

## 박막형 소음기의 주파수 특성

°최성훈\*, 김양한\*

### Frequency Characteristics of a Membrane Duct

Sunghoon Choi and Yang-Han Kim

#### ABSTRACT

Theoretical analysis of noise reduction by a membrane-duct system is presented. When acoustic waves propagate in the membrane-duct, the membrane is also excited and its motion is coupled with interior medium. It has been shown that propagating waves with supersonic wave speed exist beyond a certain critical frequency that is determined from the mass ratio of the membrane and the fluid. Also found are subsonic waves which couple strongly with the membrane and provide a powerful mechanism of energy dissipation. Existence of an exterior medium alters dispersion characteristics. It provides additional mass loading and reduces the subsonic speed further. The effect of mean flow speed on dispersion characteristics is also considered. Results show that the membrane-duct system can be applied to diminish and absorb low frequency noise in duct instead of passive muffler, such as a simple expansion chamber or absorption material.

#### I. 서론

수동형 소음기는 크게 나누어 흡음재의 특성을 이용하여 음파의 에너지를 열에너지로 변환시키는 흡음형, 임피던스 부정합(impedance mismatch)을 이용하여 음파를 반사시켜 소음을 저감하는 반사형으로 분류할 수 있다. 반사형 소음기는 주로 저주파에서 사용되며 내구성이 좋으나 부피가 크다는 단점을 가지며 흡음형 소음기는 고주파영역에서 주로 사용되나 내구성이 떨어진다는 단점이 있다. 공조기나 수송기기 등에 실제 사용하는 소음기는 이 두 가지 소음기의 특성을 적절히 혼합한 복합적 소음기가 사용된다. 대부분의 반사형 소음기에서는 단면적에 급격한 변화를 줌으로써 임피던스 부정합을 일으켰는데 이것이 소음기의 부피가 커지는 원인이 되고 있다. 따라서 단순한 단면적변화가 아닌 다른 방법으로 임피던스 부정합을 유도할

수 있다면 저주파용 소음기의 취약점을 개선할 수 있을 것이다.

그림 1에서 보여주는 박막형 소음기는 Huang<sup>(1~4)</sup> 등에 의해서 제안되었는데 이 소음기는 강건한 덕트의 중간 부분에 탄성을 가지는 박막이 부착된 구조로, 입사된 음파는 박막의 양 끝단에서 반사되거나 박막 부분을 통과하면서 감쇠에 의해 소산된다. 파동이 단면이 팽창 또는 수축 가능한 통로를 따라 진행할 때 파동의 속도는 유체의 압축성(compressibility)과 단면적의 변화(distensibility)에 의하여 결정되는데<sup>(5)</sup> 유연한 통로 통과하는 음파 속도는 자유유장에서의 음파속도보다 상당히 작은 값을 가진다. 박막형 덕트에서는 이렇게 음파의 속도가 급격히 줄어들게 되어 박막의 경계부에서 단면이 일정함에도 불구하고 반사가 일어난다. 박막형 덕트의 주파수 특성을 구하기 위해 우선 무한한 길이의 박막-유체 연경계에 대한 해석을 한다. 이를 통해 덕트 길이방향으로 진행되는 음파의 주파수 특성을 구한다. 박막 외부의 유체에 의한 영향 및 내부 유동 속도의 영향에 대해서도 조사한다. 유한길이의 박막을

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

가지는 덕트의 해석 시에는 음파 및 박막의 굽힘파를 푸리에 급수로 표현하고 운동방정식 및 경계조건을 적용하여 반사, 투과 및 감쇠현상을 정량적으로 분석한다.

