

## 박막을 이용한 저주파수 영역 덕트 소음 저감 방법

### Low Frequency Noise Reduction Inside Duct by Using Membrane

전 중 훈<sup>†</sup> · 김 양 한<sup>\*</sup>

Jong-Hoon Jeon and Yang-Hann Kim

(2004년 4월 9일 접수 : 2004년 10월 1일 심사완료)

**Key Words** : Membrane(박막), Structural-acoustic Coupling(구조-음향 연성), Transmission Loss(투과 손실)

#### ABSTRACT

Two noise reduction systems are proposed in order to overcome the geometric restriction of the reactive muffler such as an expansion chamber. First, membrane is installed as a part of a duct wall and an air cavity is covered outside membrane. Second, membrane is installed inside a duct, which gives no volume change of the duct. Structural-acoustic coupling between membrane and fluid inside the cavity and duct causes rapid impedance mismatching and thereby reflected wave. Theoretical prediction is conducted by using modal expansion approach. The results are compared with the experimental results, which show better noise reduction performance than an expansion chamber.

#### 1. 서 론

관 내에서 발생하는 저주파수 영역(약 500 Hz 이하)의 소음을 줄이기 위해 다양한 형태의 소음기가 사용된다. 이 중 확장관과 같은 반사형 소음기는 큰 공간을 요구하는 단점이 있으며, 능동소음제어 방법은 비용이 큰 단점이 있다. 공간을 많이 차지하는 단점을 보완하는 방법으로써 관 내에 비대칭적인 구조물을 설치하는 방법<sup>(1)</sup>이 있으나, 매우 제한적인 주파수에만 가능하다. 기존 소음기의 이러한 단점을 극복하기 위해 박막과 같은 구조물과 유체의 연성 작용을 통해서 음향 에너지를 박막의 운동 에너지로 변환시키거나, 박막의 운동으로 인한 임피던스 부정합을 유발하여 반사파를 형성하는 방법에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.<sup>(2~5)</sup> 선행 연구를 살펴 보면, 박막과

음장의 연성을 이용하여 덕트 벽면의 일부가 박막인 경우 투과 손실을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 이 경우 박막 외부로 나가는 소음을 막기 위해 박막 외부에 공동을 설치해야 하며, 이로 인해 박막 외부의 공동이 추가적인 경계 조건으로 작용하게 된다. 즉, 박막의 물리적인 특성 외에 공동의 크기에 의해서도 소음 저감 특성이 변하게 된다. 이러한 변수들이 투과 손실에 어떠한 영향을 미치는지 이론적으로 해석하고 실험을 통해 검증할 필요가 있다. 부피의 변화 없이 소음을 저감시키는 방법으로서 박막을 덕트 내부에 삽입하는 것이 얼마나 소음 감소 즉, 투과 손실을 발생시키는지에 대한 구체적인 연구 또한 필요하다. 즉, 박막을 덕트에 설치하는 방법에 따라 구체적으로 어느 정도의 소음 감소가 박막의 고유 진동수 영역에서 발생하는지 공부할 필요가 있다.

#### 2. 박막-음장 연성계의 소음 저감 원리

박막을 이용해서 소음을 줄이는 방법을 공부하기 위해서 우선 어떠한 원리를 통해서 박막이 소음을 저감시키는지 알아볼 필요가 있다. 이를 위해 먼저 박

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : echovel@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

<sup>\*</sup> 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

막과 음장이 연성을 일으키는 경우 발생하는 물리적인 현상을 지배하는 지배 방정식에 대해서 살펴보고, 이를 기반으로 하여 유한한 길이를 가지는 박막이 소음을 저감시킬 수 있는 근본 원리를 파악할 필요가 있다.

### 2.1 박막-음장 연성계의 지배 방정식

구조체의 진동에 의해 발생하는 음장의 문제를 해석할 때 구조물의 거동이 주위 유체에 의하여 받는 영향은 구조체의 크기가 파장에 비해 충분히 작거나, 구조체의 특성 임피던스(characteristic impedance)가 유체의 특성 임피던스에 비해 충분히 큰 경우 무시할 수 있을 정도로 작다. 만약 구조체의 크기가 커지거나 구조체가 박막과 같은 유연한 구조물일 경우, 유체가 구조체에 미치는 영향은 더 이상 배제할 수 없다. Fig. 1과 같이 2차원 덕트 내부에 무한한 길이의 박막과 음장이 서로 접해 있는 경우를 이용하여 보다 자세한 관련 현상을 살펴 보기로 하자. 이 경우 박막과 음장의 연성 지배 방정식은

