

# 다공성 흡음재가 조합된 다중 다공판 시스템의 흡음성능에 관한 연구

## A Study on the Sound Absorption of Multiple Layer Perforated Plate Systems Combined with Porous Absorbing Materials

허성욱\* · 김 옥\*\* · 이동훈\*\*\* · 권영필\*\*\*\*

Sung-Wook Heo, Wook Kim, Dong-Hoon Lee and Young-Pil Kwon

**Key Words :** Absorption Coefficient(흡음계수), Acoustic Impedance(음향임피던스), Perforated Plate System(다공판 시스템), Porous Absorbing Material(다공성 흡음재), Transfer Matrix Method(전달행렬법)

### ABSTRACT

The sound absorption coefficients for multiple layer perforated plate systems containing several compartments with airspaces and porous absorbing materials are estimated using the transfer matrix method developed in the previous paper. The absorption coefficients from transfer matrix method agree well with the values measured by the two-microphone impedance tube method for various combinations of perforated plates, airspaces or porous materials. Based on these results, a guidance for the design of multiple layer perforated plate systems combined with airspaces and porous absorbing materials is discussed in detail.

### 1. 서론

저주파 소음을 저감시킬 목적으로 다공판 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다공판 시스템은 일종의 헬름홀츠 공명기로서 연소기에서 연소불안정성으로 발생하는 강력한 세기의 불연속 스크리치음을 감소시킬 목적으로 연구가 시작되었다.<sup>(1)</sup> 그리고 최근에는 웬이나 압축기 그리고 연소기와 같은 각종 열유체기기류에서 발생하는 저주파수대역의 소음을 저감시키기 위해서 단일 다공판 시스템뿐만 아니라 다수개의 공동과 다공판으로 구성된 다중 다공판 시스템에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(2-5)</sup>

지금까지 발표된 연구결과들을 살펴보면 다중 다공판 시스템은 공명주파수대역에서 탁월한 흡음 성능을 보이는 반면에, 반공명주파수(anti resonance frequency)대역에서는 흡음성능이 저하되는 흡음특성을 보여주었다.<sup>(3-6)</sup> 특히 반공명주파수대역에서의 흡음성능을 향상시키기 위한 방법으로는 다공판의 수와 다공판 사이의 공간깊이를 증가시키거나 다공판의 구멍지름을 가급적 작게 함으로서 해결할 수 있다. 그러나 다공판의 수와 공간깊이를 증가시키게 되면 유효공간이 감소하게 된다. 또한 작은 구멍지름으로 구멍개수를 증가시키면 제작비

용이 증가하게 된다.

따라서 본 연구에서는 반공명주파수대역에서의 흡음성능 개선을 목적으로 다공성 흡음재가 조합된 다중 다공판 흡음시스템의 흡음성능과 흡음특성에 대하여 고찰하고자 한다. 이를 위해 다공판, 흡음재 그리고 다공판 사이의 공간 즉, 공기층이 조합된 다중 다공판 흡음시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델을 수립하였다. 계산모델의 타당성은 모델을 통하여 구해진 흡음계수와 실험결과와의 비교를 통하여 검증된다. 계산모델로는 소음기의 1 차원 성능해석에 쓰여온 전달행렬법<sup>(7)</sup>을 사용하였다. 또한 본 연구에서 사용된 다공판 임피던스 모델은 Rao 와 Munjal 의 모델을 수정하여 사용하였고,<sup>(8)</sup> 흡음재의 임피던스 모델은 Delany & Bazley 의 경험식<sup>(9)</sup>을 사용하였다. 다공판 흡음시스템의 흡음성능은 단일, 이중 그리고 삼중에 대하여 계산하고 측정된 흡음계수를 비교하여 토의하였다.

