

## 다중 다공판 시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델 개발

### A New Estimation Model of Predicting the Sound Absorption Performance for Multiple Perforated Plate Systems

<sup>0</sup>허성춘\* · 이동훈<sup>†\*\*</sup> · 권영필<sup>\*\*\*</sup>

Sung-Chun Hur, Dong-Hoon Lee and Young-Pil Kwon

**Key Words** : Characteristic Impedance(특성임피던스), Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Perforated Plate(다공판), Sound Absorption Coefficient(흡음계수), Transfer Matrix Method(전달행렬법)

#### ABSTRACT

A new estimation model of predicting the sound absorption performance for multiple perforated plate sound absorbing system was developed using transfer matrix method. The proposed method was validated by comparing the calculated absorption coefficients of a single layer perforated plate with the values measured by the two-microphone impedance tube method for various porosity and cavity depth. The developed transfer matrix method was further applied to estimate the multiple layer perforated plates and it is shown that the estimated absorption coefficients generally agree well with the measured values.

#### 1. 서 론

최근 기존 흡음재의 문제점을 해결하기 위한 방안의 하나로 얇은 판에 다수의 작은 구멍을 뚫어 만든 다공판과 공동(cavity)을 조합한 다공판 흡음시스템이 음향연구자들에게 관심의 대상이 되고 있다. 다공판 시스템은 일종의 헬름홀츠 공명기로써 오래전에 로켓, 램제트(ramjet) 그리고 터보제트에 쓰이는 연소기에서 연소불안정성으로 발생하는 강력한 세기의 불연속 스크리치음(screech tone)을 감소시킬 목적으로 연구가 시작되었으며<sup>(1)</sup>, 최근에는 이와 같은 단일 다공판 시스템뿐만 아니라 다수개의 공동과 다공판으로 구성된 다중 다공판 흡음시스템에 대하여 한층 발전된 연구결과들이 발표되고 있다.<sup>(2-8)</sup>

그러나 지금까지 발표된 대부분의 연구는 해석적 방법을 이용하여 단일 다공판 시스템의 흡음성능을 계산하거나<sup>(1,9)</sup>, 전기-음향상사로부터 도출된 산술식을 이용하여 다중 다공판 시스템의 흡음성능을 예측하는 정도였다<sup>(3-8)</sup>. 이와 함께 다공판 시스템에 관한 대부분의 연구가 실험적으로 충분히 타당성이 검증되지 않은 다공판 임피던스 모델을 사용한 것으로 저자들은 판단하고 있다. 특히 흡음성능 계산에 이용된 계산모델을 살펴보면 단일 다공판의 경우는 전기-음향상사로부터 도출된 계산모델의 타당성이 인정되나, 다중 다공판 시스템을 전기-음향상사로 등가시킨 Kang과 Fuchs<sup>(5)</sup>의 계산모델에는 공동간의 음향연성이 고려되어 있지 않음을 확인할 수 있다.<sup>(10)</sup> 이 때문에 지금까지 발표된 연구문헌에서 다중 다공판 시스템의 흡음성능에 대한 계산값과 실험값이 잘 일치하는 경우는 거의 없었으며, 아울러 두 결과를 엄밀하게 비교분석한 연구결과도 제시된 바 없었다.

따라서 본 연구에서는 다수개의 다공판으로 구성된 다중 다공판 시스템의 흡음성능을 정확하고도 쉽게 계산할 수 있는 새로운 형태의 계산모델

\* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

\*\* 서울산업대학교 기계공학과

† E-mail : Ldh@snut.ac.kr

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

\*\*\* 숭실대학교 기계공학과

의 제시와 함께 다공판의 제원과 배치를 다르게 하면서 구한 다중 다공판 시스템의 흡음특성에 대해서도 고찰하고자 한다. 계산모델은 소음기의 일차원 성능해석에 널리 쓰여 왔던 전달행렬법<sup>(11)</sup>으로서 공동과 다공판에 대한 전달행렬로부터 다공판 시스템의 총괄 전달행렬을 구하여 흡음계수를 계산하는 방식이다. 또한 본 연구의 다공판 임피던스 모델은 소음기의 성능해석에 관한 연구에서 모델의 타당성이 입증된 Rao와 Munjal<sup>(12)</sup>이 제안한 모델을 수정하여 사용하였다. 또 실험은 다중 다공판이 설치된 임피던스관에 부착된 두 마이크로폰 간의 전달함수 측정을 통해 흡음계수를 구하였다.

