

다중 다공판 시스템의 흡음성능 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of Acoustic Absorption of Multiple Layer Perforated Panel Systems

이 동훈† · 서성원* · 홍병국** · 송화영**

Dong-Hoon Lee, Seong-Won Seo, Byung-Kuk Hong and Hwa-Young Song

(2005년 3월 2일 접수 : 2005년 4월 21일 심사완료)

Key Words : Absorption Coefficient(흡음계수), Acoustic Impedance(음향임피던스), Perforated Panel System(다공판 시스템), Sound Absorbing Material(흡음재), Transfer Matrix Method(전달행렬법)

ABSTRACT

The acoustic absorption of multiple layer perforated panel systems is largely reduced at the anti-resonance frequency. In order to improve the acoustic absorption at the anti-resonance frequency, the sound absorbing materials are inserted between perforated panels. By the insertion of absorbing materials, it is found that the multiple layer perforated panel system has better acoustic absorption at the anti-resonance frequency and more broadband frequency. Besides, it is shown that the absorption coefficients from the transfer matrix method agree well with the values measured by the two-microphone impedance tube method for various combinations of perforated panels, airspaces or sound absorbing materials.

1. 서 론

다공판 시스템은 일종의 헬름홀츠 공명기로서 연소기에서 연소 불안정성으로 발생하는 강력한 세기의 불연속 스크리치음을 감소시킬 목적으로 단일 다공판에 대하여 연구되기 시작하였다.⁽¹⁾ 그리고 최근에는 웬이나 압축기와 같은 각종 열유체 기기류 및 공조덕트계에서 발생하는 다양한 주파수 대역의 소음을 저감시킬 목적으로 다수개의 공동과 다공판으로 구성된 다중 다공판 시스템에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.⁽²⁻⁵⁾

지금까지 발표된 연구결과에서 다중 다공판 시스템은 공명주파수대역에서 탁월한 흡음성능을 보이는 반면에, 반공명주파수대역에서의 흡음성능 저하가 문제점으로 지적되고 있다.⁽³⁻⁶⁾ 이 때문에 반공명주파수대역에서의 흡음성능 향상을 위한 방법으로 다공판의 수와 다공판 사이의 공기층 깊이를 증가시키거나 공극률이 각기 다른 다공판을 병렬로 배치하는 하는 방안이 제시된 바 있다.^(7,8) 그러나 다공판의 수와 공기층 깊이를 증가시키게 되면 다공판 시스템의 전체 체적이 증가하게 되고, 또 병렬 다공판을 배치하는 방안은 실제의 적용에 어려움이 수반된다.

따라서 이 연구에서는 반공명주파수대역에서의 흡음성능 향상을 목적으로 흡음재가 조합된 다중 다공판 흡음시스템의 흡음성능에 대하여 알아보하고자 한다. 이를 위해 우선 다공판, 흡음재 그리고 공기층이 조합된 다중 다공판 흡음시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델을 수립하고, 이 모델을 통하여 구한 흡음계수와 실험결과와의 비교를 통하여 계산모델의

† 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과
E-mail : ldh@snut.ac.kr

Tel : (02) 970-6331, Fax : (02) 948-1458

* 서울산업대학교 기계공학과

** 정희원, 서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

타당성을 검증하였다. 계산모델로는 소음기의 1차원 성능해석에 쓰여온 전달행렬법을 이용하였다.^(9~11) 또한 이 연구에서 사용된 다공판 임피던스 모델은 Rao와 Munjal의 모델⁽¹²⁾을 수정하여 사용하였고, 흡음재의 임피던스 모델은 Delany & Bazley의 경험식⁽¹³⁾을 사용하였다.

2. 관련이론

일차원 음향계를 구성하는 각 음향요소의 특성은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 전달행렬 요소인 4단자 정수로 표현할 수 있다. Fig. 1과 같이 요소 1부터 요소 n 개로 구성되어 있는 길이 l 인 음향요소 에 대한 4단자 정수는 음향요소의 상류측과 하류측의 음압 p 와 입자속도 u 를 이용하여 다음과 같은 전달행렬 $[T]$ 의 형태로 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_n \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

또 음향요소의 하류단을 무반사단 ($D \equiv 0$)으로 가정하고, $x=0$ 에서 정의된 반사계수 $R=B/A$ 와 투과계수 $T=C/A$ 를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음의 전달행렬요소로 표현된 반사계수 R 을 구할 수 있다.