### 2. 관련이론

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

\* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과  
E-mail : [ldh@snut.ac.kr](mailto:ldh@snut.ac.kr), Tel : (02) 970-6331

\*\* 기술표준원

\*\*\* 서울산업대학교 기계공학과

\*\*\*\* 숭실대학교 기계공학과

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

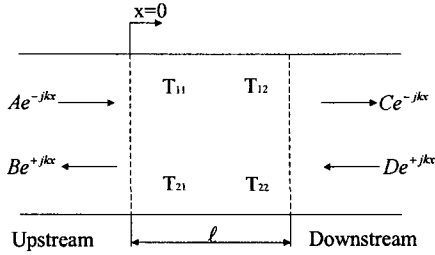


Fig. 1 Four-pole parameters of an acoustic system

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 다음과 같이 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. 2 에 도시된 바와 같이 다공판과 흡음재 그리고 공기층으로 구성된다. 먼저 Fig. 2 의 그림 (a)에 도시된 다공판에 대한 전달행렬  $[P]$ 를 구하면 다음 식과 같다.

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

식 (3)에서  $Z$  는 다공판의 특성임피던스로서 본 연구에서는 Rao 와 Munjal 이 제안한 임피던스 모델을 다음과 같이 수정하여 사용하였다.<sup>(8)</sup>

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

식 (4)에서  $\sigma$  는 공극율,  $f$  는 주파수(Hz),  $t$  는 다공판의 두께(m),  $d$  는 구멍지름(m),  $j = \sqrt{-1}$  을 나타낸다. 또한 Fig. 2 의 그림 (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  $\gamma$  는 전파상수,  $\ell_a$  는 흡음재 두께(m),  $Z_c$  는 흡음재의 특성임피던스로서 본 연구에서는 다음에 제시된 Delany & Bazley 의 경험식<sup>(9)</sup>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  $\Omega$  는 유동저항( $g/cm^3 \text{ sec}$ ),  $\omega$  는 각주파수(rad/s),  $c$  는 음속(m/s)을 나타낸다.

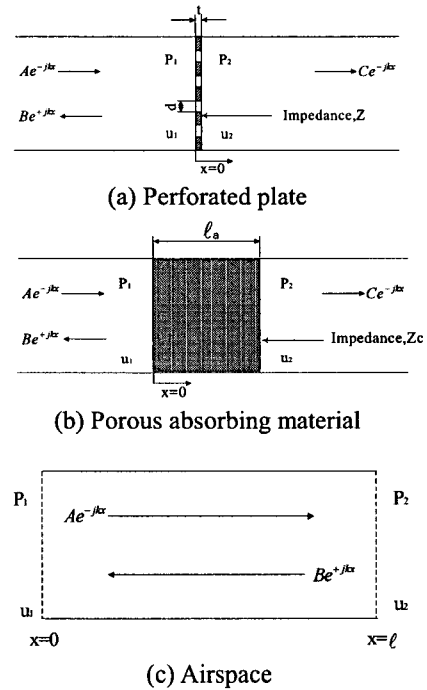


Fig. 2 Sound field representations for perforated plate, porous absorbing material and airspace

그리고 그림 (c)의 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  $\rho_0$  는 공기밀도( $kg/m^3$ ),  $k$  는 파수(rad/m)를 나타낸다.

이상과 같이 다공판, 흡음재 그리고 공기층으로 구성된 다공판 흡음시스템에 대한 총괄 전달행렬

을 식 (2)에 대입하여 흡음시스템의 반사계수 R 을 구한 후, 이것을 식 (8)에 대입하면 수직입사 흡음 계수  $\alpha_n$  을 계산할 수 있다.

