

# 다공판 시스템의 흡음설계

이 동 훈\* · 허 성 욱

(서울산업대학교 기계공학과)

## 1. 머리말

소음방지를 위하여 널리 쓰이는 대표적인 흡음 재료는 유리섬유와 폴리우레탄폼을 들 수 있다. 이들 흡음재는 음에너지의 소산을 촉진시키기 위하여 내부구조가 다공형태이거나 복잡한 음전과경로를 갖도록 되어 있어 우수한 흡음성능을 갖는다. 그러나 소재의 특성으로 인하여 사용에 상당한 제약을 받고 있다. 즉 유리섬유의 경우는 비산문제 때문에 환경공해 차원에서 법적으로 사용을 규제받고 있으며, 내구성과 내습성이 약한 단점도 있다. 그리고 폴리우레탄 폼은 화재에 취약하기 때문에 안전성 측면에서 밀폐된 공간에서의 사용을 금하고 있다. 또한 유리섬유와 폴리우레탄폼은 중고주파수대역에서 탁월한 흡음성능을 갖지만, 각종 회전기계와 연소기 그리고 열유체기기류 등에서 발생하는 저주파수 소음을 억제시키는데에는 효과적이지 못하다. 따라서 이와 같은 기존 흡음재의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 형태의 흡음재에 관한 연구와 개발이 하나의 공학적 과제로 대두되고 있다.

한편 새로운 형태의 흡음재에 대한 대안으로서 얇은 판에 작은 구멍을 뚫어 만든 판과 공동(cavity)을 조합한 다공판 시스템이 음향연구자들의 관심을 끌고 있다. 다공판 시스템은 일종의 헬

름홀츠 공명기로서 오래전에 Blackman<sup>(1)</sup>은 제트 연소기에서 발생하는 스크리치음(screech tone)을 감소시킬 목적으로 단일 다공판 시스템의 흡음특성에 대한 연구를 수행한 바 있다. 또한 최근에 Maa<sup>(2,3)</sup> 그리고 Kang과 Fuchs<sup>(4)</sup>는 단일 다공판을 비롯한 이중 다공판 시스템의 흡음성능에 대하여 한층 발전된 연구결과를 제시한 바 있으며, 이외에도 다중 다공판 시스템의 흡음성능에 대한 다수의 연구결과가 발표되고 있다.<sup>(5-9)</sup> 특히 Hughes와 Dowling<sup>(10)</sup> 그리고 Jing과 Sun<sup>(11)</sup>은 다공판 구멍을 통과하는 관통유동과 구멍의 접선방향으로 흐르는 접선유동을 동시에 작용시켜 다공판 시스템의 흡음성능을 향상시킨 연구결과를 발표한 바 있다. 특히 Lee 등<sup>(12-14)</sup>은 단일 다공판을 비롯한 다수의 다공판으로 구성된 다중 다공판 시스템의 흡음성능을 정확하고도 쉽게 계산할 수 있는 계산모델의 제시와 함께 다공판의 공극율과 간격 그리고 다공판의 수를 변화시키면서 다중 다공판 시스템의 흡음특성을 구한 바 있다.

다공판 시스템의 실제 적용관점에서 가장 중요한 것은 입사음의 세기와 유동효과를 들 수 있다. 다공판 시스템은 구멍과 공동이 결합된 음향계의 공명주파수에서 야기되는 음의 비선형 효과를 이용하는 것이므로 음향세기가 클수록 흡음효과가 더 향상되는 특징을 갖는다. 즉 음향세기가 강한 음장조건에서만 이 시스템을 적용할 수 있기 때문

\* E-mail : ldh@snut.co.kr

에 음장조건에 대한 사전고려가 반드시 필요하다. 다음은 유동이 흐르는 곳에 다공판 시스템을 적용할 경우, 접선유동과 관통유동 중에서 어떤 방향의 유동이 흡음성능 증가에 더 큰 기여를 하는지를 파악하는 것이 필요하다.

따라서 이 글에서는 지금까지의 연구결과들을 기초로 하여 다공판 시스템의 흡음특성 및 성능을 파악하고 설계단계에서 고려해야 할 기술적 내용에 대해서 설명하고자 한다. 또한 이 글에 제시된 다공판 시스템의 흡음성능 계산결과는 두 가지 방식으로 계산한 결과이다. 즉 다공판의 크기와 조합을 다르게 하면서 구한 흡음성능 결과는 전달행렬법을 이용하여 계산한 것이며, 다공판의 병렬배치와 흡음재 조합을 다르게 하면서 구한 흡음성능 결과는 전기음향등가회로법을 이용하여 계산한 것이다.