$$R = \frac{T_{11} + T_{12} - T_{21} - T_{22}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \quad (2)$$

한편 본 연구의 다중 다공판 흡음시스템은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 다공판과 흡음재 그리고 공기층으로 구성된다. 먼저 Fig. 2의 (a)에 도시된 다공판에 대한 전달행렬 $[P]$ 를 구하면 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

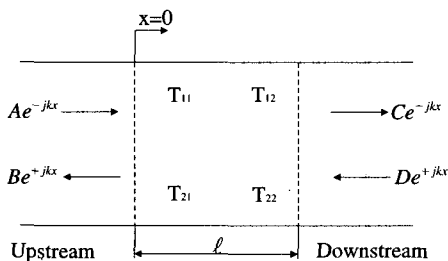


Fig. 1 Four-pole parameters of an acoustic system

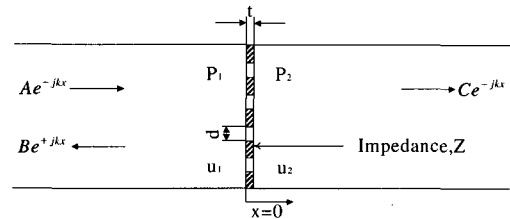
식 (3)에서 Z 는 다공판의 특성임피던스로서 본 연구에서는 Rao와 Munjal이 제안한 임피던스 모델⁽¹²⁾을 다음과 같이 수정하여 사용하였다.^(10,11)

$$Z = (7.337 \times 10^{-3}) / \sigma + j\{2.8919 \times 10^{-5} f(1+51t)(1+204d)\} / \sigma \quad (4)$$

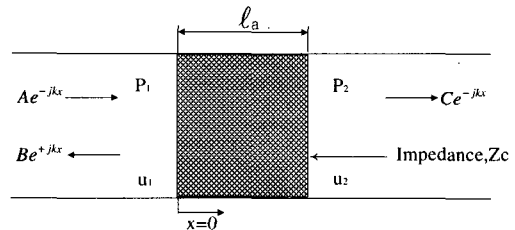
식 (4)에서 σ 는 공극률, f 는 주파수(Hz), t 는 다공판의 두께(m), d 는 구멍지름(m), $j = \sqrt{-1}$ 을 나타낸다. 또한 Fig. 2의 (b)에 도시된 흡음재에 대한 전달행렬 $[A]$ 를 구하면 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \ell_a) & Z_c \sinh(\gamma \ell_a) \\ 1/Z_c \sinh(\gamma \ell_a) & \cosh(\gamma \ell_a) \end{bmatrix} \quad (5)$$

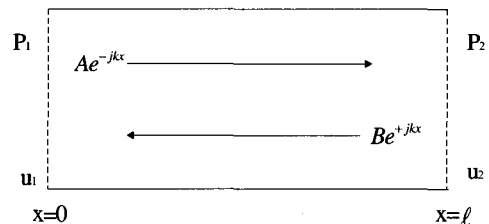
식 (5)에서 γ 는 전파상수, ℓ_a 는 흡음재 두께(m), Z_c 는 흡음재의 특성임피던스로서 이 연구에서는 다



(a) Perforated panel



(b) Sound absorbing material



(c) Airspace

Fig. 2 Sound field representations for perforated panel, sound absorbing material and airspace

음에 제시된 Delany & Bazley의 경험식⁽¹³⁾을 사용하였다.

$$Z_c = 1 + 9.08 \left(\frac{f}{\Omega} \right)^{-0.75} - 11.9j \left(\frac{f}{\Omega} \right)^{-0.73} \quad (6a)$$

$$\gamma = 10.3 \frac{\omega}{c} \left(\frac{f}{\Omega} \right)^{-0.59} + j \frac{\omega}{c} \left[1 + 10.8 \left(\frac{f}{\Omega} \right)^{-0.70} \right] \quad (6b)$$

식 (6)에서 Ω 는 유동저항($\text{g/cm}^3 \text{ sec}$), ω 는 각주파수(rad/s), c 는 음속(m/s)을 나타낸다.

그리고 Fig. 2의 (c)에 도시된 공기층에 대한 전달행렬 [S]는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & (j\rho_0 c) \sin kl \\ (j/\rho_0 c) \sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 ρ_0 는 공기밀도(kg/m^3), k 는 파수(rad/m)를 나타낸다.

