

병렬 다공판 시스템의 흡음특성과 성능에 관한 연구

A Study on the Sound Absorptive Characteristics and Performance of Parallel Perforated Plate Systems

이 동 훈* · 홍 병 국* · 송 화 영* · 서 성 원**

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

(2005년 3월 17일 접수 : 2005년 8월 10일 심사완료)

Key Words : Acoustic Impedance(음향임피던스), Equivalent Electroacoustic Circuit Approach(전기음향등가 회로법), Perforated Plate System(다공판 시스템), Sound Absorption Coefficient(흡음계수)

ABSTRACT

The acoustic absorption of a multiple layer perforated plate system is very good near the resonance frequency region, while it has been regarded as a demerit that its frequency bandwidth is considerably narrow. In order to overcome such a demerit, the parallel perforated plates with different porosities are proposed. The sound absorption of such system composed of a parallel perforated plate is calculated by an equivalent electroacoustic circuit approach and validated by comparing the calculated absorption coefficients with those measured by the two-microphone impedance tube method. The sound absorptive characteristics and performance of parallel perforated plate systems are discussed from a standpoint of frequency bandwidth related with sound absorption.

1. 서 론

팬이나 압축기 그리고 연소기와 같은 각종 열유체 기기류에서 발생하는 저주파수대역의 소음을 기존의 다공성 흡음재를 사용하여 저감시키려면 두꺼운 흡음재를 필요로 한다. 이와 같은 흡음재 두께의 증가는 유효공간을 감소시키며, 아울러 비용이 증가하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 얇은 금속 판에 작은 구멍을 뚫어 만든 다공판과 공기층을 조합한 다공판 시스템이 음향연구자들의 관심을 끌고 있다.^(1~3)

다공판 시스템은 일종의 헬름홀츠 공명기로서 오래 전에 Blackman은⁽¹⁾ 로켓 그리고 제트연소에서 발생하는 강한 불연속 스크리치음(screech tone)을 감소시킬 목적으로 단일 다공판 시스템의 흡음특성에 대한 연구를 수행한 바 있다. 또한 Maa⁽²⁾ 그리고 Kang⁽³⁾ 등은 단일 다공판을 비롯한 이중 다공판 시스템의 흡음성능에 대한 한층 발전된 연구결과를 발표하였다. 그리고 최근 이중 이상인 다중 다공판 시스템의 흡음성능에 대한 다수의 연구결과도 발표되고 있다.^(4~7)

지금까지의 연구결과들을 살펴보면 다공판 시스템은 우수한 흡음성능을 갖는 대신에 흡음대역이 좁은 것이 단점이 되고 있다. 이러한 단점은 다공판의 수와 공기층 길이를 증가시키는 방법으로 보완할 수 있으나 다공판의 수와 공기층 길이를 증가시키면 기존의 다공성 흡음 시스템과 마찬가지로 유효공간이 감소하게 된다. 이에 반하여 유효공간의 감소 없이 다공판 시스템의 흡음성능을 향상시킬 수 있는 방법으

* 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

E-mail : ldh@snut.ac.kr

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

* 정희원, 서울산업대학교 에너지시스템공학과

** 서울산업대학교 기계공학과

로 공극률 변화를 들 수 있다. 그러나 공극률을 낮게 하면 높은 흡음성능을 발휘하지만 흡음대역폭이 좁아지고, 반대로 공극률을 높게 하면 흡음대역폭이 넓어지지만 흡음성능이 떨어지는 특성으로 인하여 만족할 만한 흡음성능을 얻기 어렵다.⁽⁸⁾

따라서 저자들은 다공판 시스템의 흡음대역폭 확장 과 흡음성능 향상을 위해 서로 다른 공극률을 갖는 다공판을 병렬로 조합하였을 경우의 흡음성능 변화에 관심을 가지게 되었다. 이에 이 연구에서는 하나의 다공판에 두 종류 또는 세 종류의 공극률을 갖는 병렬 다공판 시스템의 흡음특성에 대한 연구를 수행하였다. 병렬 다공판 시스템의 흡음성능은 기존 연구문헌에 포함된 전기음향상사요류를 밝혀 수정된 전기음향등가회로법⁽⁹⁾을 이용하여 계산하였으며, 계산모델의 타당성은 병렬 단일다공판 시스템과 병렬 이중다공판 시스템의 흡음계수를 계산한 결과와 측정값을 비교하여 검증하였다.

