

다중 다공판 시스템을 이용한 흡음설계

Sound absorption design using multiple layer perforated panel systems

이 동 훈
(서울산업대학교 기계공학과)

1. 서 론

얇은 판에 작은 구멍을 다수 뚫어 만든 다공판과 공기층을 조합한 다공판 시스템은 일종의 공명기로서, 이에 대한 연구는 오래전부터 시작되어 왔으나⁽¹⁾, Maa^(2,3) 그리고 Kang 과 Fuchs⁽⁴⁾ 등의 연구결과가 발표되고 나서야 그 유용성이 널리 알려지게 되었다. 또한 다공판 시스템의 흡음성능을 향상시키기 위한 연구로는 Hughes 와 Dowling⁽⁵⁾ 그리고 Jing 과 Sun 등⁽⁶⁾이 연구한 두 방향 유동(bias flow)을 들 수 있다. 이들은 다공판 구멍을 통과하는 관통유동과 구멍의 접선방향으로 흐르는 접선유동을 동시에 작용시켜 구멍의 음향레지스턴스를 증가시키므로써 다공판 시스템의 흡음효과를 향상시켰다. 이외에도 흡음성능 향상을 목적으로 다층구조인 다중 다공판 시스템의 흡음성능을 구한 다수의 연구결과들이 발표되고 있다⁽⁷⁻¹⁰⁾.

그러나 지금까지 발표된 거의 모든 연구가 해석적 방법을 이용하여 단일 다공판 시스템의 흡음성능을 계산하거나, 전기음향상사로부터 도출된 총합음향임피던스를 이용하여 다중 다공판 시스템의 흡음성능을 예측하는 정도였다. 특히 전기음향상사를 이용하여 다중 다공판 시스템의 흡음성능을 계산한 종래의 많은 연구문헌^(2-4,7,8,11,12)에서는 다공판 사이의 모든 공기층을 벽면에 연결된 헬름홀츠 공명기와 같은 병렬집중요소로 상사시켜 해석하는 오류를 반복하여 왔다. 이에 대해 최근에 Lee 와 Chen⁽¹³⁾ 그리고 Lee 와 Kwon^(14,15)은 기존의 연구문헌에 포함되어 있는 전기음향상사오류를 밝히고 올바른 해석법을 제시한 바 있다. 또한 Lee 등⁽¹⁶⁾은 전기음향상사를 이용하여 다중 다공판 시스템의 흡음성능을 계산하는 경우에 다공판의 수가 증가할 때마다 시스템의 총합음향임피던스를 새롭게 구해야 하는 번거로움을 덜고, 시스템의 흡음성능을 정확하고도 간편하게 계산할 수 있는 실용적인 계산모델을 발표한 바 있다.

한편 다공판 시스템을 이용하여 실제의 소음장치를 설계하는 단계에서 가장 중요한 것은 입사음의 세기와 유동영향(유동이 있다면)을 들 수 있다⁽¹⁷⁾. 다공판 시스템은 구멍과 공동이 결합된 음향계의 공명주파수에서 야기되는 음의 비선형 효과

를 이용하는 것이므로 음향세기가 클수록 흡음효과가 더 향상되는 특징을 갖는다. 이러한 비선형 효과는 다공판의 구멍지름 및 공극율과도 매우 밀접한 관련이 있으므로⁽¹⁸⁾, 다공판 시스템을 실제 소음장치에 적용하는 설계단계에서는 음장조건에 대한 사전검토가 반드시 필요하다. 또 유동을 수반하는 소음장치에 다공판 시스템을 적용하는 경우에는 접선유동과 관통유동이 소음장치의 흡음성능에 긍정적인 기여를 할 수 있도록 설계안을 수립하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 입사음의 세기와 유동효과 및 다공판 배치를 고려한 다중 다공판 시스템의 흡음설계에 대해서 토의하고자 한다. 특히 본 연구에서 제시한 다공판 시스템의 흡음성능은 수직입사음에 대한 결과로서 전기음향등가회로법과 전달행렬법을 이용하여 계산한 결과이다.