$$T\nabla^2\eta + \rho_m\omega^2\eta + [p_- - p_+]_{y=0} = 0 \quad (1)$$

이다.  $T, \rho_m, \eta$ 는 각각 박막에 인가된 단위 길이당 장력, 박막의 면밀도 및 박막의 변위를 나타낸다.  $p_+, p_-$ 는 박막과 인접한 부분의 음장으로 각각 경계 조건과 파동 방정식을 만족한다. 식 (1)은 박막의 거동에 박막 주위의 음장이 영향을 준다는 사실을 나타낸다. 이와 같이 박막이 음장과 연성을 일으키는 경우 음장의 음향 임피던스는 박막의 거동으로 인해 변화를 일으킨다. 따라서 이러한 임피던스 부정합의 원리를 이용하면 덕트 내부에 입사파가 존재하는 경

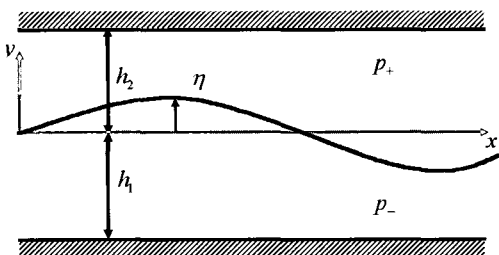


Fig. 1 Infinite membrane-acoustic coupling system

우 반사파 형성을 통한 소음 저감으로의 적용이 가능할 것이다.

### 2.2 소음 저감 모델의 제안

이제 현실적으로 생각할 수 있는 유한한 길이의 박막을 이용해서 소음을 저감하는 방법에 대해 고려해 보자. 효율적인 소음 저감을 위해서는 소음 저감의 크기도 중요하지만 공간상 제약이 크지 않아야 하며, 관 내부의 유동을 방해하는 요소 또한 고려해야 한다. 이러한 제약이 발생하지 않는 간단한 경우로 Fig. 2의 2가지 경우를 생각할 수 있다. Fig. 2(a)는 덕트의 벽의 일부를 박막으로 대체한 경우이며, Fig. 2(b)는 평면파 진행 방향에 평행하게 박막을 설치한 경우이다. 두 경우 모두 박막을 설치하기 이전의 덕트에 비해 부피의 변화도 없고 유동을 방해하지 않지만 이들은 각각 한계를 가지고 있다. Fig. 2(a)의 경우 박막 외부로 빠져 나가는 소음이 존재하기 때문에 소음 저감 시스템으로서의 효용성이 떨어진다. Fig. 2(b)의 경우 박막이 관심 주파수 영역의 파장에 비해 매우 얇다는 가정 하에  $p_1, p_2$ 가 같기 때문에 박막은 운동을 하지 않으며, 따라서 연성을 일으키지 않게 된다.<sup>(6)</sup> 그러므로 이 경우 소음 저감 효과를 기대할 수 없다. 이를 극복하기 위하여 공간상 제약 및 유동의 저항을 일부 허용하는 대신 각각 박막 외부에 공동을 씌워 밖으로 새어나가는 소음을 막거나, 박막을 평면파 진행 방향에 기울여 설치하는 방법을 생각할 수

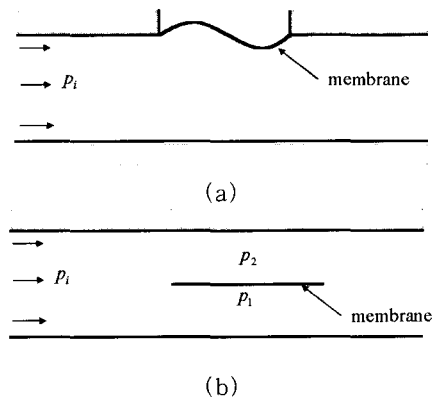


Fig. 2 Thinkable cases of noise reduction system by (a) installing membrane as part of duct wall and by (b) inserting membrane inside the duct parallel to the direction of plane wave

있다. 이 논문에서는 전자의 경우 중 부피의 변화가 동일할 경우 박막의 밀도에 따른 투과 손실의 변화에 대해서 다룬다. 후자의 경우는 박막이 평면과 진행 방향에 수직하게 설치된 경우, 박막이 덕트 단면을 가로막는 비율에 따른 투과 손실의 변화에 대해 공부해 본다.

