

# 병렬 다공판 시스템의 흡음성능에 관한 연구

## A Study on the Sound Absorbing Performance of Parallel Perforated Plate Systems

허성춘\*·임정빈\*\*·노승남\*\*\*·이동훈\*\*\*  
Sung-Chun Hur, Jung-Bin Lim, Sing-Nam Ro and Dong-Hoon Lee

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

### ABSTRACT

An equivalent electroacoustic circuit approach of estimating the sound absorption coefficient for parallel perforated plate system is proposed. The proposed approach is validated by comparing the calculated absorption coefficients of a parallel single layer perforated plate system with the values measured by the two-microphone impedance tube method for various porosity and the number of perforated plate. The sound absorbing performances of parallel and series perforated plate systems are compared and discussed from a standpoint of frequency bandwidth with sound absorption. The proposed approach is further extended to the parallel double layer perforated plate system.

## 1. 서론

헬이나 압축기 그리고 연소기와 같은 각종 열 유체기기류에서 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 공간을 조합한 다공판 시스템이 음향 연구자들의 관심을 끌고 있다.<sup>(1-3)</sup>

다공판 시스템은 일종의 헬름홀츠 공명기로서 오래전에 Blackman 은<sup>(1)</sup> 로켓 그리고 제트연소기에서 발생하는 강력한 세기의 불연속 스크리치음 (screech tone)을 감소시킬 목적으로 단일 다공판 시스템의 흡음특성에 대한 연구를 수행한 바 있다. 또한 Maa<sup>(2)</sup> 그리고 Kang<sup>(3)</sup> 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.<sup>(4-6)</sup>

지금까지의 연구결과들을 살펴보면 단일 다공판 시스템의 흡음성능은 좁은 주파수대역에서만 우수한 흡음성능을 나타내는 흡음특성을 보이고 있다. 이러한 단점은 다공판의 수와 공간길이를

증가시키는 방법으로 보완할 수 있다. 하지만 다공판의 수와 공간길이를 증가시키면 기존의 다공성 흡음재와 마찬가지로 유효공간이 감소하게 된다. 이에 반하여 유효공간의 감소 없이 다공판 시스템의 흡음성능을 향상시킬 수 있는 방법으로 공극율 변화를 들 수 있다. 그러나 공극율을 낮게 하면 높은 흡음성능을 발휘하지만 흡음대역폭이 좁아지고, 반대로 공극율을 높게 하면 흡음대역폭이 넓어지지만 흡음성능이 낮아지는 흡음특성<sup>(6)</sup>으로 인하여 만족할만한 흡음성능을 얻기 어렵다.

따라서 저자들은 다공판 시스템의 흡음대역폭 확장과 흡음성능 향상을 위해 서로 다른 공극율을 병렬로 조합하였을 경우의 흡음성능 변화에 관심을 가지게 되었다. 이에 본 연구에서는 하나의 다공판에 두 종류 또는 세 종류의 공극율을 갖는 병렬다공판 시스템의 흡음특성에 대한 연구를 수행하고자 한다. 병렬다공판 시스템의 흡음성능은 전기음향등가회로법을 이용하여 계산하였으며 계산 모델의 타당성은 병렬 단일다공판 시스템과 병렬 이중다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정하여 상호비교를 통해 검증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 다공판

본 연구에서는 Fig. 1 에 도시된 다공판을 이용하였다. 그림 (a)는 하나의 공극율을 갖는 다공판 그림 (b)는 서로 다른 두개의 공극율을 갖는 다공판, 그림 (c)는 서로 다른 세 개의 공극율을 갖는 다공판을 나타낸다. 그림 (b)와 그림 (c)의 그

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

\*\* 유니슨 기술연구소

\*\*\* 서울산업대학교 기계공학과

림처럼 서로 다른 공극율을 갖는 다공판을 본 연구에서는 병렬다공판(parallel perforated plate)이라 한다.