2. 다공판 시스템의 음향특성

Fig. 1 은 공극율 $\sigma=3.14\%$ 이고 판의 간격 $l=70mm$ 인 단일 다공판 시스템으로 입사되는 입사음의 음압레벨을 증가시키면서 측정된 흡음계수의 피크값과 음향레지스턴스값을 도시한 것이다.

공명조건에서 흡음계수의 피크값을 측정하여 도시한 그림 (a)의 결과를 보면 낮은 음압에서는 피크값의 증가폭이 작지만, 음압레벨이 커질수록 음압에 의존하여 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 흡음계수의 피크값이 음압에 크게 의존하는 것은 구멍에서 강한 비선형 현상이 야기되기 때문이다. 또한 그림 (b)의 결과는 입사음의 레벨과 음향레지스턴스와의 관계를 도시한 것으로서 종축에 다공판 시스템의 음향레지스턴스 $Re(z)$ 를 공기의 특성임피던스 $\rho_0 c_0$ 로 표준화하여 나타내었다. 결과에서 보듯이 약 102dB 을 경계로 하여 음향레지스턴스값이 선형영역과 비선형 영역으로 구분되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2 는 다공판의 공극율 $\sigma=3.14\%$ 그리고 판의 간격 $l=70mm$ 인 단일 다공판 시스템의 공명주파수를 조사할 목적으로 그림 (a)에는 흡음계수의 측정값과 계산값을 그리고 그림 (b)에는 리액턴스의 측정값과 계산값을 비교도시한 것이다. 먼저 흡음계수에 대한 그림 (a)를 보면 흡음계수의

피크값이 640Hz 와 2650Hz 에서 나타나는 것을 알 수 있다. 이 중에서 640Hz 에 해당하는 피크값은 다공판 시스템의 기본공명모드에서의 공명주파수이며, 2650Hz 에 나타난 피크값은 고차모드에서의 공명주파수이다. 이와 일치하는 각각의 공명주파수는 그림 (b)에 도시된 리액턴스의 결과에서도 분명히 확인할 수 있다.

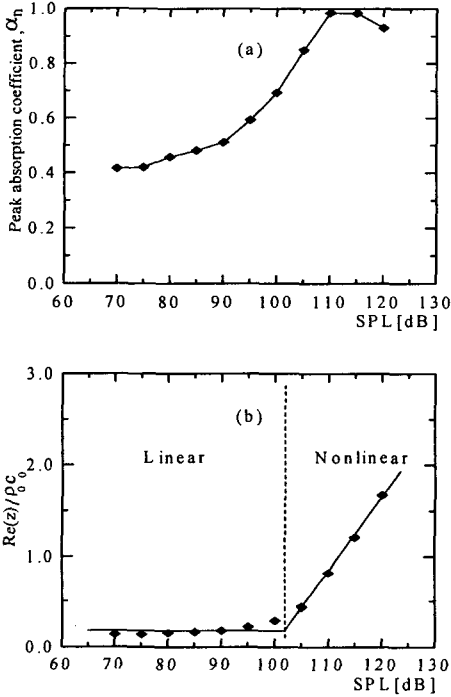


Fig. 1 Measured peak absorption coefficient and acoustic resistance for various incident sound pressure levels[16].

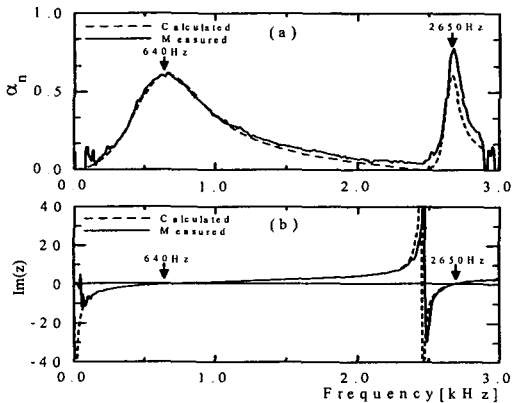


Fig. 2 Comparison of the measured and calculated resonance frequencies in a single layer perforated panel system[16].

