

차음재의 음향투과손실 측정에 Two-Microphone Impedance Tube Method의 적용과 한계

The Limit and Application of Two-microphone Impedance Tube Method to the Sound Transmission Loss Measurement of Sound Isolation Materials

이 승* · 안민홍** · 이동훈†***

Seung Lee, Min-Hong Ahn, and Dong-Hoon Lee,

Key Words : Impedance Tube Method(임피던스관법), Mass Law(질량법칙), Surface Density(면밀도), Sound Transmission Loss(음향투과손실), Sound Transfer Function(음향전달함수)

ABSTRACT

This study describes the limit and application of the two-microphone impedance tube method to the sound transmission loss measurement of several sound isolation materials with different physical properties. For the sound isolation materials having small flexural rigidity, it is shown that the two-microphone impedance tube method is validated to practically measure the sound transmission loss. For the sound isolation materials having large flexural rigidity, on the other hand, it is found that the two-microphone impedance tube method is no longer valid to measure the sound transmission loss because the regions of resonance and mass law are moved into the higher frequencies. In addition, in order to accurately measure the sound transmission loss of sound isolation materials, their size should be decided based on the consideration of the effect of acoustic excitation on their vibration response.

1. 서론

차음재의 성능척도는 투과음에 대한 입사음의 강도비에 대수를 취한 음향투과손실로 표현하며, 성능평가에는 전통적으로 잔향실법을 주로 이용하고 있다. 그러나 개발중인 차음재를 일일이 잔향실에서 음향투과손실을 측정한다는 것은 많은 시간과 비용이 드는 문제점이 있다. 또한 잔향실을 이용하여 시험할 경우에는 국제규격⁽¹⁾으로 정한 크기가 매우 큰 시료가 필요하므로 제품 개발단계에서 성능시험용 시료의 제조에 과도한 비용이 투입될 뿐만 아니라 시료준비에 많은 시간을 허비하는 단점이 있다. 이 때문에 잔향실과 같은 대형의 측정시설을 이용하지 않고도 차음재의 음향투과손실을 정확하면서도 빠르고 간편하게 측정할 수 있는 측

정장치나 측정기법의 개발이 요구되고 있다.⁽²⁾

한편 이와 관련하여 최근에 저자들은 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관만을 이용하여 차음재의 음향투과손실을 빠르고 간편하게 측정할 수 있는 실용적인 측정법을 제안한 바 있다.⁽³⁾ 저자들은 Seybert와 Ross⁽⁴⁾가 제안한 스펙트럼 밀도법을 기반으로 한 음파분리이론을 이용하여 임피던스관에 부착된 두 개의 마이크로폰간의 음향전달함수 측정값으로부터 차음재의 음향투과손실을 구하고 잔향실법으로 측정한 음향투과손실값과의 비교를 통하여 측정결과의 신뢰성을 입증한 바 있다. 그러나 저자들의 선행연구 결과에서는 시험용 차음재의 크기가 측정결과에 어떠한 영향을 미치는지를 체계적으로 조사하고 분석하지는 못하였으며, 측정가능한 차음재의 재료특성에 대해서도 자세히 고찰한 바 없다. 따라서 본 연구에서는 임피던스관에 부착된 차음재의 크기변화가 음향투과손실 측정결과에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고, 아울러 임피던스관법으로 측정가능한 차음재의 재료특성에 대해서도 고찰하고자 한다.

* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

** (주) 해인

*** 서울산업대학교 기계공학과

† E-mail : Ldh@snut.ac.kr

Tel : (02) 970-6331 Fax : (02) 949-1458

2. 이론검토

Fig. 1은 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관의 개략도를 나타낸 것이다. 임피던스관의 출구측에는 시험대상체인 차음재가 부착되어 있으며, 시험시료의 표면으로부터 마이크로폰까지의 거리는 각각 x_1 과 x_2 그리고 s 는 두 마이크로폰간의 간격이다.

