

〈논 문〉

# 박막-공동계의 주파수 특성과 응용

## Frequency Characteristics of a Membrane-Cavity System and its Applications

김 양 한\* · 임 중 민\*\*

Yang-Hann Kim and Jong-Min Im

(1999년 4월 12일 접수 : 1999년 9월 29일 심사완료)

**Key Words** : Membrane-Cavity System(박막-공동계), Low Frequency Noise Reduction(저주파 소음 저감), Absorption Coefficient(흡음계수)

### ABSTRACT

A system which is composed of a membrane and an air cavity is studied. To analyze the low frequency characteristics of a single membrane-cavity system, a plane wave model is derived. The relations among system variables, such as tension, density and stiffness, are investigated. Absorption coefficient has a maximum value at a peak frequency. In addition, a membrane-cavity system absorbs the low frequency noise with a band around peak frequency. This band is primarily determined by damping effect of the system. Furthermore, a multiple membrane-cavity system is investigated by using the transfer matrix method. To show the practical applicability of the proposed model, extensive experiments were conducted. Results show that a multiple membrane-cavity system can have broader noise reduction in the low frequency range than single one.

### 1. 서 론

폼(foam), 유리섬유(glass fiber)와 같은 흡음재는 사용의 편의성, 가격의 저렴성 등으로 인하여 소음 제어의 요소로써 광범위하게 사용된다. 이러한 흡음재의 중요한 특성 중의 하나는 주파수 범위가 고주파로 갈수록 흡음재와 유체와의 연성활동이 활발하여 에너지 소산 능력이 높아지고 따라서 소음제어 성능이 우수하다는 점이다. 반면 저주파<sup>(1)</sup> 영역에서는 이러한 연성활동이 감소하는 것이 일반적이고 따라서 소음제어의 수단으로써 한계를 가지게 된다. 그러나 판(plate)과 내부의 공기로 이루어진 판넬형

흡음재는 저주파 영역의 음향 에너지를 다른 형태의 에너지로 변환시켜 흡음을 하는 특성을 가지고 있다. 이와 같이 저주파 영역의 소음제어에 유용한 판넬형 흡음재를 효과적으로 설계하기 위하여 Ford<sup>(2)</sup>는 공동(air cavity)을 가지는 작은 크기의 사각판에 대하여 여러 개의 고유 모드를 이용한 흡음률 예측을 연구한 바 있고, Sakagami<sup>(3)</sup>는 무한계를 대상으로 키르호프 적분식을 이용하여 흡음률을 예측하였다. 이러한 선행 연구들은 흡음계의 구성 변수들(예를 들면 박막의 밀도, 공동의 깊이, 감쇠력, 장력 등)과 흡음성능에 대한 고찰이 체계적으로 밝혀져 있지 않아 구체적인 설계 방향 등을 이해하는데 한계가 있었다.

본 논문에서는 박막-공동계의 모델링을 통하여 흡음재로서의 성능인자(피크 주파수, 흡음계수, 흡음주파수 영역)를 구하고, 이들과 시스템을 구성하는 물

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 현대중공업(주)

리적 변수와의 관계를 이론 및 실험을 통해 알아본다.

## 2. 박막-공동계의 흡음 특성

박막-공동계의 흡음 특성을 알아보기 위하여, 우선 가장 단순한 형태인 1차원 박막과 공동으로 이루어진 연성계(coupling system)를 생각한다. 그리고 이를 체계적으로 해석함으로써, 궁극적인 설계 대상인 박막-공동계의 설계 인자들을 추출하고 이들 사이의 관계를 알아보도록 한다.

### 2.1 박막-공동계의 모델링 및 지배 방정식

해석 대상인 연성계는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 x 방향으로 무한한 크기를 가진 박막, y 방향으로  $h(x)$ 의 높이를 가진 공동, 그리고 공동 내부에 존재하여 박막-공동계에 탄성효과와 감쇠효과를 작용하는 물질로 구성되어 있다. 이 계의 지배 방정식은

$$\nabla^2 P_1(x, y, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P_1(x, y, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 P_2(x, y, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P_2(x, y, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

$$TV^2 \eta(x, t) - r_{sys} \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} - s_{sys} \eta(x, t) + [P_2(x, h, t) - P_1(x, h, t)] = \rho_m \frac{\partial^2 \eta(x, t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

와 같이 얻을 수 있으며, 여기서  $P_1$  및  $P_2$ 는 각각 박막을 기준으로 외부 음압 및 내부 음압,  $\eta$ 는 박막의 변위[m],  $\rho_0$ 는 공기의 밀도,  $\rho_m$ 은 박막의 밀도로 단위면적당 질량[ $\text{kg}/\text{m}^2$ ],  $s_{sys}$ 는 공동 내부에 채워지는 물질로 인해 얻어지는 단위면적당 탄성계수[ $\text{N}/\text{m}^3$ ],  $r_{sys}$ 는 박막 또는 흡음재와 같은 물질의 추가로 얻어지는 감쇠효과에 의한 단위 면적 당 감쇠계수[ $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ ]를 나타낸다.  $k$ 는 공기에서의 파수