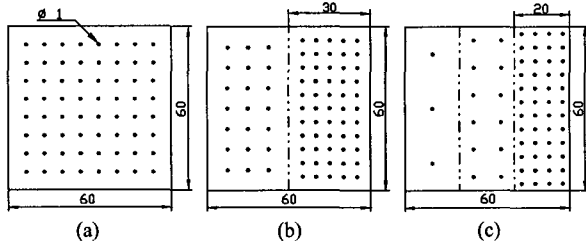


Fig. 1 Configurations of series and parallel perforated plates.

실험에 사용된 모든 다공판은 두께  $t=1$  mm, 구멍지름  $d=1$  mm 로 하였으며, 모든 공간길이  $l=70$  mm 이다. 또한 공극율  $\sigma$ 는 최소 0.35%에서 최대 2.2%까지의 범위내에서 제작하였다. 그리고 다공판의 재질은 일반강재이다.

2.2 측정장치

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

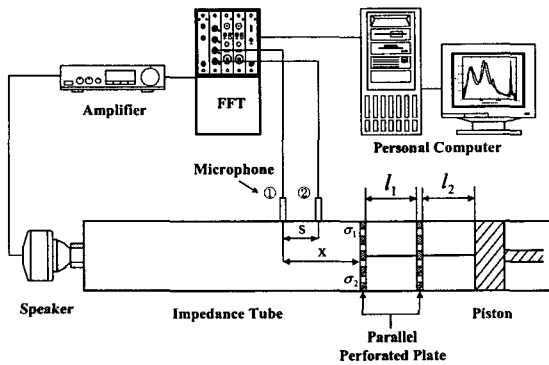


Fig. 2 Experimental setup for sound absorption coefficient measurement.

임피던스관은 두께 10mm 의 아크릴 판으로 제작하였으며 판의 단면은 가로와 세로가 60mm x 60mm 이고, 판의 길이는 1300mm 이다. 판의 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 출구측에는 시험대상체인 다공판 시스템이 설치되어 있다. 또한 출구측의 다공판 뒤에는 음의 누출이 없도록 강체피스톤으로 밀봉하였다. 측정주파수의 상한범위는 3200Hz 로 하였다. 흡음계수는 임피던스관

의 두지점에 설치된 마이크로폰간의 음향전달함수를 측정하여 계산하였다.

마이크로폰은 1/4인치 압력형 마이크로폰을 사용하였으며, 다공판 시스템으로부터 첫번째 마이크로폰까지의 거리와 두 마이크로폰의 간격은 각각  $x=100$ mm 그리고  $s=40$ mm 로 하였다.

3. 관련이론

3.1 단일 다공판

Fig. 3 은 병렬 단일다공판 시스템의 개략도와 이에 상응하는 전기음향등가회로를 나타낸 것이다.

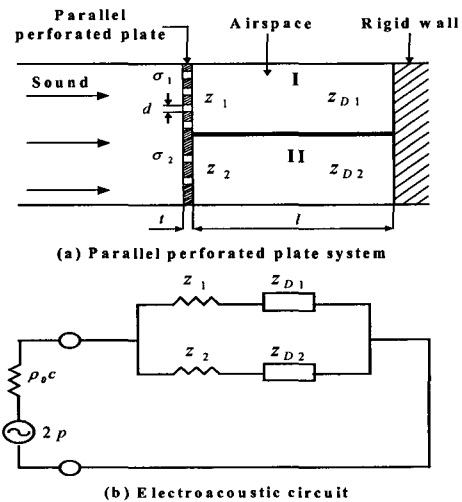


Fig. 3 The parallel single layer perforated plate system and its equivalent electroacoustic circuit.

병렬 단일다공판 시스템은 그림 (a)와 같이 병렬 다공판과 공기층으로 구성 되어 있다. 공기층은 병렬다공판에 의해 영역 I 과 영역 II 로 나누어진다. 영역 I 에서의 다공판의 공극율은  $\sigma_1$  (%) 이고, 영역 II 에서의 다공판의 공극율은  $\sigma_2$  (%) 이다. 또한  $t$  (mm)는 다공판의 두께,  $d$  (mm)는 구멍지름 그리고  $l$  (mm)은 공기층의 길이이다. 영역 I 과 영역 II 에서  $z_1$  과  $z_2$  는 다공판의 음향임피던스이며,  $z_{D1}$  과  $z_{D2}$  은 한쪽이 단단한 벽으로 막혀 있는 공기층, 즉 공동의 음향임피던스이다.