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

### 3. 실험

Fig. 3 은 흡음재와 다공판 그리고 공기층으로 구성된 다중 다공판 흡음시스템을 나타낸 것이다. 그림 (a)는 다공판만을 3 층으로 구성한 경우로서 판의 간격은 47mm 로 하였다. 그림 (b)는 단일 다공판 앞에 Polyester 흡음재를 설치한 경우이고 그림 (c)는 이중 다공판 앞에 Polyester 흡음재를 설치한 경우이다. 그림 (d)는 공간길이가 94mm 인 단일 다공판 앞에 Polyester 흡음재를 설치하였다. 다공판은 두께  $t=1\text{mm}$  이고 지름  $d=2\text{mm}$  인 구멍을 공극율  $\sigma_1=7.07\%$ ,  $\sigma_2=5.59\%$ ,  $\sigma_3=3.14\%$  가 되도록 제작하였다. 흡음재는 단면  $60\text{mm} \times 60\text{mm}$  이고, 두께  $l_a=47\text{mm}$ , 유동저항  $\Omega=7.152 \text{ g/cm}^3 \text{ sec}$  인 시료를 사용하였다.

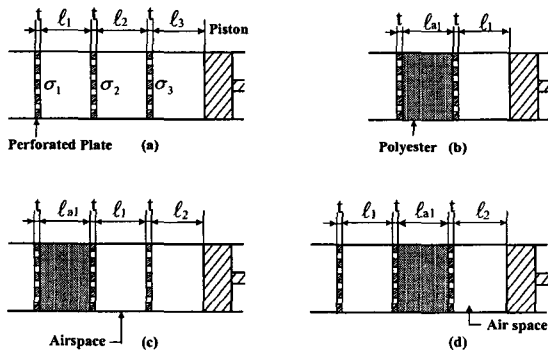


Fig. 3 Arrangements of multiple layer perforated plate systems combined with airspace and porous absorbing materials, respectively

Fig. 4 는 다중 다공판 흡음시스템이 설치된 임피던스관과 측정기기의 구성에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 임피던스관의 단면은  $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ , 길이  $1300\text{mm}$  이 되도록 두께  $10\text{mm}$  인 아크릴판으로 제작하였다. 관의 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 출구측에는 다공판과 흡음재가 설치되어 있다. 그 뒤에는 음의 누출이 없도록 O-링이 부착된 강체피스톤을 설치하였다. 주파수 분석기의 분석주파수 범위는  $3200\text{Hz}$  그리고 해상도는  $8\text{Hz}$  로 하였다. 흡음계수는 임피던스관의 두 지점

에 설치된 마이크로폰간의 음향전달함수 측정값으로부터 구하였다. 마이크로폰은 1/4 인치 압력형 마이크로폰을 사용하였으며, 다공판으로부터 첫 번째 마이크로폰까지의 거리  $x=100\text{mm}$  이고 두 마이크로폰의 간격은  $s=40\text{mm}$  로 하였다.

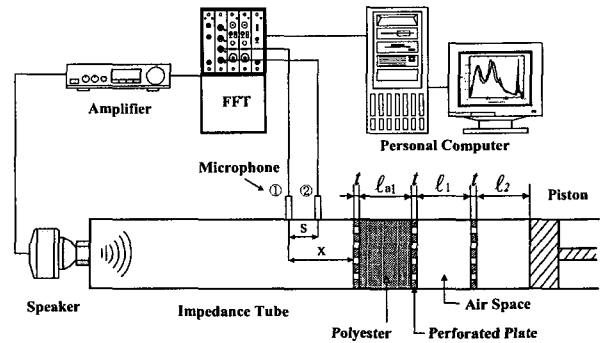
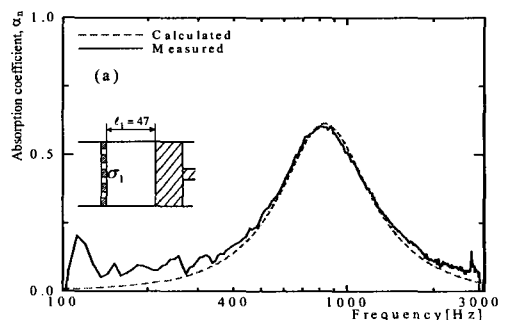


