

박막과의 연성에 의한 저주파 소음 저감

박수경*, 김양한**

Low frequency noise reduction by coupling with membrane

Park, Sukyung and Kim, Yang-Hann

ABSTRACT

A method of deminishing low frequency noise by acoustic acoupling with compliant wall is described. The coupled governing equations and boundary conditions are derived and solved. The coupled system shows very interesting behavior in the low frequency region; in the low frequency, acoustic wave doesn't propagate, but decay to satisfy the boundary condition with the compliant wall. Henceforth using this mechanism, we propose a method of reducing low frequency noise, which is infact related with the physical properties of compliant wall. The method has been experimentally verified

1. 서론

임의의 경계면에 근접한 유체의 유동은 구조물에 전달되어 구조물을 가진하게 된다. 한편 구조물은 유체의 경계조건으로 작용하여 임의의 경계면 내의 유체와 구조물은 서로 연성관계(Coupling)를 가지고 있다고 할 수 있다.[1] 이러한 연성관계가 생기면 유체와 구조물을 독립적으로 생각할 수 없게 되어 유체와

구조물로 이루어진 새로운 계를 생각해야 한다. 이러한 경우 새로이 형성된 연성계는 연성이 일어나기전 무한 경계 내에서의 유체의 동적특성과 유동에 의한 가진이 없는 구조물의 특성을 동시에 반영하게 된다. 각각의 연성정도에 따라 원래의 독립적인 계의 특성이 변형되어 반영되는데 일반적으로는 유체의 밀도가 구조물의 밀도보다 훨씬 작으므로 유체가 구조물에 의해 받는 영향의 정도가 구조물이 내부 유동에 의해 받는 영향의 정도보다 크다고 할 수 있다. 또한 구조물의 강성이 강체벽이라고 생각할 수 있을 정도의 강성을 가지고 있는 경우 유체에 의해

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

구조물은 거의 영향을 받지 않으므로 연성이 일어나지 않는다고 볼 수 있다. 만약 구조물의 강성이 매우 작아 유체의 운동을 그대로 수용할 수 있는 경우에는 강체 내에서의 유체의 동특성과는 많은 차이를 보이는 동특성을 갖게 된다. 본 연구에서는 한쪽면이 비강체벽인 경우 유동과 구조물과의 연성에 의해 발생하는 저주파 대역에서의 특성에 대해 살펴보고 이를 저주파 소음저감에 응용하고자 한다.

2. 기초 이론

2.1 연성방정식

유동과 비강체벽과의 연성현상에 대해 알아보기 위해 3 차원 음장과 비강체벽 이라고 간주할 수 있는 박막(membrane)을 생각하자. 물리적 이해를 용이하게 하기 위해 박막과 유체가 접하고 있는 경계면을 제외한 평면으로의 무한 경계조건을 생각하자[Fig.1].

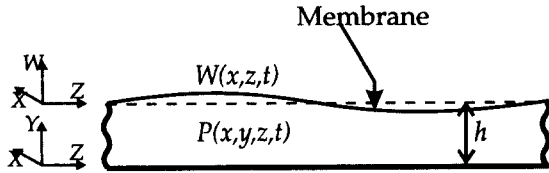


Fig.1 Modeling of coupling between fluid and compliant wall

이때 박막은 근접하고 있는 경계면에서의 유동의 미소 거동(perturbation)에 의해 가진된다. 또한 이러한 박막의 거동은 유체의 접촉면에서의 경계조건으로 작용하게 되며 따라서 이론적 측면에서 보면 연성된 지배 방정식과 경계조건이 주어지게 됨을 알 수 있다.

