

## 다중 다공판 시스템에서 직관요소에 대한 전기음향등가회로법의 오류

### The Error Involved in the Equivalent Electroacoustic Circuit Approach for the Element of Straight Pipe in Multiple Layer Perforated Plate Systems

이 동 훈\* · 권 영 필\*

D. H. Lee and Y. P. Kwon

(2002년 9월 5일 접수 : 2003년 2월 5일 심사완료)

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

#### ABSTRACT

The equivalent electroacoustic circuit approach has been conventionally used for the analysis of the multiple layer perforated plate system. However, it is found that an analogy error has been involved in the equivalent electroacoustic approach proposed by previous researchers for the element of straight pipe. Although the pipe between the perforated layers is a distributed element in the analogy, it has been treated as a parallel element by previous investigators. The analogy error is demonstrated by comparing the calculated absorption coefficients based on the parallel circuit and the distributed circuit, respectively, with the measured values by the two-microphone impedance tube method.

#### 1. 서 론

다수의 다공판과 공기층으로 구성된 다중 다공판 시스템의 흡음성능은 주로 전기음향등가회로법으로 해석되어져 왔다.<sup>(1)</sup> 전기음향등가회로법은 다공판과 공기층을 이와 상응하는 전기요소로 상사시킨 전기음향등가회로로부터 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스를 구하여 흡음성능을 계산하는 방식이다.

Maa<sup>(2)</sup> 그리고 Kang과 Fuchs<sup>(3)</sup> 등은 다공판 사이의 공기층을 병렬집중요소(shunt lumped element)로 상사시킨 전기음향등가회로를 이용하여 이중 다공판 시스템의 흡음성능을 계산한 바 있다. 그러나 다공판

사이의 공기층은 양단에 다공판이 직렬로 연결되어 있으므로 병렬요소가 아니며, 공기층의 길이도 길기 때문에 좌우측의 입자속도가 다르게 되므로 집중요소가 아닌 분산요소다. 그럼에도 불구하고 지금까지의 관련 문헌<sup>(2~4)</sup>에서 다공판 사이의 모든 공기층을 벽면에 연결된 Helmholtz공명기와 같이 병렬집중요소로 상사시켜 왔다. 이것은 아마도 오래전에 출판된 Zwicker와 Kosten<sup>(5)</sup>의 저서에 기술된 이중 다공판 시스템의 전기음향등가회로를 그대로 인용한 것에 기인되었다고 볼 수 있으며, 최근에 발표된 연구문헌에서도 이와 같은 오류는 반복되고 있다.<sup>(6,7)</sup>

따라서 본 연구에서는 기존의 연구문헌에 포함되어 있는 전기음향상사오류를 밝히기 위하여 올바른 해석 방법을 제시하고 실험으로 증명하고자 한다. 본 연구에서는 다공판사이의 모든 공기층은 양단이 개방된 직관으로 간주하고, 전기음향등가회로에서 분산요소(distributed element)로 표현하였다.

† 책임저자, 정희원, 서울산업대학교 기계공학과  
E-mail : ldh@snut.ac.kr  
Tel : (02) 970-6331, Fax : (02) 949-1458

\* 정희원, 숭실대학교 기계공학과

## 2. 전기음향 등가회로법

음향요소는 파장과 요소크기의 대소관계로부터 집중요소와 분산요소로 구분된다.  $k$ 를 파수(wave number) 그리고  $l$ 을 요소의 특성길이라 할 때  $kl \ll 1$ 인 경우, 즉 요소내부에서 음장의 위상차가 없는 경우를 집중요소라 하는데 반하여, 분산요소는 요소크기에 비해 파장이 작아 요소내부에서 위상차가 발생하는 경우를 말한다. Fig. 1은 음향요소인 집중요소와 분산요소를 전기요소로 상사시켜 전기음향등가회로에 나타낸 것이다. 도시된 회로에서  $p$ 는 음압 그리고  $v$ 는 질량속도를 나타낸다.

