

전달행렬법에 의한 다중 다공판 흡음시스템의 흡음계수 예측 Prediction of the Sound Absorption Coefficient for Multiple Perforated-Plate Sound Absorbing System by Transfer Matrix Method

허성춘*·이동훈**·권영필***

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

Key Words : Absorption Coefficient(흡음계수), Characteristic Impedance(특성임피던스), Perforated Plate(다공판), Porosity(공극율), Sound Absorbing Material(흡음재), Transfer Matrix Method(전달행렬법)

ABSTRACT

In this study, a new practical method of predicting the sound absorption coefficient for multiple perforated-plate sound absorbing system was developed using transfer matrix method. In order to validate the proposed method, the absorption coefficients calculated by transfer matrix method for single perforated plate were first compared with the absorption coefficients measured by SWR method according to different porosity, hole diameter, and thickness of the perforated plate. Based on the comparison results, transfer matrix method was further applied to double and triple perforated plates to evaluate the absorption coefficients. The experimental results showed that the absorption coefficients from transfer matrix method generally agreed well with the corresponding absorption coefficients from SWR method. However, due to the limitations of the impedance model used in this study, the measured values were differed with the calculated values for small porosity, hole diameter, and thickness in size of the perforated plate indicating the need of impedance model development for multiple perforated-plate sound absorbing system covering wide ranges of porosity, hole diameter, and thickness of the perforated plate.

1. 서론

소음방지를 목적으로 흡음재가 널리 쓰이고 있으며, 대표적인 것으로 유리섬유와 폴리우레탄 폼을 들 수 있다. 이들 흡음재는 음에너지의 소산을 촉진시키기 위하여 내부구조가 다공형태이거나 복잡한 음파경로를 갖도록 설계되어 있으며⁽¹⁾ 탁월한 흡음성능을 지니고 있다.

그러나 이들 흡음재는 탁월한 흡음성능에도 불구하고 소재의 원천적인 특성때문에 적용범위에 상당한 제약을 받고 있다. 예를 들면 유리섬유 흡음재의 경우는 비산문제 때문에 환경공해 차원에서 법적으로 사용을 규제하고 있으며, 내구성과 내습성이 약한 단점도 있다. 또한 유리섬유 흡음재만큼이나 흡음성능이 뛰어난 폴리우레탄 폼은 화재와 습기에 취약하기 때문에 안전성 측면에서 밀폐된 공간에서의 사용을 금하고 있다. 따라서 기존 흡음재의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 형태의 흡음재에 관한 연구와 개발이 절실히 요청되고 있다.

한편 이러한 기존 흡음재의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 얇은 판에 미세한 구멍을 뚫어 만

든 다공판과 공동(cavity)을 조합한 이중 다공판 흡음시스템이 Maa⁽²⁾에 의해서 처음으로 제안되었다. 그리고 Maa의 연구보다 훨씬 이전에 Blackman⁽³⁾은 로켓, 램제트(ramjet) 그리고 터보제트에 쓰이는 연소기에서 연소불안정성으로 발생하는 강력한 세기의 불연속 스크리치음(screech tone)을 감소시킬 목적으로 단일 공동과 단일 다공판을 조합한 일종의 공명형 흡음시스템에 대한 연구결과를 발표한 바 있다. 그러나 지금까지 발표된 대부분의 연구는 다공판 임피던스에 대한 해석모형을 이용하여 단일 다공판 흡음시스템의 흡음계수를 구하거나,^(3,4) 다공판 임피던스에 대한 경험근사식과 전기음향회로 유사(electro-acoustic analogy)를 통하여 이중 다공판 흡음시스템의 흡음계수를 구하는 정도였다.^(2,5,6) 3중이상인 다중 다공판 흡음시스템에 대한 흡음성능을 평가한 연구결과는 지금까지 발표된 바 없다. 이것은 다공판의 수가 3개 이상으로 되면 지금까지 발표된 연구문헌의 계산방법으로는 다공판 흡음시스템의 흡음계수를 구하기가 매우 어렵기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 단일 다공판을 비롯한 2개이상의 다공판으로 구성된 다중 다공판 흡음시스템의 흡음계수를 보다 빠르고 간편하게 계산할 수 있는 일반화된 계산모델 정립을 연구목표로 하였다. 본 연구에서 정립한 계산모델의 핵심은 전달행렬법⁽⁷⁾이며, 전달행렬법의 타당성은 먼저 단일

* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과
** 서울산업대학교 기계공학과
E-mail : Ldh@duck.snut.ac.kr, Tel : 02-970-6331
*** 숭실대학교 기계공학과

다공판 흡음시스템에 대하여 다공판의 구멍지름, 두께 그리고 공극율을 변화시키면서 계산한 흡음계수와 정재파법(SWR method)으로 측정된 흡음계수와의 비교를 통하여 검증하였다. 또 이 검증결과를 토대로 하여 전달행렬 요소를 이중과 삼중 다공판 흡음시스템으로 확장하여 흡음계수를 계산하고 측정결과와 비교하였다. 다공판에 대한 임피던스모델은 소음기의 성능평가에 오래전부터 쓰여 왔던 Rao 와 Munjal⁽⁸⁾이 개발한 모델을 이용하였다.

2. 계산모델

일차원 음향계를 구성하는 각 음향요소의 특성은 Fig. 1 에 도시된 바와 같이 전달행렬 요소인 4 단자 정수로 표현할 수 있다.

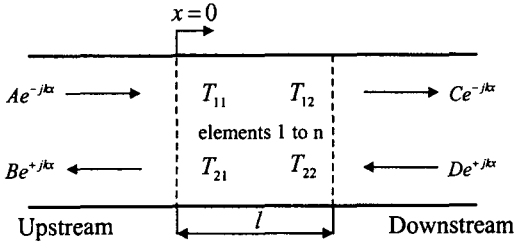


Fig. 1 Four-pole parameters of an acoustic system.

Fig. 1 과 같이 요소 1 부터 요소 n 개로 구성되어 있는 길이 l 인 음향요소에 대한 4 단자 정수는 음향요소의 상류측과 하류측의 음압 p 와 입자속도 u 를 이용하여 다음과 같은 전달행렬 $[T]$ 의 형태로 쓸 수 있다.

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

Fig. 1 에서 A 와 B 는 음향요소 상류측에서의 입사음과 반사음의 음압진폭을 그리고 C 와 D 는 음향요소 하류측에서의 투과음과 반사음의 음압진폭을 나타낸다. 또한 이들 음압진폭을 이용하여 길이 l 인 음향요소의 상류측과 하류측에서의 음압과 입자속도를 표현하면 각각 다음식과 같다.

$$p_1 = A + B \quad (2a)$$

$$u_1 = \frac{A - B}{\rho_0 c} \quad (2b)$$

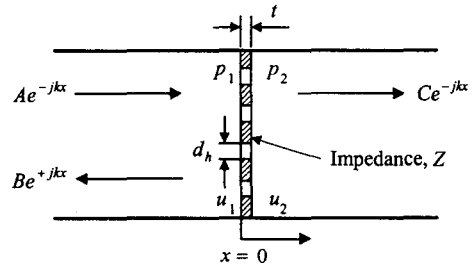
$$p_n = Ce^{-jkl} + De^{jkl} \quad (2c)$$

$$u_n = \frac{Ce^{-jkl} - De^{jkl}}{\rho_0 c} \quad (2d)$$

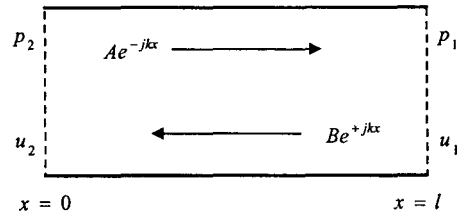
식 (2)에서 ρ_0 와 c 는 매질의 밀도와 음속, k 는 파동수 그리고 $j = \sqrt{-1}$ 을 의미한다. 또 식 (2)에서 음향요소의 하류단을 무반사단 ($D \equiv 0$) 으로 가정하고, $x=0$ 에서 정의된 반사계수 $R = B/A$ 와 투과계수 $T = C/A$ 로 정리하여 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 전달행렬요소로 표현된 반사계수 R 을 구할 수 있다.