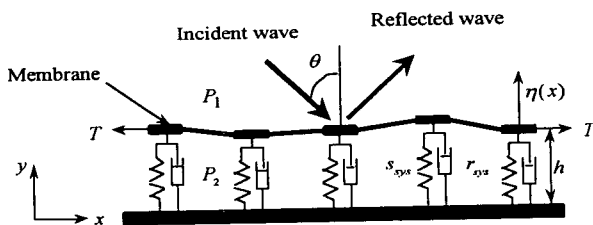


Fig. 1 Model of single membrane-cavity system

(wave number)로  $k = \omega / c_0$ 의 관계를 가지고 있다.  $\omega$ 는 주파수[rad/s],  $c_0$ 는 음압속도를 나타낸다. 그리고 경계조건은

$$\left. \frac{\partial P_2}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial P_1}{\partial y} \right|_{y=h} = \rho_0 \omega^2 \eta, \quad \left. \frac{\partial P_2}{\partial y} \right|_{y=h} = \rho_0 \omega^2 \eta \quad (5)$$

와 같다. 식 (4)는  $y=0$ 인 벽면에서의 강제조건을 나타내고, 식 (5)는 박막 표면에서 내부 음장 및 외부 음장의 유체 움직임과 박막의 변위가 같음을 나타낸다.

### 2.2 박막-공동계의 해석해

외부에서 작용하는 소음에 대한 연성계의 특성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같이 y축에 대해  $\theta$ 의 각을 가지며 입사하는 소음의 경우를 고려하면 외부 음장 및 내부 음장은 지배 방정식과 경계조건으로부터

$$P_1(x, y, t) = (I \cdot e^{jk_y(y-h)} + Rr \cdot e^{-jk_y(y-h)}) e^{j(\alpha x - k_x x)} \quad (6)$$

$$P_2(x, y, t) = C \cdot \cos(k_y y) e^{j(\alpha x - k_x x)} \quad (7)$$

$$\eta(x, t) = \hat{\eta} \cdot e^{j(\alpha x - k_x x)} \quad (8)$$

$$\text{where, } k_x = k \sin \theta, \quad k_y = k \cos \theta \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다. 위의 식을 지배 방정식 식 (3)과 경계조건 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (10)과 같이 입사파와 박막의 속도 관계를 임피던스 개념으로 표현할 수 있다. 여기서  $Z_m$ 은 박막에 의한 임피던스로 관성, 장력, 공동에 갇혀있는 공기

$$(j \cdot Z_m + Z_f) \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} = -2I e^{j(\alpha x - k_x x)} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } Z_m = \rho_m \omega - \frac{Tk_x^2}{\omega} - \frac{s_{sys}}{\omega} - \frac{\rho_0 c_0 \cot(k_y h)}{\cos \theta}$$

$$Z_f = (r_{sys} + \frac{\rho_0 \cdot \omega}{k_y})$$

에 의한 영향을 나타내고,  $Z_f$ 는 주위에 존재하는 유체와 박막 그리고 공동 내부의 물질에 의한 감쇠력의 영향을 나타내는 임피던스를 의미한다.

흡음재로서 박막-공동계의 특성을 판단하기 위한 수단으로 단위 입사에너지에 대한 경계면에서의 에너지 흡수 정도를 나타내는 흡음계수를 이용할 수 있다. 경계조건 식 (5)를 이용하면 반사계수  $R$ 을

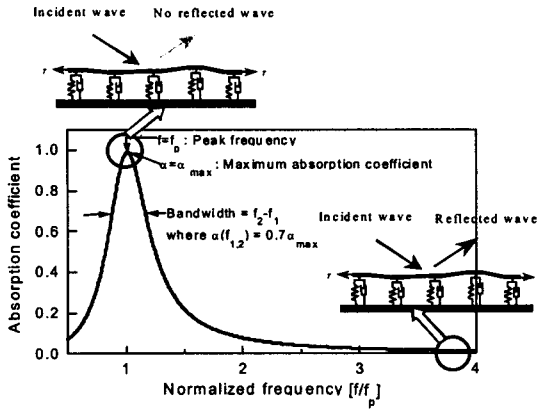


Fig. 2 Absorption coefficient in a membrane-cavity system

구할 수 있으며, 따라서 흡음계수  $\alpha$ 는

$$\alpha = 1 - |R|^2 = \frac{4 \left( \left( \frac{Z_f}{\rho_o c_o} \right) \cos \theta - 1 \right)^2}{\cos^2 \theta \left( \left( \frac{Z_f}{\rho_o c_o} \right)^2 + \left( \frac{Z_m}{\rho_o c_o} \right)^2 \right)} \quad (11)$$

과 같이 표현된다.