2. 실험

2.1 다공판

이 연구에서는 Fig. 1에 도시한 다공판을 이용하였

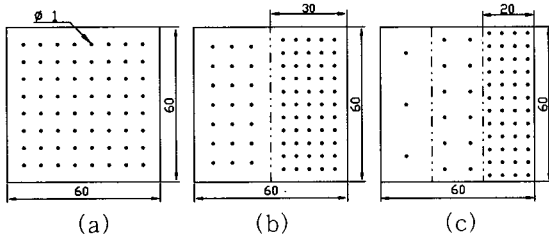


Fig. 1 Configurations of parallel perforated plates

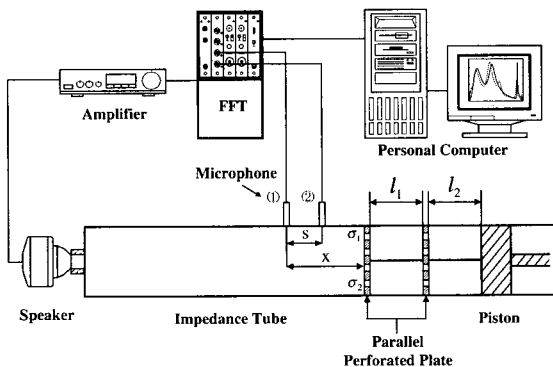


Fig. 2 Experimental set-up for normal sound absorption coefficient by impedance tube method

다. 그림 (a)는 하나의 공극률을 갖는 다공판, 그림 (b)는 서로 다른 두개의 공극률을 갖는 다공판 그리고 그림 (c)는 서로 다른 세 개의 공극률을 갖는 다공판을 나타낸다. 그림 (b)와 그림 (c)와 같이 서로 다른 공극률을 갖는 다공판을 이 연구에서는 병렬 다공판(parallel perforated plate)이라 한다.

실험에 사용한 모든 다공판은 두께 $t=1$ mm, 구멍 지름 $d=1$ mm로 하였으며, 모든 공기층 길이 $l=70$ mm이다. 또한 공극률 σ 는 최소 0.35%에서 최대 2.2%의 범위에서 제작하였다. 그리고 다공판의 재질은 일반강재이다.

2.2 측정장치

Fig. 2는 다공판 시스템이 설치된 임피던스관과 측정기기의 구성에 대한 개략도를 나타낸 것이다.

임피던스관은 두께 10 mm의 아크릴 판으로 제작하였으며 관의 단면은 가로와 세로가 60 mm×60 mm이고, 관의 길이는 1300 mm이다. 관의 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 출구측에는 시험대상체인 다공판 시스템이 설치되어 있다. 또한 출구측의 다공판 뒤에는 음의 누출이 없도록 강체피스톤으로 밀봉하였다. 측정주파수의 상한범위는 3200 Hz로 하였다. 흡음계수는 임피던스관의 두 지점에 설치된 마이크로폰간의 음향전달함수를 측정하여 계산하였다.

마이크로폰은 1/2인치 압력형 마이크로폰을 사용하였으며, 다공판 시스템으로부터 첫번째 마이크로폰까지의 거리와 두 마이크로폰의 간격은 각각 $x=100$ mm 그리고 $s=40$ mm로 하였다.

3. 관련이론

3.1 병렬 단일 다공판

Fig. 3은 병렬 단일다공판 시스템의 개략도와 이를 전기음향상사시킨 전기음향등가회로를 나타낸 것이다.