$$R = \frac{T_{11} + T_{12} - T_{21} - T_{22}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \quad (3)$$

한편 본 연구의 다중 다공판 흡음시스템은 Fig. 2 에 도시된 바와 같이 다공판과 음향매질인 공기로 충전되어 있는 직관요소로 구성된다.



(a) Perforated plate



(b) Straight pipe

Fig. 2 Sound field representations for perforated plate and straight pipe.

먼저 Fig. 2 의 그림 (a)에 도시된 다공판에 대한 전달행렬 $[P]$ 를 구하면 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)에서 Z 는 다공판의 특성임피던스로서 본 연구에서는 Rao 와 Munjal 의 임피던스 모델을 사용하였다.

$$Z = (7.337 \times 10^{-3})/\sigma + j(2.2245 \times 10^{-5} f(1 + 51t)(1 + 204d_h))/\sigma \quad (5)$$

식 (5)에서 σ 는 공극율, f 는 주파수(Hz), t 는 다공판의 두께(m), d_h 는 구멍지름(m)을 나타낸다. 또한 Fig. 2의 그림 (b)에 도시된 직관에 대한 전달행렬[S]는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & (j\rho_0 c)\sin kl \\ (j/\rho_0 c)\sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 Fig. 3에 도시된 다중 다공판 흡음시스템에 대한 전달행렬은 다공판과 직관에 대한 전달행렬을 조합하여 구할 수 있다.

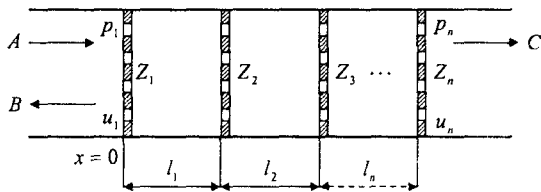


Fig. 3 Configuration of the multiple perforated plates sound absorbing system.

다공판과 직관에 대한 전달행렬에 관한 식 (4)와 식 (6)을 이용하여 n 개의 다공판과 $n-1$ 개의 직관요소로 구성된 다중 다공판 흡음시스템의 총 전달행렬 [T]를 구하면 다음과 같다.

$$[T] = [P]_1 \cdot [S]_2 \cdot [P]_3 \cdots [S]_{n-1} \cdot [P]_n \quad (7)$$

다중 다공판 흡음시스템에 대한 흡음율을 측정하고 계산하기 위해서는 하류단이 단단히 막혀 있는 조건이어야 하므로 Fig. 3에 도시된 하류측 다공판의 임피던스인 Z_n 을 무한대로 가정하는 것이 필요하다. 즉 하류측 다공판의 임피던스를 무한대로 가정하여 다중 다공판 흡음시스템에 대한 반사계수 R 을 구한 후, 식 (8)에 대입하면 수직입사 흡음계수 α_n 을 계산할 수 있다.

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

3. 실험

Fig. 4는 본 연구에 이용된 임피던스관과 측정장치의 개략도를 나타낸 것이다. 임피던스관은 내경 70mm, 길이 1000mm 그리고 두께 10mm인 아크릴판으로 제작하였다. 관의 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 출구측에는 측정하고자 하