Fig. 2는 식 (11)을 이용하여 주파수의 변화에 따른 흡음률을 나타낸 것으로 특정 주파수(이후로는 이 주파수를 피크 주파수라 정의한다.)를 중심으로 주파수 대역폭(bandwidth)을 가지고 흡음이 가능함을 확인할 수 있다. 박막-공동계의 임피던스와 흡음률의 관계로부터 식 (10)에서 임피던스의 허수항 [ $Z_m$ ]이 0이 되는 주파수에서 흡음률의 값이 가장 크고 이것이 피크 주파수에 해당함을 알 수 있다. 즉 박막-공동계의 질량 효과와 탄성 효과에 의해 결정되는 공진 주파수에서 음향 에너지를 최대로 흡수하는 것이다<sup>(4)</sup>. 그리고 흡음계수는 소음의 입사각  $\theta$ 의 함수로, 박막의 운동을 원활히 일으키는 수직 입사(normal incidence)의 경우( $\theta=0$ ) 큰 값을 가지지만, 박막 표면에 대해 소음이 평행입사(grazing incidence)하는 경우에 있어서는 흡음의 기능이 감소함을 알 수 있다.

선정한 모델, 즉 무한 박막-공동계의 흡음특성은 피크 주파수, 최대 흡음계수, 대역폭(bandwidth) 등으로 표현됨을 살펴 볼 수 있었다. 다음으로 이러한 인자들이 어떠한 물리적 변수에 의해 결정되는지 살펴 보기로 한다.

### 2.3 피크 주파수의 예측

피크 주파수는 물리적으로 박막과 주변에 존재하는 유체와의 연성작용이 활발한 주파수를 의미한다. 계의 임피던스와 흡음률과의 관계로부터 박막과 공동에 의한 임피던스의 허수항이 0, 즉  $Z_m=0$ 이 될 때

$$\rho_m \omega - \frac{Tk_x^2}{\omega} - \frac{s_{sys}}{\omega} - \frac{\rho_o c_o \cot(k_y h)}{\cos \theta} = 0 \quad (12)$$

와 같이 피크 주파수와 계의 구성변수 간의 관계식을 얻을 수 있다. 그리고 관심의 대상이 되는 피크 주파수가 저주파 영역에 존재한다는 점을 고려하면  $\cot(k_y h)$ 를 테일러 전개 (Taylor series)를 이용하여

$$\cot(k_y h) \cong 1/k_y h, \quad |k_y h| \ll 1 \quad (13)$$

과 같이 근사화 시킬 수 있고,

이를 식 (12)에 대입하여 정리하면 식 (14)와 같이 근사화된 피크 주파수를 구할 수 있다.

$$f_p \approx \frac{2}{\pi} f_o \left[ \frac{(\rho_o h / \rho_m) \sec^2 \theta}{1 - (c_m / c_o)^2 \sin^2 \theta} \right]^{1/2} \quad (14)$$

여기서,  $f_o = \frac{c_o}{4h}$ ,  $c_m = \sqrt{T / \rho_m}$

위의 관계식으로부터 피크 주파수는  $h$  높이의 공동을 가지는 강제 벽 사이에서의 공명 주파수 항과 박막, 유체와의 상호작용을 나타내는 항으로 표현되며 유체와의 상호작용에 의해 흡음 주파수가 저주파 영역으로 이동하게 된다. 식의 각 항을 살펴보면, 먼저 분자에서는 공동의 깊이가, 분모에서는 장력의 영향이 상대적으로 작고 박막의 밀도가 피크 주파수의 결정에 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. 결과적으로 박막의 밀도가 클수록, 공동의 깊이가 깊을수록 피크 주파수는 저주파 영역으로 이동한다.

### 2.4 흡음률의 최대값

흡음률은 박막과 음장의 연성활동이 활발한 피크 주파수에서 최대값을 가지게 된다. 따라서 식 (11)에  $Z_m=0$ 을 대입하면

$$\alpha_{max} = \frac{4 \left( \frac{r_{sys} \cos \theta}{\rho_o c_o} \right)^2}{\left( \frac{r_{sys} \cos \theta}{\rho_o c_o} \right)^2 + 2 \left( \frac{r_{sys} \cos \theta}{\rho_o c_o} \right) + 1} \quad (15)$$

와 같이 흡음률의 최대값을 표현할 수 있다.