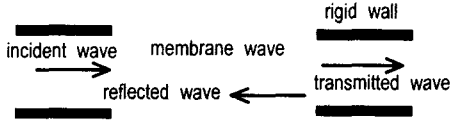


FIG. 1 Illustration of wave propagation in a membrane duct

## II. 박막-덕트의 주파수 특성

### 2.1 무한 박막-유체 연성계에서의 파동전달

그림 1의 박막-덕트에 대한 특성을 해석하기 위해 우선 무한한 길이의 박막이 있는 2차원 계를 고려한다. 이 유연한 박막이  $y=\pm h$ 에 위치한다고 가정하고 덕트의 길이방향인  $x$ 방향으로의 음파의 진행특성을 해석한다. 이 문제의 해는  $y=0$ 인 면에 대칭인 해와 비대칭인 해로 나눌 수 있는데 대칭 해는  $y=0$ 인 면이 강건한 벽면인 경우와 동일하고 비대칭 해는 이 면에 압력이 0이라는 경계조건을 부과하는 것과 동일하다. 여기서는 대칭 해에 대해서 우선 다루기로 한다. 덕트 내부를 진행하는 음파에 의해 박막이 진동하게 되고 음향에너지가 외부로 방사하게 된다. 우선은 외부 방사를 고려하지 않은 내부문제만을 다루고 외부 음장은 추후에 고려하기로 한다. 덕트 내에서  $+x$  방향으로 진행하는 음파의 파수(wavenumber)를  $k_x$ 라고 가정하면  $\omega$ 의 주파수를 가지는 조화음장  $p(x, t) = \tilde{p}(y)e^{i(\omega t - k_x x)}$ 는 다음과 같은 2차원 파동방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \tilde{p}(y)}{\partial y^2} + (k^2 - k_x^2) \tilde{p}(y) = 0 \quad (1)$$

여기서  $k = \omega/c$ 는 자유음장에서의 음파의 파수이고  $c$ 는 매질에서의 전파속도이다. 식 (1)의 일반해는  $\tilde{p}(y) = A e^{-ik_y y} + B e^{ik_y y}$ 의 형태로 주어지고 여기서  $k_y$ 는 다음과 같다.

$$k_y = (k^2 - k_x^2)^{1/2} = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_x^2}, & k > k_x \\ i\sqrt{k_x^2 - k^2}, & k < k_x \end{cases} \quad (2)$$

덕트의 변위를  $\eta(x, t) = \tilde{\eta} e^{i(\omega t - k_x x)}$ 라고 하면 음장에 대한 경계조건은  $y=0, h$ 에서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [\partial \tilde{p} / \partial y]_{y=0} &= 0 \\ [\partial \tilde{p} / \partial y]_{y=h} &= \rho \omega^2 \tilde{\eta} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도이다. 식 (3)에 의하여  $\tilde{p}(h) = -\omega^2 \rho \tilde{\eta} \cot(k_y h) / k_y$ 를 얻을 수 있고 박막에 대한 유체 임피던스  $Z_{wf} = \tilde{p}(h) / i\omega \tilde{\eta}$ 는 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_{wf} = \begin{cases} i\rho \omega \cot(k_y h) / k_y, & k > k_x \\ -i\rho \omega \coth(|k_y| h) / |k_y|, & k < k_x \end{cases} \quad (4)$$

박막에 가해진 장력을  $T$ , 감쇠계수를  $D$ , 그리고 면 밀도를  $\rho_m$ 이라고 하면 운동방정식은 다음과 같다.

$$(T k_x^2 + iD\omega - \rho_m \omega^2) \tilde{\eta} = \tilde{p}(h) \quad (5)$$

식 (5)의 우변에 앞에서 구한 박막에서의 압력 값을 대입하면 다음과 같은 무한한 박막-유체 연성계에 대한 특성 방정식을 얻는다.

$$T k_x^2 + iD\omega - \rho_m \omega^2 + \omega^2 \rho \cot(k_y h) / k_y = 0 \quad (6)$$

식 (6)을 이용해서 주파수  $\omega$ 에 대한 음파의 파수  $k_x$ 의 관계를 구할 수 있다. 일반적으로 식 (6)의 해  $k_x$ 는 복소수 값을 가지게 되며 이 때 허수부는 파동의 진행 방향으로의 감쇠 정도를 나타낸다.