### 2.3 소음 저감의 원리

2.2에서 제안한 모델은 Fig. 3과 같이 그림으로 표현할 수 있다. Fig. 3(a)의 경우 입사파는 공동과 덕트 내부의 음압의 차이를 유발하고 이로 인해 박막이 운동하게 된다. 이 경우 박막과 공동 내부의 음압이 연성을 일으켜 임피던스 부정합을 유발하며, 이는 박막-공동계의 고유 진동수 부근에서 발생할 것이라고 예측할 수 있다. 이는 박막-공동계가 이루는 관성 효과와 강성 효과로 이루어진 질량-스프링계로 상사했을 때 박막의 면밀도가 질량으로 작용하게 되고, 박막에 인가된 장력 및 공동 내부의 유체는 각각 탄성력 및 컴플라이언스(compliance)로 작용한다.<sup>(3)</sup> 따라서 박막의 장력, 밀도 및 공동의 크기를 통해 소음을 저감시키는 주파수 영역을 조절할 수 있다. 이러한 물리적 의미를 Fig. 3(b)에도 동일하게 적용하여 보자. 이 경우 입사파가 박막에 가진력으로 작용하며, 이로 인해 박막은 고유 진동수 영역에서 임피던스 부정합을 일으켜 반사파를 형성할 것이라고 예측할 수 있다. 이 경우 박막의 길이 및 면밀도가 질량으로 작용하고, 박막에 인가된 장력이 탄성력으로 작용하게 되며, 이들의 관계로 인해 고유 진동수가 결정된다.

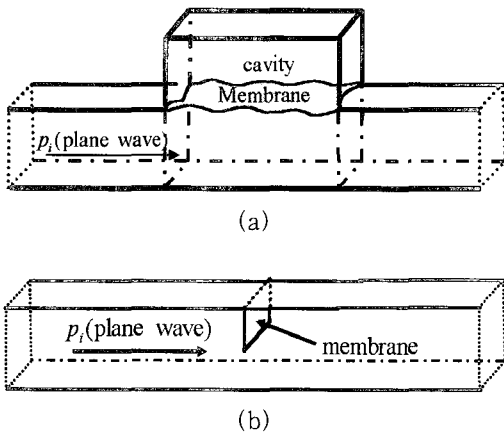


Fig. 3 Two suggested systems: (a) membrane-duct system with an air cavity, (b) vertically inserted membrane-duct system

이와 같이 제안한 2가지 모델의 물리적인 의미를 통해 소음 저감 방법의 원리를 살펴 보았다. 특히 박막의 물리적 특성인 장력 및 면밀도는 소음 저감 시스템의 규모에 영향을 주지 않으므로 이들을 적절히 조합하면 기존의 소음 저감 시스템에 비해 효율적으로 소음을 저감시킬 수 있을 것이다.

## 3. 내부 음장의 모델링 및 해석

2장에서 두 가지 소음 저감 모델을 제안하고 소음 저감이 발생하는 주파수 영역에 초점을 맞추었다. 이와 더불어 구체적인 투과 손실의 크기를 예측하기 위해서는 이론적인 모델링을 통한 해석이 필요하다. 따라서 본 장에서는 앞서 제안한 두 가지 모델의 내부 음장을 이론적으로 해석하는 방법 및 이를 통한 투과 손실을 예측하는 방법에 대해 설명한다.

### 3.1 박막 및 내부 음장의 수학적 표현

유한한 크기를 가지는 덕트 내부의 음장 및 박막의 연성계는 연성을 일으키지 않는 계의 모드 조합을 통해서 해석할 수 있다. 평면파가 입사할 때 박막과의 연성에 의해 발생하는 반사파 및 투과파의 모델링을 통해서 투과 손실을 예측한다.

#### (1) 박막-공동계가 존재하는 경우

Fig. 3(a)와 같이 박막-공동계로 이루어진 덕트가 존재하고 덕트 왼쪽에서 입사파가 들어오는 경우에 대해 생각해 본다. 입사파에 의해서 박막이 진동하고, 진동하는 박막으로 인해 추가 음장이 발생한다고 보면 이는 비제차 지배 방정식(nonhomogeneous governing equation)으로 해석이 가능하다. 즉 박막의 움직임은 분포된 음원(distributed source)으로 해석할 수 있다. 이를 해석하기 위해서 Fig. 4와 같이 덕트와 공동의 경계에 음원 강도가 인 점 음원이 존재할 때에 대해 먼저 다룬다. 공동 및 덕트 내부의