3. 다공판 시스템의 흡음설계

3.1 다공판 배치를 이용한 흡음설계

Fig. 3 은 다공판의 배치에 따른 흡음계수를 구한 결과로서 공극율은 1.4%, 3.14% 그리고 5.59%이다. 또 다공판사이의 공기층 길이는 모두 70mm이다. 공극율을 그림 (b)와 같이 배치한 경우가 그림 (a)보다 더 좋은 흡음성능을 나타낸다. 이러한 현상은 임피던스 정합(matching)으로 설명할 수 있다. 다공판의 음향임피던스는 공극율과 반비례하므로 공극율의 감소는 시스템의 임피던스 증가를 초래한다. 따라서 다공판 시스템에서 흡음을 극대화시키기 위해서는 다공판으로 입사되는 음파의 반사가 다공판을 통과하면서 단계적으로 이루어지도록, 즉 다공판 시스템의 음향임피던스가 정합이 되도록 설계해야 한다. 이와 같이 다중 다공판 시스템을 실제의 소음장치에 적용할 때에는 서로 다른 공극율의 다공판을 임피던스 정합이 되도록 적절하게 배치시키는 것은 대단히 중요하다.

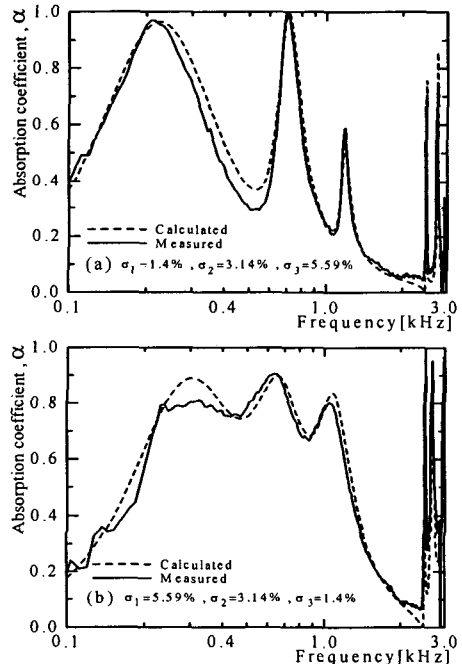


Fig. 3 Effect of the array of perforated plates on the absorption coefficient of three-layer perforated panel system[19].

Fig. 4 는 공기층의 길이에 따른 흡음계수를 구한 결과로서 공기층 길이는 40mm, 70mm 그리고 100mm이다. 또 3 중 다공판 시스템의 공극율은 모두 1.4%이다. 결과에서 보듯이 흡음계수는 공기층의 배치에 따라서도 달라지는 것을 알 수 있다.

낮은 주파수대역의 흡음설계를 위해서는 그림 (b)와 같은 배치가 적절한 것으로 판단된다.

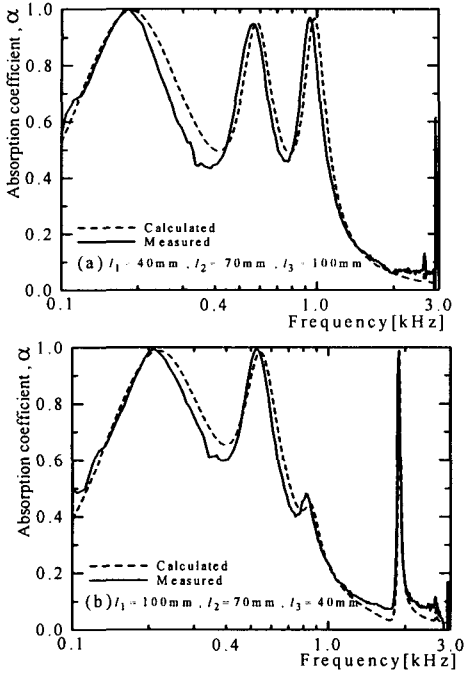


Fig. 4 Effect of the array of depths of airspace on the absorption coefficient of three-layer perforated panel system[19].