## 2. 계산모델

Fig. 1에 도시된 다중 다공판 흡음시스템에 대한 전달행렬은 다공판과 직관에 대한 전달행렬을 조합하여 구할 수 있다.

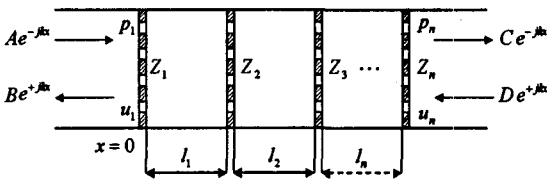


Fig.1 Configuration of the multiple perforated plate sound absorbing system.

즉 Fig. 1에서 n개의 요소로 구성되어 있는 길이 l인 음향요소에 대한 총괄 전달행렬 요소인 4단자 정수는 상류측과 하류측의 음압 p와 입자속도 u를 이용하여 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

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

Fig. 1에서 보듯이 A와 B는 음향요소 상류측에서의 입사음과 반사음의 음압진폭 그리고 C와 D는 음향요소 하류측에서의 투과음과 반사음의 음압진폭을 나타낸다. 또 Fig. 1에서 음향요소의 하류단을 무반사단 ( $D=0$ )으로 가정하고,  $x=0$ 에서 정의된 반사계수  $\gamma=B/A$ 와 투과계수  $\tau=C/A$ 로 정리하여 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 표현된 전달행렬 요소로부터 반사계수  $\gamma$ 를 구할 수 있다.

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

그리고 Fig. 2에 도시된 바와 같이 판두께 t가 파장에 비하여 충분히 작은 다공판에 대한 전달행렬 [P]는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

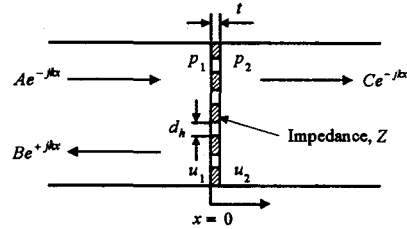


Fig.2 Sound field representation for a perforated plate.

식 (3)에서 Z는 다공판의 특성임피던스이다. 또한 직관에 대한 전달행렬[S]를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & (j\rho_0 c_0) \sin kl \\ (j\rho_0 c_0) \sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \quad (4)$$

다공판과 직관에 대한 전달행렬에 관한 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 n개의 다공판과 n-1개의 직관 요소로 구성된 다중 다공판 시스템에 대한 총괄 전달행렬 [T]를 구하면 다음과 같다.

$$[T] = [P]_1 \cdot [S]_1 \cdot [P]_2 \cdot [S]_2 \cdot \dots \cdot [S]_{n-1} \cdot [P]_n \quad (5)$$

다공판 시스템이 흡음성능을 가지려면 하류단이 단단히 막혀 있는 구조이어야 하므로 Fig. 1에 도시된 하류측 다공판의 임피던스인  $Z_n$ 을 무한대로 가정하는 것이 필요하다. 즉 하류측 다공판의 임피던스를 무한대로 가정하여 식 (2)로부터 구한 반사계수  $\gamma$ 와 공기의 특성임피던스  $\rho_0 c_0$ 로 표준화된 고유음향임피던스  $z$ 의 관계로부터 수직입사 흡음계수  $\alpha_n$ 을 계산할 수 있다.

$$\alpha_n = \frac{4Re(z)}{(1 + Re(z))^2 + (Im(z))^2} \quad (6)$$

식 (6)에서 Re와 Im는 고유음향임피던스의 실수부와 허수부를 뜻한다. 또 식 (6)에서  $Im(z)=0$ 를 만

족하는 공명조건으로부터 흡음계수의 피크치를 갖는 다공판 시스템의 공명주파수를 구할 수 있다.

