

# 구조-음향 연성계의 경계값 변화에 따른 방사음 변화

## A Parameter Study on the Frequency Characteristics of the Structural-acoustic Coupled System

서희선<sup>†</sup> · 김양한<sup>\*</sup>

Hee-Seon Seo and Yang-Hann Kim

(2004년 2월 28일 접수 ; 2004년 6월 10일 심사완료)

**Key Words** : Structural-acoustic Coupling(구조음향연성), Wall Impedance(경계 임피던스), Modal Expansion Method(모드 조합법), Structural-dominated Mode(구조 우세모드)

### ABSTRACT

It is well known that wall impedance essentially determines how sound wave transmits from one place to another. The wall impedance is related with its dynamic properties: for example, the mass, stiffness, and damping characteristics. It is noteworthy, however, that the wall impedance is also function of spatial characteristics of two spaces that is separated by the wall. This is often referred that the wall is not locally reacting. In this paper, we have attempted to see how the acoustic characteristics of the two spaces is affected by various structure parameters such as density, applied tension, and a normalized length of the wall. Calculations are conducted for two different modally reacting boundary conditions by modal expansion method. The variation of the Helmholtz mode and the structural-dominated mode are analyzed as the structure parameters vary. The displacement distribution of the structure, pressure and active intensity of the inside and outside cavity are presented at the Helmholtz mode and the structure-dominated mode. It is shown that the frequency characteristics are governed by both structure- and fluid-dominated mode. The results exhibit that the density of the structure is the most sensitive design parameter on the frequency characteristics for the coupling system as we could imagine in the beginning. The Helmholtz mode frequency decrease as density increases. However, it increases as applied tension and an opening size increase. The bandwidth of the Helmholtz mode is mainly affected by density of the structure and its opening size.

### 1. 서론

구조물과 음장의 연성 작용으로 발생한 소음을 줄이기 위해 음장과 유연한 경계로 구성된 연성계의 원인과 결과를 설명할 수 있는 메커니즘을 이해하기 위

해 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 중 많은 연구는 구조물의 임피던스가 매질의 임피던스에 비해 크다고 가정하여 매질의 거동이 구조물의 거동에 영향을 미치지 않는 일방 연성 문제로 취급해 왔다. 이러한 접근은 채택한 가정이 과감하게 보임에도 불구하고 많은 실제적인 문제에서 적용 가능하다. 그러나 박막이나 얇은 평판과 같이 구조물의 강성이 매우 작거나, 수중에서와 같이 매질의 임피던스가 큰 경우 등과 같이 상대적으로 구조물의 임피던스가 매질의 임피던스에 비해 크지 않은 경우는 매질의 거동이 구조물의

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

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

<sup>\*</sup> 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

거동에 영향을 주어 구조물의 거동과 매질의 거동을 동시에 고려해야 하는 완전 연성 문제가 된다.

연성 문제는 궁극적으로 음향 공간과 유연한 구조물이 어떤 메커니즘을 통하여 정보를 전달하는가를 알고자 하는 것이다. 연성 문제의 대표적인 예로 Fig. 1(a)에서 보이는 바와 같이 무한한 공간 사이에 경계가 존재하는 경우<sup>(1, 2)</sup>와 Fig. 1(b)에서와 같이 유한한 크기의 공간 사이에 유연한 구조물이 존재하는 경우<sup>(3, 4)</sup>에 대해서는 비교적 잘 알려져 있다. 하지만 이 두 가지 형태가 결합된 Fig. 1(c)의 경우와 같이 유한한 크기의 공간과 반 무한 공간이 결합된 형태에 대해서는 많은 연구가 진행되지 않아 잘 알려지지 않았다. 최근 Kim과 Kim<sup>(5-8)</sup>에 의해서 Fig. 1(d)에 제시한 보다 일반적인 연성구조에 대한 실험적 접근<sup>(5, 6)</sup>과 해석적 결과<sup>(7, 8)</sup>가 제시되었다.