그림 2는 박막에 의한 감쇠가 없는 경우, 즉  $D=0$ 인 경우의 해를 수치해석으로 구한 결과이다. 박막-유체 연성계에서는 진공상태에서의 박막의 모드와 강건한 덕트(rigid duct)의 음향모드가 상호간의 연성용으로 주파수 특성이 바뀌어 나타날 것으로 예상할 수 있다. 그림 2(a)는 박막의 운동이 지배하는 모드를, 2(b)는 덕트내의 음파가 지배하는 모드를 보여준다. 본 논문에서는 이 두 가지 모드를 각각 박막모드와 유체모드로 부르기로 한다. 이 그림에서는  $T = 50N/m$ ,  $\rho_m = 0.1kg/m^2$ 의 값을 이용하였는데 이 면밀도는 두께 약 1mm의 고무재질의 박막에 해당하는 값이다. 자유음장에서의 박막의 파동 전달속도는  $c_m = \sqrt{T/\rho_m}$ 에 의해 주어지며 일반적인 박막 물질의 경우  $c_m < c$ , 즉  $k_m > k$ 를 만족한다. 식 (4)의 유체 임피던스를 보면 이 경우 유체는 박막에 관성력과 같은 작용을 하게 되며, 그림 2(a)에서와 같이 파수가 커져 전파 속도가 약간 감소하여 나타나는 것을 알 수 있

다. 이 때  $k_y$ 는 순 허수가 되며  $\tilde{\chi}(y)$ 를 그려보면 박막에서부터 지수적으로(exponentially) 감소하는 상이다. 즉, 박막모드는 대부분의 에너지가 박막의 근접장을 통해 전달됨을 알 수 있다. 그림 2(b)에서는 유체모드를 보여주고 있는데 임계주파수(여기서는 약 500Hz) 이상에서만 감쇠 없이 진행되는 파동이 존재하는 것을 알 수 있다. 임계주파수 이하에서는  $k_x$ 가 음의 허수 값을 가지며 이는 진행방향으로 감쇠 하는 파동만이 존재하는 것을 의미한다. 그림에서 허수부분의 음의 값을 점선으로 표시하였다. 그림 2(b)에 강건한 덕트의 모드를 함께 표현하였는데, 이 덕트 모드들에 박막이 스프링력과 같은 작용을 하게되어 주파수가 높아지고 위상속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 주파수가 증가하면  $y$  방향으로 고차의 압력 구배를 가지는 모드를 발견할 수 있다.

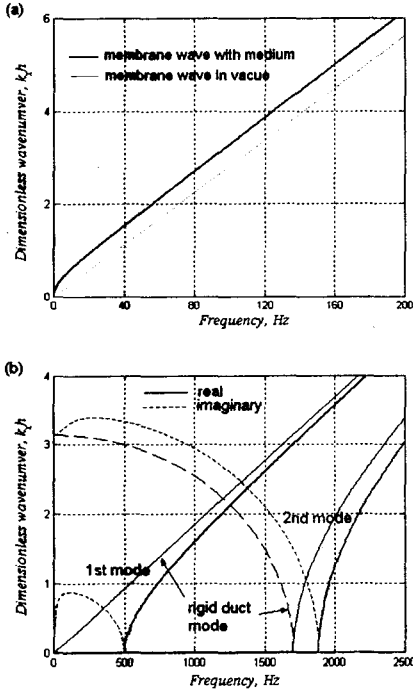


FIG. 2 Wavenumber vs. frequency: (a) Membrane dominant mode. (b) Fluid dominant modes. ( $T = 50N/m$ ,  $\rho_m = 0.1kg/m^2$ ,  $D = 0$ )

그림 3은 박막의 면밀도가 유체모드에 미치는 영향을 보여준다. 덕트의 높이  $h$ 가 일정할 때는 임계주파수가 박막의 면밀도가 작을수록 커진다는 것을 알 수

있다. 실제로 임계주파수는  $\cot(kh) - k(\rho_m/\rho) = 0$ 의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$y=0$ 인 면에 비대칭인 해는 식 (2)의 경계조건 중 첫 번째 조건을  $\tilde{\chi}(0)=0$ 으로 대치하여 구한다. 결과적으로 식 (6)에서  $\cot$  항이  $\tan$  항으로 바뀐 특성방정식이 얻어지게 된다. 박막모드는 음압분포에  $y=0$ 인 면이 미치는 영향이 적으므로 대칭인 경우와의 차이가 거의 없으며, 유체모드는 대칭 해와 마찬가지로 강건한 덕트 모드가 연성효과에 의해 이동한 결과를 얻는다. 첫 번째 비대칭 해의 임계주파수는 첫 번째와 두 번째 대칭 해의 임계주파수 사이에 있다.