먼저 Fig. 1(a)의 경우는 음향질량(acoustic inductance)과 음향저항(acoustic resistance)의 합인 음향임피던스  $z$ 가 부하측과 직렬로 연결된 직렬집중요소에 대한 전기음향등가회로를 나타낸 것으로서 다공성 흡음재나 본 연구에서와 같이 얇은 판에 미세한 다수의 구멍이 뚫린 다공판이 이에 속한다. Fig. 1(b)는 음향용량 임피던스(acoustic compliance impedance)  $z_c$ 가 부하측과 병렬로 연결된 병렬집중요소에 대한

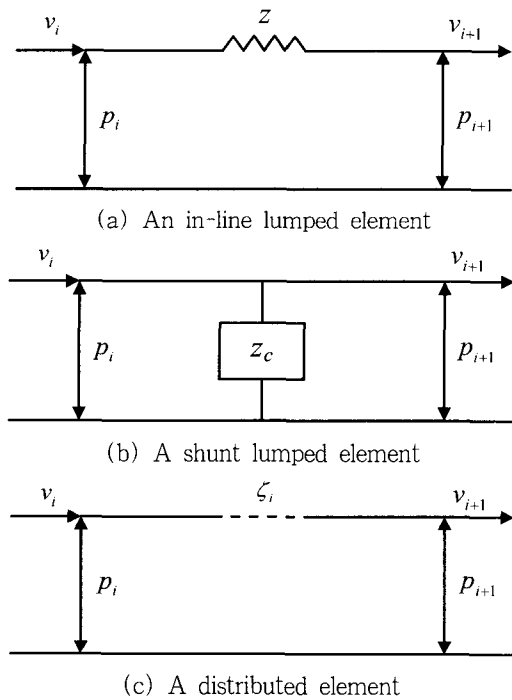


Fig. 1 Representations of acoustic elements in an equivalent electroacoustic circuit<sup>(8)</sup>

등가회로를 나타낸 것으로서 길이가 짧은 팽창실(short expansion chamber) 또는 벽면에 병렬로 달린 Helmholtz공명기가 이에 속한다. 마지막으로 Fig. 1(c)는 분산요소를 나타낸 것으로서 분산요소의 음향임피던스는 음향용량과 음향질량의 함수인  $\zeta_i$ 로 표현되며, 대표적 음향요소로는 길이가 긴 직관(전기의 전선에 해당)을 들 수 있다. 또 분산요소는 앞의 두 경우와는 달리 단일 전기요소로 상사시킬 수 없으므로 도시된 회로에서와 같이 점선으로 나타낸다.

Fig. 2는 다중 다공판 시스템과 이에 상응하는 전기음향등가회로를 나타낸 것이다. 다중 다공판 시스템은 다공판, 다공판사이의 공기층(요소 2부터 요소  $i$  번째) 그리고 단단한 벽으로 막혀 있는 공동(요소 1)으로 구성된다. 이와 같은 음향요소들은 Fig. 1에 제시된 전기음향상사방식을 이용하여 Fig. 2와 같은 전기음향등가회로로 나타낼 수 있다. 전기음향등가회로에 표기된  $\rho_0 c$ 는 공기의 특성임피던스 그리고  $2p$ 는 판의 경계면상에 충돌된 입사음의 음압크기를 의미한다. 본 연구에서는 요소 2부터 요소  $i$  번째 사이에 있는 모든 공기층을 양단이 개방된 직관으로 간주하고, 이 직관을 도시된 Fig. 1의 그림 (c)와 같은 분산요

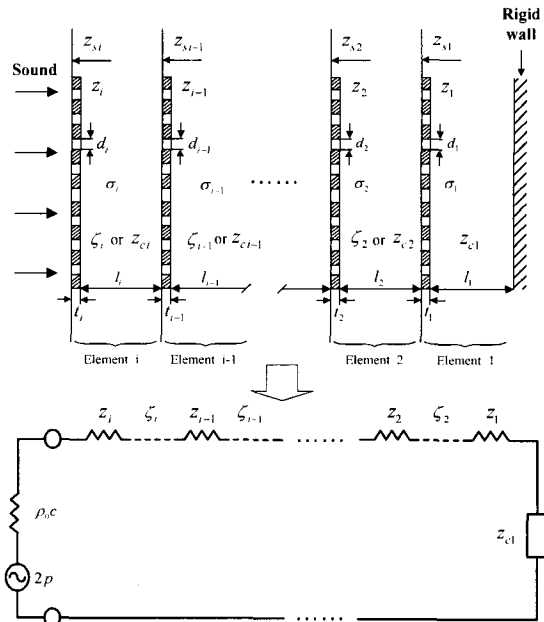


Fig. 2 Multiple layer perforated plate system and equivalent electroacoustic circuit by treating the airtspaces between perforated plates as distributed elements