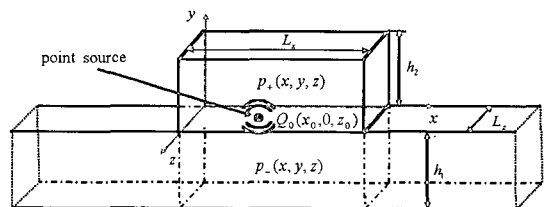


Fig. 4 Duct and a cavity system with a point source at  $(x_0, 0, z_0)$

음장의 지배방정식은

$$\nabla^2 p_+ + k^2 p_+ = -j\rho_0 \omega Q_0 \delta(x - x_0) \delta(y) \delta(z - z_0) \quad (2)$$

$$\nabla^2 p_- + k^2 p_- = -j\rho_0 \omega Q_0 \delta(x - x_0) \delta(y) \delta(z - z_0) \quad (3)$$

와 같이 쓸 수 있으며, 경계 조건은 강체벽 경계 조건을 가진다. 여기서  $p_+$ ,  $p_-$ 는 각각 공동 내부 및 덕트 내부의 음압을,  $k$ 는 파수 ( $\omega/c_0$ ,  $c_0$ 는 공기중 음의 전파 속도)를,  $\delta$ 는 크로네커 델타 함수를 나타낸다. 덕트와 공동의 경계에 점음원이 아닌 박막이 존재하는 경우에는 내부 음장을 점음원의 연속적인 분포로 표현할 수 있다. 이 경우 박막의 속도는 분포된 음원의 밀도 함수로 생각할 수 있으며, 식 (2), (3)의 음원 강도 대신 박막의 속도를 대입한다. 박막이 시간 조화운동을 하고 네 면이 모두 단순지지되어 있다고 가정하면 박막의 속도는

$$v(x, z) = \sum_{u=1}^{\infty} \sum_{w=1}^{\infty} \tilde{v}_{uw} \sin k_{xu} x \sin k_{zw} z \quad (4)$$

와 같이 연성을 일으키기 전의 고유 모드의 합으로 표현할 수 있다.  $\tilde{v}_{uw}$ 는 박막의 모드계수,  $k_{xu}$ ,  $k_{zw}$ 는 각각 박막에서  $x$  및  $z$ 방향 파수성분을 나타낸다. 이 경우 박막의 운동에 의해 방사된 음장과 박막의 속도와의 관계는 식 (2)~(3)을 만족하는 음압  $p_+$  및  $p_-$ 을 박막이 존재하는 영역에 걸쳐 에 대해 적분해서 얻을 수 있다. 박막에 의해 방사된 음장을 각각  $p_+^D(x, y, z)$ ,  $p_-^D(x, y, z)$ 라고 하고 입사파를 라고 하면 식 (1)을 통해서 입사파와 각 음장 사이의 관계를 알 수 있다.

(2) 박막이 덕트 내부에 설치된 경우

Fig. 3(b)와 같이 박막이 덕트 내부에 평면파 진행 방향에 수직하게 설치되고, 이로 인해 덕트 내부의 단면을 일부 막는 경우에 대해 생각해 본다. 이 경우 3차원 음장 및 2차원 박막으로 해석하면 수식이 매우 복잡해져서 해석에 있어 어려움이 부딪히게 된다. 따라서 이 문제의 경우 간단한 경우인 2차원 음장과 1차원 박막을 통해 물리적인 현상을 관찰하도록 한다. 입사파와 박막의 연성에 의해 발생하는 임피던스 부정합으로 인해 반사파 및 투과파가 형성되며 이들은

$$p_r(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m X'_m(x) Y'_m(y) \quad (5)$$

$$p_t(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n X'_n(x) Y'_n(y) \quad (6)$$

와 같이 표현할 수 있다.  $X'_m(x)$ ,  $Y'_m(y)$ ,  $X'_n(x)$ ,  $Y'_n(y)$ 는 각각 반사파의  $x$ ,  $y$ 방향의  $m$ 번째 성분 및 투과파의  $x$ ,  $y$ 방향의  $n$ 번째 성분을 나타낸다. 그리고  $A_m$ ,  $B_n$ 은 각각 반사파 및 투과파의  $m$ 번째 및  $n$ 번째 모드 계수를 나타낸다. 박막은 Fig. 5와 같이 덕트 벽면에 고정되어 있으며 경계 조건은 박막의 양쪽 끝의 변위가 0인 경우로 한다. 따라서 박막의 변위는

$$\eta(y) = \sum_{u=1}^{\infty} \tilde{\eta}_u \psi_u(y), \quad \psi_u(y) = \sqrt{2} \sin k_u^\alpha y \quad (7)$$