지배방정식은 음압을 $P(x,y,z,t)$, 박막의 변위를 $W(x,z,t)$ 라고 하면

$$\nabla^2 P(x,y,z,t) = \frac{1}{c_o^2} \cdot \frac{\partial^2 P(x,y,z,t)}{\partial t^2} \quad (1-a)$$

$$\nabla^2 W(x,z,t) = \frac{1}{c_m^2} \cdot \frac{\partial^2 W(x,z,t)}{\partial t^2} - \frac{P(x,h,z,t)}{T} \quad (1-b)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 c_o, c_m 은 각각 음파속도와 박막에서의 파동속도를, T 는 장력을 의미한다. 다음으로 y 방향으로의 경계조건 즉, 박막과의 경계면 및 강체면에서의 경계조건을 살펴보면

$$\left. \frac{\partial P(x,y,z,t)}{\partial y} \right|_{y=h} = -\rho_o \cdot \frac{\partial^2 W(x,z,t)}{\partial t^2} \quad (2-a)$$

$$\left. \frac{\partial P(x,y,z,t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (2-b)$$

와 같다. 유체와 구조물이 연성되어 전파한다고 가정하고 음압과 박막의 변위는

$$P(x,y,z,t) = \hat{P} e^{j(\omega t - k_x x - k_z z)} \cdot (a_1 e^{jk_y y} + a_2 e^{-jk_y y}) \quad (3-a)$$

$$W(x,z,t) = \hat{W} e^{j(\omega t - k_x x - k_z z)} \quad (3-b)$$

과 같이 됨을 쉽게 알 수 있다. 또한 주어진 지배 방정식으로부터 얻어지는 분산 관계는 다음과 같다.

$$\begin{cases} k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k_o^2 \\ k_x^2 + k_z^2 = k_m^2 \left(1 - r_o \frac{\cot(k_y h)}{k_y}\right) \end{cases} \quad (4)$$

x, z 방향으로 무한경계조건을 두었으므로 k_x, k_z 를 따로 구분하지 않고 $k_{xz} = \sqrt{k_x^2 + k_z^2}$ 라 하면 다음의 Fig.2 와 같은 분산곡선을 얻는다.

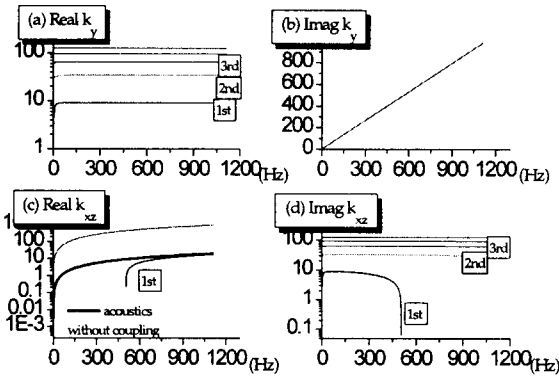


Fig.2 Dispersion curve of fluid and membrane coupled system with $T=5(N/m)$, $\rho_s=0.1(kg/m^2)$

위의 분산관계를 만족하는 근은 무수히 많이 존재하는데 그 형태를 구분해 보면 크게 세가지 종류로 구분된다. 첫번째로 Fig.2.(a)에 보이는 바와 같이 k_y 값이 두번째 실근부터는 정수배로 나타나는 데 이는 박막과 유동이 접하는 부근에서 유동의 수직속도가 0이 됨을 의미한다. 따라서 박막의 수직 속도도 0이 되어 유체의 미소거동에 의해 가진되지 않는다. 이때는 유동의 접촉면에서의 경계조건이 강체벽의 그것과 동일하게 되어 연성이 일어나지 않게 된다. 한편 첫번째 근을 살펴보면 강체벽내의 음향학적 거동을 주로 반영하는 것을 볼 수 있고, 허수 k_y 값에 대해 전체 계는 박막의 거동을 주로 반영하는데[Fig.2(b),(c)]이것은 연성이 된 계에서도 연성이 되기전의 독립적인 계의 거동을 반영한다는 물리적 의미를 가진다. 여기서 주목해야 할 점은 k_y 가 실수로서 첫번째 근을 가질때 k_{xz} 를 살펴보면 강체벽내의 음장거동과는 달리 전파되는 음파의 차단영역(cutoff region)이 생긴다는 점이다[Fig.2(d)]. 이를 물리적으로 고찰해 보면 y 방향의 비 강체 경계조건을 만족시키려면 저주파와 같이 파장이 긴 경우의 음파는 박막과의 연성에 의해 외부로 방사되고 x, z 방향으로 전파하지 않