식 (15)에서 볼 수 있듯이 흡음계수의 최대값은 입사각  $\theta$ 와 박막-공동계의 감쇠계수를 공기의 임피던스( $\rho_o \rho_c$ )로 무차원화한 항으로 표현되며 감쇠계수와 입사각의 곱이 공기중의 임피던스와 같아지는 상황에서 완전한 흡음이 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 상황은 물리적으로 공동 내부가 음파가 전파하는데 있어서 아무런 제한이 없는 자유 공간임을 의미한다.

2.5 흡음계수의 대역폭

흡음재가 보다 넓은 주파수 대역에서 작용할수록 그 성능이 우수하다는 평가를 받을 수 있을 것이다. 따라서 다루고 있는 모델의 대역폭이 어떠한 변수의 영향을 받는지 알아볼 필요가 있다. Fig. 2에서 나타나는 흡음률의 주파수 특성으로부터 흡음률의 대역폭을 식 (16)의 관계를

$$\alpha(f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha_{\max} \tag{16}$$

만족시키는 주파수 대역으로 정하고, 식 (11), (15)를 위의 식에 대입하여 정리하면 흡음률의 대역폭은

$$\Delta f = f_2 - f_1 \approx \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\sqrt{2}-1 \left( \frac{r_{\text{sys}}}{\rho_o c_o} \cos \theta + 1 \right)}{\frac{\rho_m}{\rho_o c_o} \cos \theta \left( 1 - \frac{c_m^2}{c_o^2} \sin^2 \theta \right)} \right] \tag{17}$$

식 (17)과 같이 입사각, 박막의 밀도, 감쇠계수의 함수로 표현된다.

식 (17)에서 분모의 항이 0인 경우는 물리적으로 박막에 작용하는 장력이 매우 큰 상황으로, 박막이 강체 벽처럼 작용하여 운동할 때의 공진 주파수에 해당하며 이때 대역폭은 정의되지 않는다.

위의 해석으로부터 감쇠계수의 조절을 통하여 흡음률의 최대값과 주파수 대역폭을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

3. 박막-공동계의 수치해석 및 실험

앞에서 무한한 크기를 가지는 박막-공동계에 대하여 흡음성능과 물리적 변수와의 관계를 살펴 보았다. 그러나 실제의 경우 박막은 유한한 크기를 가지므로, 앞에서의 극한적 분석 결과가 실제 응용에 대해 어떠한 제한성이 있는지 살펴보는 것이 필요하다. 즉, 박막이 유한한 크기를 가질 때 나타나는 효과를 분석해 보아야 할 것이다. 이를 위해서는 적절한 수치해석과 이의 확인을 위한 실험이 필요하다.

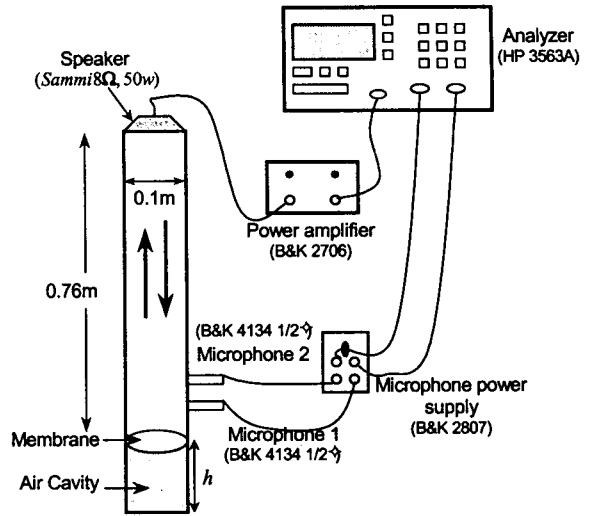
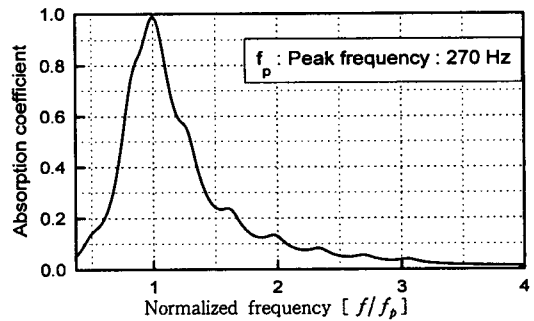


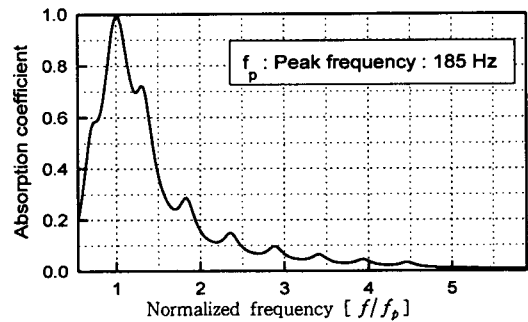
Fig. 3 Experimental setup of membrane-cavity system