로 표현할 수 있다.  $\tilde{\eta}_u$ ,  $\psi_u(y)$ 는 각각 박막의  $u$ 번째 모드 계수 및 모드 함수를 나타내며,  $k_u^\alpha$ 는 덕트 벽면의 높이에 대한 박막의 길이의 비율이  $\alpha$ 인 경우 경계 조건을 만족하는  $u$ 번째 파수 성분이다. 박막이 단면에 대해 차지하는 비율을  $\alpha$ 라고 하면  $x=0$ 에서의 경계 조건은

$$\left. \frac{\partial(p_i + p_r)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial(p_t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \rho_0 \omega^2 \eta(y) \quad (x=0, -\alpha h_1 < y < 0) \quad (8)$$

$$p_i(0) + p_r(0, y) = p_t(0, y) \quad (9)$$

$$v_i(0) + v_r(0, y) = v_t(0, y) \quad (x=0, -h_1 < y < -\alpha h_1)$$

와 같다.  $h_1$ 은 덕트의 높이이며  $v_i$ ,  $v_r$ ,  $v_t$ 는 각각 입사파, 반사파 및 투과파의 유체 입자 속도를 나타낸다. 위의 식과 박막-음장 연성 지배 방정식을 통해 입사파, 반사파 및 투과파들의 모드 계수들의 관계를 알 수 있다.

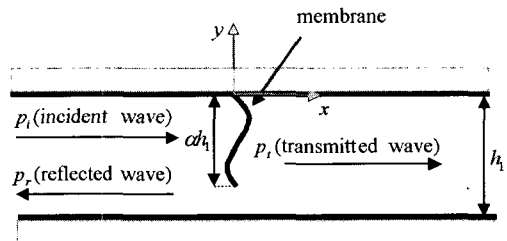


Fig. 5 Modeling of the suggested system(membrane is inserted inside the duct)

### 3.2 투과 손실 예측

3.1에서 구한 식들을 통해  $x < 0$ 인 경우 박막의 운동에 의해 왼쪽으로 진행하는 반사파를  $p_r(x) > L_x$ 인 경우 오른쪽으로 진행하는 투과파를  $p_t$ 라고 하자. 관심 주파수 영역이 저주파수 영역인 것을 감안하여 파장이 덕트 단면의 유효 길이의 2배보다 큰 경우 평면파 성분만 전파하게 된다. 이 경우 투과 손실은

$$TL[dB] = 10 \log_{10} \left| \frac{p_i}{p_t} \right|^2 \quad (10)$$

이다.

## 4. 수치 해석 및 실험 결과

3장에서 구한 식 (10)은 박막과 음장의 여러 모드들이 조합된 복잡한 계산을 거쳐서 얻을 수 있으므로 수학적 표현을 통해서 물리량의 의미를 파악하기에는 어려움이 있다. 이러한 제한성을 극복하기 위하여 컴퓨터를 이용한 그래프를 통해서 결과를 분석해본다. 이렇게 이론적으로 예측한 결과를 간단한 실험을 통해서 검증한다.

### 4.1 수치 해석을 통한 결과 예측

박막-공동계의 경우 모든 박막의 모드를 고려하여 해석하기에는 계산 수행 시간에 있어 제한이 있다. 다루고자 하는 시스템의 경우 박막의 첫 번째 모드가 지배적으로 작용하므로 박막의 모드는 1개만 고려하며, 음장의 모드수는 20개면 현실적으로 충분하다.<sup>(7)</sup> 기본적인 변수의 설정은 후에 있을 실험의 경우와 동일하게  $T=50 \text{ N/m}$ ,  $h_1=0.05 \text{ m}$ ,  $h_2=0.07 \text{ m}$ ,  $L_x=0.16 \text{ m}$ ,  $L_z=0.05 \text{ m}$ 로 하였다. 이 중 박막의 밀도를 변화시키기에 따라 투과 손실이 어떻게 변하는지 예측해 보면 Fig. 6의 결과를 얻을 수 있다. 결과를 살펴보면 박막의 밀도가 커짐에 따라 소음 저감 영역이 낮은 주파수로 이동함을 알 수 있다. 이는 2.3에서 살펴본 물리적인 의미와 동일한 결과를 가져 온다. 따라서 동일한 부피를 이용해서 낮은 주파수에서 소음 저감 효과를 지닐 수 있다. 하지만 밀도가 높아질수록 투과 손실의 크기 또한 함께 줄어들기 때문에 효율적으로 저주파수 영역의 소음을 줄이기 위해선 다른 변수와의 적절한 조합이 필요하다. 박막의 밀도가 무한하게 커지는 경우에는 투과 손실이 0으로 수렴한

다. 이를 물리적으로 살펴보면, Fig. 3(a)의 박막이 강체벽처럼 단단해지는 경우이므로 박막 상, 하의 공기는 박막과 상호 작용을 일으키지 않는다. 따라서 덕트의 좌측에서 입사하는 파의 입장에서 볼 때, 덕트의 단면적 또한 일정하기 때문에 임피던스의 변화는 발생하지 않으며, 이로 인해 소음 저감이 발생하지 않게 된다.