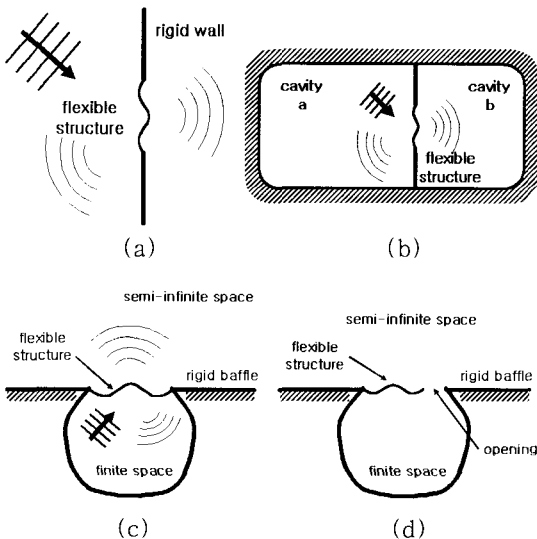
연성 현상은 근본적으로 어떠한 두 공간 사이 혹은 시스템 사이의 관계를 이야기한다 볼 수 있다. 그 중에서 잔향 특성이 큰 음향학적으로 유한한 크기를 갖는 공간과 반 무한 공간 사이에 유연한 구조물이 존재하는 연성계에서 두 공간과 유연한 구조물 사이의

관계에 대해 알아보려고 한다. 여기에 Fig. 1(d)에 보인 바와 같이 입구를 허용하여 보다 일반적인 연성 현상을 다루고자 하였다. 이러한 연성계에서는 입구를 통해서 '압력에 의한 상호작용'이 발생하고, 구조물을 통해서 '체적에 의한 상호작용'이 발생한다. 이러한 유한한 크기의 공간과 반 무한 공간이 결합된 일반적인 연성 현상을 모두 포함할 것으로 생각되는 연성계에서 경계의 변화에 의해 두 개의 음장 특성이 어떻게 영향을 받는지 알아 보는 것이 이 연구의 목적이다. 즉, 체적과 압력 경계를 갖는 음향학적으로 유한한 공간과 반 무한 공간 사이의 상호작용을 경계를 형성하는 벽면의 제어변수에 따른 음장 특성의 변화를 고찰함으로써 연성 현상에 가장 민감한 변수를 추출하고, 연성 현상을 보다 명확히 이해하여 이를 이용하는 방안에 대해 알아보는 것이 이 연구의 목적이다. 또한, 연성계의 특성을 잘 이해하기 위해 두 공간에서 에너지(또는 음압)와 에너지 흐름(또는 능동 인텐시티)을 연성 주파수에서 가시화한다.

## 2. 문제 정의 및 수식화

### 2.1 문제정의

일반적인 연성 현상을 대표할 수 있는 매우 반사각 큰 공동과 반 무한 공간의 음장이 입구와 유연한 구조물을 통해 서로 정보를 주고 받는, 즉 매우 일반적인 연성 현상을 모두 포함하는 체적과 압력 경계조건을 갖는 음향학적으로 유한한 공간과 반 무한 공간 사이의 관계를 규명하기 위해 일반적인 모델인 Fig. 1(d) 대신에 일반적인 연성 현상을 모두 포함하고 있으나, 수학적으로 취급이 간단하여 이론적 접근이 가능한 직사각 형태의 공동이 반 무한 공간의 강체 배플(rigid baffle)에 설치되어 있는 연성 공동계를 다루고자 한다. 공동의 윗면에는 유연한 구조물과 입구로 구성된 경계가 추가되지만 나머지 세 벽면은 음향학적으로 강체벽 경계를 갖는다고 가정한다. 그리고 수학적 취급을 용이하게 하기 위해 계가 한 방향에 대해 독립이라 가정한다. 또한 공동 위에 추가된 구조물의 두께는 고려하는 주파수 범위 내에서 가장 짧은 파장에 비해 매우 작아 무시할 수 있다고 가정한다. 이 연구에서 대상으로 하는 구조-음향 연성계의 좌표, 구조물의 길이, 입구 길이, 음원의 위치 등을 Fig. 2에 자세히 표현하였다. 공동의 폭과 높이는



**Fig. 1** The typical examples of the coupling systems: (a) unbounded spaces separate by the wall; (b) two bounded spaces separate by the wall; (c) bounded and unbounded spaces separate by the wall; and (d) bounded and unbounded spaces separate by the flexible structure and the opening

$L_x$ 와  $L_z$ 이고, 연성계는 공동의 바닥( $z = -L_z, x = x_s$ )에 위치한 음원강도  $Q$ 를 가지는 단극 음원(체적 음원, 단위:  $m^2/s$ )에 의해 가진 된다고 가정한다. 유연한 구조물은 수학적으로 가장 간단한 경우인 박막으로 가정하였으며, 박막에 인가되는 장력이  $T$ , 박막의 단위 면적당 밀도는  $\rho_m$ 이고, 박막의 변위와 관련된 경계조건으로 양단 단순 지지(simply supported)를 가정한다. 평판의 경우에도 구조물의 파동 방정식의 차수 증가와 고려하는 모드의 복잡성 등 수학적인 복잡성을 제외하면 크게 다르지 않다.

