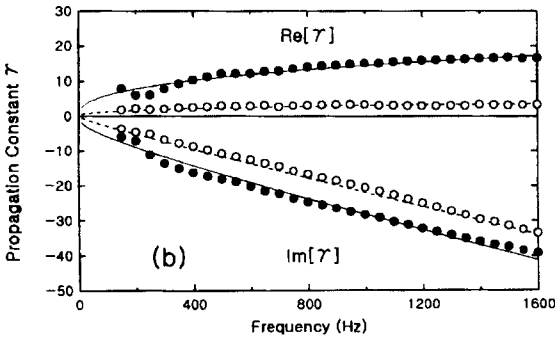
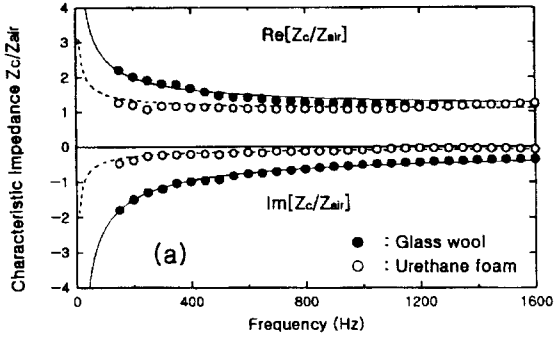


Fig. 5 Comparison between measured and calculated sound absorption coefficients for glass wool and urethane foam. Miki and Jung model is used in calculation of glass wool with flow resistivity of 13,000 mks rayl/m and urethane foam with flow resistivity of 1,250 mks rayl/m, respectively: ●, measured value of glass wool; —, calculated value of glass wool; ○, measured value of urethane foam; - - -, calculated value of urethane foam; (a) characteristic impedance; (b) propagation constant.

두께 4.4 cm인 우레탄 폼을 강제 바로 앞에 두는 경우와 5 cm의 공기층을 강제와의 사이에 두는 경우에 대해 각각 흡음계수 측정치(○, 공기층이 없는 경우; ●, 5 cm의 공기층이 있는 경우)와 유동비저항을 1,250 mks rayl/m로 하여 계산한 이론적 예측치(실선)를 Fig. 7에 비교하였다. 이 그림에서 두 값이 잘 일치하며, 공기층을 이용하면 저주파수 영역에서의 흡음을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7의 결과로부터 새로 제안한 방법으로 측정된 특성 임피던스와 전파상수로부터 추정된 유동비저항 값이 적절하며, 유리솜과 우레탄 폼에 대한 Miki와 정성수 모델의 타당성을 확인할 수 있다.

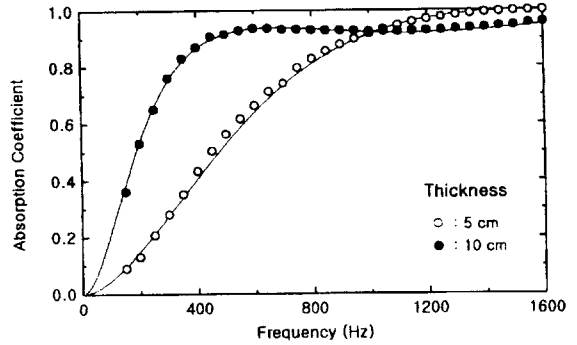


Fig. 6 Comparison between measured and calculated(—) sound absorption coefficient for 5-cm-thick(○) and 10-cm-thick(●) glass wool samples backed by a rigid body. The calculated values are estimated by Miki model with flow resistivity of 13,000 mks rayl/m.

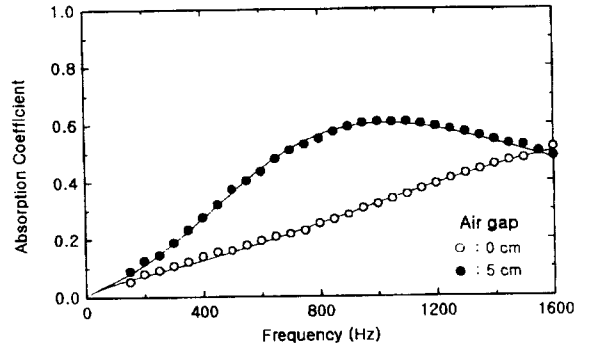


Fig. 7 Comparison between measured and calculated(—) sound absorption coefficient for 4.4-cm-thick urethane foam: ○, measured value for the sample backed by a 5-cm-thick air space; ●, measured value for the sample without air space. The calculated values are estimated by Jung model with flow resistivity of 1,250 mks rayl/m.

4. 결론

본 연구에서는 흡음재인 유리솜과 우레탄 폼에 대해 음향학적 기본 특성치인 특성 임피던스와 전파상수를 구할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 이것은 임피던스관내에서 시료 바로 뒤에 강체를 붙인 경우와 시료 뒤를 자유공간에 노출시킨 두 경우에 대한 표면 임피던스 측정으로부터 시료의 특성 임피

던스와 전파상수를 구하는 방법이다. 제안한 방법으로 얻은 측정치를 Smith와 Parrott의 방법과 Utsuno등의 방법으로 구한 측정치와 비교한 결과 서로 잘 일치하였으며, 제안한 방법이 안정되고 효과적인 방법임을 확인하였다.

유리솜과 우레탄 폼에 대해 제안한 방법으로 구한 특성 임피던스와 전파상수의 측정값들을 Miki 모델과 정성수 모델에 의한 이론 예측치와 비교함으로써 각 시료의 유동비저항 값을 13,000과 1,250 mks rayl/m로 추정하였으며, 이 값들을 이용하여 다른 두께의 시료들과 시료 뒤에 공기층을 둔 경우에 대해 흡음계수를 예측하고 측정치와 비교한 결과 서로 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법의 타당성과 함께 유리솜과 우레탄에 대한 Miki 모델과 정성수 모델의 유효함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Scott, R. A., 1946, "The Absorption of Sound in a Homogeneous Porous Medium," Proc. Phys. Soc. London, Vol. 58, pp. 165~183.
- (2) Yaniv, S. L., 1973, "Impedance Tube Measurement of the Propagation Constant and Characteristic Impedance of Porous Materials," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 54, pp. 1138~1142.
- (3) Smith, C. D. and Parrott, T. L., 1983, "Comparison of Three Method for Measuring Acoustic Properties of Bulk Materials," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 74, pp. 1577~1582.
- (4) Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T., and Seybert, A. F., 1989, "Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 86, pp. 637~643.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Miki, Y., 1990, "Acoustical Properties of Porous Materials -Modification of Delany-Bazley Model," J. Acoust. Soc. Jpn.(E), Vol. 11, pp. 19~22.
- (8) 정성수, 황철호, 1996, "플라스틱 폼의 음향특성 조사," 한국소음진동공학회지, 제 6 권, 제 3 호, pp. 333~340.
- (9) Levine, H. and Schwinger, J., 1948, "On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe," Physics Review, Vol. 73, pp. 383~406.
- (10) Delany, M. E. and Bazley, E. N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials," Appl. Acoust., Vol. 3, pp. 105~116.
- (11) 정성수, 서상준, 김민곤, 1996, "임피던스관을 사용한 두 마이크로폰 방식 흡음재의 음향특성 측정," 응용물리, 제 9권, 제 5호, pp. 623~629.
- (12) 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.
- (13) Woodcock, R. and Hodgson, M., 1992, "Acoustic Method for Determining the Effective Flow Resistivity of Fibrous Materials," J. Sound Vib., Vol. 153, pp. 186~191.