박막이 덕트 내부에 설치된 경우 마찬가지로 음장의 모드수는 20개로 하되, 이 경우 박막의 모드수는 20개를 기준으로  $\alpha$ 의 값에 비례하게 설정하였다.<sup>(8)</sup> 즉,  $\alpha=0.1$ 인 경우 박막의 모드수는 2개이며,  $\alpha=1$ 인 경우는 20개이다. 기본적인 변수는  $T=100 \text{ N/m}$ ,  $\rho_m=0.39 \text{ kg/m}^2$ 로 하고 이중 박막의 길이를 결정하는  $\alpha$ 를 바꾸어 가면서 모의실험을 하면 Fig. 7의 결과

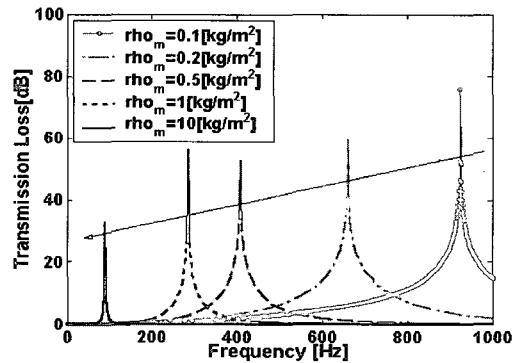


Fig. 6 Simulation results: Transmission Loss of the membrane-cavity system with varying density of membrane

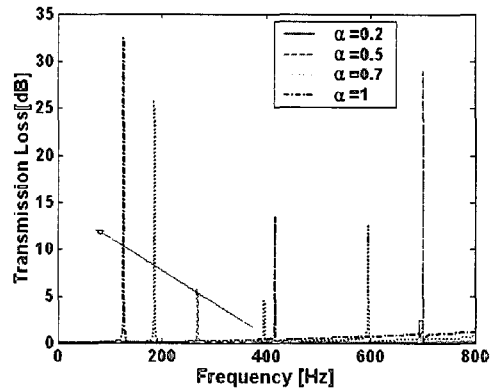


Fig. 7 Simulation results: Transmission Loss of the vertically inserted membrane-duct system varying

를 얻을 수 있다. 박막의 길이가 커질 수록 낮은 주파수 영역에서 투과 손실이 최대가 됨을 알 수 있다. 이 경우 박막의 길이는 박막에 질량으로 작용한다. 박막이 덕트 단면을 가로막는 비율이 커질수록 투과 손실은 저주파수 영역에서 최대가 되며, 그 크기 또한 증가한다는 사실을 알 수 있다. 그림상의 화살표는  $\alpha$ 의 변화에 따른 투과 손실의 변화를 나타낸다.

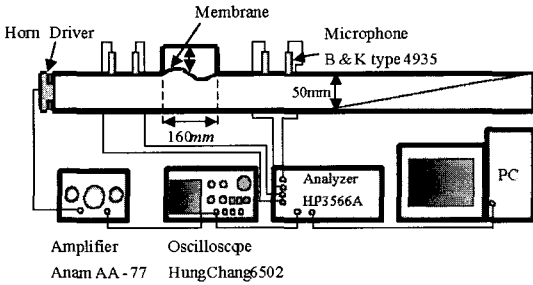
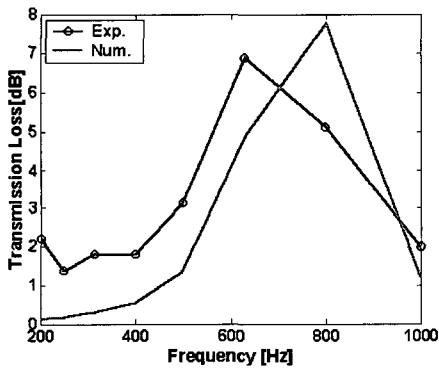
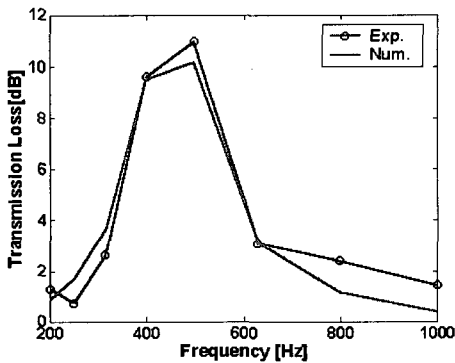