Table 1 Variables used in numerical simulations

Density of membrane	1.06 kg/m <sup>2</sup>
Tension	100 N/m
Loss factor of membrane	0.2 <sup>(11)</sup>



(a) Cavity depth : 0.05 m



(b) Cavity depth : 0.1 m

Fig. 4 Absorption coefficient in a membrane-cavity system (Numerical simulations)

이를 위하여 다양한 크기에 대한 이론적 수치해석과 실험이 수행되었으며 Fig. 3은 이러한 목적을 위하여 선택된 유한한 크기를 가지는 모델과 실험장치를 보여주고 있다.

Fig. 4, 5는  $h=0.05$  m, 0.1 m의 공동 높이를 가지는 유한한 크기의 박막에 대한 수치해석과 실험 결과를 보여주고 있다. 수치해석과 실험 결과로부터  $h=0.05$  m의 공동에서는 270 Hz 부근에서, 0.1 m의 공동에서는 185 Hz 부근에서 박막과 공동의 상호작용에 의한 피크 주파수가 나타나며 공동의 높이 증가에 따라 피크 주파수가 저주파 영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2의 무한한 크기를 가지는 박막-공동계의 주파수 특성과 달리 유한한 크기를 갖는 박막-공동계에 대한 수치해석과 실험 결과에서는 피크 주파수 외의 주파수 영역에서 조그만 피크 값들이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 유한한 크기와 경계조건으로 인하여 박막의 고유 모드에 해당하는 주파수로 가진 될 때 박막-공동의 연성효과가 커져 흡음계수의 값이 주위의 주파수보다 높아지기 때문이다. 위의 사실로부터 박막-공동계의 주파수 특성 파악에 무한

Table 2 Variables used in experiments

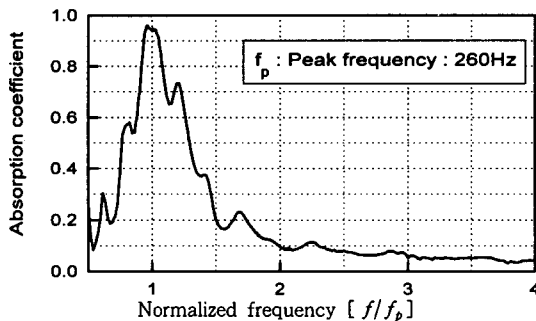
Density of membrane	1.06 kg/m <sup>2</sup>
Density of form	33.9 kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus of form	$2.15 \cdot 10^5 \cdot (1+0.21j)$ N/m <sup>2</sup>
Shear modulus	$7 \cdot 10^4 \cdot (1+0.14j)$ N/m <sup>2</sup>
Flow resistance of form	22.1 kRays/m

계를 이용한 해석이 유용한 것과 특정 주파수 영역의 소음을 제어할 수 있는 가능성을 알 수 있다.

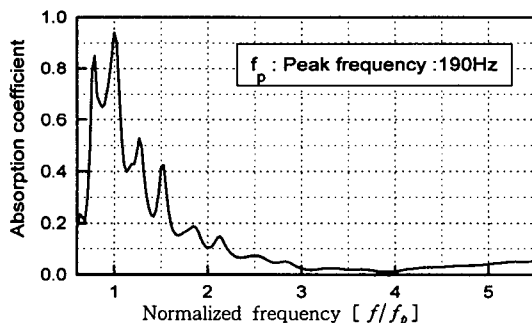
#### 4. 흡음재가 결합된 박막-공동계

지금까지 살펴본 박막-공동계가 유용한 흡음재로써 작용하기 위해서는 좀 더 넓은 주파수 영역에서 소음저감을 이룰 수 있는 방법에 관한 연구가 필요할 것이다. 앞에서 박막-공동계의 성능인자와 물리적 변수의 관계로부터 감쇠계수의 조절을 통하여 흡음성능의 향상을 이룰 수 있음을 알 수 있었다<sup>(4)</sup>. 박막에 감쇠력을 추가할 수 있는 손쉬운 재료로는 흡음재를 택할 수 있다. 이는 흡음재 내부의 소산작용으로 인한 감쇠력과 다공성 구조로 인한 공동의 효과를 유지할 수 있기 때문이다. 흡음성능의 향상을 위해 기존의 박막-공동계가 감쇠력 효과를 가지는 흡음재와 결합되었을 때 나타나는 현상에 대하여 살펴보는 것은 박막-공동계의 실용적 적용 측면에서 많은 가치가 있을 것이다. 박막-공동계에 대한 흡음재의 배치는 여러가지 경우를 생각해 볼 수 있으며 이러한 배치는 전체적인 흡음성능의 변화를 일으킬 것이라 예측할 수 있다. 흡음재가 결합된 박막-공동계의 주파수 특성을 알아보기 위해 다양한 흡음재의 배치에 대한 실험이나 해석이 필요하다<sup>(4)</sup>. 해석적 접근이 궁극적인 면에서 보다 좋은 방법이라 할 수 있으나 기본적인 박막-공동계, 흡음재 배치에 따른 흡음효과를 정성적으로 관찰하기 위해서는 실험적 방법이 보다 효과적이라 할 수 있다. 다양한 배치에 따른 실험이 수행 되었고, 그 결과 다음과 같은 두 가지 경우로 특성을 파악할 수 있다. Table 2는 실험에 사용된 박막과 흡음재의 측정된 물성치를 나타낸다.