음을 의미한다. 여기서 주목되는 감쇄파(evanescent wave)의 차단영역 주파수(cutoff frequency)는 박막의 면밀도에 관련된 값으로 면밀도를 증가시킬수록 차단 주파수가 감소함을 알 수 있다[Fig.3(a)]. 한편 박막에 가해지는 장력은 감쇄파의 감쇄율에 관련되어 있다. 장력이 증가할 수록 감쇄율은 감소하며 이는 Fig.3(b)에 k_{xz} 의 허수값의 감소로 나타난다. 이는 무한 장력이 걸리고 박막의 면밀도가 무한히 증가하였을때의 조건이 강체벽 조건에 근접함을 상기한다면 물리적으로 타당하다고 할 수 있다.

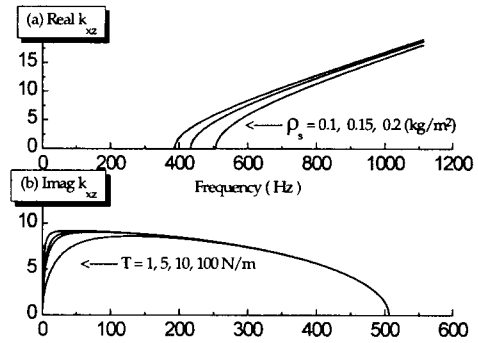


Fig.3 Cutoff frequency shifting for changing membrane density and tension

2.2 유한덕트내에서의 연성방정식

앞서 설명된 연성계의 물리적 특성은 x, z 방향으로 무한 경계조건에 대한 특성이다. 그러나 실제로는 경계조건이 유한해 질 수 밖에 없고 따라서 유한 경계조건을 갖는 덕트내의 음장에 관해 살펴 보아야 한다. 일반적으로 유한 경계조건을 갖는 계의 거동은 고유 진동 모우드의 선형 합으로 표현할 수 있음이 잘 알려져 있다.[2] 따라서 앞서 제시한 지배방정식에 대해 다음과 같은 경계조건을 갖게 된다.

$$\left. \frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=b} = 0 \quad (5-a)$$

$$W(0, z, t) = W(b, z, t) = 0 \quad (5-b)$$

$$\left. \frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=l} = 0 \quad (6-a)$$

$$W(x, 0, t) = W(x, l, t) = 0 \quad (6-b)$$

이와 같은 고유치 문제를 푸는데 있어서 식(2-a)와 같은 nonhomogeneous 경계 조건을 homogeneous 경계조건으로 변형시켜 풀 수 있음이 알려져 있다.[2]

3. 실험적 고찰

한쪽면이 비강체인 유한 덕트내에 음파가 전파할 때 저주파 대역의 음파는 전파하지 않음을 살펴 보기 위해 아래의 Fig.4 와 같은 계를 구성한다.

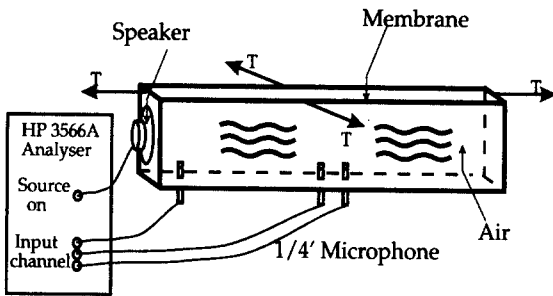


Fig.4 Experimental Set-up

덕트의 윗면으로는 비강체벽으로 가정할 수 있는 비닐을 사용하여 음장을 살펴보면 y, z 방향으로 각각 Fig.5, Fig.6 과 같은 음압 분포를 보인다. x 방향으로로는 강체 덕트에서와 마찬가지로 평면파가 생기는데, 이는 x 방향으로 첫번째 모우드가 걸리는 주파수가 고주파이기 때문에 관심을 두고 있는 저주파 대역에 대해서는 평면파가 발생하는 것이며,

y 방향의 음장은 실수 k_y 에 해당하는 모우드로 생성되므로 y 방향의 위치에 따라 위상 변화가 있음을 알 수 있다[Fig.5].