### 2.2 지배방정식과 경계조건

공동 내/외부의 음압에 대한 지배방정식은  $y$  방향의 길이가  $x$  방향의 길이에 비해 매우 큰 경우를 가정하고, 조화함수의 형태를 가정하면, 다음의 2차원 동차 파동방정식을 각각 만족한다.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) p_{i,o}(x, z) = 0 \quad (1)$$

여기서  $p_i$ 와  $p_o$ 는 각각 공동 내/외부 음압을 의미하고  $k$ 는 파수(wavenumber)를 의미한다. 유연한 구조물의 내/외부에 존재하는 압력의 차로 인한 외력을

포함하는 박막에 대한 지배방정식은 1차 원 비 동차 파동방정식을 만족한다.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \kappa^2 \right) w(x) = -\frac{1}{T} \{ p_i(x, 0) - p_o(x, 0) \} \quad (2)$$

여기서  $w$ 는 구조물의 변위,  $\kappa$ 는 구조물 내에서 파수를 의미한다. 음원이 있는 바닥 면의 경계조건은 오일러 방정식을 이용하면 다음의 경계조건으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial p_i}{\partial z} \Big|_{z=-L_z} = -jk\rho_0 c_0 Q \delta(x - x_s) \quad (0 < x < L_x) \quad (3)$$

여기서  $\rho_0$ 는 유체의 밀도,  $c_0$ 는 음속이다. 공동 내에서는  $x$ 축에 수직인 벽면에서 음압의 공간 미분이 0이 되는 경계조건, 입구에서의 압력과 속도에 대한 연속 조건, 구조물의 속도는 공동 내/외부 유체의 입자 속도와 같아야 하는 경계조건을 고려하면 필요한 지배 방정식과 경계 조건을 모두 수학적으로 표현할 수 있다. 이로부터 해를 얻기 위해 구조-음향 연성 문제에서 가장 잘 정립된 이론인 모드 함수의 합을 이용하는 방법을 이용한다.<sup>(4, 8)</sup>

공동 내의 음압은  $x$ 방향 및  $z$ 방향 진행파 및 반사파의 조합으로 표현할 수 있으며,  $x$ 방향의 경계 조건을 적용하면, 공동 내의 음압은 모드 조합의 형태인

$$p_i(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \Psi_n(x) (A_n e^{-jk_n z} + B_n e^{jk_n z}) \quad (4)$$

로 표현할 수 있다. 여기서,  $\Psi_n(x)$ 는 공동 내의  $x$  방향으로 형성되는 모드 함수,  $k_{xn}$ 과  $k_{zn}$ 은 각각  $n$ 번째 모드에서  $x$ 와  $z$ 방향의 파수이다. 공동 윗면의 외부음장은 유연한 구조물과 입구에 의해 연성되어 있으므로 구조물의 법선 방향 속도와 공동 내/외부의 입자속도, 입구에서의 음압 및 입자 속도 연속 조건을 동시에 고려해야 한다. 여기서 외부음장은  $z=0$  위치에 가상의 음원이 강체 배플에 놓여있는 경우로 생각할 수 있으며, 이는 키르호프-헬름홀츠(Kirchhoff-Helmholtz) 적분방정식을 이용해 표현할 수 있다. 또, 노이만(Neumann) 경계조건을 만족하는 그린

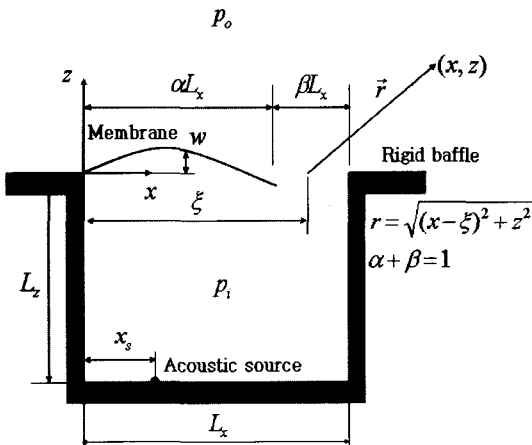


Fig. 2 The mathematical model of coupling system. The cavity is rectangle and its size is  $L_x$  by  $L_z$ . The membrane has length ( $L_x$ ) and is under tensile force  $T$ . The source is located at the bottom of cavity ( $z = -L_z, x = x_s$ )