## 2. 실험

이 글에서 제시한 연구결과는 입사음이 다공판 시스템에 수직으로 입사하는 경우에 대하여 측정된 수직입사 흡음계수의 결과이다. 측정에 사용된 임피던스관과 측정기기의 구성도는 그림 1과 같

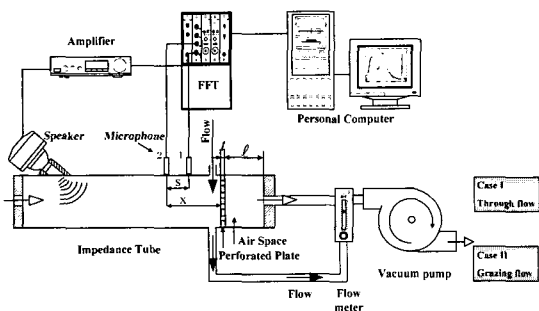


그림 1 Experimental setup for measuring absorption coefficient of a perforated plate system with through-flow and grazing-flow, respectively

다. 임피던스관은 두께 10 mm인 아크릴관으로 단면이 60 mm × 60 mm이고, 길이 1300 mm이다. 관의 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 이와 함께 다공구멍을 가로지르는 관통유동이 유입될 수 있도록 구멍이 뚫려있다. 또한 다공판과 가까운 관의 측벽에는 접선유동이 유입될 수 있도록 슬롯형태의 노즐이 설치되어 있다. 유동이 없는 경우에는 입구와 출구를 밀폐시킨 상태에서 흡음계수를 측정하였다.

음향신호는 신호발생기에서 발생되어 증폭기를 거친 후, 스피커를 통해 임피던스관으로 공급된다. 주파수 분석기의 분석범위는 3200 Hz 그리고 해상도는 8 Hz로 하였다. 출구측에는 다공판이 부착되어 있으며, 다공판 전방에는 전달합수를 구하기 위한 두개의 1/4인치 압력형 마이크로폰이 설치되어 있다.

다공판 후방에는 다공판을 가로지르는 관통유동과 다공판의 접선방향으로 흐르는 접선유동을 얻기 위한 진공펌프와 유량측정용 유량계가 설치되어 있다. 관통유동에 의해 관내로 공급되는 유동의 평균유속은 0~64.8 cm/s이고, 유동방향은 음의 입사방향과 같다. 또한 접선유동에 의해 다공판을 스치는 평균유속은 0~25.5 m/s이고, 유동방향은 음의 입사방향과 서로 교차한다.

다공판은 공극률 3.14 %인 조건에서 구멍지름 1 mm, 2 mm 및 3 mm 그리고 구멍지름 2 mm인 조건에서 공극률 5.59 %와 7.07 %인 판을 사용하였다. 실험에 이용한 모든 다공판의 두께는 1 mm이다.

## 3. 다공판 시스템의 흡음특성

그림 2는 공극률  $\sigma = 3.14\%$ 이고 간격  $l = 70$  mm인 단일 다공판 시스템으로 입사되는 입사음의 음압레벨을 증가시키면서 측정한 흡음계수의 피크값과 음향레지스텐스값을 도시한 것이다.

먼저 공명조건에서 흡음계수의 피크값을 측정하여 도시한 그림 2(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 2(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 102 dB을 경계로 하여 음향레지스턴스값이 선형영역과 비선형 영역으로 구분되

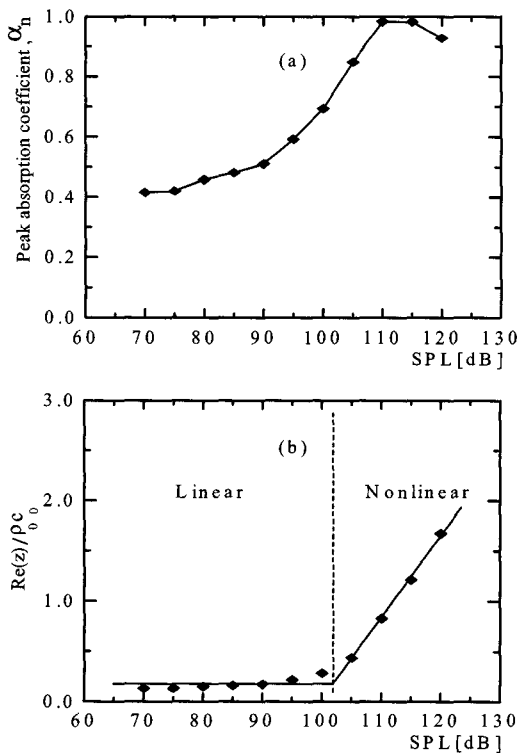


그림 2 Measured peak absorption coefficient and acoustic resistance for various incident sound pressure levels

는 것을 볼 수 있다. 이러한 선형과 비선형의 경계는 공극율의 크기와도 밀접한 관련이 있다.<sup>(14)</sup>

그림 3은 다공판의 공극율  $\sigma = 3.14\%$  그리고 간격  $l = 70$  mm인 단일 다공판 시스템의 공명주파수를 조사할 목적으로 그림 3(a)에는 흡음계수의 측정값과 계산값을 그리고 그림 3(b)에는 리액턴스의 측정값과 계산값을 비교도시한 것이다. 먼저 흡음계수에 대한 그림 3(a)를 보면 흡음계수의 피크치가 640 Hz와 2650 Hz에서 나타나는 것을 알 수 있다. 이 중에서 640 Hz에 해당하는 피크치는 다공판 시스템의 기본공명모드에서의 공명주파수이며, 2650 Hz에 나타난 피크치는 고차모드에서의 공명주파수이다. 이와 일치하는 각각의 공명주파수는 그림 3(b)에 도시된 리액턴스의 결과에서도 분명히 확인할 수 있다.