소로 간주하여 등가회로에 나타내었다. 반면에 요소 1의 공기층은 한쪽이 단단한 벽으로 막혀 있는 공동이므로 Fig. 1의 그림 (b)와 같이 병렬집중요소로 표현되어야 하지만, 공동자체가 부하축이 되기 때문에 요소 1의 다공판과 직렬로 연결되는 직렬집중요소가 된다. 그리고 파장에 비하여 두께가 아주 얇은 다공판은 Fig. 1의 그림 (a)와 같이 등가회로에서 직렬집중요소로 표현된다. 따라서 Fig. 2에 도시된 전기음향등가회로에서의 분산요소와 집중요소는 모두가 직렬로 연결됨을 알 수 있다.

다중 다공판 시스템의 흡음계수를 구하기 위해서는 Fig. 2에 도시된 전기음향등가회로를 이용하여 각 요소에 대한 표면음향임피던스의 순차적 합산을 통해 시스템의 총괄표면음향임피던스가 계산되어야 한다. 요소  $i$  번째 까지의 총괄표면음향임피던스  $z_{si}$ 를 구하기 위한 계산식은 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

$$z_{si} = z_i + \frac{z_{si-1} + j \cdot \tan(kl_i)}{1 + j \cdot z_{si-1} \tan(kl_i)} \quad (1)$$

식 (1)의 첫째 항은 Fig. 2에 도시된 직렬집중요소인 다공판의 음향임피던스를 나타내며, 둘째 항은 분산요소인 직관의 음향임피던스로서 Fig. 1의 그림 (c)에 도시된 음향임피던스  $\zeta_i$ 와 대응된다.  $l_i$ 는  $i$ 번째 요소의 공기층 길이 그리고  $j = \sqrt{-1}$ 을 뜻한다. 특히 식 (1)을 이용하여  $z_{si}$ 를 구하기 위해서는 먼저 요소 1의 표면음향임피던스  $z_{s1}$ 을 다음식으로 구한다.

$$z_{s1} = z_1 - j \cot(kl_1) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하여  $z_{si}$ 를 구하기 위한 계산순서를 요약하면 다음과 같다.

(1) 식 (2)를 이용하여 구한 요소 1의 표면음향임피던스  $z_{s1}$ 을 식 (1)에 대입하여 요소 2의 다공판 음향임피던스와 합산함으로써 요소 2의 표면음향임피던스  $z_{s2}$ 가 계산된다.

(2) 요소 2의 표면음향임피던스  $z_{s2}$ 를 다시 식 (1)에 대입하여 요소 3의 다공판 음향임피던스와 합산함으로써 요소 3의 표면음향임피던스  $z_{s3}$ 가 구해진다.

(3) (2)항의 계산절차를  $i$ 번째 요소까지 반복함으로써 다중 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스  $z_{si}$ 의 계산이 완료된다.

또한 식 (1)과 식 (2)에서 보듯이 다중 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스를 구하는데 필요한  $i$ 번째 다공판의 음향임피던스  $z_i$ 는  $i$ 번째 다공판의 구멍지름과 판 두께를 각각  $d_i$ 와  $t_i$  그리고 공극률을  $\sigma_i$ 이라 할 때 다음식으로 구할 수 있다.<sup>(8)</sup>

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

이와 같이  $i$ 개의 요소로 구성된 다중 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스  $z_{si}$ 가 구해지면, 다공판 시스템의 수직입사 흡음계수  $\alpha_n$ 는 다음식으로 계산된다.

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

식 (4)에서 Re와 Im는 총괄표면음향임피던스의 실수부와 허수부를 뜻한다.

한편 Fig. 3은 최근에 발표된 Maa 그리고 Kang과 Fuchs를 비롯한 몇몇 연구자들<sup>(2-6)</sup>과 같이 직관요소를 병렬요소로 다룬 전기음향상사방식을 이용하여 다중 다공판 시스템의 전기음향등가회로를 나타낸 것이다.