3.2 유동효과를 이용한 흡음설계

Fig. 5는 두 방향 유동을 갖는 다공판의 구조를 나타낸 것이다. 그림 (a)와 같이 입사음파와 평균 유속 U 가 구멍을 동시에 통과하면, 구멍 주변에서는 와류(vortex)가 발생하고, 이로 인하여 음에너지가 열에너지로 소산된다. 통과유속이 빠를수록 유동과 구멍과의 마찰로 인하여 음향레지스탕스는 증가하게 되어 흡음계수는 더 증가하게 된다. 그림 (b)는 다공판의 구멍을 가로지르는 관통유동과 접선방향으로 흐르는 접선유동을 나타내고 있다.

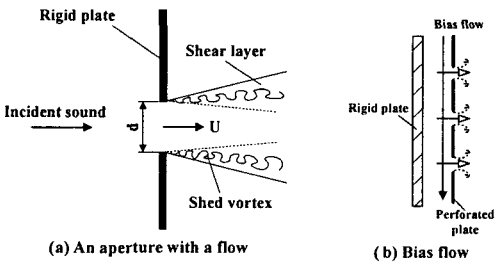


Fig. 5 The perforated panel with bias flow

지금까지의 연구에서는 관통유동과 접선유동이 동시에 작용하는 두 방향 유동일 때의 흡음계수에 대해서만 연구가 수행되었을 뿐, 두 방향 중에서 어느 방향이 흡음계수에 더 큰 기여를 하는지는 알려진 바 없다. 다음은 이에 대하여 저자들에 의해 수행된 연구결과의 일부를 소개한다.

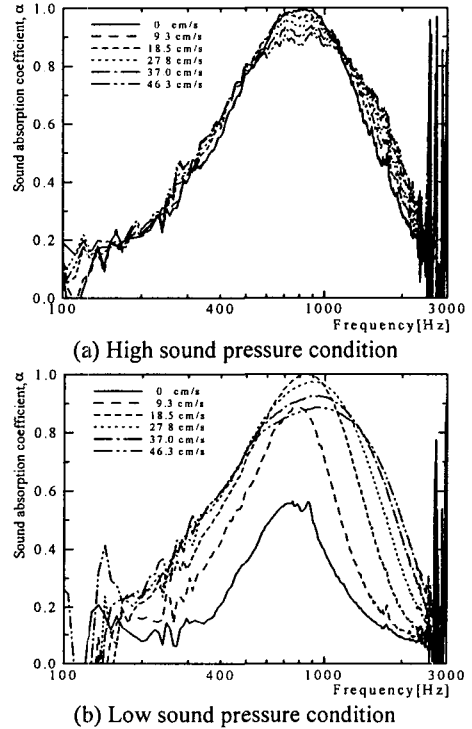


Fig. 6 Effect of the through flow on the absorption coefficient for a perforated panel system[20].