#### 4. 다공판 시스템의 흡음설계

##### 4.1 다공판의 크기와 조합방식이 흡음성능에 미치는 영향

그림 4는 다공판의 간격  $l = 70$  mm인 단일 다

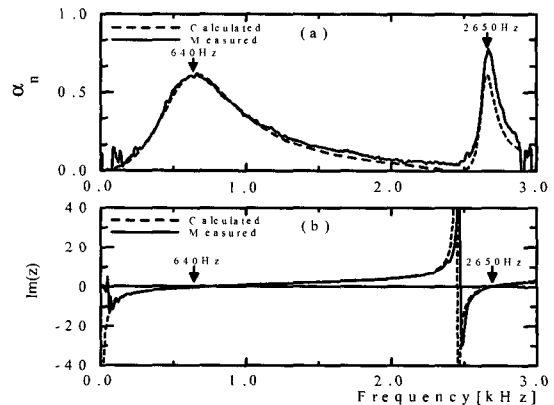


그림 3 Comparison of the measured and calculated resonance frequencies in a single layer perforated plate system

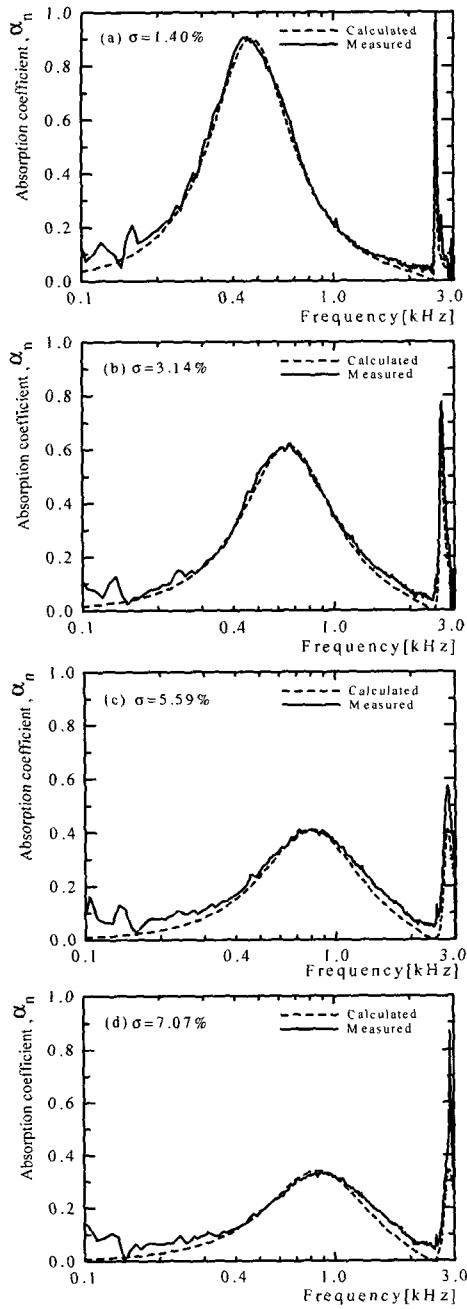


그림 4 Comparisons between the measured and calculated absorption coefficients of a single layer perforated plate system for various porosities

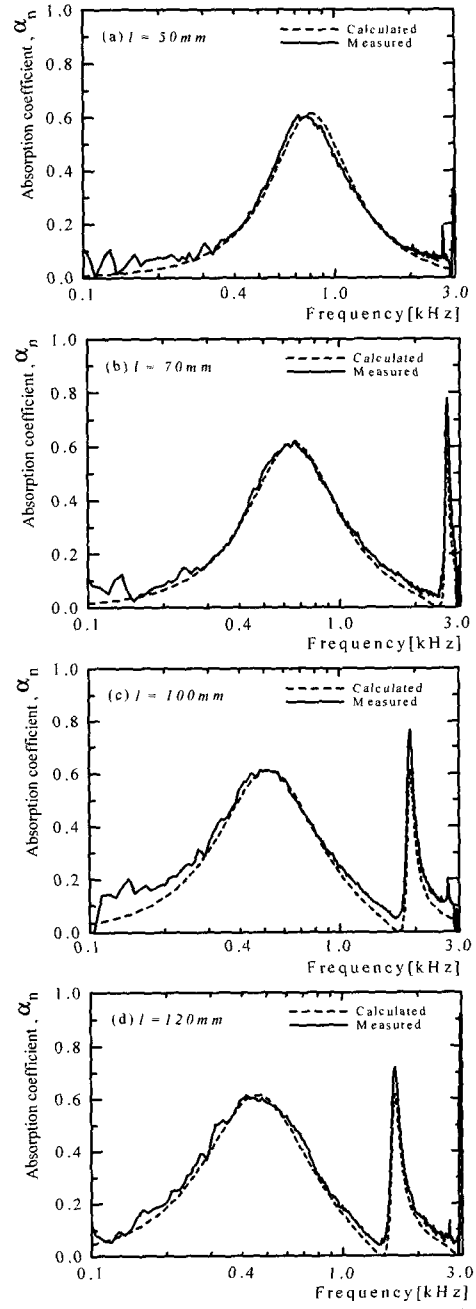


그림 5 Comparisons between the measured and calculated absorption coefficients of a single layer perforated plate system for various spacing