함수를 사용하면 적분 방정식의 한 항을 제거할 수 있어 외부음장을 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$p_o(x, z) = -\int_0^L G_N(x, z | \xi, 0) \frac{\partial p_o(\xi, 0)}{\partial \xi} d\xi \quad (5)$$

한편, 유연한 구조물의 변위는 경계조건을 만족하는 구조물의 진공 중의 모드의 합을 이용해 다음 식으로 표현할 수 있다고 가정하자.

$$w(x) = \sum_{m=0}^{\infty} W_m \phi_m(x) \quad (6)$$

모드 함수의 합으로 표현된 내/외부 음압 및 구조물의 변위를 경계조건에 대입해 모드 함수의 직교 특성을 이용해 해를 구하는 방법은 참고문헌 8에 매우 잘 정립되어 있다. 본 연구는 이 방법을 이용해 경계의 특성 변화에 따른 구조-음향 연성 문제를 자세히 다루고자 한다.

### 3. 수치실험 및 고찰

경계의 특성 변화가 연성계의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 입구의 특성 만을 파악할 수 있고, 연성계와 비교를 통해 구조물의 추가적인 특성의 파악이 가능하도록 먼저 구조물 대신 강체벽과 입구로 구성된 비 연성 공동계에 대해 살펴보고 비교하고자 한다. 모드 함수의 합을 이용한 파라미터 연구의 경우 비교적 많은 시간이 소요되므로 그 특성을 파악할 수 있는 최소한의 독립 변수에 대해 고찰하고자 하였다. 박막의 변경 가능한 특성으로 밀도, 장력, 길이를 고려하였으며, 공동의  $x$ 방향 길이에 대해 정규화된 구조물의 길이를  $\alpha$ 로 정의하였다.

Fig. 3(a)는 정규화된 구조물의 길이 변화에 대해 비 연성계 공동 내부의 공간 평균된 음압을 무 차원화된 파수에 대해 보인 것이다.  $\alpha$ 가 증가함에 따라 즉, 입구의 길이가 감소할수록 피크 주파수 성분의 정점은 저주파로 이동하고, 크기는 증가하며, 대역폭은 감소하는 경향을 보인다. 이는 헬름홀쯔 모드에 해당하는 것으로 공동의 기하학적 형태가 주어진 경우, 주파수<sup>(9)</sup>는

$$f_H = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (7)$$

로 결정되고, 대역폭은 임피던스의 실수 항 즉, 방사 저항에 의해 지배되고, 플랜지가 있는 입구의 방사 저항<sup>(9)</sup>은

$$R_r = \rho_0 c_0 \frac{k^2 S^2}{2\pi} \quad (8)$$

의 관계를 가진다. 여기서  $S$ 는 입구의 면적,  $V$ 는 공동 내의 체적,  $L$ 은 목의 유효 길이로 플랜지가 있는 경우와 없는 경우에 대해 다른 값이 적용된다. 헬름홀쯔 공명기의 공명 주파수는 다른 값이 고정되어 있다면, 입구의 면적에 비례하여 증가하고, 대역폭은 입구 면적의 제곱에 비례하는 특성을 보인다. 정규화된 벽의 길이  $\alpha$ 가 증가하는 경우는 입구가 감소하는 것과 같으므로 주파수와 대역폭이 감소하게 된다. 만약  $\alpha$ 가 계속 증가하여 1이 되는 극한의 경우를 생각하면 헬름홀쯔 주파수는 0이 되고 이는 강체벽 공동에서 발견할 수 있는 주파수가 0인 곳에서의 피크 즉, 강체 모드에 대한 특성으로 나타나게 될 것임을 쉽게 예측할 수 있다. 이제 강체벽을 박막으로 대치한 Fig. 3(b)의 경우를 고찰해 보자. 이 경우 인가되는 장력은 1000 N/m, 박막의 단위 면적당 밀도는 1 kg/m<sup>2</sup>를 사용해 구조물 내의 파동 속도가 음속의 1/10 정도 되게 하였다. Fig. 3(b)는  $\alpha$ 가 변화하는 경우에 연성계 공동 내부의 공간 평균된 음압을 보인 것이다. 전체적인 경향은 비 연성계의 결과와 유사하나 넓은 대역폭을 갖는 헬름홀쯔 모드의 주위에 박막과 공동의 연성 작용에 의해 좁은 대역폭을 갖는 산과 골이 추가적으로 발생한 것을 볼 수 있다. 입구의 길이가 증가할수록 헬름홀쯔 모드의 주파수는 비 연성계의 경우처럼 증가하지만 그 변화의 폭은 오히려 연성계가 크다. 이는 박막의 길이 전체가 강체벽으로 동작하지 않고 일부는 벽으로, 일부는 입구로 작용해 상대적으로 입구 면적의 변화가 증가한 것으로 해석할 수 있을 것이다.  $\alpha$ 가 증가할수록 박막의 길이가 증가하는 것이므로 고유 주파수는 감소할 것이고, 연성과 관련된 면적이 증가해 연성 주파수에서의 피크는 크게 될 것임을 예측할 수 있고, 계산 결과는 이러한 사실을 반영하고 있다.