박막-덕트 내를 진행하는 파동은 위와 같은 주파수 특성에 따라 전체 에너지가 두 가지 다른 형태의 파동에 의해 나누어져 전달된다. 이 중 특히 박막모드에 해당하는 파동은 박막에 감쇠가 있는 경우 효과적으로 에너지를 소산시킬 수 있게된다.

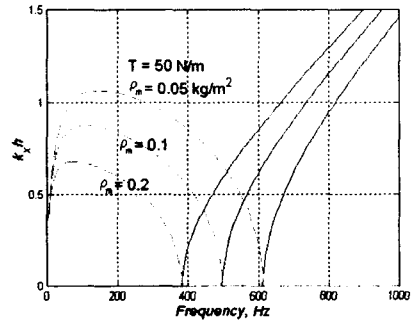


FIG. 3 Effect of membrane density (a) and tension (b) on dispersion. ( $D = 0$ )

박막에 댐핑이 있는 일반적인 경우의 유체와 박막 사이의 에너지 전달에 대하여 생각해 보자. 유체의 파동이 박막에 전달하는 평균 입력파워는 다음과 같다.

$$P = \langle p \dot{\eta} \rangle = \frac{1}{2} |\eta|^2 \text{Re}[-i\omega T k_x^2 + D\omega^2] \quad (7)$$

여기서  $\langle \cdot \rangle_t$ 는 시간에 대한 평균을 나타내고  $*$ 는 복소수 짝을 의미한다. 식 (7)을 보면  $k_x$ 가 순 실수 또는 순 허수인 경우 박막의 복원력에 의한 항은 0이 된다. 이는 박막의 운동에너지와 유체 사이에 에너지의 균형이 이루어짐을 보여준다. 즉 박막의 댐핑에 의해서만 에너지가 소산되는 것을 알 수 있다. 박막형 소음기로 입사파가 들어오면 주파수에 따라 박막모드나

유체모드의 형태로 전달되는데 유체모드의 임계주파수 이하에서는 모든 에너지가 박막모드에 의해 전달되며 이 영역에서 댐핑 등을 이용해서 소음저감을 할 수 있다.

## 2.2 내부 유동의 영향

이번 절에서는 덕트 내의 유체가  $W$ 의 평균유동속도(mean flow speed)를 가지는 경우의 주파수 특성을 알아본다. 이 때의 파동은 컨벡티브(convective) 항포함한 파동방정식<sup>(6)</sup>을 만족하며 일반해는 2.1절에서와 마찬가지로  $\tilde{p}(y) = \tilde{A}e^{-ik_y y} + \tilde{B}e^{ik_y y}$ 로 주어지고  $k_y$ 는 다음 식을 만족한다.

$$k_y^2 = (k - k_x M)^2 - k_x^2 \quad (8)$$

여기서  $M = W/c$ 는 마하수(Mach number)를 나타낸다. 유동속도가 박막모드의 위상속도보다 크면 유동이 불안정하게 되어 유동기인진동(flow-induced vibration) 등의 문제가 발생하게 되는데 이 문제 본 연구의 관점을 넘어서는 것이므로 다루지 않기도 한다. 여기서는  $M$ 이 충분히 작다고 가정한다. 식(3)~(6)은 여기에서도 동일하게 적용할 수 있다.