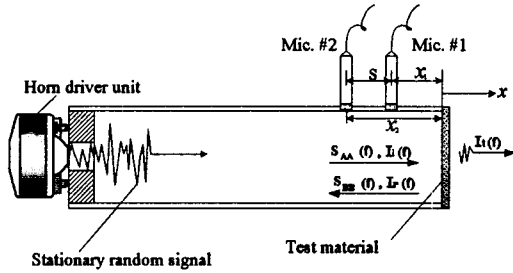


Fig. 1 Schematic of an impedance tube

스피커를 통해 정상불규칙 음향신호가 임피던스관내로 공급될 때 x_1 과 x_2 지점간의 음향전달함수 $H_{12}(f)$ 와 x_1 지점의 자기스펙트럼 밀도함수 $S_{11}(f)$ 를 이용하여 입사음의 음향세기 $I_i(f)$ 와 반사음의 음향세기 $I_r(f)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$I_i(f) = \{S_{11}(f) \cdot [1 + |H_{12}(f)|^2 - 2\text{Re}[H_{12}(f) \cos k(x_1 - x_2)] + 2\text{Im}[H_{12}(f) \sin k(x_1 - x_2)]] / 4\rho c \sin^2 k(x_1 - x_2)\} \quad (1)$$

$$I_r(f) = \{S_{11}(f) \cdot [1 + |H_{12}(f)|^2 - 2\text{Re}[H_{12}(f) \cos k(x_1 - x_2)] - 2\text{Im}[H_{12}(f) \sin k(x_1 - x_2)]] / 4\rho c \sin^2 k(x_1 - x_2)\} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 Im 과 Re 는 전달함수의 허수부와 실수부를 뜻하며, f 는 주파수, $k = 2\pi f/c$ 는 파수(wave number), c 는 음속 그리고 ρc 는 공기의 특성임피던스이다.

또 시험용 차음재가 Fig. 1과 같이 관출구단에 부착되어 있을 때 차음재를 투과하여 외부로 방사된 음이 관내로 다시 입사하지 않는다면 그리고 차음재 자체의 흡음력을 무시할 수 있다면 식 (1)과 식 (2)의 관계로부터 수직입사음에 대한 음향투과손실 $TL_{H_0}(f)$ 를 구할 수 있다.

$$TL_{H_0}(f) = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1 + |H_{12}(f)|^2 - 2\text{Re}[H_{12}(f) \cos ks] + 2\text{Im}[H_{12}(f) \sin ks]}{4\text{Im}[H_{12}(f) \sin ks]} \right\} \quad (3)$$

식 (3)에서 보듯이 차음재의 음향투과손실을 구하는데는 두 지점간의 음향전달함수 $H_{12}(f)$ 만의 측정이 필요하다는 것을 알 수 있다. 한편 질량법칙(mass law)영역에서의 차음재의 음향투과손실은 다음식으로 계산할 수 있다.⁽⁵⁾

$$TL(\theta, f) = 10 \log_{10} \{1 + (\omega m \cos \theta / 2\rho c)^2\} \quad (4)$$

식 (4)에서 ω 는 각주파수, m 는 차음재의 단위면적당 질량(통상 면밀도라 부른다.) 그리고 θ 는 차음재 표면의 법선방향으로부터 접선방향에 이르는 입사음의 입사각도를 나타낸다. 또 통상 차음재로 입사되는 입사음은 입사각도의 제한을 받기 때문에 아래에 제시된 유효입사음 ($\theta = 0^\circ \sim 78^\circ$)에 대한 질량법칙(field-incidence mass law)을 만족하는 음향투과손실 $TL_{field}(f)$ 로 차음성능을 평가한다.⁽⁶⁾

$$TL_{field}(f) \cong 20 \log_{10}(mf) - P \quad (5)$$

식 (5)에서 P 는 식 (4)에 포함된 상수와 협대역의 차음성능을 옥타브 대역으로 변환할 때의 옥타브 보정계수값을 포함하는 파라미터이다. 본 연구에서는 주파수 분석기의 해상도를 16Hz로 하여 분석하였으므로 상수를 포함한 보정계수값 P 를 49dB로 하여 계산하였다. 또 수직입사음에 대한 음향투과손실 $TL_{normal}(f)$ 와 유효입사음에 대한 음향투과손실 $TL_{field}(f)$ 의 관계는 다음과 같다.⁽³⁾