는 시험대상체인 다공판이 설치되어 있다. 또한 출구측 다공판 뒤에는 음의 누수가 없도록 링이 부착된 강제피스톤으로 밀봉하였다. 음향신호는 주파수분석기의 신호발생기에서 100Hz 간격으로 발생시켜 스피커에 공급하였다. 다공판의 흡음율은 정재파법으로 측정하였으며, 이를 위해 내경 3mm와 길이 1500mm인 스테인레스관을 탐침관으로 이용하였다. 탐침관 한쪽에는 1/4인치 마이크로폰 연결이 가능하도록 어댑터를 제작하여 부착하였다. 특히 탐침관은 외부로부터의 외란영향을 가능한 배제시키기 위하여 자동이송장치에 탑재하여 이송시켰다. 또 본 연구에 쓰인 임피던스관은 내경이 70mm이므로 고차모드에 의한 차단주파수를 감안하면, 측정가능한 주파수범위는 0-2800Hz가 된다. 그러나 저주파수대역에서의 흡음성능 측정은 관길이의 제한을 받으므로 본 연구에서는 하한주파수 100Hz부터 측정하였다.

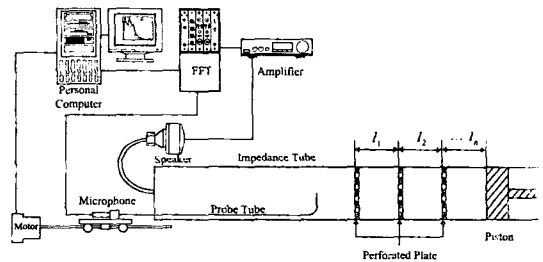


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup.

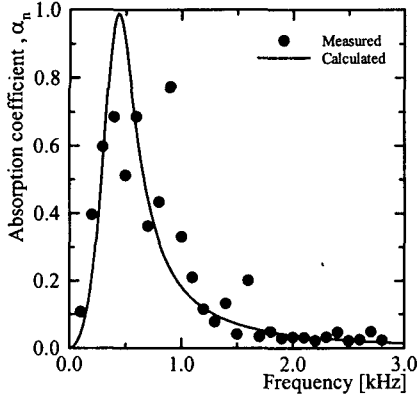
한편 측정에 쓰인 다공판의 재질은 알루미늄으로 Table 1에 도시되어 있는 다공판의 제원인 공극율, 두께 및 구멍지름을 변화시키면서 측정하였다. 다공판의 구성은 단일, 이중, 삼중 다공판으로 하였으며, 판과 판사이 그리고 판과 강제벽 사이의 거리는 모두 50mm로 고정하였다.

Table 1 Dimensions of the perforated plate.

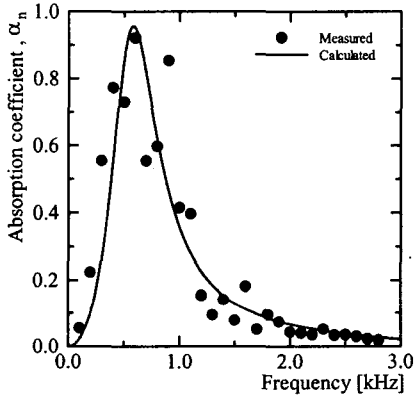
Porosity, σ (%)	Thickness, t (mm)	Hole diameter, d_h (mm)	Adjusted parameters
0.6	0.8	2.0	Porosity
1.12			
1.64			
1.19	0.4	1.0	Thickness
	1.0		
	2.0		
1.2	1.0	1.0	Hole diameter
		2.0	
		3.0	