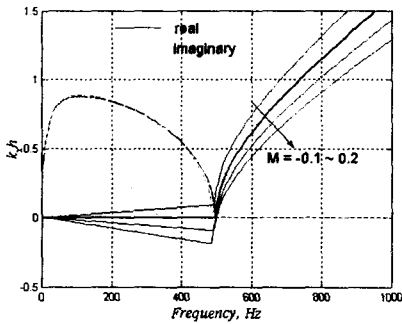


FIG. 4 Effect of mean flow speed on the fluid dominant mode. ( $T = 50N/m$ ,  $\rho_m = 0.1kg/m^2$ ,  $D = 0$ )

그림 4는 식 (6)과 (8)을 수치해석으로 풀 결과이다. 박막의 장력과 면밀도는 그림 2에서와 동일하고 유동 속도를  $M = -0.1, 0.0, 0.1, 0.2$  등으로 바꾸가며 해를 구하였다. 박막모드의 경우에는 유동속도에 의한 영향이 거의 없으므로 여기서는 유체모드만 보여준다. 임계주파수는 유동속도에는 무관하며, 파동의 위상속도는 유동속도가 커질수록 증가한다. 다음

에 기술하겠지만, 박막의 댐핑을 이용하거나 유한길이 박막에서 박막과의 반사현상을 이용하여 박막형 덕트에서 소음을 저감할 수 있기 때문에 내부 유동은 박막형 덕트의 효율에 무관하다 할 수 있다.

## 2.3 외부 음장에 의한 영향

이제는 덕트 외부의 음장으로 음향 방사가 있는 경우를 고려한다. 외부 음장에서의 유체와 내부음장의 유체가 동일하다고 가정한다. 외부음장의 음압을  $p_+(x, t) = \tilde{p}_+(y)e^{i(\omega t - k_x x)}$ 라고 가정하면  $\tilde{p}_+(y)$ 도 식(1)의 파동방정식을 만족하며 같은 형태의 일반해로 표현할 수 있다. 경계조건으로는  $y=h$ 에서 유체입자의 수직방향 속도와 박막의 속도가 같다는 조건과, 원거리 음장으로부터 입사하는 파동이 없다는 두 가지 조건을 적용해야 한다. 두 번째 조건으로부터  $y$ 방향의 파수  $k_y$ 는  $\text{real}(k_y) \geq 0$ , 그리고  $\text{imag}(k_y) \leq 0$ 를 만족해야 한다.  $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ 를 만족하는  $k_x$  또한  $x$ 방향으로 진행하는 파동을 나타내므로  $\text{real}(k_x) \geq 0$ ,  $\text{imag}(k_x) \leq 0$ 이 되어야 하는데 이들 조건을 모두 만족하는  $k_x$ 와  $k_y$ 는 순 실수 또는 순 허수밖에 없다는 것을 쉽게 증명할 수 있다. 따라서 순 실수인  $k_x$ 에 대하여  $k_y$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$k_y = (k^2 - k_x^2)^{1/2} = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_x^2}, & k > k_x \\ -i\sqrt{k_x^2 - k^2}, & k < k_x \end{cases} \quad (9)$$

식 (2)에서는 덕트내의 음장만을 표현하므로 어느 부호를 쓰더라도 결과는 같으며 이는 식 (6)에서도 확인할 수 있다. 박막에 대한 운동 방정식은

$$(Tk_x^2 + iD\omega - \rho_m \omega^2)\tilde{\eta} = \tilde{p}(h) - \tilde{p}_+(h) \quad (10)$$

가 되고 박막 윗면에서의 경계조건을 적용하면 다음과 같은 특성방정식을 얻을 수 있다.

$$Tk_x^2 + iD\omega - \rho_m \omega^2 + \omega^2 \rho [\cot(k_y h) + i]/k_y = 0 \quad (11)$$

식 (11)을 보면,  $D = 0$ 일 때,  $0 \leq k \leq k_x$ 인 경우에만 해가 존재한다는 것을 알 수 있다. 즉 외부음장이 있는 경우에는 박막모드만 존재하게 된다<sup>(6)</sup>. 여기서 유체 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{wf} = \begin{cases} i\rho\omega [\cot(k_y h) + i]/k_y, & k > k_x \\ -i\rho\omega [\coth(|k_y| h) + 1]/|k_y|, & k < k_x \end{cases} \quad (12)$$

$k > k_x$  일 때 박막이 스프링 효과를 주던 것이 저항효

과까지 주게 되어 진행파가 없어지고,  $k < k_x$  일 때는 부가질량 효과가 커지는 것을 알 수 있다. 그림 5에 외부음장이 있는 경우의 분산커브가 있는데 외부음장의 영향으로 위상속도가 감소함을 알 수 있다.