이상과 같이 다공판, 흡음재 그리고 공기층으로 구성된 다공판 흡음시스템에 대한 총괄 전달행렬을 식 (2)에 대입하여 흡음시스템의 반사계수 R 을 구한 후, 이것을 식 (8)에 대입하면 수직입사 흡음계수 α_n 을 계산할 수 있다.

$$\alpha_n = 1 - |R|^2 \quad (8)$$

3. 실험

Fig. 3은 흡음재와 다공판 그리고 공기층으로 구성된 가능한 다중 다공판 흡음시스템의 여러 가지 예를 도시한 것이다. Fig. 3의 (a)는 다공판만을 3중으로 구성한 경우로서 판의 간격은 47 mm로 동일하였다. Fig. 3의 (b)는 다공판 앞에 polyester흡음재를 설치한 경우, Fig. 3의 (c)는 이중 다공판 앞에 polyester흡음재를 설치한 경우 그리고 Fig. 4의 (d)는 3중 다공판 시스템의 가운데 부분에 polyester흡음재를 설치한 경우이다. 다공판은 두께 $t=1 \text{ mm}$ 이고, 지름 $d=2 \text{ mm}$ 인 구멍을 공극률 $\sigma_1=7.07\%$, $\sigma_2=5.59\%$, $\sigma_3=3.14\%$ 가 되도록 제작하여 설치하였다. 흡음재는 단면 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 이고, 두께 $\ell_a=47 \text{ mm}$, 유동저항 $\Omega=7.152 \text{ g/cm}^3 \text{ sec}$ 인 polyester흡음재를 사용하였다.

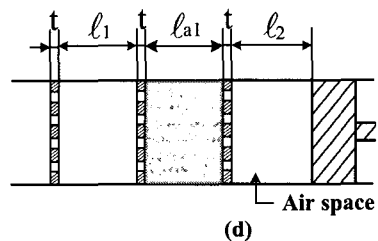
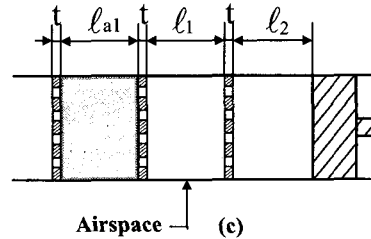
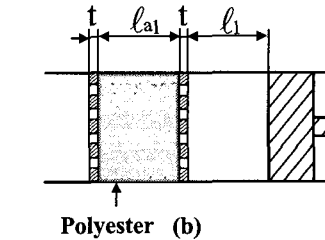
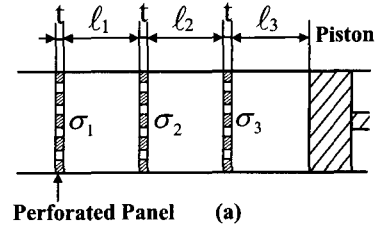


Fig. 3 Arrangements of multiple layer perforated panel systems combined with airspaces and sound absorbing materials, respectively

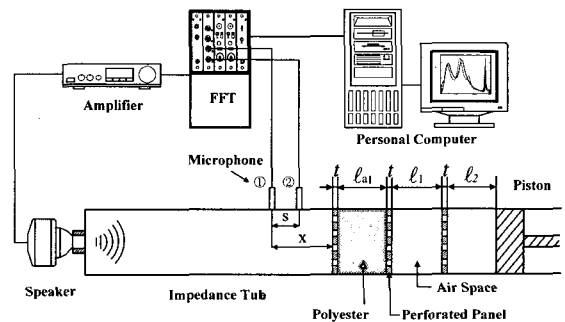


Fig. 4 Schematic of the experimental apparatus for sound absorption coefficient measurement

Fig. 4는 다중 다공판 흡음시스템이 설치된 임피던스관과 측정기기의 구성에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 임피던스관의 단면은 60 mm × 60 mm, 길이 1300 mm이 되도록 두께 10 mm인 아크릴판으로 제작하였다. 관의 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 출구측에는 다공판과 흡음재가 설치되어 있다. 그 뒤에는 음의 누출이 없도록 O-링이 부착된 강제 피스톤을 설치하였다. 주파수 분석기의 분석주파수 범위는 3200 Hz 그리고 해상도는 1Hz로 하였다. 흡음계수는 임피던스관의 두 지점에 설치된 마이크로폰간의 음향전달함수 측정값으로부터 구하였다. 마이크로폰은 1/4인치 압력형 마이크로폰을 사용하였으며, 다공판으로부터 첫 번째 마이크로폰까지의 거리 $x=100$ mm이고, 두 마이크로폰의 간격 $s=40$ mm로 하였다.