Fig. 6은 관통유속에 따른 흡음계수를 구한 것으로서 공극율 3.14%, 구멍지름이 2mm인 다공판을 사용하였다. 그림 (a)는 높은 입사음압 조건에서 그리고 그림 (b)는 낮은 입사음압 조건에서 구한 결과이다. 높은 음압조건인 그림 (a)의 결과를 보면 음파에 의한 비선형 현상 때문에 흡음계수의 피크값이 1에 도달하였다가 유동으로 인하여 오히려 흡음계수가 감소하게 된다. 이것은 다공판의 음향레지스탕스가 유동과의 마찰로 인하여 공기의 특성임피던스보다 훨씬 더 증가하였기 때문이다. 한편 낮은 입사음압 조건인 그림 (b)의 결과에서는 유속이 증가함에 따라 흡음계수가 피크까지 증가하였다가 점차 감소하면서 흡음대역폭이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 더구나 유속이 커질수록 흡음계수의 성능곡선이 높은 주파수측으로 다소 이동하는 대류효과도 관찰할 수 있다. 이상과 같이

음압이 낮은 경우에는 관통유동이 흡음에 좋은 역할을 하지만, 음압이 높은 경우에는 오히려 유동이 흡음을 저하시키는 요인이 되는 것을 알 수 있다.

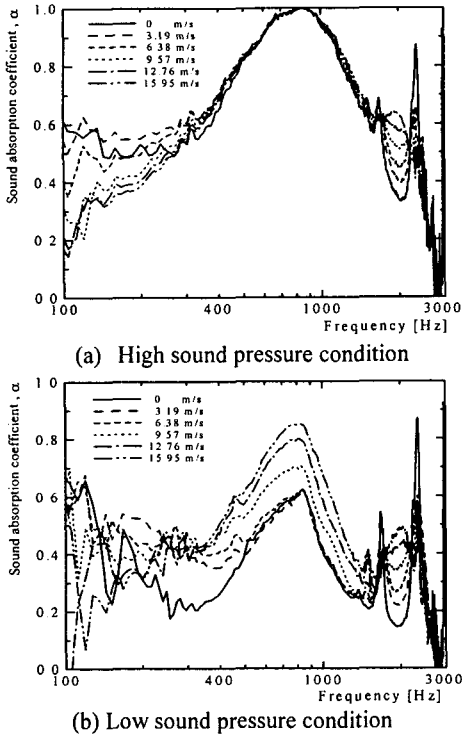


Fig. 7 Effect of the grazing flow on the absorption coefficient for a perforated panel system[21].

Fig. 7 은 접선유속에 따른 흡음계수를 구한 것으로서 다공판의 공극율은 3.14%이고, 구멍지름은 2mm 이다. 그림 (a)는 높은 입사음압 조건이며 그리고 그림 (b)는 낮은 입사음압 조건에서 구한 흡음계수 결과이다. 높은 음압조건인 그림 (a)의 결과에서는 유속이 증가하는 만큼의 흡음계수 증가는 볼 수 없으나, 낮은 음압조건인 그림 (b)에서는 유속이 증가함에 따라 흡음계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 Fig. 6 과 Fig. 7 의 결과를 비교해 볼 때, 관통유동보다 접선유동의 유속범위가 더 큰 것은 실험장치에서 접선유동의 유입구가 관통유동보다 상대적으로 더 작게 구성되었기 때문이다. 이와 같이 관통유속에 비하여 접선유속이 월등히 더 높음에도 불구하고 접선유동이 관통유동의 경우보다 흡음효과가 더 작은 것은 구멍으로 유입되는 유량이 상대적으로 적기 때문이다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 접선유동에 의해 얻어진 흡음은 접선유동의 일부가 관통유동으

로 작용한데서 비롯된 것으로 간주할 수 있다.

3.3 병렬 다공판을 이용한 흡음설계

Fig. 8 은 서로 다른 네 종류의 공극율을 갖는 다공판을 이중으로 설치한 이중 병렬다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. 그림 (a)는 낮은 공극율로 조합된 병렬 다공판이 음원 쪽에 위치한 경우이다. 제시된 결과에서 보듯이 시스템의 흡음계수는 첫번째 피크에서 높은 흡음 성능을 보이고 두번째 피크는 낮다. 반면에 공극율이 1.4%와 2.2%가 조합된 병렬 다공판이 음원 쪽에 위치한 그림 (b)의 경우는 흡음계수의 첫번째와 두번째가 모두 높고, 흡음대역폭도 전체적으로 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이 결과 역시 다공판 시스템의 음향임피던스 정합의 결과로 간주할 수 있다.