Fig. 4 Schematic of the experimental apparatus for sound absorption coefficient measurement

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 5 는 공극율 3.14%인 단일 다공판 시스템과 흡음재의 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 그림 (a)와 같이 단일 다공판 시스템인 경우에는 일정대역폭으로 흡음성능이 제한된 것을 볼 수 있다. 또한 그림 (b)는 그림 (a)의 공기층길이만큼의 폴리에스터 흡음재를 설치하고 흡음성능을 구한 결과이다. 입사음의 1/4 파장에 해당하는 주파수대역 이상에서 흡음성능이 최대가 되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 다공성 흡음재를 사용하면 고주파영역의 성능은 좋지만 저주파영역의 성능은 저조한 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 (c)는 단일 다공판 시스템에 흡음재를 설치한 경우로서 그림 (a)의 단일 다공판 시스템과 비교하면 흡음대역폭이 넓어지고 흡음효과가 높아진 것을 볼 수 있다. 또한 세 결과 모두에서 계산결과와 측정결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.



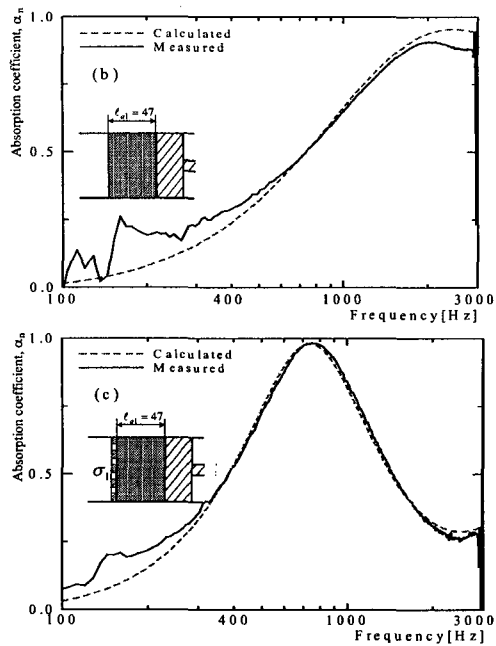


Fig. 5 Effect of the porous absorbing material on the absorption coefficients for single layer perforated plate system

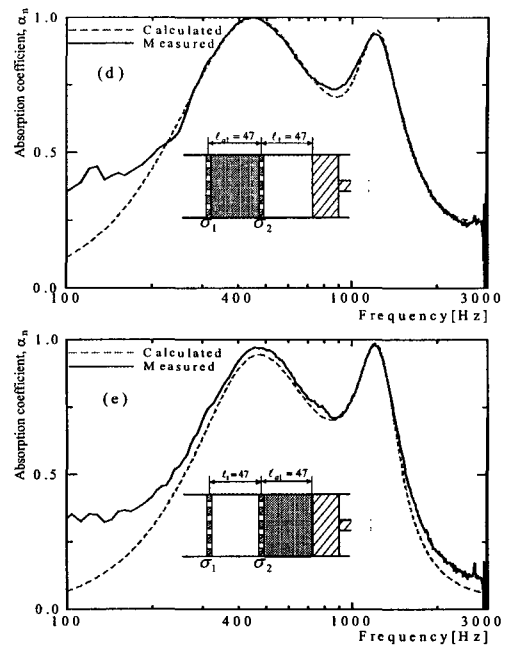


Fig. 6 Effect of the porous absorbing material on the absorption coefficients for double layer perforated plate system