Fig. 4는 두 가지 다른 입구의 크기에 대해서 헬름홀츠 모드에서 연성계와 비 연성계의 에너지 (음압) 및 에너지 흐름 (능동 인텐시티)을 경계로 나누어진 두 개의 공간에서 보인 것이다. 음압은  $\sqrt{\langle p_i \rangle^2}$ 에 대해 정규화하였고, 능동 인텐시티는  $\langle p_i \rangle^2 / 2\rho_0 c_0^2$ 에 대해 정규화하였다. 여기서  $\langle \cdot \rangle$ 는 공동 내부에 대해 공간 평균되었음을 의미한다. 벽과 배플은 강체로 가정하였으므로 능동 인텐시티의 수직한 성분은 0이 됨을 볼 수 있다. 비 연성계의 경우 (Fig. 4(a-b)) 음원에서 발생한 에너지가 입구를 통해 반 무한 공간으로 방사되지만 연성계의 경우 (Fig. 4(c-d)) 대부분의 에너지는 입구를 통해 방사되고 일부분의 에너지는 박막을 통해 방사됨을 에너지 흐름으로부터 확인할 수 있다. 또한 입구의 면적이 작아지면 외부로 방사되는 에너지가 줄어드는 현상을 관측할 수 있

으며, 이는 물리적으로 예측 가능한 결과이다. 박막의 길이가 길어지는 경우는 연성 현상에 의해 외부로 방사되는 음압의 형태도 달라지는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 두 가지 다른 크기의 입구 또는 박막의 길이에 대해 구조물의 특성이 강하게 나타나는 두 번째 산과 골에서의 음장 및 구조물의 특성을 가시화한 것이다. Fig. 4에서와 동일한 정규화를 통해 결과를 제시하였다. 산에 해당하는 주파수에서는 대부분의 에너지가 입구로 방사되고 그 중 일부는 박막을 통해 공동으로 다시 들어오는 것을 관찰할 수 있다. 박막의 길이가 작은 경우 골에 해당하는 주파수에서의 음장특성(Fig. 5(b))은 산에 해당하는 음장의 특성과 매우 비슷하다. 그러나 박막의 길이가 긴 경우 골에 해당하는 주파수에서 대부분의 에너지는 박막을 통해 방사되고 박막의 끝 부분에서 일부분만이 공동으로 다시 유입되는 것을 관찰할 수 있다. 구조물의 길이가 긴 경우에 연성 현상이 탁월하게 관찰됨을 알 수 있고, 이때 산에 해당하는 주파수에서는 대부분의 에너지가 구조물의 주위에 집중되어 강한 구조-음향 연성현상 중에서 비 효율적인 방사가 되는 것으로 생각