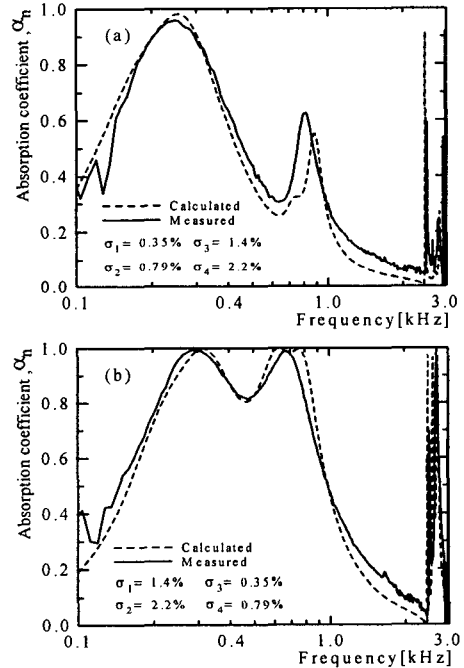


Fig. 8 Comparison of the measured and calculated absorption coefficients for the parallel double layer perforated panel system with four different porosities[22].

Fig. 9 는 서로 다른 두 종류의 공극율을 갖는 다공판을 이중으로 설치한 이중 병렬다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. 그림 (a)의 결과를 보면 공동의 공명주파수와 일치하는 두 개의 공명주파수대역에서 흡음계수의 피크가 나타나며, 반공명주파수대역에서의 흡음계수는 감

소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 (b)의 결과에서는 흡음재의 조합으로 반공명주파수대역의 흡음계수가 높아져 전체적으로 흡음성능이 향상되고 흡음대역폭도 넓어지는 것을 볼 수 있다.

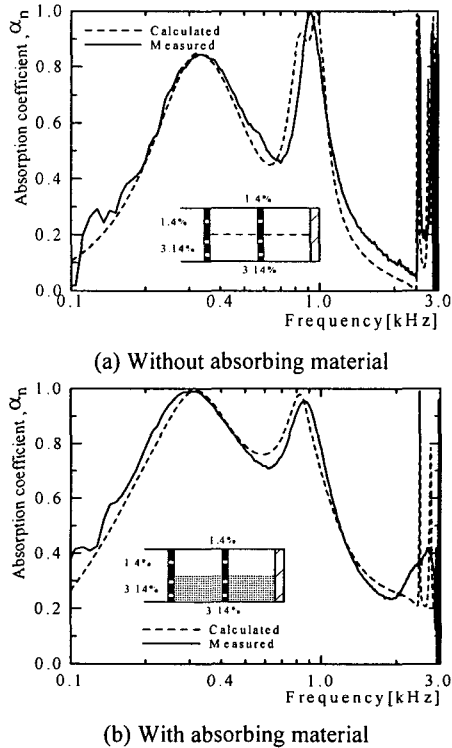


Fig. 9 Comparison of the measured and calculated absorption coefficients for the parallel double layer perforated panel system with two different porosities[23].

3.4 다공판과 흡음재를 조합한 흡음설계

Fig. 10 은 공극률 3.14%로 구성된 3 중 다공판 시스템과 이 시스템에 흡음재를 조합하였을 때의 흡음계수를 계산하고 측정 한 결과이다. 그림 (a)는 흡음재가 없는 3 중 다공판 시스템으로서 공명주파수대역에서 흡음계수가 최대가 되는 것을 알 수 있다. 그림 (b)는 흡음재만을 설치한 경우로서 입사음의 1/4 파장에 해당하는 주파수대에서 흡음계수의 피크를 볼 수 있다. 또한 그림 (c)와 그림 (d)의 결과에서 보듯이 3 중 다공판에 흡음재가 조합되면 그림 (a)와 비교해서 공명주파수와 반공명주파수대역에서의 흡음성능이 크게 향상되는 것을 볼 수 있다. 또한 흡음재를 모두 설치하는 것보다 하나의 공간에만 설치하더라도 그림 (c)에 가까운 흡음성능을 얻을 수 있다. 한편 제시된 모든 결과에서 보듯이 200Hz 이하의 주파수대역을 제외하면