병렬 단일다공판 시스템은 Fig. 3(a)와 같이 공극률이 서로 다른 병렬 다공판과 공기층으로 구성 되어 있다. 공기층은 병렬 다공판에 의해 영역 I과 영역 II로 나누어진다. 영역 I에서의 다공판의 공극률은 σ_1 (%)이고, 영역 II에서의 다공판의 공극률은 σ_2 (%)이다. 또한 t (mm)는 다공판의 두께, d (mm)는 구멍 지름 그리고 l (mm)은 공기층의 길이이다. 영역 I과 영역 II에서 z_1 과 z_2 는 다공판의 음향임피던스이며,

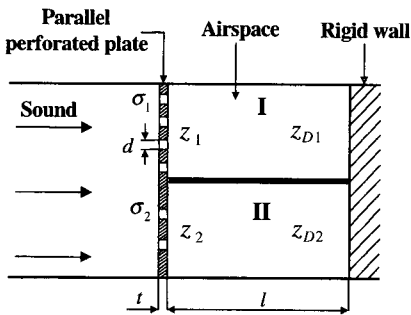
z_{D1} 과 z_{D2} 은 한쪽이 단단한 벽으로 막혀 있는 공기 층, 즉 공동의 음향임피던스이다.

병렬 다공판에 음파가 1차원 평면파로 입사된다면 Fig. 3(b)와 같은 전기음향등가회로로 나타낼 수 있다. 또 등가회로에 표기된 다공판의 음향임피던스 z_1 과 z_2 는 입사음의 파장에 비해 두께가 아주 얇으므로 직렬집중요소로 표현되는 반면에, 공동의 음향임피던스 z_{D1} 과 z_{D2} 는 병렬집중요소로 표현되어야 하지만, 공동자체가 부하측이 되기 때문에 다공판의 음향임피던스와 직렬로 연결된다. 여기서 $\rho_0 c$ 는 공기의 특성임피던스를 나타내며, $2p$ 는 판의 경계면에 충돌된 입사음의 음압크기를 의미한다. 제시된 등가회로에서 각 영역의 음향임피던스 z_1 과 z_{D1} 그리고 z_2 와 z_{D2} 는 각각 직렬로 연결되지만, 두 영역을 음의 전파경로의 관점에서 보면 Fig. 3(b)와 같이 병렬회로로 구성 된다.

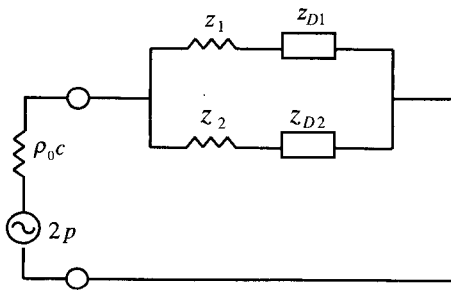
다공판의 음향임피던스 z_i 는 다음식을 사용하였다.⁽¹⁰⁾

$$z_i = [6 \times 10^{-3} + j \cdot k(t + 0.75d)] / \sigma_i \quad (1)$$

식 (1)에서 k 는 파수 그리고 $j = \sqrt{-1}$ 이다. 또한



(a) Parallel perforated plate system



(b) Electroacoustic circuit

Fig. 3 Parallel single layer perforated plate system and its equivalent electroacoustic circuit

공동의 음향임피던스 z_{Di} 는 다음식으로 계산된다.

$$z_{Di} = -j \cot(kl_i) \quad (2)$$

이와 같이 다공판과 공동의 음향임피던스가 구해지면 서로 다른 i 개의 공극률을 가진 병렬 단일다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스 z_T 는 다음식으로 구할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$z_T = \frac{1}{\frac{f_1}{(z_1 + z_{D1})} + \frac{f_2}{(z_2 + z_{D2})} + \dots + \frac{f_i}{(z_i + z_{Di})}} \quad (3)$$