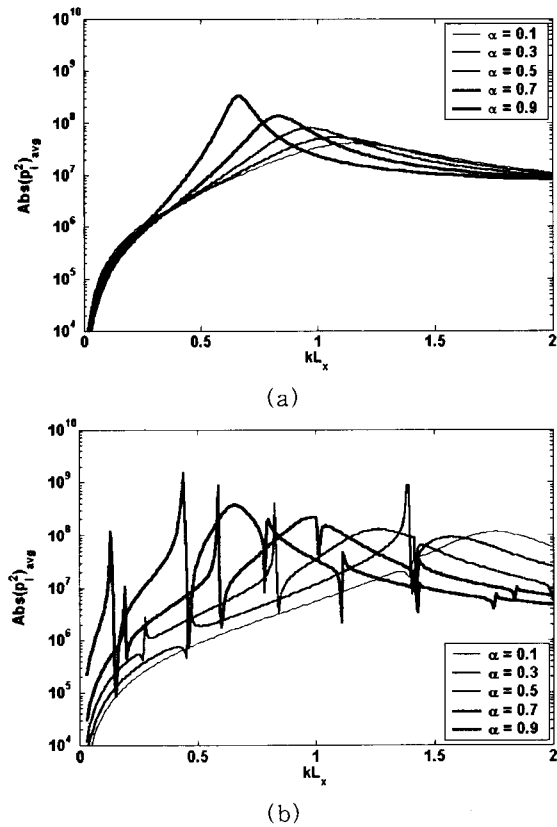


Fig. 3 The effect of the normalized length of membrane on the spatially averaged sound pressure level in the cavity: (a) uncoupled cavity; (b) coupled cavity with  $T=1000 \text{ N/m}$  and  $\rho_m=1 \text{ kg/m}^2$

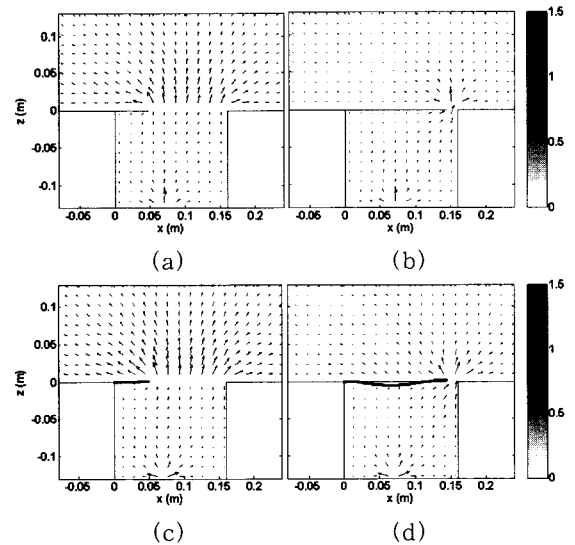


Fig. 4 Contour and vector plots of acoustic fields at the Helmholtz mode frequency: (a) for  $\alpha=0.3$  at  $kLx=1.073$  for the uncoupled cavity; (b) for  $\alpha=0.9$  at  $kLx=0.660$  for the uncoupled cavity; (c) for  $\alpha=0.3$  at  $kLx=1.571$  for the coupled cavity; (d) for  $\alpha=0.9$  at  $kLx=0.657$  for the coupled cavity

할 수 있으며, 골에 해당하는 주파수의 경우는 효율적인 방사가 되는 강한 연성현상이라는 것을 알 수 있다.

경계의 임피던스 성분 중에서 질량과 관계를 갖고 있는 요소는 벽의 단위 면적당 밀도이다. 질량, 즉 박막의 단위 면적당 밀도가 연성 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 밀도를 기준 값의 0.1배에서 10배까지의 범위에서 다섯 가지 경우에 대해 변화시키며 살펴 보았다. 이때 인가되는 장력은 1000 N/m, 정규화된 박막의 길이는 0.8로 선정하였다. Fig. 6은 박막의 밀도 변화에 따른 공동 내부의 공간 평균된 음압을 보인 것이다. 박막의 밀도를 증가시키면 연성 전 박막의 공진 주파수는 감소할 것이고, 이 현상은 연성 후에도 그대로 반영될 것임을 쉽게 예측할 수 있다. 연성 전 박막의 공진 주파수와 관계가 깊은 헬름홀츠 모드 이하의 주파수에 형성되는 날카로운 첫 번째 구조-우세 모드를 살펴보면 박막의 밀도가 증가하면 공진 주파수가 낮아지는 물리적으로 타당한 특성을 보인다. 헬름홀츠 모드에 해당하는 주파수는 박막의 밀도가 낮은 경우에 연성 전의 주파수에 비해 많이 증

가하는 것을 볼 수 있다. 이는 박막의 밀도가 낮아지면 박막이 경계로서의 작용보다 입구로서 작용하여 입구의 유효 면적이 넓어지고 식 (7)에서 설명한 바와 같이 공진 주파수가 증가하는 경향을 보이는 것으로 설명할 수 있을 것이다. 또한 밀도가 낮아지면 연성 대역폭이 증가하는 경향을 가진다는 사실도 관찰할 수 있으며, 이에 대한 이유도 유효 면적의 개념에서 설명할 수 있을 것이다. 밀도가 계속하여 증가하여 경계가 강체벽이 되는 극한의 경우를 생각하면, Fig. 3(a)와 같은 비 연성계의 특성을 갖게 될 것이다. 밀도가 10배 증가한 경우 헬름홀츠 주파수는 거의 강체벽 경계조건에 수렴하였으며, 구조-음향 연성에 의한 산과 골도 매우 작아져 있음을 볼 수 있다.