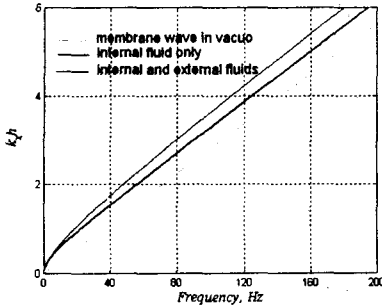


FIG. 5 Effect of internal and external fluid dispersion. ( $T = 50N/m$ ,  $\rho_m = 0.1kg/m^2$ ,  $D = 0$ )

소음기는 입력단의 음압을 출력단에서 최소로 하는 것이 목적이므로 외부음장을 고려 하는 경우 박막을 통하여 방출되는 에너지로 인해 전달손실(transmission loss, TL)이 커지겠지만 경우에 따라서는 이러한 방출 소음(break out noise)이 문제가 될 수 있다. 이런 경우에는 외부로 방출되는 소음을 차단하기 위해 박막형 덕트의 외부에 강건한 덮개를 사용할 수 있다. 이런 2중 구조 덕트를 사용하면 방출된 소음이 다시 반사되어 들어가기 때문에 투과손실에 영향을 줄 수 있으나 흡음처리 등을 함으로써 반사를 최소화하여 효율을 늘릴 수 있다.

### III. 유한 길이 박막-덕트의 전달손실

앞장에서는 무한한 길이의 연성계의 주파수 특성에 대해서 알아보았는데, 여기서는 그림 1에서와 같이 박막의 길이가 유한하여 양 끝단에서 반사파가 발생하는 경우에 덕트의 전달손실을 계산한다. 박막의 길이를  $L$ 이라 하고 덕트의 왼쪽으로부터  $p_i(x, t) = \overline{p}_i e^{i(\omega t - kx)}$ 와 같은 평면파가 입사된다고 하자. 여기서도 우선  $y=0$ 을 강체 벽면이라 가정하고  $y=h$ 에 박막이 있는 대칭모드만을 고려한다. 이 때 유체와 박막의 연성을, 입사파에 의해 박막이 가진 되고, 박막과 유체사이의 국부 방사 임피던스에 의하여

유체에 압력을 발생시킨다고 가정하면 박막의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - D \frac{\partial \eta}{\partial t} + p_i - Z \frac{\partial \eta}{\partial t} = \rho_m \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad (13)$$

여기서 국부 방사 임피던스  $Z$ 는 박막의 단위 진동에 의하여 덕트 내에 발생하는 음압의 크기이다. 박막의 속도를  $\partial \eta(x, t) / \partial t = \tilde{v}(x) e^{i\omega t}$ 라고 가정하고 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$\tilde{v}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n \sin [n\pi(x/L + 1/2)],$$

$$v_n = \frac{2}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \tilde{v}(x) \sin [n\pi(x/L + 1/2)] dx.$$

식 (13)를 위와 같은 푸리에 급수로 쓰면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[\mathcal{E}_{mn}][v_n] = [q_m] \quad (14)$$

여기서  $\mathcal{E}_{mn}$ 과  $q_m$ 은,

$$\mathcal{E}_{mn} = \left[ i\rho_m \omega + D + \left( \frac{T}{i\omega} \right) \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \delta_{mn} + Z_{mn}.$$

$$q_m = 2m\pi e^{ikL/2} \overline{p}_i \left[ \frac{e^{i(-kL + mn)} - 1}{(kL)^2 - (m\pi)^2} \right]$$

이며,  $Z_{mn}$ 은  $n$ 번째 박막 진동 모드에 의한  $m$ 번째 덕트내의 음향모드를 나타낸다<sup>(1)</sup>.