Fig. 6(a)는 박막 위에 흡음재가 위치해 있을 때 주파수에 따른 흡음률의 변화를 나타낸다. 저주파 영역에서는 박막과 공동의 상호작용에 의하여 피크 주파수를 중심으로 대역폭을 가지며 소음을 제어하



(a) Cavity depth : 0.05 m

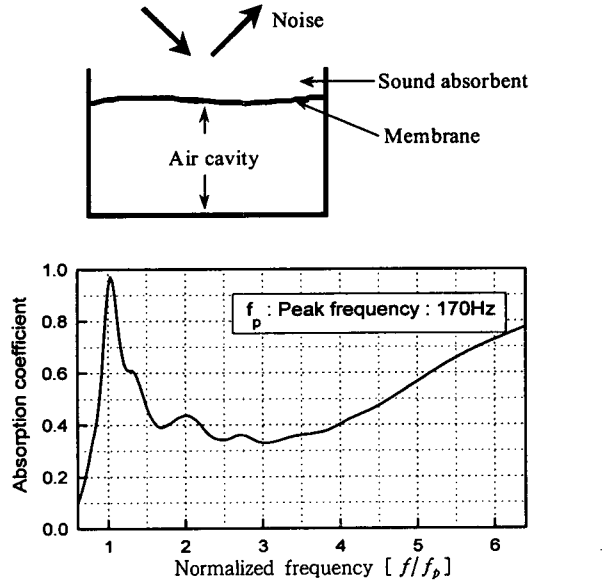


(b) Cavity depth : 0.1m

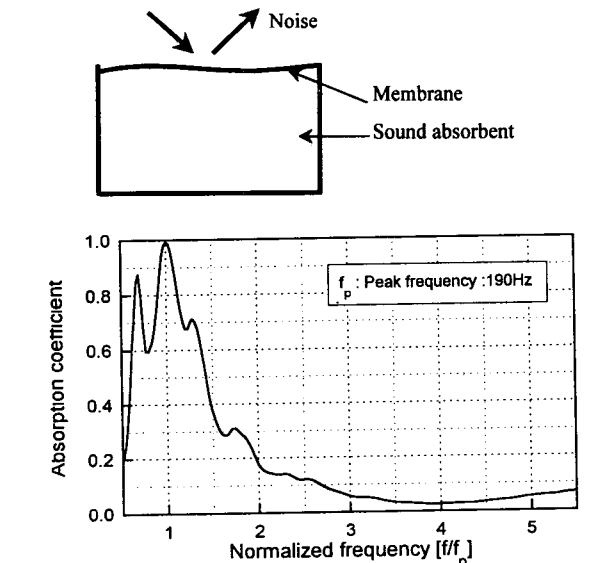
Fig. 5 Absorption coefficient  $\alpha$  in membrane-cavity system (Experiments)

고 고주파 영역에서는 박막 위에 존재하는 흡음재에 의해 소음을 제어하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6(b)는 공동 내부에 흡음재가 존재하는 경우 흡음률의 특성을 나타낸다. 공동 내부에 존재하는 흡음재가 박막에 접촉할 때 좀 더 넓은 저주파 대역에서 흡음률의 향상을 볼 수 있다. 이는 외부에서 입사되는 음향 에너지가 박막의 운동에너지로 변환



(a) Case of sound absorbent over the membrane-cavity system



(b) Case of sound absorbent in the membrane-cavity system

Fig. 6 Absorption coefficient in a membrane-cavity system with sound absorbent (cavity depth = 0.1 m)

되고 이것이 흡음재로 전달된 후 흡음재 내부의 소산 작용에 의해 흡수되기 때문이다. 이러한 현상으로부터 공동 내부에 흡음재를 배치하여 박막에 감쇠효과를 부여함으로써 저주파 영역의 소음을 효과적으로 제어할 수 있는 가능성을 알 수 있다.