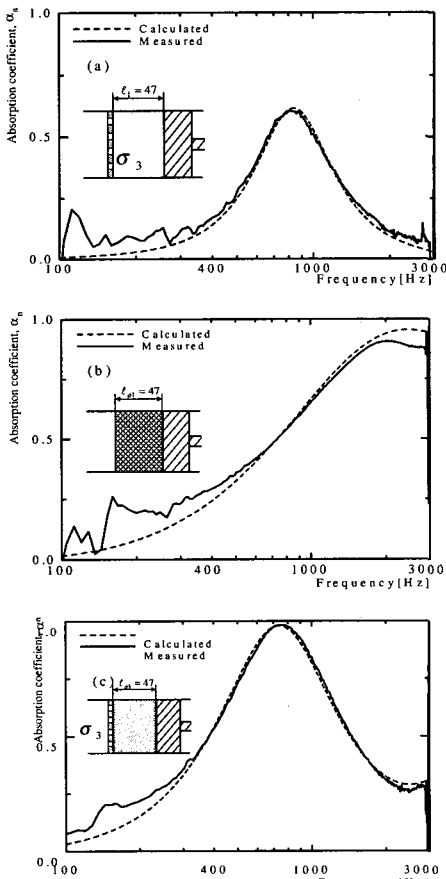


Fig. 5 Effect of the sound absorbing material on the absorption coefficients for single layer perforated panel system

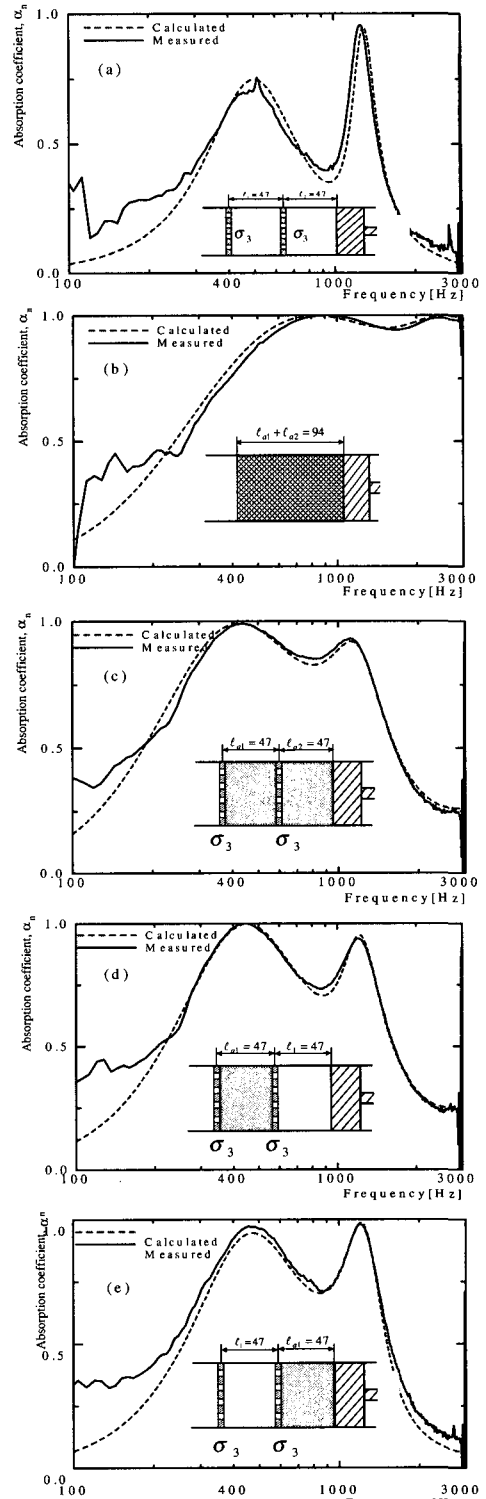


Fig. 6 Effect of the sound absorbing material on the absorption coefficients for double layer perforated panel system