공판 시스템에서 공극율을 변화시키면서 흡음계수를 측정하고 계산한 결과이다. 그림에서 공극률이 서로 다르더라도 측정값과 계산값은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또 공극률이 증가할수록 흡음성능의 피크값은 점차 감소하면서 피크치의 주파수는 고주파수쪽으로 이동하는 특성을 나타낸다. 다만 300 Hz이하의 저주파수대역에서 나타난 측정값과 계산값간의 차이는 측정오차로서 마이크로폰의 위치와 관련된 오차임을 실험에서 확인하였다.

그림 5는 공극률  $\sigma = 3.14\%$ 인 단일 다공판 시스템의 다공판 간격을 변화시키면서 흡음계수를 계산하고 측정한 결과이다. 이 결과에서도 저주파수대역을 제외하면 측정값과 계산값은 잘 일치함을 보여준다. 또 다공판 간격이 증가함에 따라 공명주파수는 낮은 주파수대역으로 이동하지만, 기본 공명주파수에 해당하는 흡음계수의 피크값은 거의 일정한 값으로 유지된다.

그림 6는 동일한 계원의 다공판을 단일에서 5중까지 공동깊이 70 mm씩 확장하면서 흡음계수를

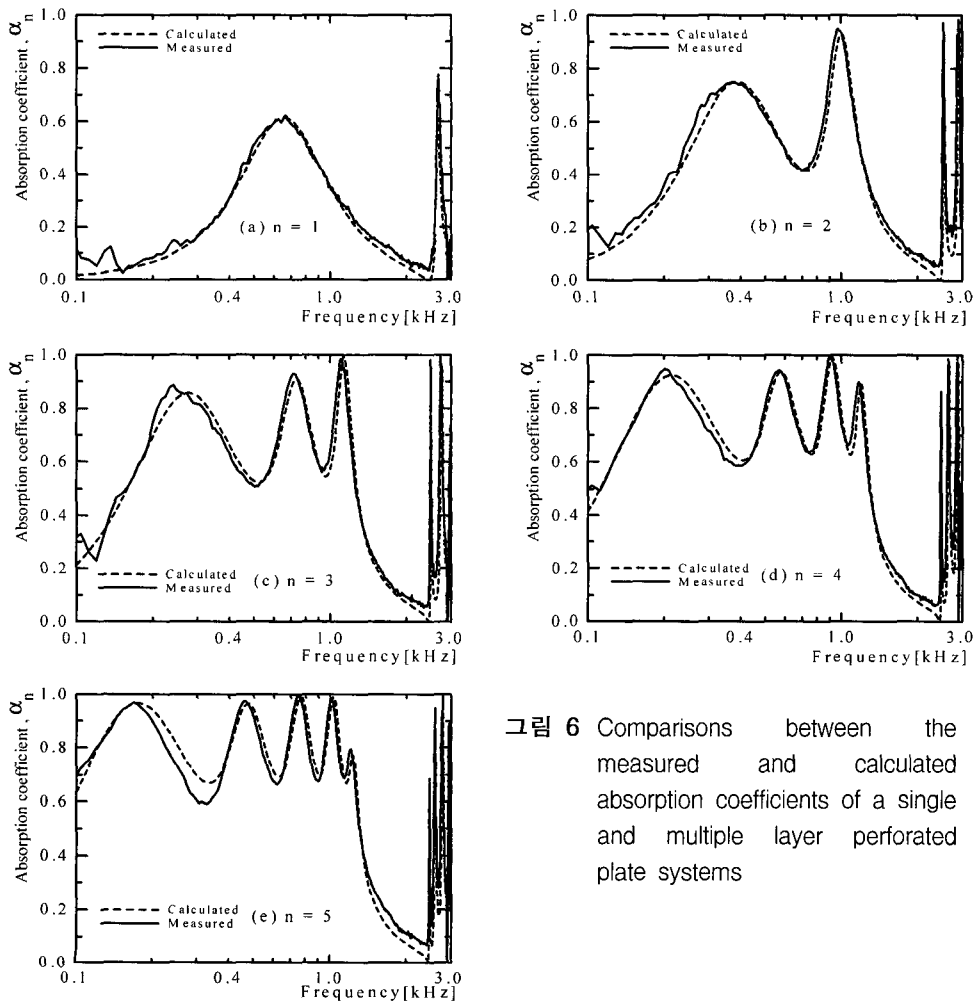
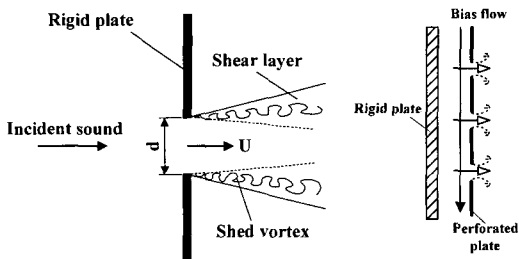