계산결과와 측정결과는 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 200Hz 이하의 저주파대역에서 계산값과 측정값간의 차이는 마이크론의 위치와 관련된 측정오차이다.

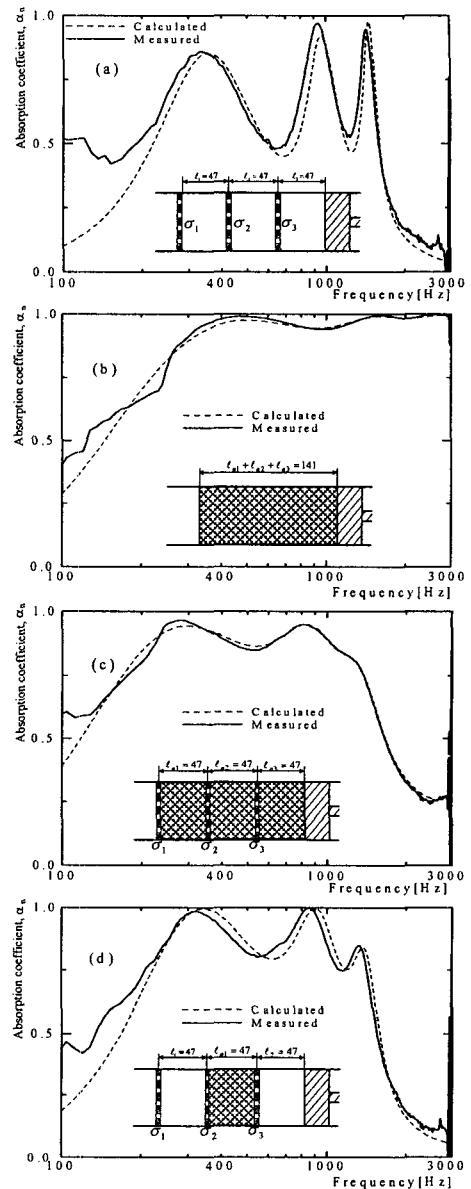


Fig. 10 Effect of the porous absorbing material on the absorption coefficients for three layer perforated panel system[24].

4. 결론

- 1) 다중 다공판 시스템이 우수한 흡음성능을 가지려면 다공판 시스템의 음향임피던스가 상호 정합이 되도록 조합되어야 한다.

- 2) 다공판 시스템에서 관통유동은 입사음압이 낮은 조건에서는 흡음에 좋은 역할을 하지만, 입사음압이 높은 조건에서는 오히려 흡음을 저하시키는 요인으로 작용한다. 또한 접선유동에 의한 흡음효과는 엄밀히 말하면 접선유동의 일부가 관통유동으로 작용한데서 비롯된 것으로 이해할 수 있으며, 관통유동보다는 흡음효과가 낮았다.
- 3) 다중 다공판 시스템을 실제 소음장치에 적용하는데 있어서 가장 문제가 되는 것은 반공명주파수대역에서의 흡음성능 저하이다. 이를 해결하기 위해서는 시스템의 음향임피던스 정합을 위한 다공판 배치외에도 소량의 흡음재를 하나의 공기층에 설치하거나 또는 각기 다른 공극율을 갖는 다공판을 병렬로 배치하는 것도 적절한 방안이라 사료된다.