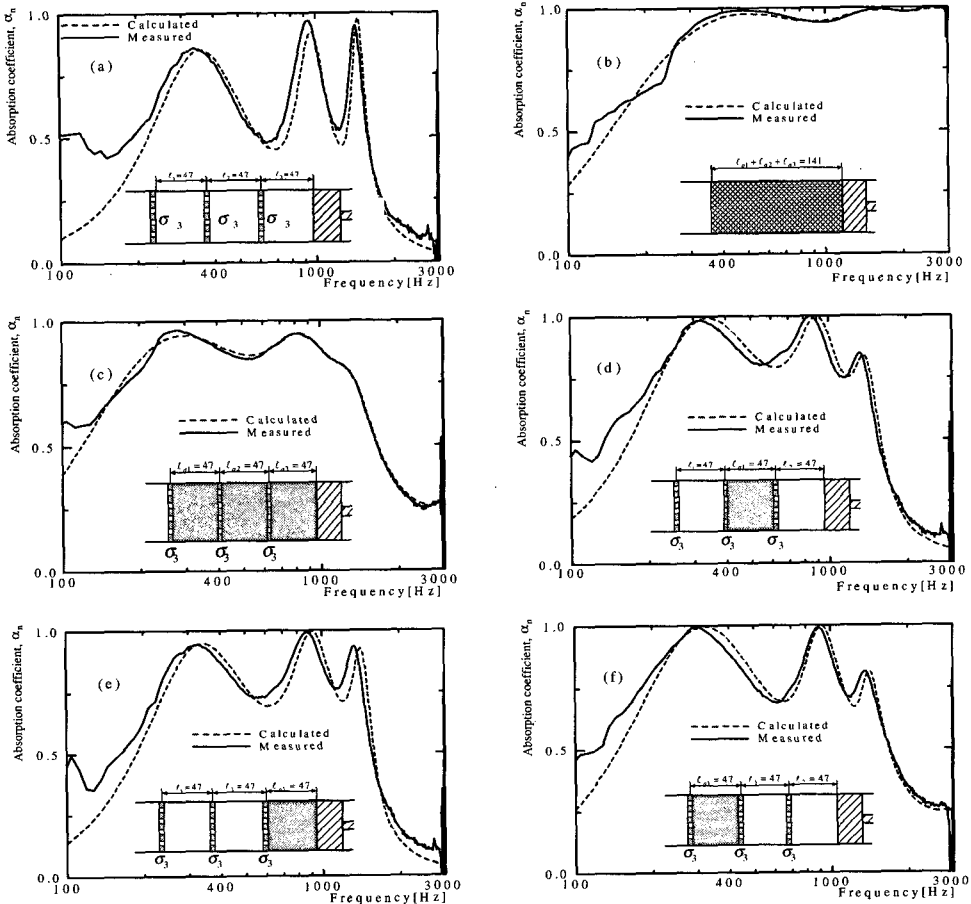


Fig. 7 Effect of the sound absorbing material on the absorption coefficients for triple layer perforated panel system

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 공극률 3.14%인 단일 다공판 시스템과 이와 동일한 길이의 흡음재에 대한 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. Fig. 5의 (a)와 같이 단일 다공판 시스템인 경우에는 특정 대역폭으로 흡음 성능이 제한되는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5의 (b)는 (a)와 같은 길이의 폴리에스터 흡음재만을 설치하고 흡음 성능을 구한 결과로서, 입사음의 1/4파장에 해당하는 주파수대역 이상에서 흡음 성능이 최대가 되는 것을 볼 수 있다.

그리고 Fig. 5의 (c)는 다공판과 흡음재를 조합한 시스템에 대한 경우로서 Fig. 5의 (a)의 단일 다공판 시스템과 비교하면 흡음대역폭이 넓어지고 흡음 효과

도 더 좋아진 것을 볼 수 있다. 또한 세 결과 모두에서 계산결과와 측정결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 공극률 3.14%로 구성된 다공판, 흡음재 및 공기층을 조합한 이중 다공판 흡음시스템의 흡음 계수를 계산하고 측정한 결과이다. Fig. 6의 (a)는 이중 다공판 시스템으로서 공동의 공명주파수와 일치하는 두개의 공명주파수영역에서 흡음 성능의 피크치를 나타낸다. 그리고 Fig. 6의 (b)는 (a)와 같은 길이 흡음재만 설치한 경우로서 Fig. 5의 (b)와 같이 입사음의 1/4파장에 해당하는 주파수대역 이상에서 흡음 성능이 최대가 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6의 (c), (d) 그리고 (e)는 이중 다공판 시스템에 흡음재를 설치한 경우로서 다공판 시스템만의 흡음 성능을 나타낸 Fig. 6의 (a)의 결과와 비교하여 공명주파수와 반공명주파수대역 모두에서 흡음 성능이 크게 향상되고, 흡음대