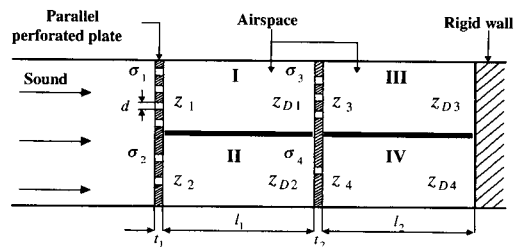
식 (3)에서 $f_1 \dots f_i$ 는 다공판 전체 면적에 대한 서로 다른 공극률을 갖는 다공판 면적의 비를 나타낸다. 식 (3)으로부터 구한 총괄표면음향임피던스를 다음 식에 대입하면 다공판 시스템의 수직입사 흡음계수 α_n 을 계산할 수 있다.

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

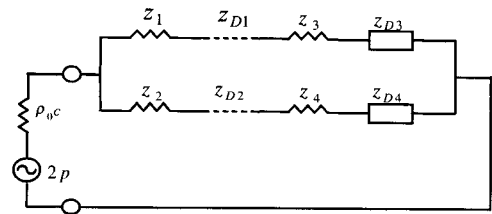
식 (4)에서 Re 와 Im 는 총괄표면음향임피던스의 실수부와 허수부를 뜻한다.

3.2 병렬 이중 다공판

Fig. 4는 서로 다른 공극률을 갖는 병렬 다공판을



(a) Parallel perforated plate system



(b) Electroacoustic circuit

Fig. 4 Parallel double layer perforated plate system and its equivalent electroacoustic circuit

이중으로 설치한 병렬 이중다공판 시스템의 개략도와 전기음향등가회로를 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)와 같이 병렬 이중다공판 시스템은 두 개의 병렬 다공판 그리고 두 개의 공기층으로 구성되어 있다. 각 영역에서 $z_1 \dots z_4$ 는 다공판의 음향임피던스를 나타낸다. 첫 번째 공기층의 영역 I과 영역 II는 양단이 개방된 직관으로 각 영역의 음향임피던스는 z_{D1} 와 z_{D2} 이며, 두 번째 공기층의 영역 III과 영역 IV는 한쪽이 막혀 있는 공동으로 각 영역의 음향임피던스는 z_{D3} 와 z_{D4} 이다. $\sigma_1 \dots \sigma_4$ (%)는 각 영역에서의 다공판의 공극률, t_1 (mm)과 t_2 (mm)는 다공판의 두께, d (mm)는 구멍지름, l_1 (mm)은 영역 I과 영역 II의 공기층 길이, l_2 (mm)은 영역 III과 영역 IV의 공기층 길이이다. 이와 같은 이중 다공판 시스템에 대한 전기음향등가회로는 Fig. 4(b)와 같이 나타낼 수 있다. 등가회로에서 영역 I과 영역 III 그리고 영역 II와 영역 IV는 서로가 직렬로 연결되지만, 두 영역을 음의 전파경로의 관점으로 보면 병렬회로로 구성된다. 직관의 음향임피던스 z_{D1} 과 z_{D2} 는 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.⁽⁹⁾

$$z_{D1} = \frac{(z_3 + z_{D3}) + j \cdot \tan(k l_1)}{1 + j \cdot (z_3 + z_{D3}) \tan(k l_1)} \quad (5a)$$

$$z_{D2} = \frac{(z_4 + z_{D4}) + j \cdot \tan(k l_1)}{1 + j \cdot (z_4 + z_{D4}) \tan(k l_1)} \quad (5b)$$

식 (5)에서 공동의 음향임피던스 z_{D3} 와 z_{D4} 는 식 (2)로 계산할 수 있다. 따라서 병렬 이중다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스 z_T 는 식 (5)를 식 (3)에 대입하여 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 병렬 단일 다공판 시스템의 흡음계수에 대한 결과를 도시한 것이다. 제시된 결과에서 그림 (a)는 각기 다른 공극률 $\sigma=0.79\%$ 와 $\sigma=1.4\%$ 을 갖는 단일 다공판과 이를 조합한 병렬 단일 다공판 시스템의 흡음계수를 계산하여 비교한 것이다.