### 5. 다중 박막-공동계

앞에서 박막-공동계의 흡음 특성을 알아보기 위하여, 하나의 박막과 공동으로 이루어진 연성계에 대하여 해석을 시도하였다. 그 결과 박막과 공동의 상호작용에 의해 결정되는 피크 주파수를 중심으로 흡음하는 특성을 살펴 볼 수 있었다. 이러한 현상으로부터 계의 공진 주파수가 여러 개 존재하는 다중 박막-공동계의 경우 다수의 피크 주파수 영역을 제어함으로써 좀 더 넓은 주파수 영역에서 음향 에너지를 흡음할 수 있는 가능성이 존재함을 예측해 볼 수 있다.

#### 5.1 이중 박막-공동계의 흡음 특성

다중 박막-공동계의 특성을 알아보기 위해 Fig. 7과 같이 2개의 박막이 존재하는 이중 박막-공동계의 해석이 가치 있음을 알 수 있다. 해석계는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 x방향으로는 무한한 크기를 가진 2개의 박막, y방향으로는  $h_1$ ,  $h_2$ 의 깊이를 가진 공동 그리고 공동 내부에 존재하여 박막-공동계에 탄성효과와 감쇠효과를 작용하는 물질로 구성되어 있다.

Fig. 8은 박막의 밀도가  $1.06 \text{ kg/m}^2$ ,  $h_1=0.1 \text{ m}$ ,  $h_2=0.05 \text{ m}$ 의 조건에서 수직입사의 경우에 대해 주파수에 따른 흡음계수의 변화를 나타낸다. 위의 수치해석 결과로부터 이중 박막-공동계에서 2개의 피크 주파수가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

박막에 작용하는 감쇠계수가 탄성계수에 비해 작다고 가정하면 식 (18)와 같이 피크 주파수를

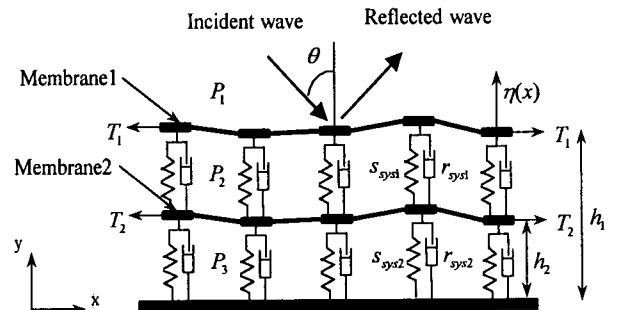


Fig. 7 Model of a double membrane-cavity system

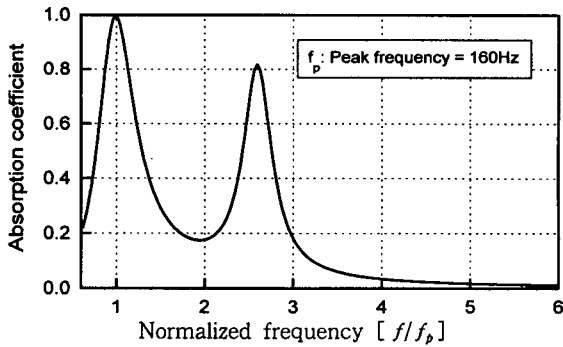


Fig. 8 Sound absorption coefficient of a double membrane-cavity system

$$f_{d1} \cong f_1 \sqrt{\frac{(f_2/f_1)^2}{1+(f_2/f_1)^2}} \quad (18)$$

여기서,  $f_{d2} \cong f_2 \sqrt{\left(1+(f_1/f_2)^2\right) \cdot \frac{h_1}{h_1-h_2} - \frac{(f_1/f_2)^2}{1+(f_1/f_2)^2}}$

$$f_{1,2} \approx \frac{2}{\pi} f_0 \left[ \frac{(\rho_o h_{1,2} / \rho_{m1,2}) \sec^2 \theta}{1 - (c_{m1,2} / c_o)^2 \sin^2 \theta} \right]^{1/2}$$

$$f_o = \frac{c_o}{4h_{1,2}}, \quad c_m = \sqrt{T / \rho_{m1,2}}$$

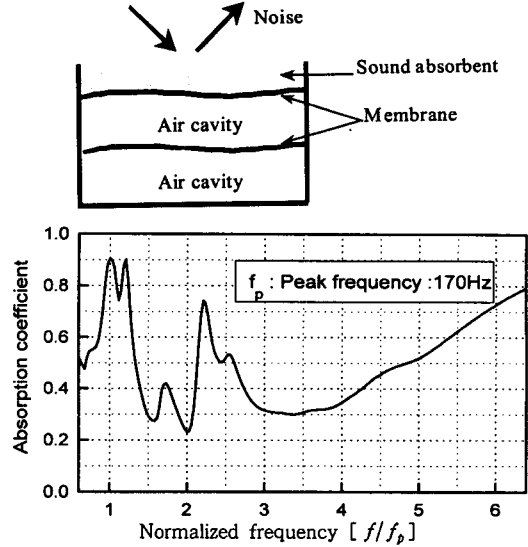
공동의 깊이가  $h_1, h_2$  일 때 단일 박막-공동계에서 나타나는 피크 주파수의 조합으로 표현할 수 있다.