한편 Rao와 Munjal에 의해 제안된 다공판의 음향임피던스  $Z$ 를 점선유동항을 생략하여 표현하면 다음과 같다.

$$Z = R + jX \quad (7)$$

$$R = (7.337 \times 10^{-3})/\sigma$$

$$X = (2.2245 \times 10^{-5} f(1 + 51 t)(1 + 204 d_h))/\sigma$$

식 (7)에서  $\sigma$ 는 공극율,  $f$ 는 주파수(Hz),  $t$ 는 다공판의 두께(m),  $d_h$ 는 구멍지름(m)을 나타낸다.

Fig. 3은 식 (7)에 도시된 다공판 임피던스의 실수부  $R$ 와 허수부  $X$ 에 가중값을 단계적으로 곱하면서 식 (6)을 이용하여 단일 다공판 시스템의 흡음계수를 계산한 결과이다. 다공판의 재원은 두께 1mm, 지름 2mm 그리고 공극율 3.14%이다.

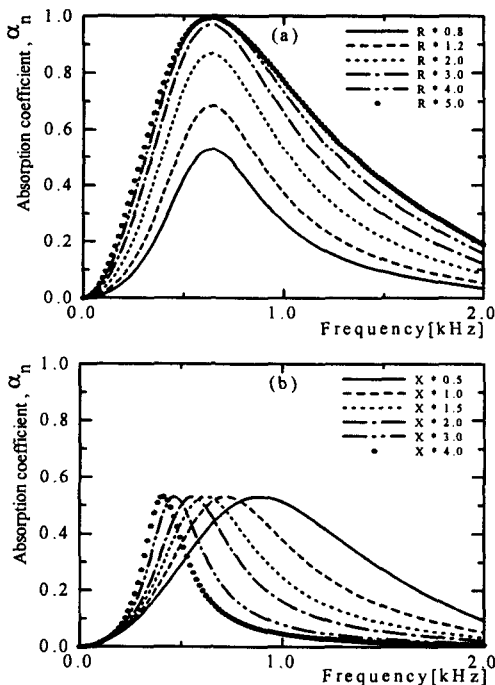


Fig.3 Effect of the resistance and reactance values of perforated plate on the sound absorption coefficient.

제시된 그림 (a)의 계산결과를 보면 실수부의 가중값이 순차적으로 증가할 때 흡음능의 피크치도 증가하면서 흡음대역폭이 점차 넓어지는 것을

볼 수 있다. 반면에 그림 (b)에 도시된 다공판 음향임피던스의 허수부의 가중값이 증가할 때는 흡음능의 피크주파수는 저주파수 쪽으로 이동하며, 흡음대역폭은 점차 좁아지는 것을 볼 수 있다.

### 3. 실험

Fig. 4는 다중 다공판이 설치된 임피던스관과 측정기기의 구성에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 임피던스관은 60mm x 60mm인 정사각형이며, 길이 1300mm 그리고 두께 10mm인 아크릴판으로 제작하였다. 관의 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 출구측에는 시험대상체인 다공판이 설치되어 있다. 또한 출구측의 다공판 뒤에는 음의 누출이 없도록 강체피스톤으로 밀봉하였다. 측정주파수의 상한범위는 3200Hz로 하였으나, 본 연구에 쓰인 사각형 임피던스관의 등가지름이 67.7mm이므로 고차모드가 야기되는 차단주파수를 감안하면, 평면파 음장조건을 유지하는 주파수의 상한범위는 2900Hz가 된다. 흡음계수는 임피던스관의 두 지점에 설치된 두 개의 마이크로폰간의 음향전달함수 측정값으로부터 음향임피던스를 구한 후, 식 (6)에 대입하여 구하였다. 마이크로폰은 1/4인치 압력형 마이크로폰을 사용하였으며, 다공판으로부터 첫 번째 마이크로폰까지의 거리와 두 마이크로폰의 간격은 각각  $x=100\text{mm}$  그리고  $s=40\text{mm}$ 로 하였다.