이들은 Fig. 2에 도시된 요소 2부터 요소  $i$ 번째 사이의 모든 공기층을 Fig. 1의 그림 (b)와 같은 병렬집중요소(shunt lumped element)로 간주하여 등가회로에 나타내었다. 그러나 공기층은 양단에 다공판이 직렬로 연결되어 있으므로 병렬요소가 아니며, 실제 다공판 시스템의 공기층 길이가 길기 때문에 좌우측의 입사속도가 다르게 되므로 공기층은 집중요소가 아닌 분산요소가 된다. 그럼에도 불구하고 기존연구에서 요소 2부터 요소  $i$ 번째 까지의 모든 공기층을 전기음향등가회로에서 병렬집중요소로 상사시킨 것은 전기음향상사를 잘못 적용한 오류라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구문헌에 포함되어 있

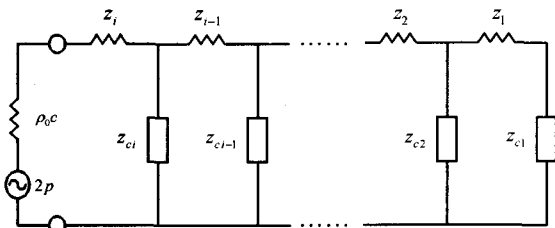


Fig. 3 Equivalent electroacoustic circuit by regarding airspaces between perforated plates as shunt lumped elements like the previous works

는 상사오류를 입증하기 위하여 Fig. 3에 도시된 전기음향등가회로로부터 다중 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스를 구하여 흡음계수를 계산하고 분산요소로 다루어 계산한 결과와 비교하였다. Fig. 3에 도시된 전기음향등가회로를 이용하여 다중 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스  $z_{si}$ 를 구하기 위한 계산순서는 다음과 같다.

(1) 식 (2)를 이용하여 요소 1의 표면음향임피던스  $z_{s1}$ 이 계산되어야 한다.

(2) 표면음향임피던스  $z_{s1}$ 은 요소 2인 공동의 음향임피던스  $z_{e2}$ 와 병렬관계이므로 요소 2의 공동까지만을 포함한 표면음향임피던스  $z_{e2}$ 는 다음식으로 계산된다.

$$z_{e2} = \frac{z_{e2}z_{s1}}{z_{e2} + z_{s1}} \quad (5)$$

(3)  $z_{e2}$ 는 요소 2의 다공판 음향임피던스  $z_2$ 와 합산되어 요소 2의 표면음향임피던스  $z_{s2}$ 의 계산이 완성된다.

(4) 이와 같은 방법으로 (2)항과 (3)항의 계산절차를  $i$ 번째 요소까지 반복하므로써  $i$ 개의 요소로 구성된 다중 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스  $z_{si}$ 의 계산이 완료된다.

### 3. 실험

Fig. 4는 다공판이 설치된 임피던스관과 측정기기의 구성도를 나타낸 것이다. 임피던스관은 두께 10 mm인 아크릴판으로 단면이 60 mm × 60 mm이고,

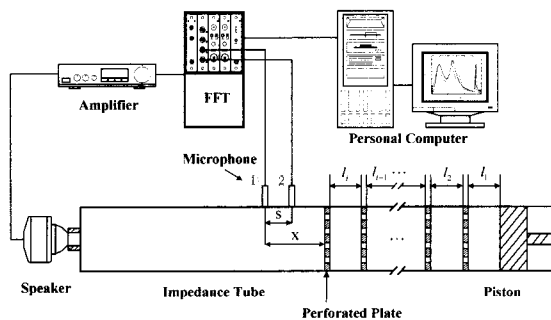


Fig. 4 Experimental setup for normal sound absorption coefficient measurement

길이 1300 mm가 되도록 제작하였다. 관의 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 출구측에는 다중 다공판 시스템이 설치되어 있다. 출구측 다공판 뒤에는 음의 누출이 없도록 강제피스톤으로 밀봉하였다.

음향신호는 음신호발생기에서 발생되어 증폭기를 거친 후, 스피커를 통해 임피던스관으로 공급된다. 관 내로 입사된 입사음의 총음압레벨은 110 dB~125 dB 범위로 하였다. 주파수분석기의 분석범위는 3200 Hz 그리고 해상도는 8 Hz로 하였다. 다중 다공판 시스템의 총괄표면음향임피던스는 다공판 전방의 두 지점에 설치된 1/4인치 압력형 마이크로폰으로 측정된 음향 전달함수  $H(f)$ 를 다음식에 대입하여 계산하였다.<sup>(10)</sup>

$$z_{si} = j \frac{\sin[k(s+x)] - H(f)\sin(kx)}{H(f)\cos(kx) - \cos[k(s+x)]} \quad (6)$$