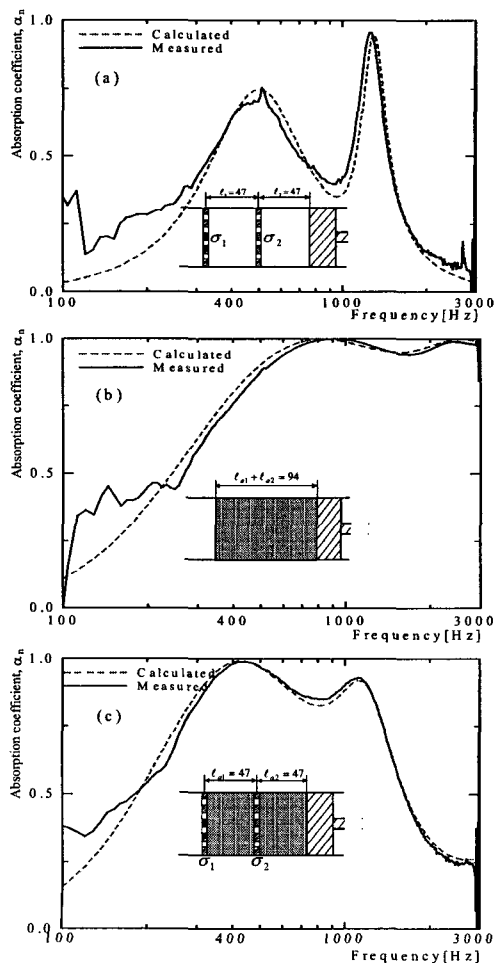


Fig. 6 은 공극율 3.14%로 구성된 이중 다공판 시스템과 흡음재가 조합된 이중 다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정한 결과이다. 그림 (a)는 이중 다공판 시스템으로서 공동의 공명주파수와 일치하는 두개의 공명주파수영역에서 흡음성능의 피크치를 나타낸다. 그리고 그림 (b)는 흡음재만 설치한 경우로서 Fig. 5의 그림 (b)와 같이 입사음의 1/4 파장에 해당하는 주파수대역이상에서 흡음성능이 최대가 되는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5의 그림 (b)와 비교해 보면 흡음재의 두께가 두꺼워질수록 흡음성능의 피크치는 저주파대역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 한편 그림 (c), 그림 (d) 그리고 그림 (e)는 이중 다공판 시스템에 흡음재를 설치한 경우로서 다공판 시스템만의 흡음성능을 나타낸 그림 (a)의 결과와 비교하여 공명주파수와 반공명주파수대역 모두에서 흡음성능이 크게 증대되고 흡음대역폭이 넓어지는 것을 알 수 있다. 더욱이 그림 (d)와 그림 (e)처럼 흡음재를 하나의 공간에만 넣어도 그림 (c)의 결과에 가까운 흡음성능을 나타낸다.

Fig. 7 은 공극율 3.14%로 구성된 삼중 다공판 시스템과 흡음재가 조합된 삼중 다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정한 결과이다. 그림 (a)는 흡음재가 없는 삼중 다공판 시스템으로서 공명주파수대역에서 흡음성능이 최대가 되는 것을 알 수

있다. 그림 (b)는 흡음재만을 설치한 경우로서 두께가 두꺼워짐에 따라 피크치가 저주파대역으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