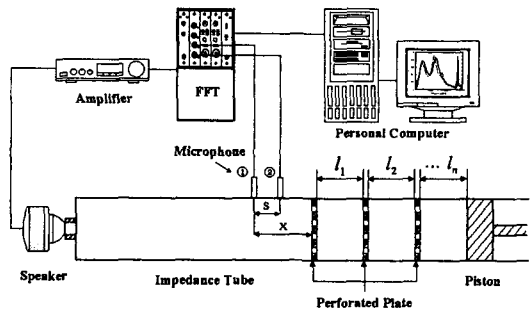


Fig.4 Experimental setup for sound absorption coefficient measurement.

실험에 사용된 다공판은 두께  $t=1\text{mm}$ 이고 지름  $d_h=2\text{mm}$ 인 구멍을 공극율  $\sigma=1.40\%$ ,  $\sigma=3.14\%$  그리고  $\sigma=5.59\%$ 가 되도록 제작하였다. 또 다공판의 재질은 일반강재로 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 단일 다공판 시스템에 입사되는 입사음의 음압레벨을 증가시키면서 측정한 흡음계수의 피크값과 음향레지스텐스값을 도시한 것이다. 레지스텐스값  $R$ 은 공기의 특성임피던스  $\rho_0 c_0$ 로 표준화되었다. 다공판의 채원과 설치조건은 공동깊이  $l=70\text{mm}$ , 다공판의 두께  $t=1\text{mm}$ , 구멍지름  $d_h=2\text{mm}$  그리고 공극율  $\sigma=3.14\%$ 이다. 그림 (a)의 결과에서 보듯이 흡음계수의 피크값은 낮은 음압범위에서는 변화폭이 작지만, 음압이 점차 커질수록 다공구멍에서 강한 비선형현상의 발생으로 피크값은 크게 증가하는 경향을 갖는다.

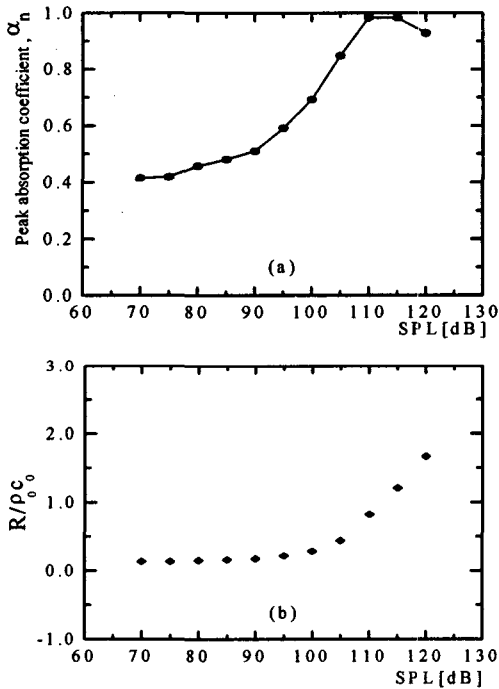


Fig.5 Measured peak absorption coefficient and measured resistance for various incident sound pressure level.

또 그림 (b)의 결과에서 레지스텐스값은 입사음의 음압레벨이 증가하더라도 거의 일정한 크기를 갖는 선형영역과 입사음과 함께 증가하는 비선형영역으로 나뉘어진다. 이러한 입사음의 크기와 음향레지스텐스의 관계로부터 식 (7)에 도시된 다공판 임피던스는 식 (8)로 수정되어야 한다. 따라서

본 연구에 제시된 모든 계산결과는 식 (8)을 이용하여 계산되었다.

$$Z = (5.87 \times 10^{-3})/\sigma + j(3.1143 \times 10^{-5} f(1 + 51 \delta)(1 + 204 d_h))/\sigma \quad (8)$$