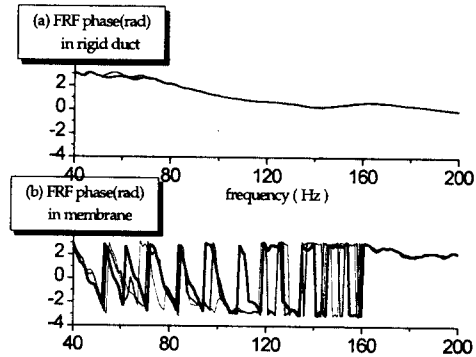


Fig. 5 Comparison of FRF phase between rigid duct and membrane. $y=$ — : 9.5, — : 4.5, — : 3.0 cm

또한 z 방향의 음장은 주파수에 따라 전파되는 영역과 감쇠되는 영역으로 나뉜다[Fig.6].

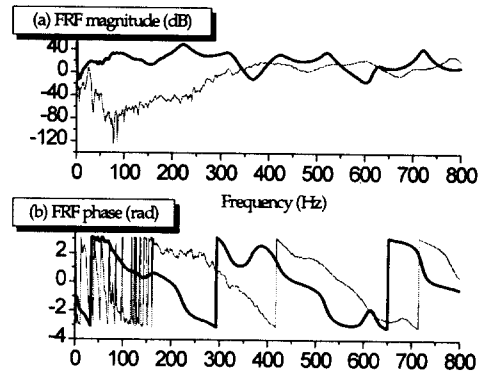


Fig. 6 Sound pressure level along the z -axis Comparison between rigid and membrane at $z=0.568L$ ($L=1.7m$)
— : rigid, — : membrane

차단주파수를 f_{cutoff} 라 하면 $f < f_{cutoff}$ 인 주파수 대역에는 허수 k_{xz} 가 존재하므로 공간상으로 소멸되는 음파가 생성되며[Fig.7(a)], $f \geq f_{cutoff}$ 인 주파수 대역에서는 강체내에서의 음장분포와 유사한

형태로서 음파가 전파됨을 알 수 있다[Fig.7(b)].

Macmillan, pp.90-91,141-43,300-308, 1967.

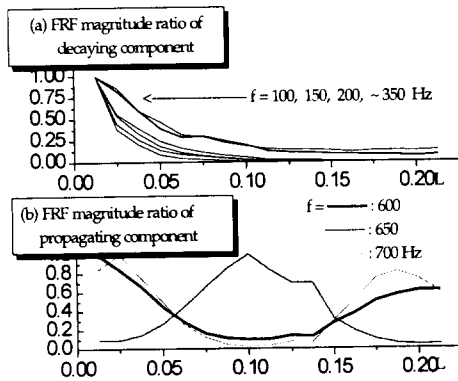


Fig.7 FRF Magnitude ratio according to the dimensionless distance from the speaker $L=1.7m$

4. 결 론

비 강체 벽으로서 박막과 유체와의 연성에 의한 연성계의 동특성을 살펴보았다. 이때 박막과의 연성에 의해 내부 음장에 발생하는 공간상 감쇄 현상에 대해 살펴보고 이를 실험을 통해 확인하였다. 이러한 물리적 현상은 덕트내 저주파 소음을 감소시키는 데 응용될 수 있으며 감쇄과와 진행과를 구분짓는 차단 주파수와 감쇄율이 박막의 물리량, 장력, 높이방향(y 방향)의 기하학적 형상에 관련하므로 저주파 소음제어를 위해서 기존의 덕트 길이보다 짧은 길이로서 튜닝이 가능하다는 장점을 지닌다. 이러한 감쇄음장이 박막을 통한 방사음장으로 변환되므로 이를 제어할 수 있는 덕트 상부처리 에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] F. J. Fahy, *Sound and Structural Vibration*, Academic press, pp. 259-268, 1985.
- [2] L. Meirovitch, *Analytical Methods In Vibrations*,