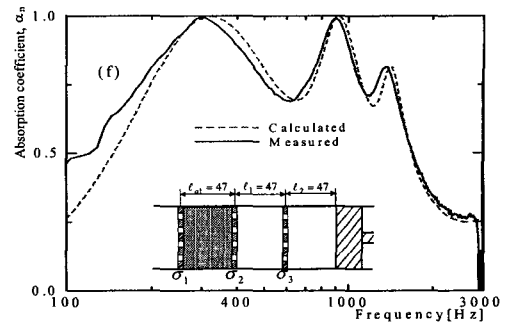
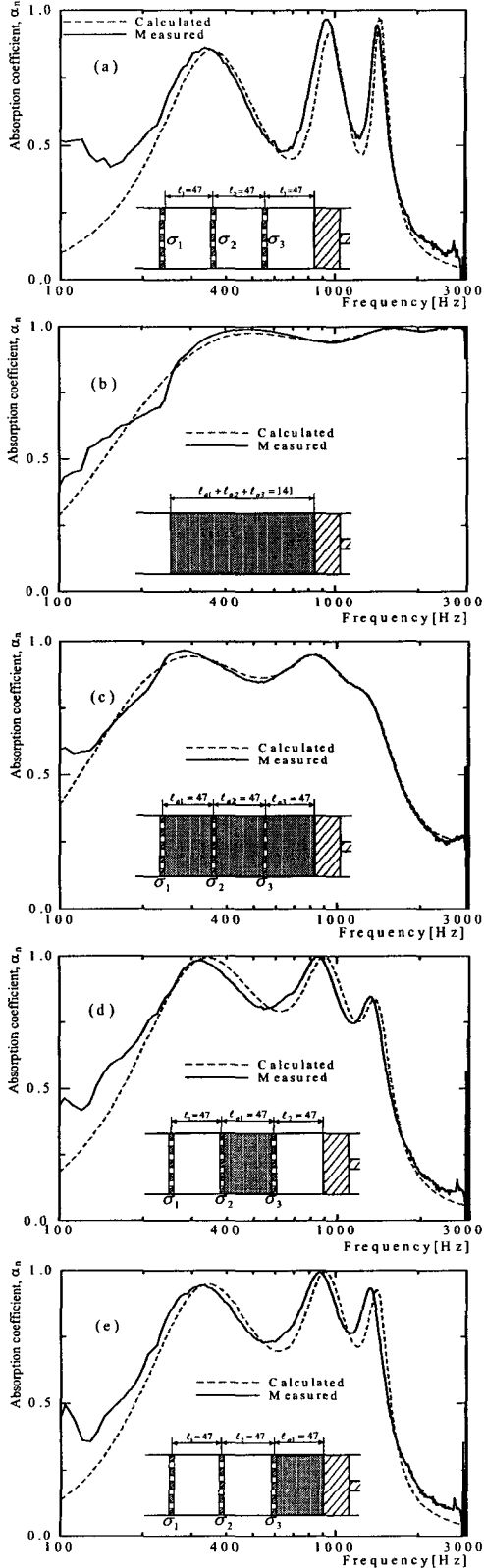
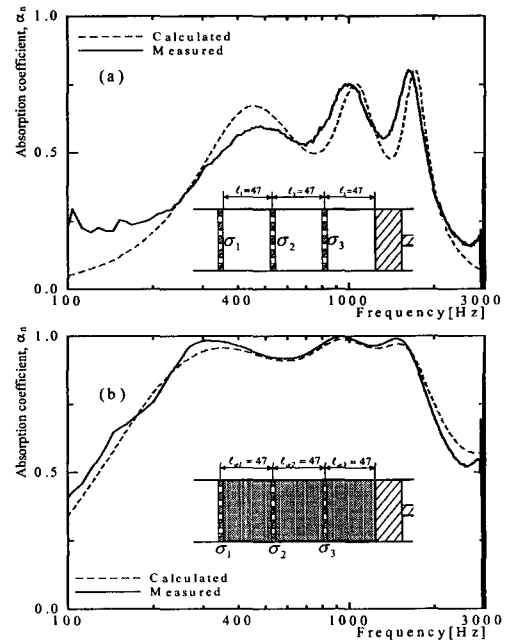


Fig. 7 Effect of the porous absorbing material on the absorption coefficients for three layer perforated plate system

또한 그림 (c)에서 그림 (f)까지의 결과에서 보듯이 삼중 다공판에 흡음재가 조합되면 그림 (a)와 비교해서 공명주파수와 반공명주파수대역에서 흡음능력이 크게 향상된 것을 볼 수 있다. 또한 흡음재를 모두 설치하는 것보다 하나의 공간에만 설치하더라도 그림 (c)에 가까운 흡음능력을 얻을 수 있다. 한편 제시된 모든 결과에서 보듯이 200Hz 이하의 주파수대역을 제외하면 계산결과와 측정결과는 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 200Hz 이하의 저주파대역에서는 계산값과 측정값의 큰 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 마이크로폰의 위치와 관련된 측정오차를 실험에서 확인하였다.