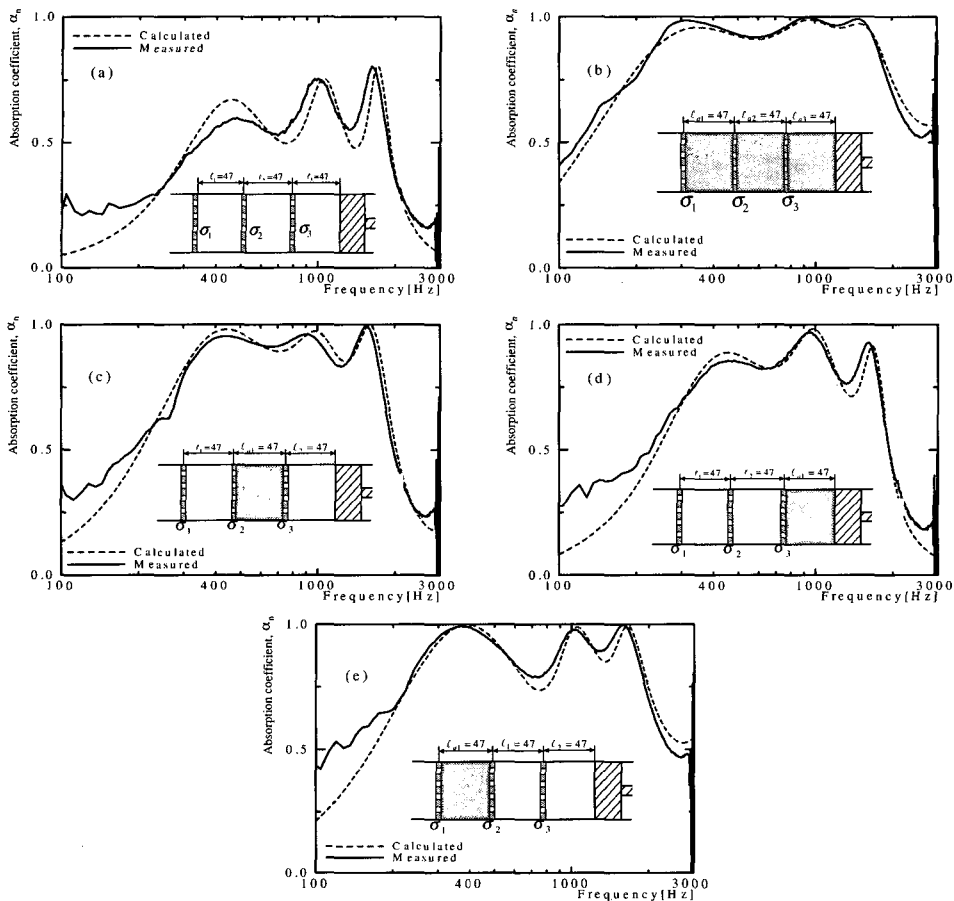


Fig. 8 Effect of the sound absorbing material on the absorption coefficients for triple layer perforated panel system with each different porosity

역폭도 넓어진 것을 알 수 있다. 더욱이 Fig. 6의 (d)와 (e)처럼 하나의 공기층에만 흡음재를 넣어도 Fig. 6의 (c)의 결과에 가까운 흡음성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 공극률 3.14%로 구성된 다공판, 흡음재 및 공기층을 조합한 삼중 다공판 흡음시스템의 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. Fig. 7의 (a)는 흡음재가 없는 삼중 다공판 시스템으로서 공명주파수대역에서만 흡음성능이 최대로 되는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 (b)는 흡음재만을 설치한 경우로서 흡음재 두께의 증가로 흡음피크가 저주파대역으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

또한 Fig. 7의 (c)에서 (f)까지의 결과에서 보듯이 삼중 다공판 시스템의 공기층에 흡음재가 조합되면 Fig. 7의 (a)와 비교해서 공명주파수와 반공명주파수대역에서 흡음성능이 크게 향상되는 것을 알 수 있

다. 또한 흡음재를 모두 설치하는 것보다 하나의 공간에만 설치하더라도 Fig. 7의 (c)에 가까운 흡음성능을 얻을 수 있다. 한편 제시된 모든 결과에서 보듯이 200 Hz 이하의 주파수대역을 제외하면 계산결과와 측정결과는 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 200 Hz 이하의 저주파대역에서 계산값과 측정값 간에 차이가 있는 것은 스피커의 낮은 응답성⁽¹⁴⁾ 및 마이크로폰 위치와 관련된 측정오차임을 실험에서 확인하였다.