$$TL_{normal}(f) \cong TL_{field}(f) + 5dB \quad (6)$$

또한 원형 임피던스관으로 입사된 음파가 관내에 부착된 차음재의 고유주파수와 일치하게 되면 차음재에 공진이 발생하여 성능결과에 반영되며, 이때 공진주파수 f_r 는 다음식으로 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$f_r = \frac{B}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Kg}{\gamma h}} \quad (7)$$

$$K = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)에서 a 는 임피던스관의 반지름(m), K 는 차음재의 유연강성도($kg \cdot m$), γ 는 비중량

(kg/m^3), h 는 두께(m), g 는 중력가속도(m/s^2) 그리고 B 는 공진모드의 계수값을 뜻한다. 공진모드가 1차이고 고정지지 조건일때의 계수 B 는 10.21이다. 또 $E(\text{Pa})$ 와 ν 는 차음재의 탄성계수와 프와송비를 뜻한다.

3. 실험

Fig. 2는 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관의 개략도를 나타낸 것으로서 측정기기의 구성도를 결과에 함께 나타내었다.

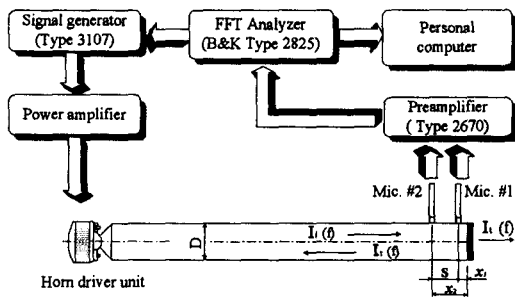


Fig. 2 Experimental setup for sound transmission loss measurement of sound isolation materials

임피던스관의 내경 D 는 30mm, 50mm 그리고 78mm이며, 길이는 1000mm 그리고 두께는 10mm이다. 시험용 차음재는 음누출이 되지 않도록 접착제를 이용하여 관출구에 부착시켰다. 음향전달함수는 1/4인치 압력형 마이크로폰 두개를 이용하여 측정하였다. Table 1은 본 연구에 쓰인 차음재의 재료시험 결과와 재원을 나타낸 것이다. 차음재는 연질 차음재 4종류와 경질 차음판 3종류이다.

Table 1 Specifications of test materials used for this study

시료명	밀도 (kg/m^3)	두께 (mm)	탄성계수 (GPa)	프와송비	음향투과율 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
Polyvinyl sheet A	2.4	1.3	0.1	0.22	0.002
Polyvinyl sheet B	2.3	1.3			
Rubber sheet	3.7	2.0			
Acrylic sheet	3.4	2.7			
Acryl plate	2.3	2.0	1.7	0.40	0.140
Aluminum plate	1.1	0.4	64.6	0.30	0.040
Wood plate	2.2	2.0	0.5	0.47	0.040

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 임피던스관의 지름(즉 차음재의 크기)을 30mm, 50mm 그리고 78mm로 변화시키면서 Polyvinyl sheet A의 음향투과손실을 측정한 결과이다.

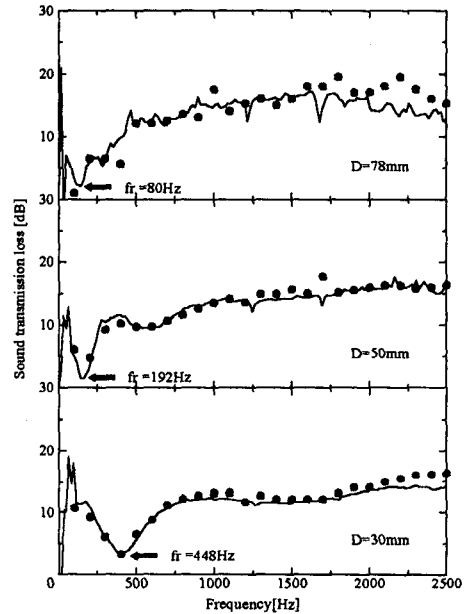


Fig. 3 Effect of the impedance tube diameter on the measured narrow band sound transmission loss