Fig. 6은 세 개의 다공판을 공극율이 작은 것부터 큰 순으로 그리고 큰 것부터 작은 순으로 각각 배치하였을 때의 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. 다공판 채원은  $t=1\text{mm}$ ,  $d_h=2\text{mm}$ 이며, 공동깊이는 모두 70mm 이다. 제시된 결과에서 계산결과와 측정결과는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또 다공판 시스템의 흡음성능을 살펴보면 공극율이 작은 다공판을 가장 앞쪽에 배치한 그림 (a)의 경우는 주로 저주파수대역에서만 좋은 흡음성능을 보이는 반면에, 공극율이 큰 것부터 작은 순으로 다공판을 배치한 그림 (b)의 결과에서는 흡음대역폭이 더 높은 주파수대역까지 확장되는 것을 알 수 있다.

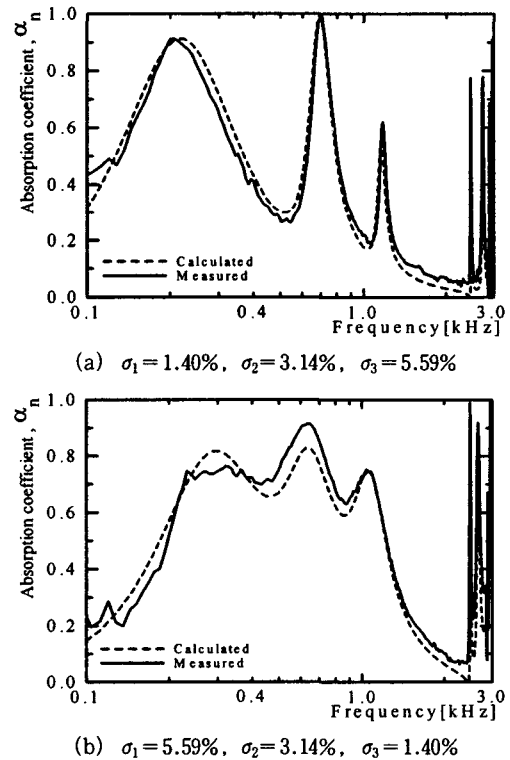
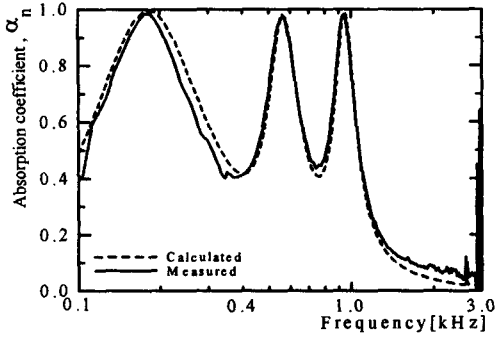
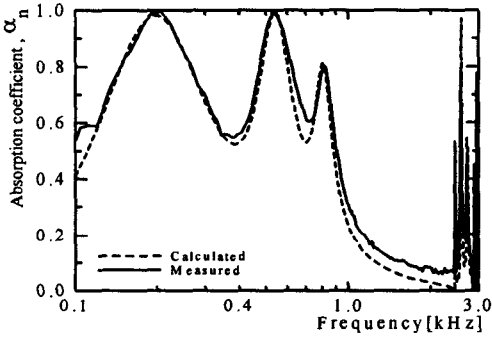


Fig.6 Effect of the arrangements of perforated plates with each different porosity on the sound absorption coefficient

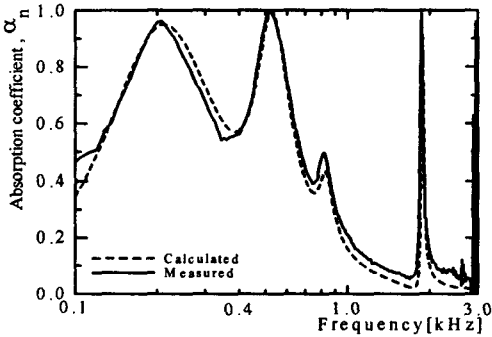
Fig. 7은 공극율이 같은 다공판의 공동깊이를 좁은 것부터 넓은 순으로, 동일간격으로 그리고 넓은 것부터 좁은 순으로 배치하였을 때의 흡음계수를 계산하고 측정결과와 비교한 것이다.