그림 6 Comparisons between the measured and calculated absorption coefficients of a single and multiple layer perforated plate systems

계산하고 측정된 결과이다. 다공판의 공극률은  $\sigma = 3.14\%$ 이며, 그림결과에 기입된  $n$ 는 다공판의 수(즉 공동의 수)를 나타낸다. 제시된 모든 결과에서 측정값과 계산값은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 특히 단일 다공판에 비하여 다중 다공판으로 하였을 때가 흡음계수의 피크값이 저주파수대역으로 이동하면서 흡음대역폭이 점차 확장되는 것을 알 수 있다. 또 다공판의 수가 늘어날수록 공동의 수와 일치하는 기본공명모드뿐만 아니라 다수의 고차모드가 발생하며, 이들 공명모드에 해당하는 공명주파수에서 흡음성능이 최대로 되는 것을 알 수 있다.

4.2 통과유동의 유속변화가 흡음성능에 미치는 영향<sup>(15,16)</sup>

그림 7은 두 방향 유동을 갖는 다공판의 구조를 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 강체의 구멍사이로 입사음과 평균유속  $U$ 가 동시에 통과하고 있다. 이때 구멍 주변에서는 와류(vortex)가 발생하고 이로 인하여 음에너지가 열에너지로 소산된다. 통과유속이 빠를수록 유동과 구멍과의 마찰로 인하여 음향 레지스턴스는 증가하게 되어 흡음성능은 더 증가하게 된다. 그림 7(b)는 다공판을 흐르는 두 방향 유동을 나타내고 있다. 다공판의 구멍을 가로지르는 유동을 관통유동이라 하고, 다공판의 접선방향으로 흐르는 유동을 접선유동이라 한다.



(a) An aperture a flow (b) Bias flow

그림 7 The geometry of a perforated plate with bias flow

지금까지의 연구에서는 관통유동과 접선유동이 동시에 작용하는 두 방향 유동(bias flow)일 때의 흡음성능에 대해서만 연구가 수행되었을 뿐, 두 방향중에서 어느 방향이 흡음성능에 더 큰 기여를 하는지는 알려진 바 없다. 또한 높은 입사음압 조건에서도 유동이 흡음성능 향상에 도움이 되는지를 조사한 연구결과도 제시된 바 없다. 다음은 이에 대하여 저자들에 의해 수행된 연구결과와 일부를 소개하며, 유동이 있는 환경에 다공판 시스템을 적용하려면 본 연구결과를 참고하여 설계할 것을 권장한다.

그림 8은 선형범위의 낮은 입사음압 조건에서 관통유속을 증가시키면서 측정된 음향레지스턴스와 흡음계수의 피크값을 도시한 것이다. 다공판의 제원은 그림에 표시되었으며, 횡축은 관내의 평균 유속을 의미한다. 그림 8(a)의 결과에서 공극률 3.14%인 경우에는 유속증가에 따라 음향레지스턴스 값이 큰 폭으로 증가하는 반면에, 공극률이 5.59% 또는 7.07%와 같이 큰 경우에는 유속증가에 따라 음향레지스턴스 값의 증가는 크지 않을 수 있다.

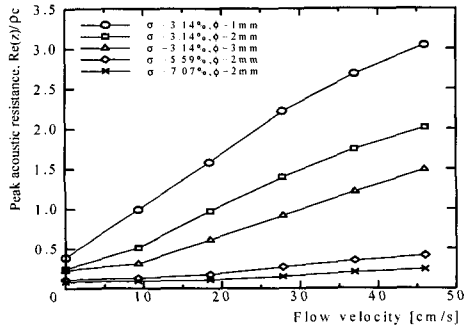
한편 그림 8(a)의 결과를 그림 8(b)에 도시된 결과와 비교해 보면, 음향레지스턴스 값이 1에 가까울수록 흡음계수도 1에 가까워지는 것을 알 수 있다. 그러나 음향레지스턴스 값이 1을 초과하면 서부터 흡음계수가 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 선형(낮은) 입사음압 조건이라도 구멍을 통과하는 관통유동이 존재하게 되면 강한 비선형 현상의 발생으로 음향레지스턴스가 증가하게 되어 흡음계수가 향상되는 것을 알 수 있다. 게다가 관통유동에 의한 비선형 현상은 공극률이나 구멍지름이 작을수록 더 낮은 유속에서 발생할 수 있음을 제시된 결과에서 확인할 수 있다.

또한 이러한 관통유동의 영향으로 야기된 비선형 현상에 의한 흡음계수의 증가는 흡음계수의 피크값과 유속과의 관계를 나타낸 그림 8(b)에서

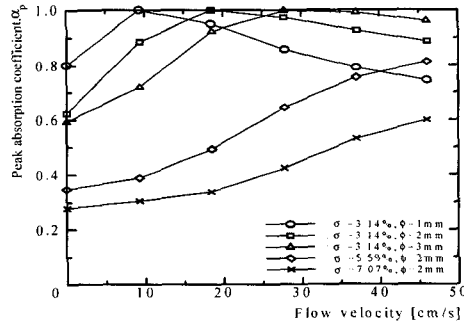
분명히 확인할 수 있다. 도시된 결과에서 공극률 3.14%, 구멍지름 1mm인 다공판이 관통유동에 의한 비선형 현상으로 인하여 낮은 유속에서 가장

탁월한 흡음성능을 갖게 됨을 볼 수 있다.