참고로 원형심볼 ●는 정재파법으로 측정된 음향투과손실값을 나타낸다. 제시된 측정결과에서 관의 내경이 작을수록, 즉 시험용 차음재의 크기가 작을수록 공진주파수대역은 점차 고주파수쪽으로 이동하여 가는 것을 볼 수 있다. 먼저 측정결과에서 관지름에 따른 공진주파수 f_r 을 조사해 보면 관의 내경이 78mm인 경우는 80Hz, 50mm인 경우는 192Hz 그리고 30mm인 경우는 448Hz로 공진주파수가 변화되었다. 즉 관지름 D 가 커질수록 공진주파수 f_r 은 감소하는 것을 알 수 있다. 공진주파수의 측정결과를 식 (7)을 이용하여 계산으로 구한 공진주파수 71Hz, 174Hz 그리고 480Hz와 대응하여 비교해 보면 두 결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다. 한편 차음재의 크기에 따라 음향투과손실값이 차이를 갖는 것은 임피던스관으로 입

사된 음파가 공기진동-차음재 진동-공기진동과 같은 에너지 전달과정을 통하여 차음재를 투과하는 것임을 고려해 볼 때 차음재의 진동응답특성이 시료크기의 영향을 받는 것으로 사료된다.

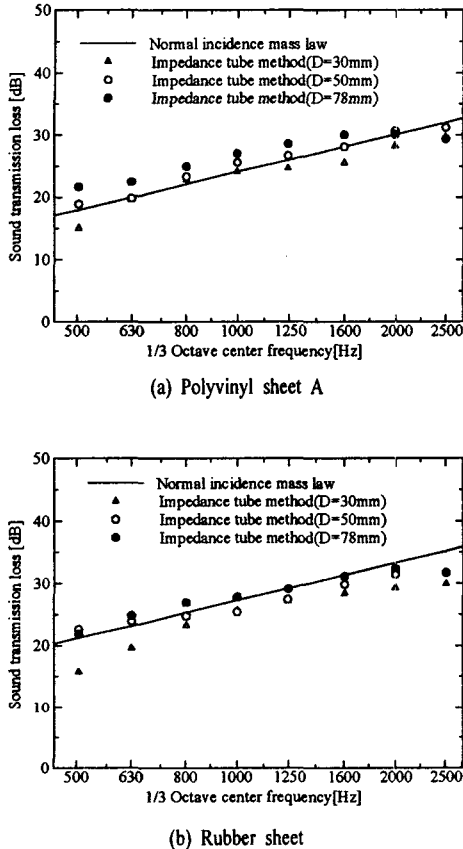


Fig. 4 Effect of the impedance tube diameter on the measured 1/3 octave band sound transmission loss

Fig. 4는 관지름을 변화시키면서 협대역주파수에서 측정된 음향투과손실값을 1/3옥타브대역 중심주파수로 변환한 것이다. 먼저 그림 (a)에 도시된 Polyvinyl sheet A에 대한 결과를 보면 지름 50mm인 임피던스관에서 구한 음향투과손실값이 계산결과와 가장 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 한편 그림 (b)에 도시된 Rubber sheet에 대한 결과에서는 지름 30mm인 임피던스관에서 구한 음향투과손실값이 계산결과와 가장 큰 차이를 나타내는 반면에, 관지름 50mm와 78mm인 임피던스관에서 구한 음향투과손실값은 계산결과값과 비교적 잘 일치하는 경향을 보인다. 특히 그림 (a)와 그림 (b)의