그림 (b)는 병렬 단일다공판 시스템을 전기음향등가회로로 나타낸 것이다. 등가회로에 표기된 다공판의 음향임피던스  $z_1$  과  $z_2$  는 입사음의 파장에 비해 두께가 아주 얇으므로 직렬집중요소로 표

현되는 반면에, 공동의 음향임피던스  $z_{D1}$  과  $z_{D2}$  는 병렬직중요소로 표현되어야 하지만 공동자체가 부하측이 되기 때문에 다공판의 음향임피던스와 직렬로 연결된다. 또한  $\rho_0 c$  는 공기의 특성임피던스를 나타내며,  $2p$  는 판의 경계면상에 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 관점으로 보면 그림 (b)와 같이 병렬회로로 구성 된다.

다공판의 음향임피던스  $z_i$  는 다음식을 사용하였다.<sup>(8)</sup>

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

식 (1)에서  $k$  는 파수 그리고  $j = \sqrt{-1}$  이다. 또한 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 공극율을 가진 단일 병렬 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스  $z_T$  는 다음식으로 구할 수 있다.

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

식 (3)에서  $f_1 \dots f_i$  는 다공판 전체 면적에 대한 서로 다른 공극율을 갖는 다공판 면적의 비를 나타낸다. 또한 식 (3)으로부터 구한 총괄표면음향임피던스를 이용하여 다공판 시스템의 수직입사 흡음계수  $\alpha_n$  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  $\operatorname{Re}$  와  $\operatorname{Im}$  는 총괄표면음향임피던스의 실수부와 허수부를 뜻한다.

### 3.2 이중 다공판

Fig. 4 는 서로 다른 공극율을 갖는 병렬 다공

판을 이중으로 설치한 병렬 이중다공판 시스템의 개략도와 전기음향등가회로를 나타낸 것이다.

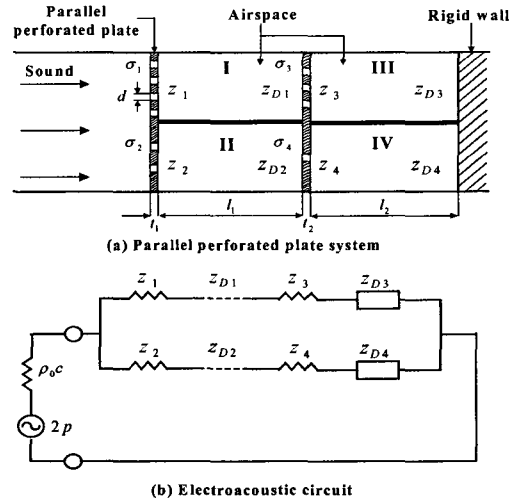


Fig. 4 The parallel double layer perforated plate system and its equivalent electroacoustic circuit.

그림 (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 I 과 영역 II 는 양단이 개방된 직관으로 각 영역의 음향임피던스는  $z_{D1}$  와  $z_{D2}$  이며, 두 번째 공기층의 영역 III 과 영역 IV 는 한쪽이 막혀 있는 공동으로 각 영역의 음향임피던스는  $z_{D3}$  와  $z_{D4}$  이다.  $\sigma_1 \dots \sigma_4$  (%)는 각 영역에서의 다공판의 공극율,  $t_1$  (mm)과  $t_2$  (mm)는 다공판의 두께,  $d$  (mm)는 구멍지름,  $l_1$  (mm)은 영역 I 과 영역 II 의 공기층 길이,  $l_2$  (mm)은 영역 III 과 영역 IV 의 공기층 길이이다. 이와 같은 이중 다공판 시스템에 대한 전기음향등가회로는 그림 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 등가회로에서 영역 I 과 영역 III 그리고 영역 II 와 영역 IV 는 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.<sup>(7)</sup>