식 (6)에서  $x$ 는 Fig. 4에서 보듯이 다공판으로부터 ①번째 마이크로폰 까지의 거리,  $f$ 는 주파수 그리고  $s$ 는 두 마이크로폰의 간격을 나타낸다. 본 연구에서는  $x=100$  mm 그리고  $s=40$  mm로 하였다. 다중 다공판 시스템의 흡음계수는 식 (6)을 이용하여 구한 총괄표면음향임피던스  $z_{si}$ 를 식 (4)에 대입하므로써 구해진다. 다공판은 두께  $t=1$  mm인 일반강재로서, 구멍지름  $d=1$  mm와 공극률  $\sigma=1.4\%$ , 구멍지름  $d=2$  mm와 공극률  $\sigma=3.14\%$ 인 두 종류의 다공판을 사용하였다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 이중 다공판 시스템의 공기층을 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 도시된 전기음향등가회로와 같이 분산요소와 병렬집중요소로 상사시켜 흡음계수를 계산하여 상호비교한 것이다. 구멍지름  $d=1$  mm, 두께  $t=1$  mm 그리고 공극률  $\sigma=1.4\%$ 인 다공판을  $l_1=70$  mm로 고정시킨 상태에서 요소 2의 공기층 길이  $l_2$ 만을 10 mm, 40 mm 그리고 100 mm로 변화시켰다.

도시된 결과에서 보듯이 요소 2의 공기층 길이  $l_2$ 가 짧아질수록 분산요소와 집중요소로 계산한 흡음계수값은 거의 같아지는 경향을 보이는 반면에, 공기층 길이  $l_2$ 가 길어지고 주파수가 증가하게 되면 분산요소와 집중요소로 계산한 흡음계수값은 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다.

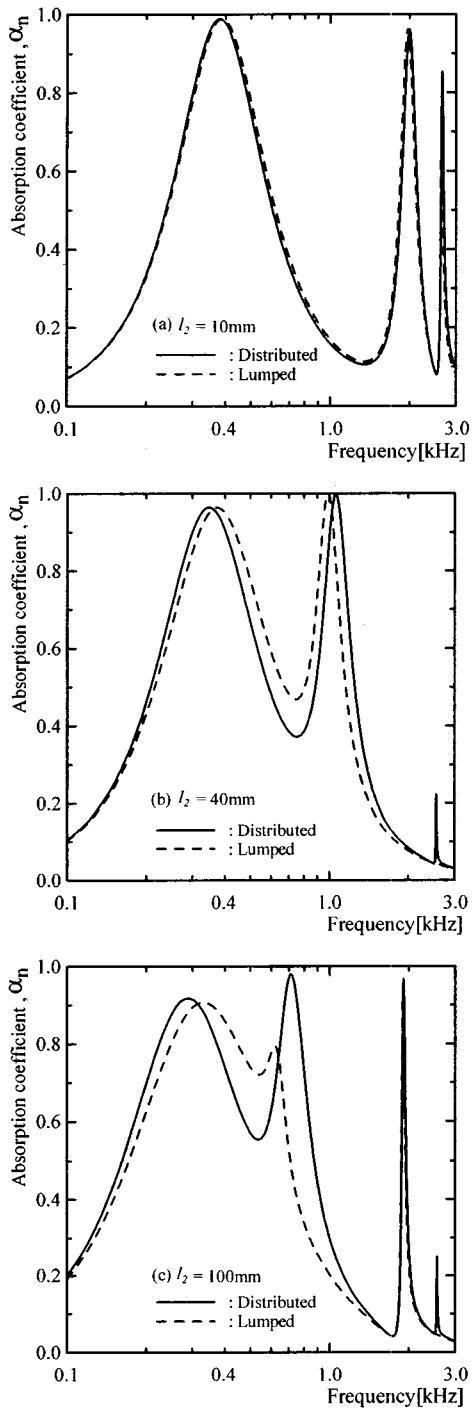
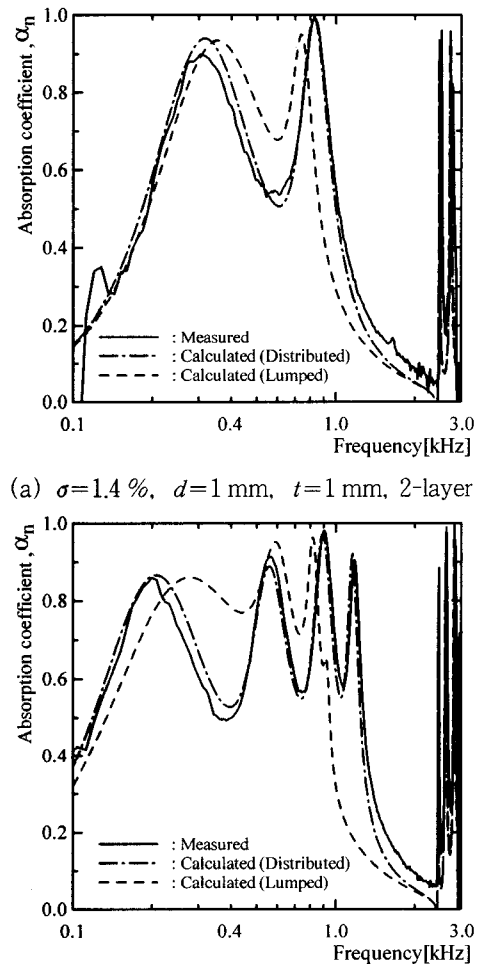