결과에서 관지름 30mm인 임피던스관을 이용하여 측정된 음향투과손실값이 관지름 50mm와 78mm인 임피던스관에서 측정된 결과값보다 작은 것은 Fig. 3의 토의에서도 언급한 바 있듯이 시험용 차음재의 크기감소에 따른 차음재의 진동응답이 원할치 못한데서 비롯된 하나의 실험오차로 간주할 수 있다. 따라서 이상의 결과를 종합해 볼 때 임피던스관법을 이용하여 차음재의 차음성능을 측정하기 위해서는 음파가진에 의한 시료의 진동응답성을 고려하여 대상시료의 최소크기를 결정하는 것이 대단히 중요하다는 것을 알 수 있다.

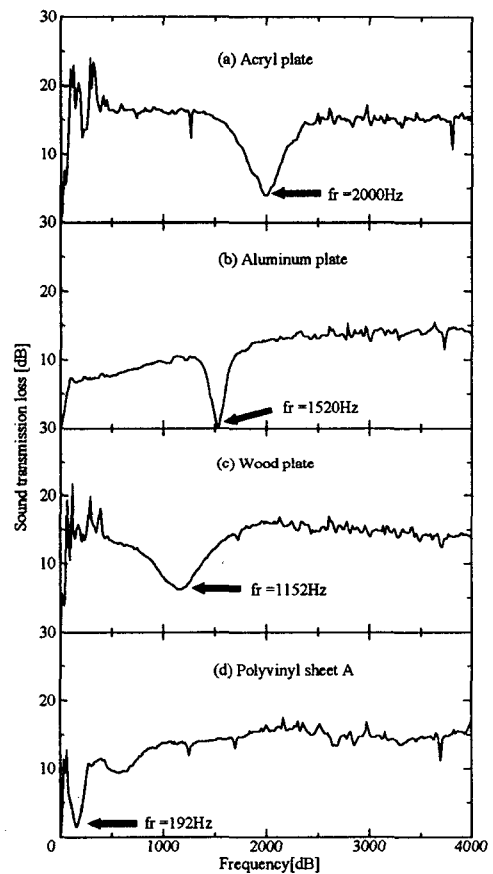
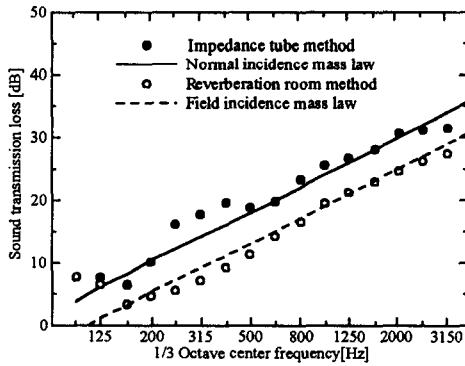


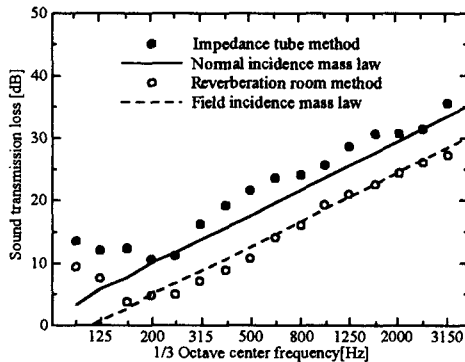
Fig. 5 Effect of the flexural rigidity of sound isolation materials on the measured narrow band sound transmission loss

Fig. 5는 유연강성도가 각기 다른 차음재에 대한 음향투과손실을 본 연구의 임피던스관법으로 측정된 결과이다. 도시된 측정결과에서 음향투과손실값이 급격히 감소하는 주파수대역은 공진영역을 의