(a)  $l_1=40\text{mm}$  ,  $l_2=70\text{mm}$  ,  $l_3=100\text{mm}$



(b)  $l_1=70\text{mm}$  ,  $l_2=70\text{mm}$  ,  $l_3=70\text{mm}$



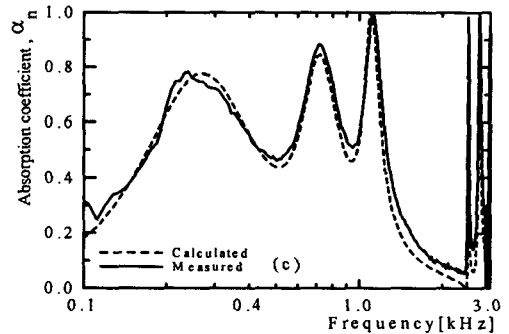
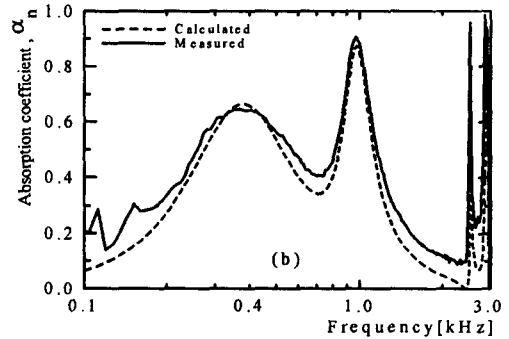
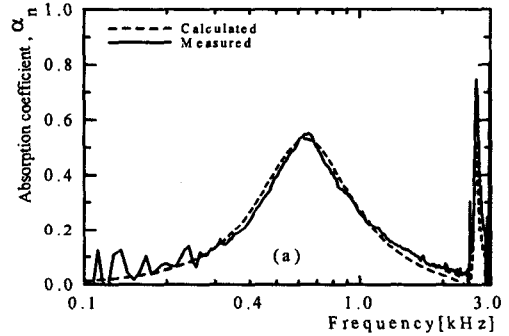
(c)  $l_1=100\text{mm}$  ,  $l_2=70\text{mm}$  ,  $l_3=40\text{mm}$

Fig.7 Effect of the arrangements of perforated plates with each different cavity depth on the sound absorption coefficient.

다공판의 제원은 두께  $t=1\text{mm}$ , 지름  $d_h=2\text{mm}$  그리고 공극율  $\sigma=1.40\%$ 이다. 도시된 결과에서 공동깊이가 좁은 것에서 점차 넓어지게 배치한 그림

(a)와 이와 반대로 배치한 그림 (c)의 결과를 서로 비교해 보면 흡음성능의 피크를 나타내는 주파수 간격이 다르게 되는 것을 알 수 있다. 또한 첫 번째 공동깊이를 크게 한 그림 (c)의 결과에서는 그림 (a)에 나타난 흡음성능의 세 번째 피크치가 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 그리고 공동간격을 모두 동일하게 한 그림 (b)의 결과는 두 결과의 중간 정도임을 알 수 있다.

Fig. 8은 동일한 제원의 다공판을 5중까지 확장하면서 흡음계수를 계산하고 측정한 결과이다. 다공판 제원은 두께  $t=1\text{mm}$ , 지름  $d_h=2\text{mm}$ , 공극율  $\sigma=3.14\%$  그리고 공동깊이는 70mm씩 확장하였다. 제시된 모든 결과에서 측정값과 계산값은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.