Fig. 5 Comparisons of the absorption coefficients calculated by equivalent electroacoustic circuits based on the distributed element and the lumped parallel element, respectively, for the double layer perforated plate system

Fig. 6은 다공판 사이의 공기층을 Fig. 2와 Fig. 3에 도시된 전기음향등가회로와 같이 분산요소와 병렬 집중요소로 상사시켜 2중 다공판과 4중 다공판 시스템에 대하여 흡음계수를 계산하고 측정결과와 비교한 것이다. 그림 (a)에 도시된 2중 다공판 시스템은 판의 간격  $l_1 = l_2 = 70$  mm이다. 그리고 그림 (b)에 도시된 4중 다공판 시스템 역시 판의 간격은 모두 70 mm이다.

도시된 결과를 보면 본 연구의 분산요소로 다루어 계산한 흡음계수는 측정결과와 비교적 잘 일치하는 반면에, 기존연구와 같이 병렬요소로 다루어 계산한 흡음계수는 측정결과와 큰 차이가 나는 것을 알 수



(a)  $\sigma = 1.4\%$ ,  $d = 1$  mm,  $t = 1$  mm, 2-layer  
 (b)  $\sigma = 3.14\%$ ,  $d = 2$  mm,  $t = 1$  mm, 4-layer  
 Fig. 6 Comparisons between the measured and the calculated absorption coefficients for the multiple layer perforated plate system

있다. 이러한 큰 차이는 다공판사이의 공기층 길이가 길수록, 판의 수가 많을수록, 주파수가 높을수록 증가하게 된다. 이것은 Fig. 5의 결과에서도 보았듯이 기존연구에서는 입사음의 파장과 비교하여 다공판사이의 공기층 길이가 더 긴데도 불구하고, 이 공기층을 전기음향등가회로에서 분산요소가 아닌 병렬집중요소로 상사시켜 흡음계수를 계산하였기 때문이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존 연구문헌에 보고된 다중 다공판 시스템의 전기음향등가회로 해석에 포함된 상사요류를 밝히고, 올바른 계산법을 제시하였다. 다공판 사이의 공간인 직관 요소는 등가회로에서 분산요소로 다루어야 하며 병렬집중요소로 다루어 흡음계수를 구하게 되면 주파수가 높을수록 공간의 길이가 길수록 또한, 판의 수가 많을수록 오차가 크게 발생하게 된다.

## 후 기

이 논문은 서울산업대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

(1) 이동훈, 허성춘, 권영필, 2002, "전달행렬법을 이용한 다중 다공판 시스템의 흡음성능 예측," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 9 호, pp. 709 ~ 716.  
 (2) Maa, D. Y., 1987, "Micro-perforated Panel Wideband Absorbers," Noise Control Engineering Journal, Vol. 29, No. 3, pp.77~84.

(3) 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, Vol. 220, No. 5, pp. 905~920.

(4) 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.

(5) Zwikker, C. and Kosten, C. W., 1949, Sound Absorbing Materials, Elsevier Publishing Company, Inc., Chap.VII.

(6) 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.

(7) 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.

(8) Munjal, M. L., 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, Chap. 2.

(9) 이동훈, 권영필, 2002, "다중 다공판 시스템의 흡음계수 계산에 있어서 전기음향등가회로법의 오류," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 890 ~ 895.

(10) Chung, J. Y. and Blaser, D. A., 1980, "Transfer Function Method of Measuring In-duct Acoustic Properties, II. Experiment," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 68, No. 3, pp. 914~921.