덕트의 오른쪽으로 투과되는 음파는 입사파와 박막의 진동에 의하여 오른쪽으로 방사되는 음파의 합이다. 식 (14)로부터 박막의 진동을 구하고 이로부터 투과되는 음파의 크기, 그리고 투과손실을 구할 수 있다. 그림 6에는 입사파의 주파수에 따른 투과손실을 보여준다. 그림 6(a)에서는 박막의 댐핑이 없는 경우와 있는 경우의 투과손실을 보여준다. 댐핑이 없는 경우에는 이 박막덕트의 임계주파수인 약 500Hz 이하에서 투과손실이 반복적으로 커졌다 작아졌다 하는 것을 볼 수 있다. 이 주파수 영역에서는 박막 모드에 의하여 대부분의 에너지가 전달되는데 이 박막파의 파장의 정수배가 박막의 길이와 일치하게 되면 반사현상에 의하여 박막의 변위가 작아지게 되어 투과손실이 커지는 것이다. 임계주파수 이상에서는 음향모드가 대부분의 에너지를 전달하게 되어 박막 끝단에서의 반사파 영향을 거의 받지 않게 된다. 그림 6(a)에서 굵은 선은 박막의 댐핑을 가정한 결과이다. 여기서 댐핑계수는  $D' = (L/nc_m \rho_m)D$ 에 의하여 주어지

며, 한 진동 주기 당 감소하는 에너지 비율을 나타낸다. 임계주파수 이하에서 반사파의 영향이 없어 박막 운동이 감소하지 않는 경우라도 댐핑의 영향으로 에너지가 소산되기 때문에 전 영역에서 고르게 높은 투과 손실을 얻을 수 있는 것이다. 그림 6(b)에서는 몇 가지 다른 박막특성에 대한 결과이다. 여기서는 장력을 변화 시켰는데 장력이 작을수록 투과손실이 크다는 것을 알 수 있다.

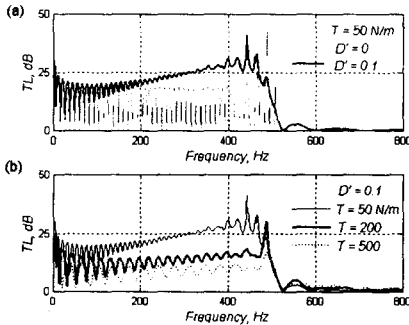


FIG. 6 Transmission loss (TL) vs frequency. (a) without damping and with damping. (b) TL f different tension. ( $\rho_m = 0.1 \text{ kg/m}^2$ ,  $h = 0.1 \text{ m}$ ,  $1.0 \text{ m}$ )

#### IV. 결론

본 연구는 박막형 소음기의 이론 및 적용가능성에 대하여 다루었다. 무한한 박막-유체 연성계에 대한 주파수특성을 구하여 이 연성계를 지배하는 파동의 특성을 예측하였다. 박막의 면밀도에 의해서 결정되

는 임계주파수 이하에서는 박막의 파동에 의해 유기 되는 근접장 형태의 박막모드가 존재하고, 임계주파수 이상에서는 덕트모드가 발생한다. 덕트내부의 유동은 덕트모드의 위상속도만을 증가시키는 효과를 가지며 박막모드에는 영향을 주지 못한다. 외부음장이 있는 경우에는 외부로 방사되는 파동의 영향으로 박막모드만 존재하게 된다. 유한한 길이의 박막이 있는 소음기에서는 임계주파수 이하에서 소음저감 효과를 얻을 수 있는데 이는 박막모드의 반사에 의한 영향이다. 적절한 댐핑처리를 통해 상당히 넓은 주파수 영역에서 적용 가능한 소음기를 만들 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) Huang, L., 1999, "A theoretical study of noise control by flexible panels," J. Acous Am., **106**(4), pp.1801~1809.
- (2) Huang, L., 2000, "Experimental study of s propagation in a flexible panel," J. Acoust. So **108**(2), pp.624~631.
- (3) 박수경, 김양한, 1997, "박막과 음장의 연성에 한 지주파 소음 저감," 한국소음진동공학회지, 제 권, 제 4호, pp.579~588.
- (4) 김양한, 전영두, 2000, "박막형 소음기: 이론과 용 가능성," 한국소음진동공학회 2000 춘계학술대회 논문집
- (5) Lighthill, M. J., 1978, Waves in F Cambridge University Press.
- (6) Ko, S. H., 1994, "Sound wave propagation i two-dimensional flexible duct in the presence invicid flow," J. Sound. Vib., **175**(2), pp.279~2