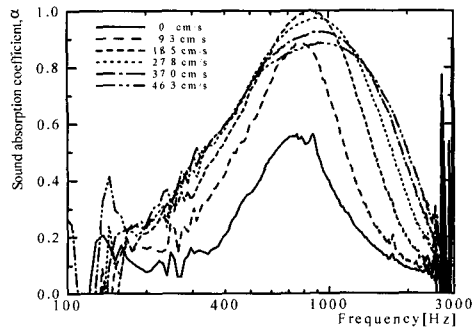
그림 8(c)는 낮은 입사음압 조건에서 관통유속에 따른 흡음계수를 전주파수대역에서 구한 것으로



(a) Peak acoustic resistance

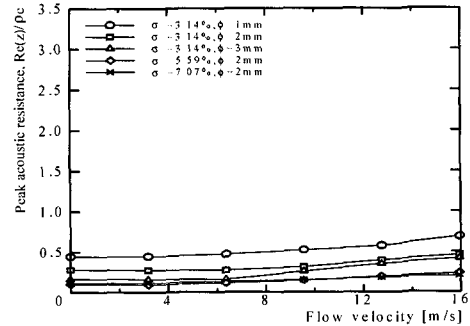


(b) Peak absorption coefficient

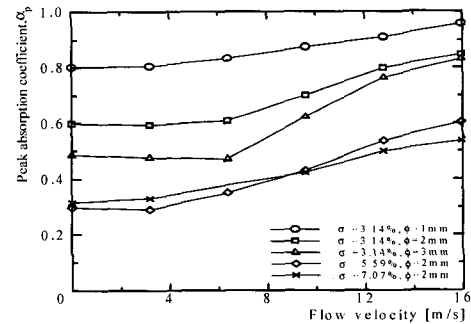


(c) Low incident sound pressure

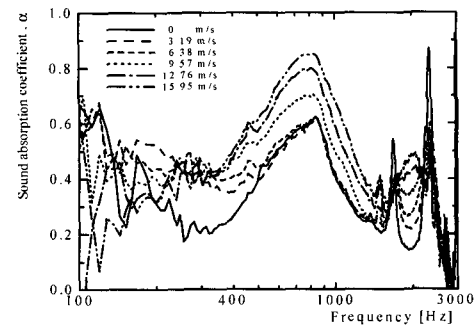
그림 8 Effect of the through-flow on the acoustic resistance and absorption coefficient in the case of low incident sound pressure level



(a) Peak acoustic resistance



(b) Peak absorption coefficient



(c) Low incident sound pressure

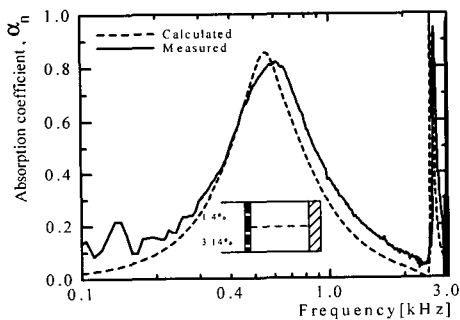
그림 9 Effect of the grazing-flow on the acoustic resistance and absorption coefficient in the case of low incident sound pressure level

로서 공극률 3.14 %, 구멍지름이 2mm인 다공판을 사용하였다. 결과에서 유속이 증가함에 따라 흡음 계수가 1까지 증가하였다가 점차 감소하면서 흡음 대역폭이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 더구나 유속이 커질수록 흡음계수의 성능곡선이 높은 주파수측으로 다소 이동하는 대류효과도 관찰할 수 있다.

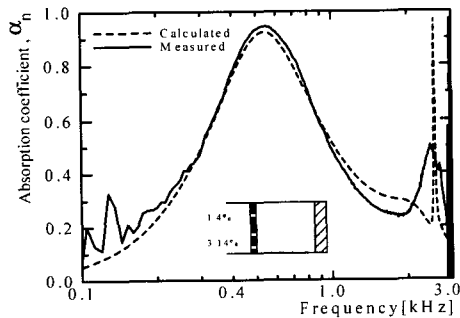
그림 9는 선형범위의 낮은 입사음압 조건에서 접선유동속도를 증가시키면서 측정된 음향레지스턴스와 흡음계수의 피크값을 도시한 것이다. 다공판의 제원은 그림에 표시되었으며, 횡축은 다공판의 접선방향으로 흐르는 평균유속을 의미한다. 그림 9(a)의 결과에서 공극율이나 구멍지름이 작을수록 음향레지스턴스는 높은 값을 갖지만, 관통유

동에 비해 접선유동에 의한 음향레지스턴스의 증가폭은 작게 나타났다. 이것은 다공판 구멍에 미치는 관통유동의 영향에 비해 다공판의 접선방향으로 흐르는 접선유동이 구멍에 미치는 효과가 작기 때문이다.