Fig. 8 Experimental setup



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison between simulation and experimental results with  $T=50$  N/m,  $0.39$  kg/m<sup>2</sup>,  $L_x=0.16$  m,  $L_z=0.05$  m and (a)  $h_2=0.025$  m, (b)  $h_2=0.07$  m

그리고 전체적으로 투과 손실이 최대가 되는 피크값을 중심으로 소음 저감은 매우 좁은 주파수 영역에서 발생하며, 이는 음장을 해석함에 있어서 감쇠 효과를 고려하지 않았기 때문이다.  $\alpha$ 가 0인 경우에는 덕트 내에 박막이 없는 것으로 생각할 수 있으며, 이 경우 투과 손실이 0이 된다. 박막의 밀도 및 길이가 커질수록 높은 주파수 영역에서도 피크가 발생한다는 사실을 알 수 있는데, 이는 박막의 2차, 3차 모드에 의한 값이며, 이들은 첫 번째 피크에 비해 작은 값을 지닌다.

#### 4.2 실험 결과

이론적인 예측을 실험을 통해 검증하기 위해 Fig. 8과 같은 실험 장치를 설치했다. 박막-공동계의 경우 2가지 다른 공동의 높이에 대해 투과 손실을 측정하고 이론해와 비교하였다. 투과 손실은 2개의 음향탐

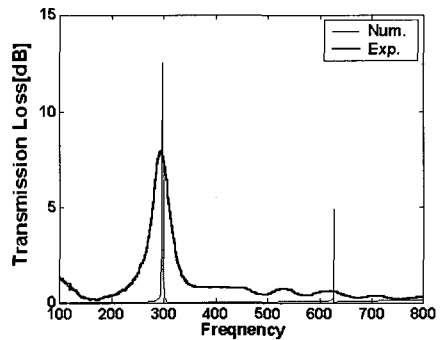


Fig. 10 Comparison between simulation and experimental results with  $T=99$  N/m,  $0.39$  kg/m<sup>2</sup> and  $\alpha=0.5$

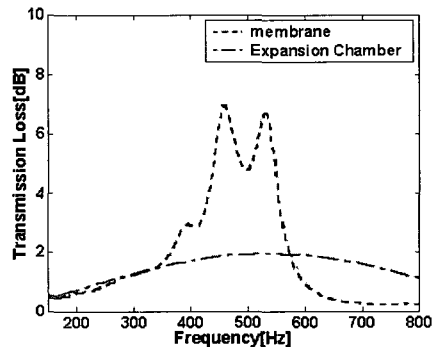


Fig. 11 Experimental results: Transmission loss of the two membrane system and comparison with that of an expansion chamber

축차 방법(9)을 이용해 입사파 및 반사파를 분리해 내서 측정하였다. 사용한 박막은 두께 0.05 mm의 얇은 동판이다. 공동의 높이가 0.25 mm, 0.07 m인 경우에 대해 투과 손실을 측정하였다. Fig. 9는 두 경우에 대한 투과 손실의 이론적인 예측과 실험값을 1/3 옥타브 밴드별로 비교한 그림이며, 각 옥타브 밴드별로 크고 작은 차이가 있다. 이는 박막에 가한 장력의 정확한 측정이 힘들었다는 점과 박막이라는 소재의 특성상 모든 면에 균일하게 장력을 주기 힘들었다는 점, 그리고 경계 조건으로 가정한 단순지지(simply supported) 경계조건을 제대로 주지 못하였기 때문일 가능성이 있다. 이와 같은 실험의 부정확성을 감안하더라도 전체적인 소음 저감 특성이 이론적인 예측과 유사한 형태를 띠을 알 수 있다.