공극률 $\sigma=0.79\%$ 인 경우는 흡음계수의 피크주파수가 $\sigma=1.4\%$ 보다 낮은 주파수에 위치하며, 공극률이 클수록 흡음계수의 피크값은 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 이들 두개의 공극률을 조합한 병렬 다공판의 흡음특성은 공극률 $\sigma=0.79\%$ 인 다공판의 흡

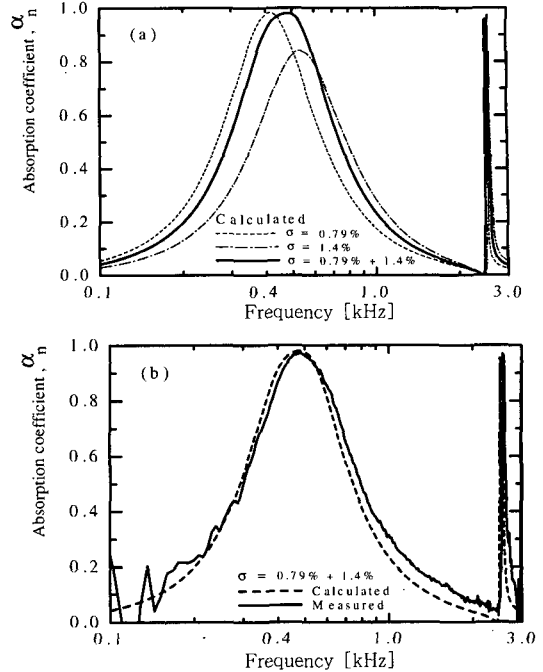


Fig. 5 Measured and calculated absorption coefficients for a parallel single layer perforated plate system with porosities of $\sigma=0.79\%$ and $\sigma=1.4\%$

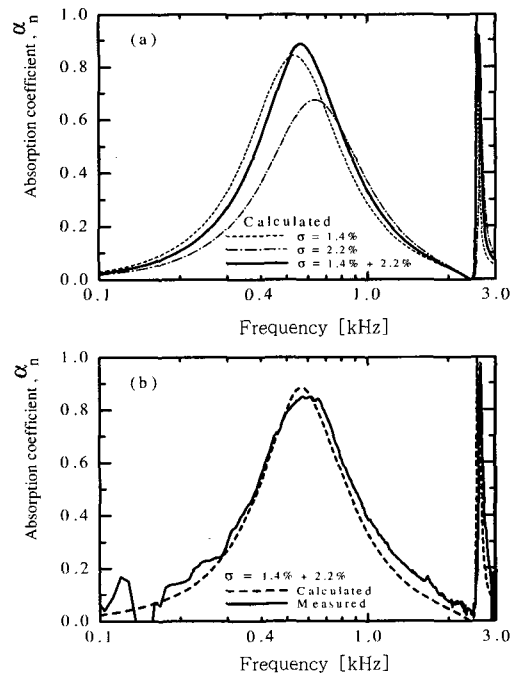


Fig. 6 Measured and calculated absorption coefficients for a parallel single layer perforated plate system with porosities of $\sigma=1.4\%$ and $\sigma=2.2\%$

흡음능을 따르는 경향을 보이며, 흡음대역폭이 확장된 것을 볼 수 있다. 또한 피크주파수는 공극률 $\sigma = 0.79\%$ 와 $\sigma = 1.4\%$ 사이에 위치한다. Fig. 5(b)는 두개의 공극률이 조합된 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수를 계산하여 측정결과와 비교한 것이다. 도시된 결과에서 계산결과와 측정결과는 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 결과에서와 같이 두개의 공극률로 조합한 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수에 대한 계산결과와 측정결과를 비교 도시한 것이다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)의 결과를 보면 Fig. 5의 결과에서 고찰한 것과 같이 두개의 공극률을 조합한 경우의 흡음

특성은 주로 낮은 공극률을 갖는 다공판과 유사한 흡음성능을 가지면서 흡음대역폭이 확장되는 특성을 나타낸다.