그림 9(b)는 흡음성능을 나타내는 것으로서 음향레지스턴스 값이 1에 가깝게 됨에 따라 다공판의 흡음성능이 가장 좋은 것을 알 수 있다. 그림 9(c) 낮은 입사음압레벨 조건에서 접선유동속도에 따른 흡음계수를 구한 것으로서 다공판의 제원은 공극율이 3.14 %이고, 구멍지름은 2mm이다. 결과에서 일정유속이상에서 유속이 증가함에 따라 흡음계수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

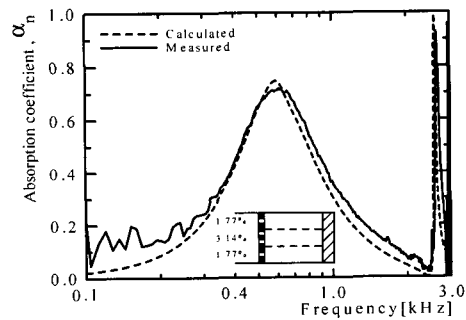


(a) Without absorbing material

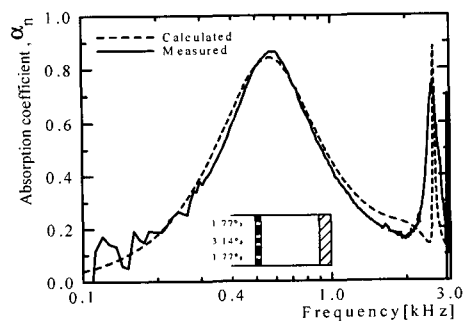


(b) With absorbing material

그림 10 Comparison of the measured and calculated absorption coefficients for the parallel single layer perforated plate system with two different porosities



(a) Without absorbing material



(b) With absorbing material

그림 11 Comparison of the measured and calculated absorption coefficients for the parallel single layer perforated plate system with three different porosities

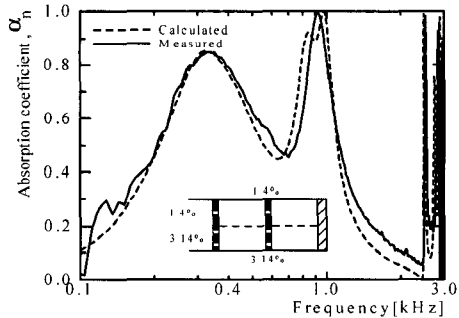


4.3 다공판의 병렬배치와 흡음재 조합방식이 흡음성능에 미치는 영향<sup>(13)</sup>

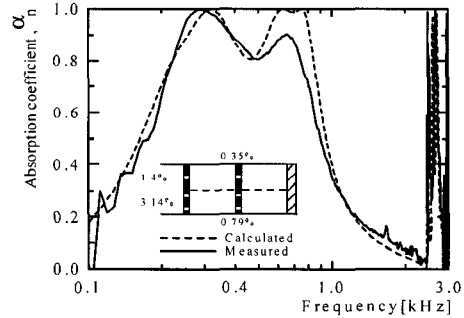
그림 10은 병렬 단일다공판 시스템에 흡음재가 조합된 경우와 조합되지 않은 경우를 비교 도시한 결과이다. 도시된 결과에서 그림 10(a)는 공극률  $\sigma = 1.4\%$ 와  $\sigma = 3.14\%$ 가 조합된 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정하여 비교한 결과이다. 그림 10(b)는 그림 10(a)와 동일한 병렬 단일다공판 시스템으로서 공극률  $\sigma = 3.14\%$ 인 다공판 후방에 흡음재를 삽입하여 흡음성능을 구한 결과이다. 그림 10(a)와 그림 10(b)를 비교해 보면 다공판과 공기층만으로 구성된 그림 10(a)보다는 그림 10(b)와 같이 다공

판 후방의 제한된 영역에 흡음재가 삽입된 경우가 흡음대역폭이 넓어지고 흡음효과도 다소 더 높아진 것을 볼 수 있다.

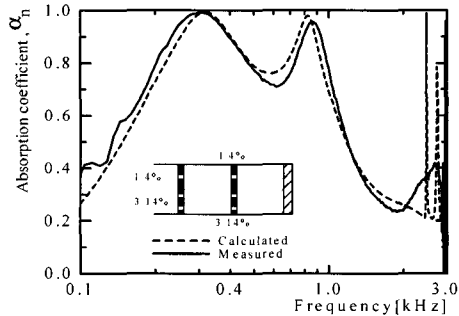
그림 11은 서로 다른 세 개의 공극율을 조합한 병렬 단일다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. 그림 11(a)는 병렬다공판과 공기층만으로 구성된 시스템의 흡음성능 결과이고, 그림 11(b)는 공극률  $\sigma = 3.14\%$ 인 다공판 후방에 흡음재를 설치한 결과이다. 제시된 두 결과를 상호 비교해 보면 그림 11(a)와 같이 흡음재를 조합한 경우가 흡음대역폭이 넓어지며 흡음성능이 더 좋아지는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 10과 그림 11에 도시된 그림 11(a)의 결과만을 비교해