박막을 내부에 설치한 경우의 투과 손실은 Fig. 10과 같으며, 피크가 발생하는 주파수가 잘 맞음을 보여준다. 이번에는 박막을 2장 설치한 경우에 대해서 투과 손실을 측정하였다. 박막의 간격을 0.16 m 띄운 경우 측정된 투과 손실은 Fig. 11과 같고, 이를 덕트 단면적을 특정 구간 줄인 단순 확장관의 경우와 비교해 보았다. 단면적이 줄어든 구간의 길이를 두 장의 박막의 간격과 동일하게 하고, 단면적의 비율은 박막과 덕트 단면의 비율과 동일하게 했다. 따라서 움직이는 유체의 관점에서 보았을 때 두 계는 유동의 흐름을 방해하는 정도가 같기 때문에 적합한 비교라고 할 수 있다. 박막을 2장 설치한 경우 2개 지점에서 피크를 가짐을 알 수 있고, 이는 단순 확장관에 비해 약 350 Hz~580 Hz 구간에서 높은 소음 저감 성능을 지님을 확인할 수 있다. 따라서 이 경우도 박막-공동계와 마찬가지로 공간을 적게 차지하면서 좁은 주파수 영역의 소음 저감을 필요로 하는 시스템에 적용할 수 있음을 알 수 있다. 물론 박막의 간격 또한 결과에 영향을 줄 수 있으며, 이에 대한 추가적인 연구 또한 필요하다.

## 5. 결론

이 논문에서는 낮은 주파수 영역에서 박막을 이용해서 소음을 저감하는 방법에 대해 크게 2가지로 나누어 다루었다. 모드 조합을 통해 음장을 해석하여 투과 손실을 예측하였으며, 실험을 통해 이를 검증하

였다. 이를 통해서 소음 저감 시스템의 부피에 영향을 주지 않는 물리량인 박막에 인가된 장력이나 박막의 밀도를 이용해서 소음 저감 성능을 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 변수들은 박막 및 박막-공동계가 이루는 계를 질량-스프링으로 이루어진 1차 유도계의 질량 및 스프링과 같은 의미를 가짐을 투과 손실의 변화를 통해 확인하였으며, 이들의 적절한 조합을 통해 낮은 주파수 영역에서 작은 부피를 이용해 소음을 줄일 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서 제안한 2가지 방법은 부피를 줄임과 동시에 유동을 방해하는 요소를 줄이면서 소음을 저감한다는 관점에서 볼 때 각각 단점을 지닌다. 그러므로 박막과 공동을 이용한 경우는 부피를 더욱 효율적으로 줄일 수 있는 방안에 대해, 그리고 덕트 내부에 박막을 설치한 경우는 유체의 흐름을 방해하지 않는 방법에 대해 추가적인 연구가 이루어져야 한다. 그리고 유동이 존재하는 경우 투과 손실에 있어서 어떠한 차이를 보이는지에 대한 연구 또한 필요하다. 이러한 과제들이 남아 있지만, 본 연구에서 제안한 모델은 단순 확장관과 비교해서 공간을 비교적 작게 차지하면서 특정 주파수 영역에서 소음 저감을 필요로 하는 시스템에 적용할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL) 사업 및 교육부의 두뇌한국21(BK21) 사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 임민홍, 김양한, 1998, "덕트 내 음향 스크린의 협대역 소음 저감 특성," 한국소음진동공학회논문집, 제 8 권, 제 4 호, pp. 733~740.
- (2) 박수경, 김양한, 1997, "박막과 음장의 연성에 의한 저주파 소음 저감," 한국소음진동공학회논문집, 제 7 권, 제 4 호, pp. 579~588.
- (3) 김양한, 임종민, 1999, "박막-공동계의 주파수 특성과 응용," 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 6 호, pp. 1123~1130.
- (4) Huang, L., 1999, "A Theoretical Study of

Duct Noise Control by Flexible Panels," J. Acoust. Soc. Am, 106(4), pp. 1801~1809.

(5) Ramamoorthy, S., Grosh, K., 2002, "A Theoretical Study of Structural Acoustic Silencers for Hydraulic Systems," J. Acoust. Soc. Am, 111(5), pp. 2097~2108.

(6) Huang, L., "Modal analysis of a drumlike silencer," J. Acoust. Soc. Am, 112(5), pp. 2014~2025.

(7) 전중훈, 2004, 박막과 음장의 연성을 이용한 덕트 소음 저감 방법, 한국과학기술원 기계공학과, 석사학위논문.

(8) Kim, Y.-H. and Kim, S.-M., 2002, "Solution of Coupled Acoustic Problems: A Partially Opened Cavity Coupled with a Membrane and a Semi-infinite Exterior Field," Journal of Sound and Vibration 254(2), pp. 231~244.

(9) Seybert, A. F. and Ross, D. F., "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique," J. Acoust. Soc. Am, Vol. 61, No. 5, pp. 1362~1370, 1976.