4. 결과 및 고찰

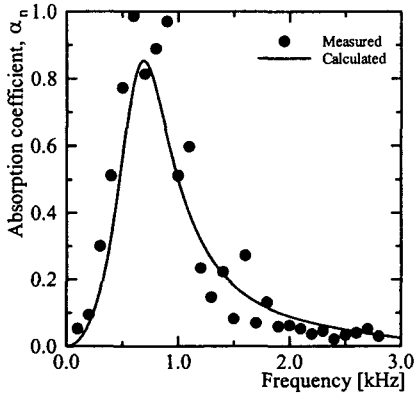
4.1 단일 다공판 흡음시스템



(a) $\sigma = 0.6, t = 0.8\text{mm}, d_h = 2.0\text{mm}$



(b) $\sigma = 1.12, t = 0.8\text{mm}, d_h = 2.0\text{mm}$



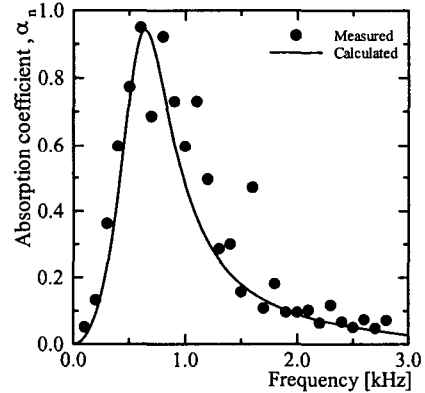
(c) $\sigma = 1.64, t = 0.8\text{mm}, d_h = 2.0\text{mm}$

Fig. 5 Comparisons between the measured and calculated absorption coefficients for single perforated plate with different porosity.

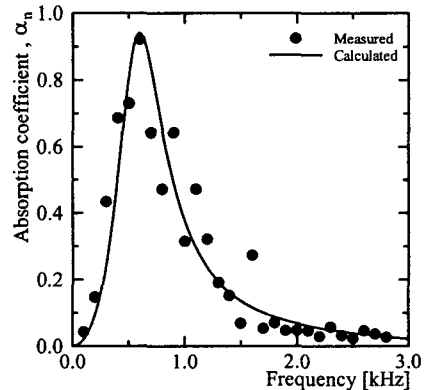
Fig. 5 는 서로 다른 공극율을 갖는 단일 다공판 흡음시스템에 대한 흡음율 계산값과 측정값을 비

교도시한 것이다. 전달행렬법으로 구한 계산결과와 측정결과는 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나, 공극율 0.6%인 그림 (a)와 공극율 1.64%인 그림(b)의 결과에서는 흡음율의 피크치에 해당하는 주파수에서 측정값과 계산값간에 차이를 나타낸다. 이것은 본 연구에 쓰인 임피던스 모델이 공극율이 아주 작거나 큰 경우에는 적용의 제한을 받는 것으로 사료된다. 또 결과에서 흡음성능의 피크치는 공극율에 좌우되는 것을 볼 수 있으며, 공극율이 클수록 흡음성능의 피크치에 해당하는 주파수는 점차 높은 주파수측으로 이동하면서 흡음성능의 주파수대역폭이 더 넓어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6 은 각기 다른 크기의 구멍지름을 갖는 단일 다공판 흡음시스템에 대하여 흡음율을 계산하고 측정한 결과이다. 이 경우에도 구멍지름이 작은 그림 (a)의 결과를 제외하면 측정결과와 계산결과는 비교적 잘 일치한다. 구멍지름이 작아질수록 흡음성능의 주파수대역폭이 더 넓어진다. 그러나 최대 흡음성능을 나타내는 피크주파수는 구멍지름 크기에 큰 변화를 보이지 않는다.



(a) $\sigma = 1.2, t = 1.0\text{mm}, d_h = 1.0\text{mm}$



(b) $\sigma = 1.2, t = 1.0\text{mm}, d_h = 2.0\text{mm}$

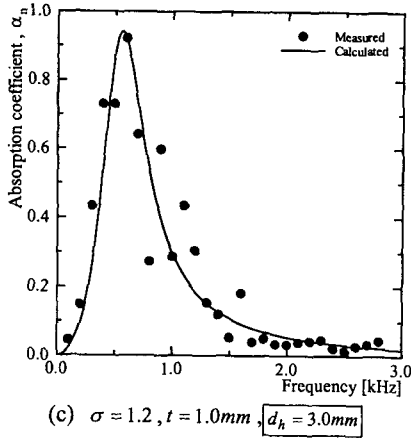


Fig. 6 Comparisons between the measured and calculated absorption coefficients for single perforated plate with different hole diameter.