Fig. 7은 서로 다른 세 개의 공극률을 조합한 병렬 단일 다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. Fig. 7(a)는 각기 다른 공극률을 갖는 단일 다공판과 서로 다른 세 개의 공극률을 조합한 병렬 단일 다공판 시스템의 흡음계수를 계산하여 비교한 것이다. Fig. 7(a)의 결과에서 다공판 시스템의 공극률을 단일로 하는 것 보다 서로 다른 세 개의 공극률로 조합하는 것이 우수한 흡음성능을 나타내고 있다. 이때 흡음성능은 공극률 면적이 큰 쪽에 의존하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)는 다공판의 면적을 삼등분하여 가운데 부분을 공극률 $\sigma = 0.79\%$ 로 배치하고 양쪽 두 부분을 공극률 $\sigma = 1.77\%$ 로 조합한 다공판 시스템의 흡음계수를 계산하여 측정과 비교한 것이다. 흡음계수의 피크값은 공극률 $\sigma = 1.77\%$ 의 단일 공극률 다공판 시스템의 흡음계수 보다 높아 졌으며, 흡음대역폭도 넓어진 것을 알 수 있다. Fig. 7(c)는 가운데 부분을 공극률 $\sigma = 1.77\%$ 로 배치하고 양쪽

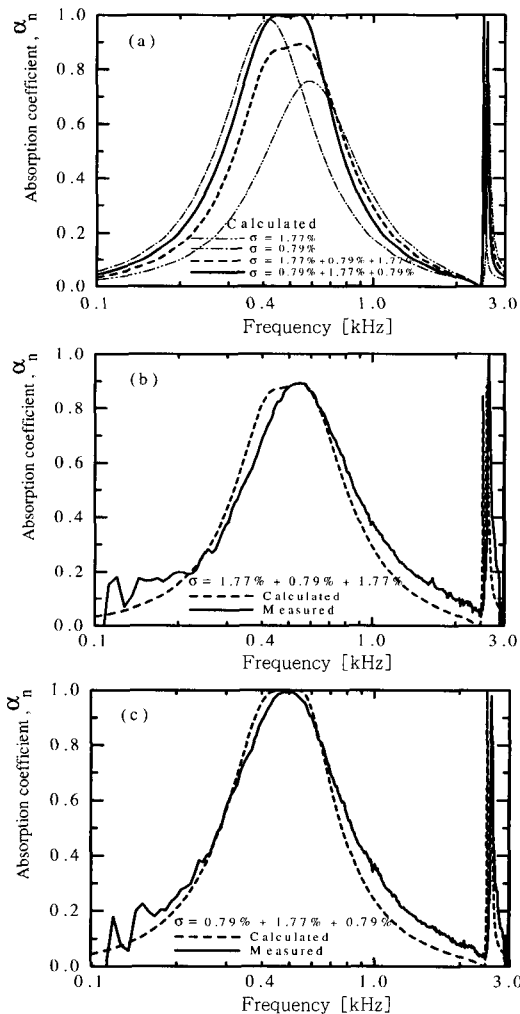


Fig. 7 Measured and calculated absorption coefficients for a parallel single layer perforated plate system with porosities of $\sigma = 0.79\%$ and $\sigma = 1.77\%$