여기서  $f_1, f_2$  는 공동의 깊이가  $h_1, h_2$  일 때 단일 박막-공동계의 피크 주파수에 해당한다.

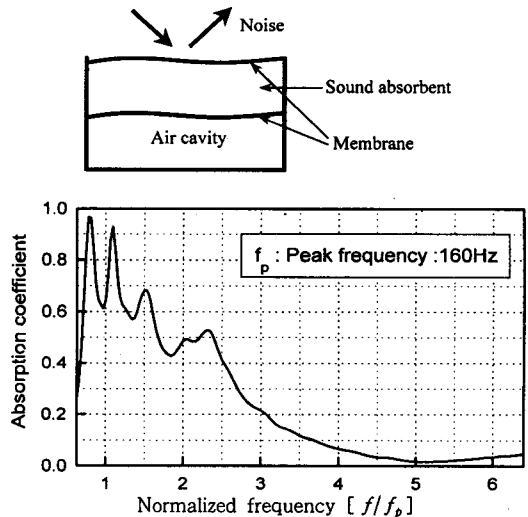
위 결과로부터 단일 박막-공동계에서 동일한 공동의 깊이로부터 얻을 수 있는 피크 주파수와 비교해 볼 때 이중 박막-공동계의 경우 더 낮은 저주파 성분을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

### 5.2 흡음재가 결합된 이중 박막-공동계

단일 박막-공동계처럼 이중 박막-공동계에 대해서도 흡음재의 추가, 배치가 전체적인 흡음성능의 변화를 일으킬 것이다. 이를 알아보기 위해 전달 행렬을 이용한 수치해석과 실험을 통해 여러가지 경우에 있어서 박막에 대한 흡음재 배치의 영향에 대해 살펴 보았다<sup>(4)</sup>. 그 결과 다음의 두 경우에서 적은 양의 흡음재를 이용하여 효과적으로 소음을 제어할 수 있는 가능성을 확인해 볼 수 있었다. Fig. 9는 박막의 밀도가  $1.06 \text{ kg/m}^2$ ,  $h_1=0.1 \text{ m}$ ,  $h_2=0.05 \text{ m}$  의 조건에서 행해진 실험 결과를 나타낸다. Fig. 9(a)는 이중 박막의 상부에 흡음재가 위치해 있는 경우로 저주파 영역에서는 박막과 공동의 상호작용



(a) Case of sound absorber over the membrane-cavity system



(b) Case of sound absorber between the membranes

Fig. 9 Absorption coefficient in a double membrane-cavity system with sound absorber ( $h_1=0.1 \text{ m}$ ,  $h_2=0.05 \text{ m}$ )

에 의해서, 고주파 영역에서는 박막 위에 위치해 있는 흡음재의 영향에 의해 흡음을 한다. Fig. 9(b)는 두 박막 사이에 흡음재가 존재하는 경우로 박막 사이에 위치한 흡음재에 의한 감쇠력 효과를 두개의 박막에 작용함으로써 좀 더 넓은 저주파 영역의 에너지를 제어하는 가능성을 볼 수 있다.

## 6. 결 론

단일 박막-공동계에서 성능인자와 구성변수 사이

의 상관관계를 파악하고 이를 이용하여 저주파 영역에서의 소음제어 성능 확인 및 흡음성능의 개선을 위한 방법에 관하여 연구를 수행하였다. 그리고 이를 바탕으로 다중 박막-공동계에서의 흡음특성을 살펴 보았다. 그 결과 다중 박막-공동계가 흡음재와 연계 되었을 때 단일 박막-공동계 보다 넓은 영역에서 저주파 소음을 효율적으로 제어할 수 있음을 확인해 볼 수 있었다.

### 참 고 문 헌

(1) Beranek, L. L. 1988, "Noise and Vibration

Control", Institute of Noise Control Engineering, pp. 219~224,456.

(2) Ford, R. D., 1969, "Panel Sound Absorber", Journal of Sound and Vibration, Vol. 10(3), pp. 411~423.

(3) Sakagami, K., Gen H. and Morimoto, M., 1996, Acoustic Properties of an Infinite Elastic Plate Backed by Multiple Layers, Acustica, Vol. 82, pp. 45~53.

(4) 임종민, 1999, 박막과 공동계의 저주파 특성 고찰, 한국과학기술원 기계공학과, 석사학위논문.