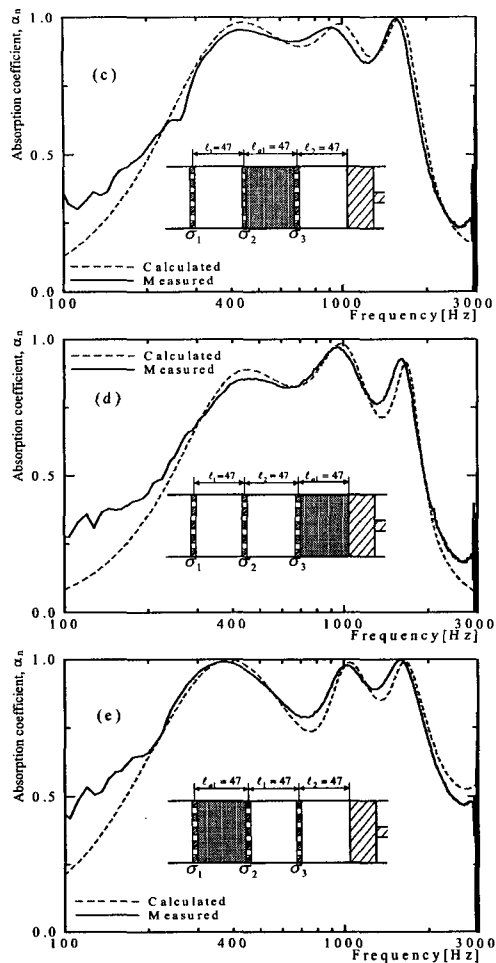


Fig. 8 Effect of the porous absorbing material on the absorption coefficients for three layer perforated plate system with each different porosity

Fig. 8 은 공극율이 서로 다른 삼중 다공판 시스템과 흡음재를 조합된 삼중 다공판 시스템에 대하여 흡음계수를 계산하고 측정한 결과이다. 다공판의 배치는 음원쪽에서부터  $\sigma_1=7.07\%$ ,  $\sigma_2=5.59\%$ ,  $\sigma_3=3.14\%$  순서로 하였다. 세개의 다공판 모두를 공극율 3.14%로 배치한 Fig. 7 의 결과와 비교해보면 전반적으로 흡음특성은 유사하나, 첫번째와 세번째 공명주파수대역에서의 흡음성능이 다소 개선된 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

1. 단일 다공판 시스템에 다공성 흡음재를 조합하면 흡음재가 조합되지 않은 경우보다 흡음대역 폭이 넓어지고 흡음성능이 향상되었다.
2. 다중 다공판 시스템에서 초래되는 반공명주파

수대역에서의 흡음성능 저하를 억제하기 위해서 흡음재를 다공판 사이에 모두 설치하기보다는 하나의 공간에만 설치하더라도 흡음성능이 향상됨을 알았다.

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

### 참고문헌

- (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*, 248(4), pp.621~634
- (3) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음성능에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.688~693
- (4) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델 개발", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.877~882
- (5) Shenoda, F.B., 2001, "Non-Dissipative Geometric Wide-Band Sound Absorber", 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, JASA, USA
- (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*, 220(5), pp.905~920.
- (7) Munjal, M.L., 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, Chap.2, John Wiley & Son, Inc., New York.
- (8) 이동훈, 허성춘, 권영필, 2002, "전달행렬법을 이용한 다중 다공판 시스템의 흡음성능 예측", 한국소음진동공학회 논문집 제 12 권 제 9 호
- (9) Delany, M.E. and Bazley, E. N., 1969, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials", *Applied Acoustics*, Vol.3, pp.105~116