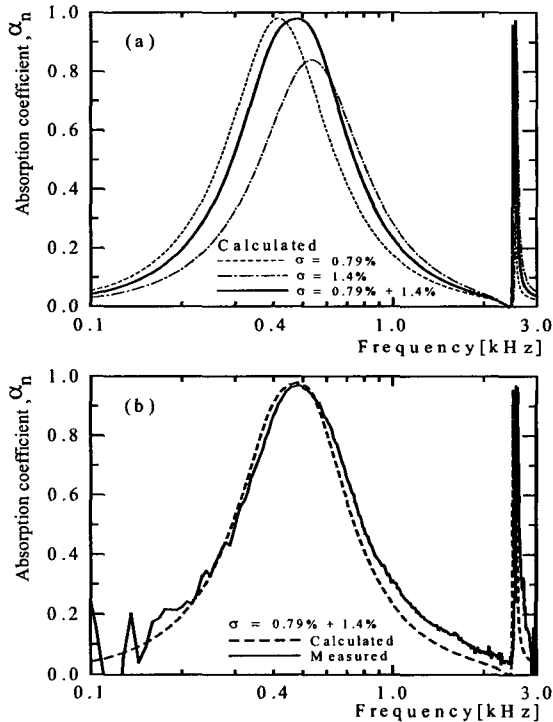
$$z_{D1} = \frac{(z_3 + z_{D3}) + j \cdot \tan(kl_1)}{1 + j \cdot (z_3 + z_{D3}) \tan(kl_1)} \quad (5a)$$

$$z_{D2} = \frac{(z_4 + z_{D4}) + j \cdot \tan(kl_1)}{1 + j \cdot (z_4 + z_{D4}) \tan(kl_1)} \quad (5b)$$

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

#### 4. 결과 및 고찰

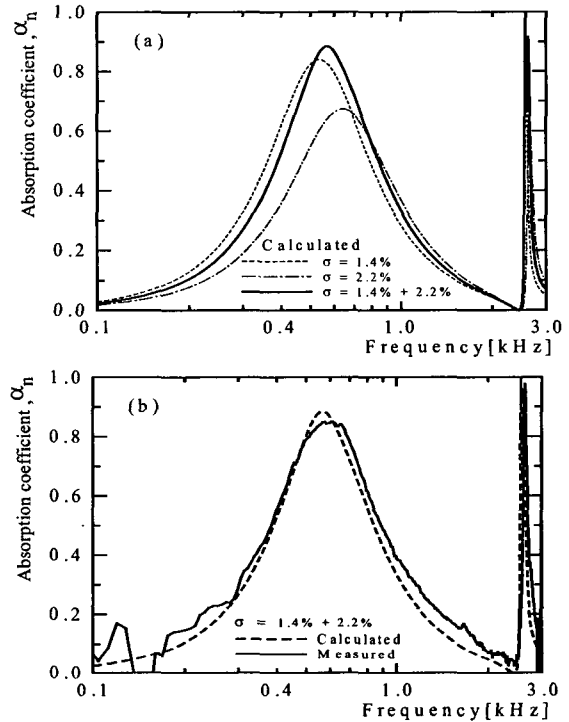
Fig. 5은 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수에 대한 결과를 도시한 것이다. 제시된 결과에서 그림 (a)는 하나의 공극율  $\sigma = 0.79\%$ 와  $\sigma = 1.4\%$ 을 갖는 다공판과 서로 다른 두개의 공극율을 조합한 병렬다공판 시스템의 흡음계수를 계산하여 비교한 것이다.



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

공극율  $\sigma = 0.79\%$ 인 경우는 흡음계수의 피크주파수가  $\sigma = 1.4\%$ 보다 낮은 주파수에 위치하며, 공극율이 클수록 흡음계수의 피크값은 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 이들 두개의 공극율을 조합한 병렬 다공판의 흡음특성은 공극율  $\sigma = 0.79\%$ 인 다공판의 흡음성능을 따르는 경향을 보이며, 다소 개선된 흡음성능을 보인다. 또한 피크주파수는 공극율  $\sigma = 0.79\%$ 와  $\sigma = 1.4\%$ 사

이에 위치한다. 그림 (b)는 두개의 공극율이 조합된 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수를 계산하여 측정결과와 비교한 것이다. 도시된 결과에서 계산결과와 측정결과는 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