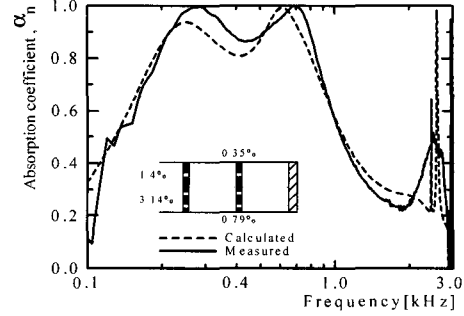
(a) Without absorbing material



(a) Without absorbing material



(b) With absorbing material



(b) With absorbing material

그림 12 Comparison of the measured and calculated absorption coefficients for the parallel double layer perforated plate system with each different porosity

그림 13 Comparison of the measured and calculated absorption coefficients for the parallel double layer perforated plate system with each different porosity

보면 흡음성능 차이는 별로 나지 않는다. 하지만 흡음재가 조합된 경우는 그림 11에 비하여 다소 더 넓은 공간에 흡음재가 설치되어 있는 그림 10의 경우가 다소 더 좋은 흡음성능을 보이고 있다.

그림 12는 병렬 이중다공판 시스템의 흡음계수를 계산하고 측정된 결과이다. 그림 12(a)의 결과를 보면 공기층의 공명주파수와 일치하는 두 개의 공명주파수대역에서 흡음성능의 피크치가 나타나며, 반공명주파수대역에서는 흡음성능이 저하되는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 12(b)의 결과에서는 흡음재의 조합으로 반공명주파수대역의 흡음계수가 높아져 전체적인 흡음성능이 향상되고 흡음대역폭이 넓어진 것을 볼 수 있다.

그림 13은 네 개의 서로 다른 공극률을 갖는 병렬 이중다공판 시스템의 흡음성능을 계산하고 측정된 결과이다. 이 결과에서도 그림 12와 같이 흡음재가 조합된 그림 13(a)의 결과보다 다공판 후방에 흡음재가 조합된 그림 13(b)의 결과가 흡음성능이 더 향상된 것을 알 수 있다.

### 5. 맺음말

다공판 시스템은 기존의 다공성 또는 섬유사로 된 흡음재와 비교하여 성능 및 적용 관점에서 상이한 점이 많다. 먼저 성능관점에서 비교해 보면, 기존의 다공성 혹은 섬유사로 된 흡음재는 주로 중고주파수 대역에서 우수한 흡음성능을 보유하는 반면에, 다공판 시스템은 구멍과 공동이 상호 연결된 다수개의 공명기가 공명작용을 하므로써 주로 저주파수대역에서 우수한 흡음성능을 갖는다. 또한 적용 관점에서 보면, 다공판 시스템은 저주파수 대역에서 좋은 흡음성능을 가지므로써 각종 회전기계와 연소기 그리고 열유체기기류 등에서 발생하는 저주파수 소음을 억제시키는데 매우 효과적이라 할 수 있다. 특히 다공판 시스템은 본 고에서도 언급한 바와 같이 입사음압의 크기가 클

수록 유리하므로 낮은 음압을 갖는 음장조건에서는 사용이 제한된다는 점을 유의해야 한다. 또한 유동이 흐르는 곳에 다공판 시스템을 적용하는 경우에는 흡음성능이 유동의 유입방향에 좌우되므로, 본 고의 기술적 자료를 적절히 반영하여 설계하는 것이 필요하다.

### 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) Maa, D. Y., 1987, "Microperforated-pannel 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," J. of Sound and Vibration, Vol. 220, No. 5, pp. 905~920.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Nilsson, A. C. and Rasmussen, B., 1985, "Sound Absorption Properties of a Perforated Plate and Membrane Construction," ACUSTICA,

Vol. 57, pp. 139~148.

(8) Lee, F. C. and Chen, W. H., 2001, "Acoustic Transmission Analysis of Multi-layer Absorbers," Journal of Sound and Vibration, Vol. 248, No.4, pp. 621~634.

(9) 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.

(10) Hughes, I. J. and Dowling, A. P., 1990, "The Absorption of Sound by Perforated Linings," J. Fluid Mech., Vol. 218, pp. 299~335.

(11) Jing, X. and Sun, X., 1999, "Experimental Investigation of Perforated Liners with Bias Flow," J. Acoust. Soc. Am., 106(5), pp. 2436~2441.

(12) 허성춘, 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공

판 시스템의 흡음성능 예측을 위한 계산모델 개발," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 877~882.

(12) 허성춘, 허성욱, 서기원, 이동훈, 2002, "다공성 흡음재가 조합된 병렬 다공판 시스템의 흡음성능," 대한설비공학회 동계학술발표대회논문집, pp. 444~449.

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

(14) 허성욱, 주경민, 김동윤, 이동훈, 2003, "다공판 시스템의 흡음성능에 접선유동이 미치는 효과," 대한설비공학회 하계학술발표대회논문집, pp. 1148~1152.

(15) 허성욱, 이동훈, 2003, "다공판 시스템의 흡음성능에 관통유동이 미치는 효과," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 163~167.