Fig. 8은 공극률이 서로 다른 다공판, 흡음재 및 공기층을 조합한 삼중 다공판 흡음시스템에 대하여 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. 다공판의 배치는 음원측(상류단)에서부터 $\sigma_1 = 7.07\%$, $\sigma_2 = 5.59\%$, $\sigma_3 = 3.14\%$ 순서로 하였다. 공극률 3.14%인 다공판과 흡음재를 조합한 Fig. 7의 결과와 비교해 보면, 첫번째 또는 세번째 공명주파수대역에서만 흡음

성능이 다소 향상된 것을 제외하면 전반적으로 흡음 특성은 유사함을 알 수 있다.

5. 결 론

(1) 단일 다공관 시스템에 흡음재를 조합하면 흡음재를 조합하지 않은 경우보다 흡음대역폭이 넓어지고 흡음성능이 향상되었다.

(2) 다중 다공관 시스템에서 초래되는 반공명주파수대역에서의 흡음성능 저하를 억제하기 위해서 흡음재를 다공관 사이에 모두 설치하기보다는 하나의 공간에만 설치하더라도 흡음성능이 향상됨을 알았다.

(3) 다공관, 공기층 그리고 흡음재를 조합한 다중 다공관 흡음시스템의 흡음계수를 전달행렬법을 이용하여 계산하였으며, 계산결과는 측정결과와 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

(1) Blackman, A. W., 1960, "Effect of Nonlinear Losses on the Design of Absorbers for Combustion Instabilities", ARS Journal, pp.1022~1028.

(2) Lee, F. C. and Chen, W. C., 2001, "Acoustic Transmission Analysis of Multi-Layer Absorbers", Journal of Sound and Vibration, Vol.248, No. 4, pp. 621~634.

(3) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공관 시스템의 흡음성능에 관한 연구", 대한기계학회 춘계 학술대회논문집, pp. 688~693.

(4) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공관 시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델 개발", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 877~882.

(5) Shenoda, F. B., 2001, "Non-dissipative Geometric Wide-Bend Sound Absorber", 17th International

Congress on Acoustics, JASA, USA, pp. 8~9.

(6) Kang, L. and Fuchs, H.V., 1999, "Predicting the Absorption of Open Weave Textiles and Micro-Perforated Membranes Backed by an Air Space", Journal of Sound Vibration, Vol.220, No. 5, pp. 905~920.

(7) 이동훈, 2004, "다중 다공관 시스템을 이용한 흡음설계", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 65~70.

(8) 허성춘, 임정빈, 노승남, 이동훈, 2002, "병렬 다공관 시스템의 흡음성능에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 902~907.

(9) Munjal, M. L., 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, Chap.2, John wiley & Son, Inc., New York.

(10) 이동훈, 허성춘, 권영필, 2002, "전달행렬법을 이용한 다중 다공관 시스템의 흡음성능 예측", 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 9 호, pp. 709~716.

(11) Lee, D. H. and Kwon, Y. P., 2004, "Estimation of the Absorption Performance of Multiple Layer Perforated Panel Systems by Transfer Matrix Method", Journal of Sound and Vibration, Vol. 278, pp. 847~860.

(12) Rao, K. N. and Munjal, M. L., 1986, "Experimental Evaluation of Impedance of Perforates with Grazing Flow", Journal of Sound and Vibration, Vol. 108, No. 2, pp. 283~295.

(13) Delany, M. E. and Bazley, E. N., 1969, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials", Applied Acoustics, Vol. 3, pp. 105~116.

(14) Hans B and Mats A, 1986, "Influence of Errors on the Two-microphone Method for Measuring Acoustic Properties in Ducts, JASA, Vol. 79, No. 2, pp. 541~549.