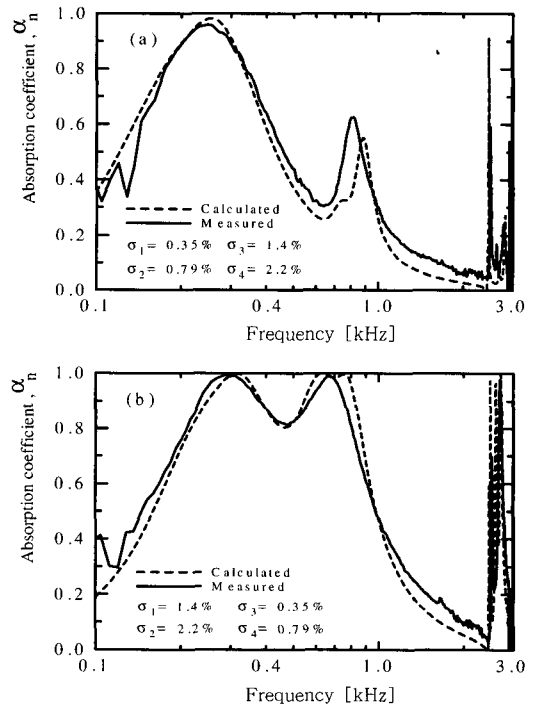


Fig. 8 Measured and calculated absorption coefficients for a parallel double layer perforated plate systems

두 부분을 공극률 $\sigma=0.79\%$ 로 조합한 다공판 시스템의 결과이다. 흡음성능은 단일 공극률 $\sigma=0.79\%$ 인 다공판 시스템 보다 흡음대역폭이 더욱 넓어졌으며, 피크주파수가 고주파수쪽으로 이동하였다. 또한 제시된 계산결과와 측정결과는 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)의 결과를 비교해보면 서로 다른 세 개의 공극률로 조합시킨 다공판 시스템의 경우, 가운데 부분을 높은 공극률로 조합하는 것이 더욱 좋은 흡음성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 서로 다른 두 개의 공극률을 갖는 병렬 다공판을 이중으로 설치한 병렬 이중다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다.

Fig. 8(a)는 공극률 $\sigma_1=0.35\%$, $\sigma_2=0.79\%$ 가 조합된 병렬다공판이 음원쪽에 위치한 경우이다. 제시된 결과에서 계산결과와 측정결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 두개의 공기층에 의해 두개의 흡음계수 피크가 나타나고 있다. 시스템의 흡음계수는 첫 번째 피크에서 높은 흡음성능을 보이고, 두 번째 피크의 흡음성능은 낮은 흡음성능을 보인다. 반면에 공극률 $\sigma_1=1.4\%$, $\sigma_2=2.2\%$ 가 조합된 병렬다공판이 음원쪽에 위치한 Fig. 8(b)의 경우는 다른 형태를 보이고 있다. 흡음계수의 첫 번째 피크는 높은 흡음성능을 가지며, 두 번째 피크의 피크값도 매우 높아진다. 그리고 Fig. 8(a)의 결과와 비교해 보면 흡음대역폭이 전체적으로 넓어진 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

(1) 두 종류의 서로 다른 공극률로 조합된 병렬 단일다공판 시스템의 흡음특성은 하나의 낮은 공극률로 구성된 다공판 시스템의 흡음성능과 유사한 반면에, 흡음대역폭이 확장되는 특성을 보여 주었다.

(2) 병렬 이중다공판 시스템의 경우는 낮은 공극률로 조합된 병렬다공판을 음원쪽에 배치한 경우보다 높은 공극률로 조합된 병렬다공판을 음원쪽에 배치하는 경우가 흡음성능이 더 우수하였다.

(3) 전기음향등가회로를 이용하여 병렬다공판 시스템의 흡음성능을 계산한 결과는 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) Maa, D. Y., 1998, "Potential of Micro-perforated Panel Absorbers", J. Acoust. Soc. Am., 104(5), pp. 2861~2866.

(3) 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.

(4) Shenoda, F. B., 2001, "Non-Dissipative Geometric Wide-Bend Sound Absorber", 17th International Congress on Acoustics, JASA, USA

(5) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음성능에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 688~693.

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

(7) 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.

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

(9) 이동훈, 권영필, 2003, "다중 다공판 시스템에서 직관요소에 대한 전기음향등가회로법의 오류", 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 3 호, pp. 180~185.

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

(11) 허성춘, 임정빈, 노승남, 이동훈, 2002, "병렬 다공판 시스템의 흡음성능에 관한 연구", 기계의 날선포 및 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄(한국소음진동공학회)논문집, pp. 902~907.