Fig. 7 은 각기 다른 두께를 갖는 단일 다공판 흡음시스템에 대하여 흡음율을 계산하고 측정된 결과이다. 다공판의 두께가 아주 얇은 그림 (a)와 두꺼운 그림 (c)의 결과에서는 계산값과 측정값간에 큰 차이를 나타낸다.

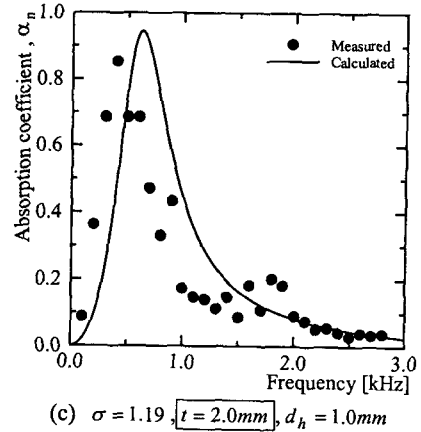
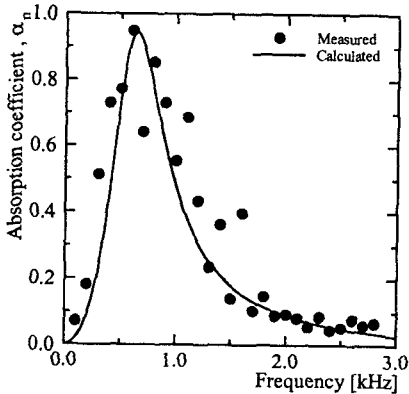
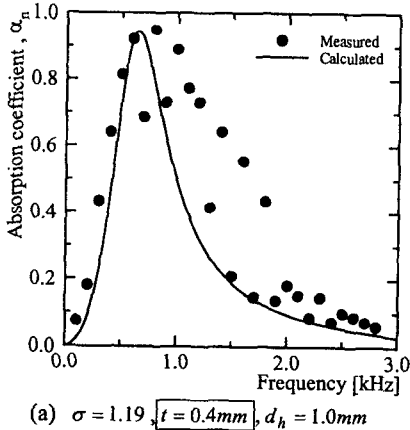


Fig. 7 Comparisons between the measured and calculated absorption coefficients for single perforated plate with different plate thickness.

먼저 계산결과를 보면 다공판의 두께가 변화하더라도 흡음성능의 대역폭 변화에는 큰 차이를 나타내지 않는다. 그러나 실제 측정결과에서는 다공판의 두께가 흡음율 결과에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이것 역시 앞서 언급하였듯이 본 연구에 쓰인 임피던스 모델이 적용한계를 가지기 때문이다. 따라서 보다 정확한 계산값을 얻기 위해서는 다양한 크기의 다공판 제원을 포함하는 임피던스 모델의 개발이 필요하다.

4.2 다중 다공판 흡음시스템

Fig. 8 과 Fig. 9 는 단일 다공판 결과에서 계산값과 측정값이 비교적 잘 일치하는 제원을 갖는 다공판을 이중과 삼중으로 설치하여 흡음율을 구한 다중 다공판 흡음시스템의 결과이다.

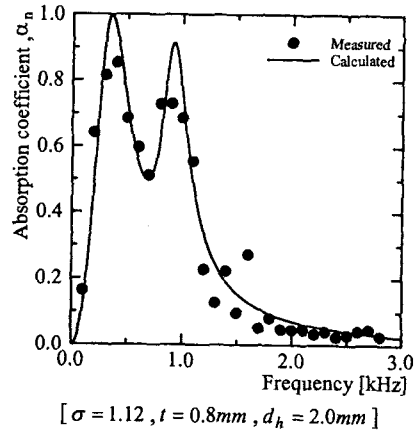


Fig. 8 Comparison of the measured and calculated absorption coefficients for double perforated plates.