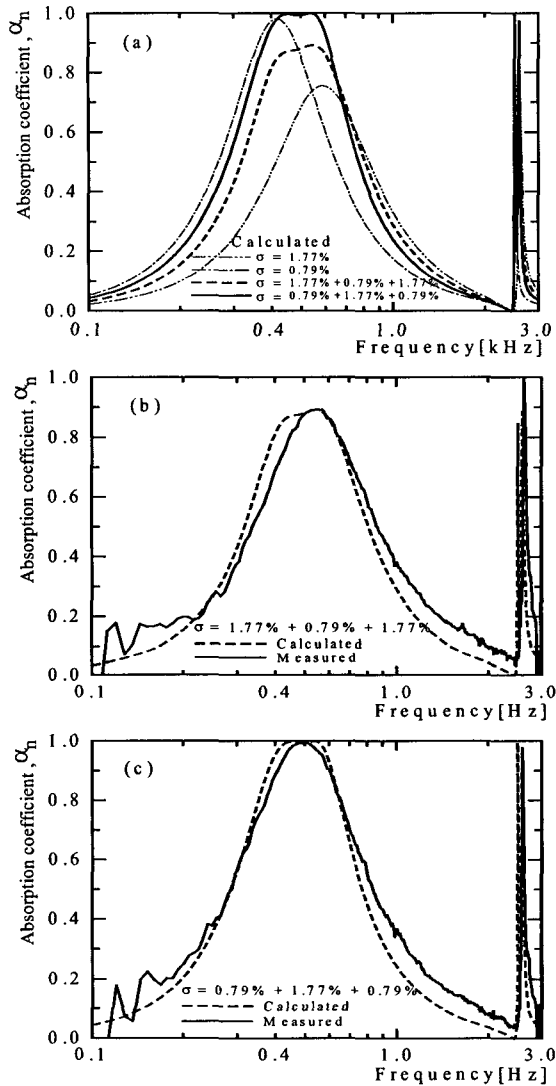


**Fig. 6** Measured and calculated absorption coefficients for the series and parallel single layer perforated plate system with porosity of  $\sigma = 1.4\%$  and  $\sigma = 2.2\%$ .

Fig. 6는 Fig. 5의 결과에서와 같이 두개의 공극율로 조합한 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수를 계산과 측정하여 비교 도시한 것이다. 그림 (a)와 그림 (b)의 결과를 보면 Fig. 5의 결과에서 고찰한 것과 같이 두개의 공극율을 조합한 경우의 흡음특성은 주로 낮은 공극율의 흡음성능에 영향을 받는다.

Fig. 7는 서로 다른 세 개의 공극율을 조합한 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정한 결과이다. 그림 (a)는 하나의 공극율을 갖는 다공판과 서로 다른 세 개의 공극율을 갖는 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수를 계산하여 비교한 것이다. 그림 (a)의 결과에서 다공판 시스템의 공극율을 단일로 하는 것 보다 서로 다른 세 개의 공극율로 조합하는 것이 우수한 흡음성능을 나타내고 있다. 이때 흡음성능은 보다 많은 면적

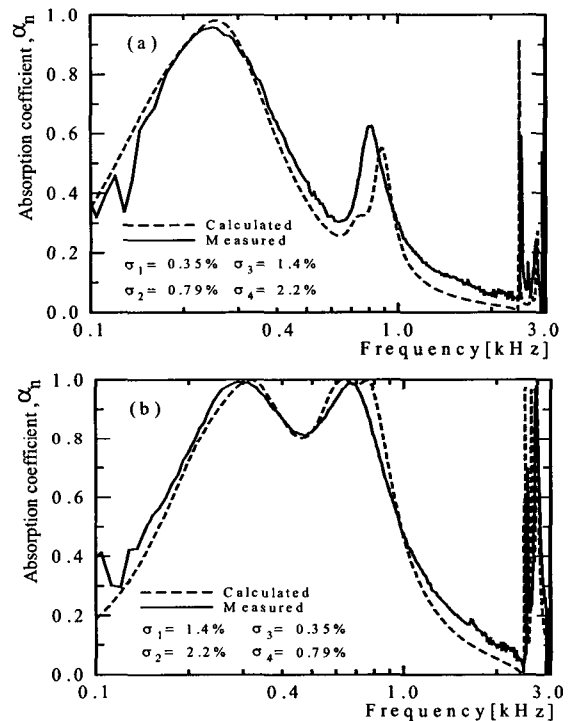
을 가진 공극율에 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 그림 (b)는 다공판의 면적을 삼등분하여 가운데 부분을 공극율  $\sigma=0.79\%$ 로 배치하고 양쪽 두 부분을 공극율  $\sigma=1.77\%$ 로 조합한 다공판 시스템의 흡음계수를 계산하여 측정과 비교한 것이다.