벽의 임피던스를 결정하는 요소 중 강성과 관련 있는 것은 구조물이 박막인 경우 작용하는 장력과 관계가 있다. Fig. 7은 박막에 인가되는 장력을 기준 값의 0.1배에서 10배까지의 범위에서 다섯 단계로 박막의 장력을 증가시키면서 주파수에 대한 공동 내부에 발생하는 공간 평균된 음압을 계산한 결과이다. 박막에 인가되는 장력이 증가하면 계의 질량은 유지되며 스프링 상수가 증가하는 것이므로 박막의 공진 주파수가 증가하는 특성을 보이며, 이 또한 물리적으로 예측 가능한 타당한 결과이다. 장력의 증가와 함께 헬름홀츠 공명 주파수도 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 박막의 주파수 특성이 변화하는 것에 비해 헬름홀츠 공명 주파수는 밀도를 변화시키는 것에 비해 매우 작은 변화를 보이고 있으며, 이로부터 연성작용에 의한 헬름홀츠 공명 주파수의 변화는 박막

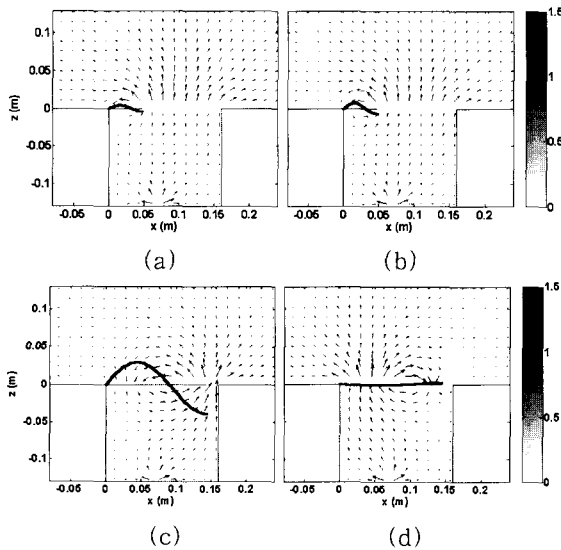


Fig. 5 Contour and vector plots of acoustic fields for the coupled cavity at the second peak and trough: (a) for  $\alpha=0.3$  at the second peak ( $kLx=1.389$ ): (b) for  $\alpha=0.3$  at the second trough ( $kLx=1.407$ ): (c) for  $\alpha=0.9$  at the second peak ( $kLx=0.440$ ): (d) for  $\alpha=0.9$  at the second trough ( $kLx=0.462$ )

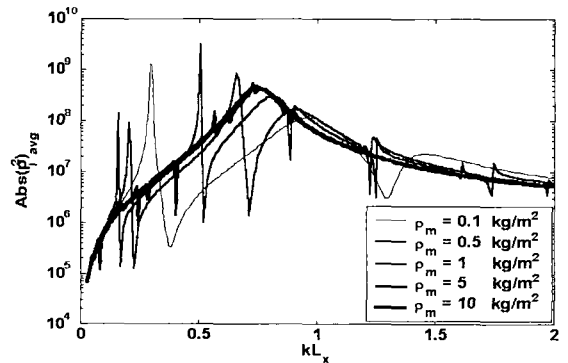


Fig. 6 The effect of the density of membrane, ( $m$  on the spatially averaged sound pressure level in the cavity with  $\alpha=0.8$  and  $T=1000$  N/m

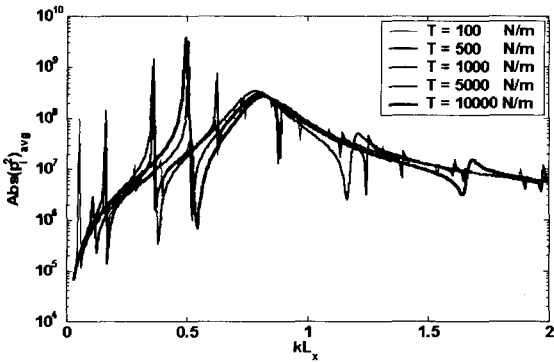


Fig. 7 The effect of the applied tension of membrane, on the spatially averaged sound pressure level in the cavity under  $\alpha=0.8$  and  $\rho_m=1 \text{ kg/m}^2$

의 장력 변화에 비해 밀도의 변화에 더욱 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이는 저주파에서 공동이 주로 스프링의 효과만을 갖고 있기 때문에 이에 상응하는 거의 질량효과와 상쇄되는 헬름홀쯔 공명 주파수는 박막의 질량효과 변화에 민감할 것이라는 유추를 가능하게 한다.