먼저 Fig. 8 에 도시된 이중 다공판 흡음시스템의 결과를 보면 동일제원의 단일 다공판의 결과에서와 같이 측정값과 계산값은 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 앞서 도시한 동일제원의 단일 다공판에 비하여 이중 다공판으로 하였을 때가 흡음성능의 주파수대역이 크게 확장되는 것을 볼 수 있다. 이중 다공판의 경우는 단일 다공판과는 달리 흡음성능의 피크치가 두개 나타난다는 것이다. 이것은 공동과 다공판에 대한 합성임피던스의 허수부가 0 이 되는 공진주파수와 일치하며, 이 공진주파수에서 흡음성능이 최대로 된다.⁽⁵⁾

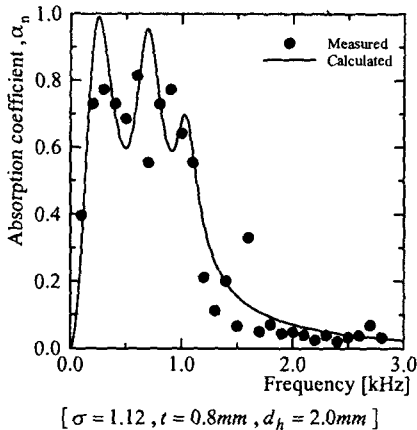


Fig. 9 Comparison of the measured and calculated absorption coefficients for triple perforated plates.

Fig. 9 는 동일제원의 단일 다공판을 삼중으로 설치한 삼중 다공판 흡음시스템의 흡음율을 구한 결과이다. 이 결과에서도 측정값과 계산값은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 8 에 도시된 이중 다공판의 결과와 비교해 보면 다공판의 추가로 인해 양호한 흡음성능을 갖는 주파수대역폭이 다소 더 넓어지는 것을 알 수 있다. 이 경우의 흡음성능 피크치는 다공판을 삼중으로 설치하였으므로 세개가 나타나며, 이중 다공판과는 달리 흡음곡선의 산과 골의 깊이가 크지 않음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 전달행렬법을 이용하여 단일 다공판을 비롯한 2 개 이상의 다공판으로 구성된 다중 다공판 흡음시스템의 흡음계수를 보다 빠르고 간편하게 계산할 수 있는 일반화된 계산모델 정립을 완성하였다. 계산모델의 타당성은 다공판의 구멍지름, 두께 그리고 공극율을 변화시키면서 계산

한 흡음계수와 정재파법으로 측정된 흡음계수와의 비교검증을 통하여 입증하였다. 계산결과와 측정결과와의 비교를 통하여 다중 다공판 흡음시스템의 흡음계수는 다공판의 개수, 구멍지름, 두께 그리고 공극율에 좌우되는 것을 알았다. 또 계산모델의 결과는 전반적으로 측정결과와 잘 일치하였으나, 다공판의 공극율과 두께에 좌우되어 다소의 오차를 수반하는 것은 본 연구에 쓰인 다공판 임피던스 모델의 적용한계로 간주할 수 있다. 따라서 정확한 계산결과를 얻기 위해서는 다양한 크기의 구멍지름, 두께 및 공극율을 포함하는 다공판 임피던스 모델의 개발이 필요하다.

참고문헌

- (1) Beranek, Leo, L., and Ver, I., 1992, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (2) Maa, D.Y., 1987, "Microperforated-Pannel Wideband Absorbers", Noise Control Engineering Journal, Vo.29, No.3, pp.77~84.
- (3) Blackman, A.W., 1960, "Effect of Nonlinear Losses on the Design of Absorbers for Combustion Instabilities", ARS Journal, pp.1022~1028.
- (4) Jing, X., and Sun, X., 1999, "Experimental Investigation of Perforated Linears with Bias Flow", J.Acoust.Soc.Am., Vol.106, No.5, pp.2436~2441.
- (5) Zhang, Z.M., and Gu, X.T., 1998, "The Theoretical and Application Study on a Double Layer Microperforated Sound Absorption Structure", Journal of Sound and Vibration, Vol.215, No.3, pp.399~405.
- (6) Kang, J., 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, Vo.220, No.5, pp.905~920.
- (7) Munjal, M.L., 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (8) 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.