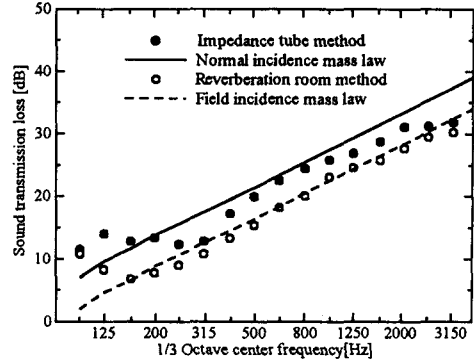
미하며, 공진영역에서의 공진주파수는 측정결과에 도시되어 있듯이 Acryl판의 경우는 2000Hz, 알루미늄판은 1520Hz, 나무판은 1152Hz, Polyvinyl sheet A는 192Hz이다. 또 Table 2에 도시된 물성값을 식 (7)에 대입하여 공진주파수를 계산하면 Acryl판의 경우는 2016 Hz, 알루미늄판은 1527Hz, 나무판은 1114Hz, Polyvinyl sheet A는 174Hz가 된다. 두 결과값을 비교해 볼 때 측정한 공진주파수와 계산으로 구한 공진주파수는 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 한편 Table 1에 도시된 각 차음재의 유연강성도(flexural rigidity)나 탄성계수와 같은 기계강도값이 커지게 되면 Fig. 5에서 보듯이 공진주파수는 증가하게 된다. 이렇게 되면 차음재의 주된 성능척도를 나타내는 질량법칙을 만족하는 주파수범위가 감소하게 되어 본 연구의 측정법으로는 만족스런 측정결과를 얻을 수 없게 된다. 따라서 본 연구의 임피던스관법은 유연강성도나 탄성계수값이 매우 작은 연질 차음재에만 적용된다는 것을 알 수 있다.



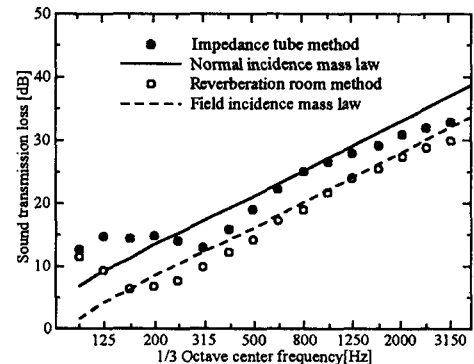
(a) Polyvinyl sheet A



(b) Polyvinyl sheet B



(c) Rubber sheet



(d) Asphalt sheet

Fig. 6 Sound transmission losses for sound isolation sheets having small flexural rigidity

Fig. 6에 도시된 결과는 연질 차음재 4종류에 대하여 음향투과손실을 측정하고 계산한 결과를 1/3 옥타브대역 중심주파수로 나타낸 것이다. 도시된 모든 결과에서 유효입사음에 대한 음향투과손실의 측정값과 이론계산값만을 비교해 보면 낮은 주파수대역을 제외한 모든 주파수영역에서 두 결과는 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 낮은 주파수대역은 차음재의 공진영역에 해당하는 것으로서 식 (5)와 식 (6)에 의한 이론계산값은 질량법칙을 만족하는 주파수대역에서만 유효하다는 것에 유의할 필요가 있다. 한편 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관을 이용하여 수직입사음에 대한 음향투과손실의 측정값과 이론계산값을 서로 비교해 보면 전반적으로 두 결과는 잘 일치하지만, 차음재의 종류에 따라 다소간의 차이를 나타낸다. 즉 Fig. 6의 그림 (a)와 (b)에 도시된 Polyvinyl sheet A, B에 대한 결과에서는 측정값이 이론계산값보다 다

소 더 높게 평가되는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 (c)와 (d)에 도시된 Rubber sheet와 Asphalt sheet의 결과에서는 오히려 측정값이 계산값보다 작다. 이러한 차이는 시험시료의 기계강도값의 차이에 따른 진동응답특성의 변화가 결과에 반영되었기 때문이다. 즉 유연강성도가 작은 차음재의 경우는 시료에 가해지는 음에너지에 대한 시료의 진동응답특성이 양호하기 때문에 비교적 정확한 측정결과를 얻을 수 있는 반면에, 유연강성도가 큰 경우에는 음파가진에 대한 시료의 진동응답특성 부족이 측정결과에 반영된 것으로 볼 수 있다.