#### 4. 결론

체적과 압력 경계를 갖는 음향학적으로 유한한 공간과 반 무한 공간 사이의 상호작용을 경계를 형성하는 벽면의 제어변수에 따른 음장 특성의 변화를 저주파 대역에서 탁월한 특성이 나타나는 구조-우세 모드와 헬름홀쯔 모드에 대해 중점적으로 고찰하였다. 헬름홀쯔 모드에 해당하는 주파수와 그 주파수에서의 대역폭은 박막의 길이와 밀도의 증가에 따라 감소하는데 반해, 장력의 증가와 함께 주파수는 증가하고, 대역폭은 거의 변하지 않는 특성을 갖는다. 저주파에서 강성 특성을 갖는 공동이 질량 항의 변화에 해당하는 길이와 밀도에 대해서는 민감하게 반응하고, 강성 항에 해당하는 장력의 변화에는 큰 변화를 보이지 않음을 뜻한다. 구조-우세 모드에 해당하는 연성 주파수의 경우는 질량 항에 해당하는 길이와 밀도가 증가하는 경우에는 감소하고, 강성이 증가하는 경우에는 증가하는 물리적으로 매우 타당한 결과를 관찰하였다.

유한한 공간과 반 무한 공간에서 에너지와 에너지 흐름을 헬름홀쯔 모드와 구조-우세 연성 모드에서 구

조물의 크기가 달라지는 경우에 대해 가시화해 관찰하였다. 연성 구조물의 면적이 연성 현상에 매우 중요한 요소임을 보였으며, 연성 현상에 의해 방사 음장 형태가 달라질 수 있음을 보였다. 구조-우세 모드가 발생하는 즉, 강한 구조-음향 연성 현상 중 산에 해당하는 주파수에서는 비 효율적인 방사가 이루어지는데 반해 골에 해당하는 주파수에서는 효율적인 방사가 이루어짐을 보였다.

구조-음향 연성 현상을 이용해 소음 제어, 방사체 설계 등을 시도하는 경우에 연성 주파수, 헬름홀쯔 주파수 및 대역폭 변화 등의 연성 특성을 제어하기 위해 본 연구에서 제시한 특성 변화를 이용할 수 있을 것이다.

#### 후기

본 연구는 한국과학기술연구원(KISTEP)의 국가지정연구실(NRL) 사업과 교육부의 두뇌한국21(BK21) 사업의 지원으로 수행되었을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- (1) Morse, P. M., 1966, "Transmission of Sound Through a Circular Membrane in a Plane Wall," J. Acous. Soc. Am., Vol. 40, No. 2, pp. 354~366.
- (2) Mason, V., 1966, "On the Coupling of a Membrane with an Incident Sound Wave," J. Sound Vib., Vol. 4, No. 1, pp. 9~17.
- (3) Morse, P. M. and Ingard, K. U., 1968, "Theoretical Acoustics," pp 679~688, McGraw-Hill.
- (4) Dowell, E. H., Gorman, G. F. and Smith, D. A., 1977, "Acoustoelasticity: General Theory, Acoustic Natural Modes and Forced Response to Sinusoidal Excitation, Including Comparisons with Experiment," J. Sound Vib., Vol. 52, No. 4, pp. 519~542.
- (5) 김시문, 김양한, 1997, "실험적 방법에 의한 평판-공동 연성계의 음장 가시화," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 662~668.

(6) Kim, S. -M. and Kim, Y. -H., 2001, "Structural-acoustic Coupling in a Partially Opened Platecavity System: Experimental Observation by Using Nearfield Acoustic Holography," J. Acous. Soc. Am., Vol. 109, No. 1, pp. 65~74.

(7) 김시문, 김양한, 1999, "부분적으로 개방되어 있는 2 차원 박막-공동 연성계의 임피던스 해석," 한국소음진동공학회 춘계학술대논문집, pp. 742~747.

(8) Kim, S. M. and Kim, Y. -H., 2002, "Solution of Coupled Acoustic Problems: a Partially Opened Cavity Coupled with a Membrane and a Semi-infinite Exterior Field," J. Sound Vib., vol. 254, No. 2, pp. 231~244.

(9) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 1982, "Fundamentals of Acoustics," pp. 225-228, John Wiley and sons.