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

흡음계수의 피크값은 공극율  $\sigma=1.77\%$ 의 단일 공극율 다공판 시스템의 흡음계수 보다 높아졌으며, 흡음대역폭도 넓어진다. 그림 (c)는 가운데 부분을 공극율  $\sigma=1.77\%$ 로 배치하고 양쪽 두 부분을 공극율  $\sigma=0.79\%$ 로 조합한 다공판 시스템의 결과이다. 흡음성능은 단일 공극율  $\sigma=0.79\%$

의 다공판 시스템 보다 흡음대역폭이 더욱 넓어졌으며, 피크주파수가 고주파수쪽으로 이동하였다. 또한 제시된 계산결과와 측정결과는 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 (b)와 그림 (c)의 결과를 비교해보면 서로 다른 세 개의 공극율을 조합할 경우 가운데 부분을 높은 공극율로 조합하는 것이 더욱 좋은 흡음성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 제시된 결과에서 다공판 시스템의 흡음성능은 단일 공극율의 다공판 보다는 다중 공극율로 조합한 병렬다공판을 사용하는 것이 흡음성능을 향상시킬 수 있음을 확인 하였다.



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

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

그림 (a)는 공극율  $\sigma_1=0.35\%$ ,  $\sigma_2=0.79\%$ 가 조합된 병렬다공판이 음원쪽에 위치한 경우이다. 제시된 결과에서 계산결과와 측정결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 두개의 다공판에 의해 두개의 흡음계수 피크가 나타나고 있다. 시스템의 흡음계수는 첫 번째 피크에서 높은 흡음특성을 보이고, 두 번째 피크의 흡음성능은 낮은 흡음특성을 보인다. 반면에 공극율  $\sigma_1=1.4\%$ ,  $\sigma_2=2.2\%$ 가 조합

된 병렬다공판이 음원쪽에 위치한 그림 (b)의 경우는 다른 형태를 보이고 있다. 흡음계수의 첫 번째 피크는 높은 흡음성능을 가지며, 두 번째 피크의 피크값도 매우 높아진다. 그리고 그림 (a)의 결과와 비교해 보면 우수한 성능의 흡음대역폭이 전체적으로 넓어진 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

- 1) 작은 공극율과 큰 공극율로 구성된 병렬 단일 다공판 시스템의 흡음성능은 작은 공극율만을 갖는 단일 다공판 시스템의 흡음성능을 따르며, 흡음대역폭도 다소 넓어지는 특성이 있음을 확인하였다.
- 2) 병렬 이중다공판 시스템의 경우는 낮은 공극율로 조합된 병렬다공판을 음원쪽에 배치한 경우보다 높은 공극율로 조합된 병렬다공판을 음원쪽에 배치한 경우가 더욱 향상된 흡음성능을 나타내었다.
- 3) 병렬다공판 시스템의 흡음성능을 예측할 수 있는 전기음향등가회로를 수립하였다. 또한 등가회로를 이용하여 계산한 결과는 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) Maa, D.Y., 1998, "Potential of Microperforated 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*, 220(5), pp.905~920.
- (4) Shenoda, F.B., 2001, "Non-Dissipative Geometric Wide-Band Sound Absorber", 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, JASA, USA
- (5) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음성능에 관한 연구", *대한기계학회 춘계학술대회 논문집*, pp.688~693
- (6) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델 개발", *한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집*, pp.877~882
- (7) 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음계수 계산에 있어서 전기음향등가회로법의 오류", *한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집*.
- (8) Munjal, M.L., 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, Chap.2, John Wiley & Son, Inc., New York.