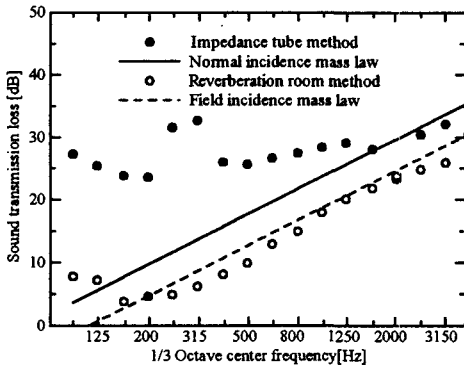


Fig. 7 Sound transmission loss for an acrylic plate having large flexural rigidity

Fig. 7에 도시된 결과는 경질 차음재인 아크릴판에 대하여 음향투과손실을 측정하고 계산한 결과를 1/3옥타브대역 중심주파수로 나타낸 것이다. 제시된 결과에서 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관을 이용하여 수직입사음에 대한 측정값과 이론계산값을 비교해 보면 2000Hz를 기준으로 2000 Hz이하의 주파수대역에서는 큰 차이를 나타내지만, 2000Hz이상의 주파수대역에서는 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 5에 도시된 아크릴판에 대한 협대역주파수 결과에서도 확인하였듯이 2000Hz이하의 공진영역 그리고 2000 Hz이상은 질량법칙을 만족하는 주파수영역에 해당되기 때문이다. 또한 이 결과에서도 Fig. 6에서와 같이 유효입사음에 대한 음향투과손실의 측정값과 계산값은 공진영역을 제외한 모든 주파수대역에서 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관으로

차음재의 음향투과손실을 측정할 때의 측정주파수 범위와 측정결과의 정확성은 차음재의 유연강성도와 차음재의 크기에 의존한다. 즉 차음재의 유연강성도가 커지게 되면 차음재의 공진영역이 고주파수쪽으로 이동하게 된다. 이렇게 되면 차음재의 주된 성능척도를 나타내는 질량법칙을 만족하는 주파수범위가 제한되어 본 연구의 측정법으로는 차음재의 성능을 적절히 평가할 수 없게 된다. 또한 임피던스관에 부착된 차음재의 크기가 너무 작고 (즉 관지름이 작은 임피던스관으로 시험하면) 유연강성도가 큰 경우에는, 음파가진에 의한 시료의 진동응답특성이 좋지 못하여 차음재의 음향투과손실이 실제보다 과소평가될 수 있다. 따라서 임피던스관법을 이용하여 차음재의 차음성능을 측정하기 위해서는 음파가진에 의한 시료의 응답성을 고려하여 시험용 차음재의 최소크기를 선정해야 한다.

참고문헌

- (1) ASTM E90-90, 1990, Standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions, ASTM, Philadelphia.
- (2) Crocker, M.J., et al., 1981, "Measurement of transmission loss of panels by the direct determination of transmitted acoustic intensity", Noise Control Engineering, 17(1), pp.6-11.
- (3) Lee, D.H., Kim, D.W., and Seto, K., 2001, "A Study on Measurement of Sound Transmission Loss for Sound Isolation Sheets by Two-Microphone Impedance Tube Method," The 8th International Congress on Sound and Vibration, 2-6 July, Hong Kong, China, pp.2423-2430.
- (4) Seybert, A.F. and Ross, D.F., 1977, Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique," J. Acoust. Soc. Am., 61(5), pp.1362-1370.
- (5) HECKL, M., 1981, "The Tenth Sir Richard Fairly Memorial Lecture : Sound Transmission in Buildings", J. of Sound and Vibration, 77(2), pp.165-189.
- (6) Jones, R.E., 1979, "Intercomparisons of Laboratory Determinations of Airborne Sound Transmission Loss", J. Acoust. Soc. Am., 66(1), pp.148-164.
- (7) Harris, Cyril M., 1996, Shock and Vibration Handbook (Fourth Edition), Chap.7, McGraw-Hill Book Company.