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., 1987, "Microperforated Panel Wideband Absorbers," *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 29, No.3, pp.77~84.
- (3) Maa, D.Y., 1998, "Potential of Microperforated Panel Absorber," *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(5), pp.2861~2866.
- (4) Kang, J. and Fuchs, H.V., 1999, "Predicting the Absorption of Open Weave Textiles and Microperforated Membranes Backed by an Air Space," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 220, No.5, pp.905~920.
- (5) Hughes, I.J. and Dowling, A.P., 1990, "The Absorption of Sound by Perforated Linings", *J. Fluid Mech.*, Vol.218, pp.299~335.
- (6) Jing, X. and Sun, X., 1999, "Experimental Investigation of Perforated Liners with Bias Flow", *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(5), pp.2436~2441.
- (7) Shenoda, F.B., 2001, "Non-Dissipative Geometric Wide-Band Sound Absorber," 17th International Congress on Acoustics sponsored by JASA, Vol.1 Structural Acoustic and Vibration, pp.8~9, USA.
- (8) Tronchin, L., 2001, "Normal Incidence Absorption Coefficient of Rigid Perforated Screens," 17th International Congress on Acoustics sponsored by JASA, Vol.1 Structural Acoustic and Vibration, pp.24~25, USA.
- (9) Nilsson, A.C. and Rasmussen, B., 1985, "Sound Absorption Properties of a Perforated Plate and Membrane Construction," *ACUSTICA*, Vol. 57, pp.139~148.
- (10) Song, J and Bolton, J.S., 2003, "Sound Absorption Characteristics of Membrane-Based Sound Absorbers", *The 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Jeju International Convention Center, Seogwipo, Korea, pp.3881~3888.
- (11) Zwikker, C. and Kosten, C.W., 1949, *Sound Absorbing Materials*, Elsevier Publishing Company, Inc., Chap. VII
- (12) Zhang, Z.M. and Gu, X.T., 1998, "The Theoretical and Application Study on a Double Layer Micro-perforated Sound Absorption Structure", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.215, No.3, pp.399~405.
- (13) Lee, F.C. and Chen, W.H., 2001, "Acoustic Transmission Analysis of Multi-Layer Absorbers", *Journal of Sound and Vibration*, 248(4), pp.621~634.
- (14) 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음계수 계산에 있어서 전기음향등가회로법의 오류", 한국소음진동공학회 추계학술대회 발표논문집, pp.890~895.
- (15) 이동훈, 권영필, 2003, "다중 다공판 시스템에서 직관요소에 대한 전기음향등가회로법의 오류", 한국소음진동공학회 논문집, 제 13 권, 제 3 호, pp.180~185.
- (16) 이동훈, 허성춘, 권영필, 2002, "전달행렬법을 이용한 다중 다공판 시스템의 흡음성능 예측", 한국소음진동공학회 논문집, 제 12 권, 제 9 호, pp.709~716.
- (17) 이동훈, 허성욱, 2003, "다공판 시스템의 흡음 설계", 한국소음진동공학회지, 제 13 권, 제 5 호, pp. 295~305.
- (18) 허성춘, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델 개발", 서울산업대학교 산업대학원 석사학위논문.
- (19) 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*. (in press)
- (20) 허성욱, 이동훈, 2003, "다공판 시스템의 흡음성능에 관통유동이 미치는 효과", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.163~167.
- (21) 허성욱, 주경민, 김동윤, 이동훈, 2003, "다공판 시스템의 흡음성능에 접선유동이 미치는 효과", 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, pp.1148~1152.
- (22) 허성춘, 임정빈, 노승남, 이동훈, 2002, "병렬 다공판 시스템의 흡음성능에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp.902~907.
- (23) 허성춘, 허성욱, 서기원, 이동훈, 2002, "다공성 흡음재가 조합된 병렬 다공판 시스템의 흡음성능", 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp.444~449.
- (24) 허성욱, 김욱, 이동훈, 권영필, 2002, "다공성 흡음재가 조합된 다중 다공판 시스템의 흡음성능에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp.896~901.