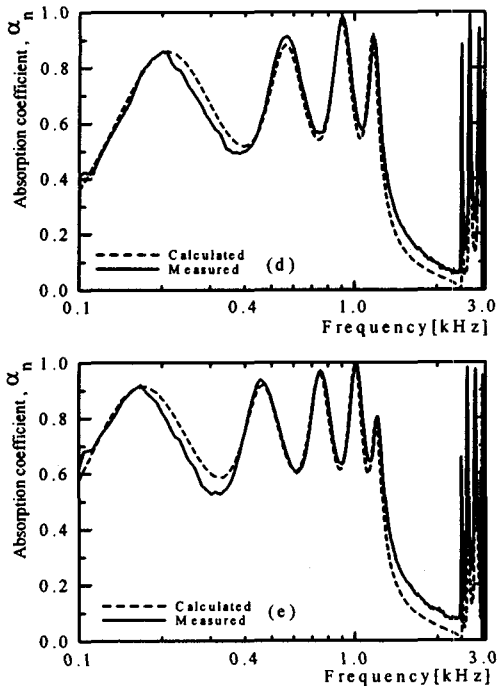


Fig.8 Comparisons between the measured and calculated absorption coefficients of multiple layer perforated plate sound absorbing systems

특히 단일 다공판에 비하여 다중 다공판으로 하였을 때가 흡음계수의 피크값이 저주파수대역으로 이동하면서 흡음대역폭이 점차 확장되는 것을 알 수 있다. 또 다공판의 수가 늘어날수록 기본모드뿐만 아니라 다수의 고차모드가 발생하며, 이들 공명모드의 공명주파수에서 흡음성능의 피크값이 얻어지는 것을 볼 수 있다.

### 5. 결론

- 1) 본 연구에서는 다수개의 다공판으로 구성된 다중 다공판 시스템의 흡음성능을 정확하고도 쉽게 구할 수 있는 계산모델을 정립하였다.
- 2) 흡음성능은 음압진폭에 의존한다는 실험적 사실을 근거로 하여 음향레지스턴스의 조절을 통해 다공판 시스템의 흡음성능을 정확히 예측할 수 있었다.
- 3) 다공판의 수가 많아질수록 흡음성능의 피크값이 저주파대역으로 이동함과 동시에 흡음성능을

갖는 주파수대역은 크게 넓어진다. 또 공동의 수와 기본공명모드의 수는 일치한다.

- 4) 다중 다공판 시스템은 각기 다른 공극율을 갖는 다공판을 적절히 조합하고 제어하고자 하는 공명조건으로 공동깊이를 배치하게 되면 매우 탁월한 흡음성능을 발휘할 수 있다.

### 참고 문헌

- (1) Blackman, A.W., 1960, "Effect of Nonlinear Losses on the Design of Absorbers for Combustion Instabilities", ARS Journal, pp.1022~1028.
- (2) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2001, "전달행렬법에 의한 다중 다공판 흡음시스템의 흡음계수 예측", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp.653~658.
- (3) Maa, D.Y., 1987, "Microperforated Panel Wideband Absorbers", Noise Control Engineering Journal, Vol.29, Np.3, pp.77-84.
- (4) Maa, D.Y., 1998, "Potential of Microperforated Panel Absorber", J. Acoust. Soc. Am., 104(5), pp.2861~2866.
- (5) 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 and Vibration, 220(5), pp.905-920.
- (6) Shenoda, F. B., 2001, "Non-Dissipative Geometric Wide-Band Sound Absorber", 17th International Congress on Acoustics, JASA, USA
- (7) Tronchin, L., 2001, "Normal Incidence Absorption Coefficient of Rigid Perforated Screens", 17th International Congress on Acoustics, JASA, USA
- (8) Zhang, B., Ding, H. and Lang, G.S., 2001, "The Development of New Micro-Perforated Metal Panel with Wider Absorbing Band", 17th International Congress on Acoustics, JASA, USA.
- (9) Hughes, I.J. and Dowling, A.P., 1990, "The Absorption of Sound by Perforated Linings", J. Fluid Mech., Vol.218, pp.299-335.
- (10) 이동훈, 허성춘, 허성욱, 김민배, 2002, "다중 다공판 시스템의 음향임피던스와 계산모델에 관한 고찰," 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집.
- (11) Munjal, M.L., 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, Chap. 2, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (12) Rao, K.N. and Munjal, M.L., 1986, "Experimental Evaluation of Impedance of Perforates with Grazing Flow", Journal of Sound and Vibration, 108(2), pp.283~295.