한국소음진동공학회 1997년도 춘계학술대회논문집, pp. 662 ~ 668.

# 실험적 방법에 의한 평판-공동 연성계의 음장 가시화

°김시문*, 김양한**

# Visualization of Sound Field of Plate-Cavity Coupled System by Experimental Method

Sea-Moon Kim and Yang-Hann Kim


## ABSTRACT

Since the structural impedance is much greater than that of medium in the most cases, we often assume that the structure is rigid and that the structural vibration is independent of medium, i.e. we usually calculate the vibration of the structure first, and then obtain the radiation sound from it. This assumption is no longer satisfied when the structural stiffness is small or the fluid impedance is comparable to it. This situation often happens in underwater acoustics. Although many researchers have studied about structural-fluid coupling, we have difficulties in solving the problem analytically. Therefore the numerical method using powerful computation leads us to obtain the various coupling problem. To understand the physical coupling phenomena, visualization of sound field by a geometrically simple system(plate-cavity coupled system) is performed experimentally. Acoustic holographic method is used to estimate sound field.


## 1. 서론

음파는 음원 및 매질에 따라서 크게 고체음(structure-borne sound)과 공기음(air-borne sound)으로 나눌 수 있다. 공기음은 유체의 흐름이 있는 경우 점성 또는 장애물에 의한 흐름의 변화에 의해서 발생되는 소음으로서 예로 제트 소음(jet noise), 와류 소음(turbulent noise) 등이 있다. 주위에서 주로 접하고 있는 소음은 고체음에 의한 것으로 구조물에서 기계적인 운동이 원인이 되어 발생한다. 구조물은 유한한 크기를 가지고 있기 때문에 음파의 중첩에 의한 공진이 발생하며 큰 진동을 유발하기도 한다. 이는 물리적으로 구조물에 손상을 입힐 수도 있을 뿐만 아니라 큰 소음을 발생시켜 문제가 되는 경우도 있다.

대부분의 시스템의 경우 공기의 임피던스(impedance)가 상대적으로 구조물의 임피던스에 비해 작기 때문에, 공기음 해석의 경우 구조물은 강체라고 가정하며, 고체음 해석시에는 유체에 의

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

한 영향을 무시를 하고 분석을 한다. 즉 구조물의 진동만을 해석한 후 키르히호프 헬름홀쯔 방정식(Kirhhoff-Helmholtz equation)으로부터 방사 음장을 계산한다[1]. 그러나 수중이나 혹은 구조물의 강성이 작아 유체의 임피던스를 무시할 수 없는 경우에는 이에 의한 영향을 고려해야 한다[1]. 무한 공간 내에서 유체 하중(fluid loading)에 의한 평판의 진동 해석[1] 및 공동(cavity)과 평판과의 상호 작용에 관한 모우드 해석[2] 등의 연성에 관한 연구는 오래 전부터 있어왔으나, 고유진동수, 어드미턴스(admittance), 자유진동 등의 부분적인 관계를 주로 다루고 있으며[3,4] 외부로 방사되는 음장은 다루고 있지 않다. 최근에 들어와서는 자동차 실내의 부밍(booming) 소음 등의 수치적인 방법에 의존한 연성 해석이 활발히 이루어지고 있으며[5] 한쪽 면이 박막(membrane)인 관(duct)에서의 소음 저감을 외부 음장을 고려한 모우드의 선형 합에 의해 해석하려는 시도가 있었으나[6] 한정된 주파수 영역의 한계점을 벗어나지 못하고 있다. 본 연구에서는 일반적인 해석에 앞서 평판-공동 연성계의 물리적인 현상을 이해할 수 있도록 기본적인 계를 구성하여 실험적으로 결과를 살펴 보았다. 공동 내부의 음압을 측정하여 각 주파수 별로 모우드를 얻었으며 외부에서 마이크로폰 어레이로 음압을 측정한 후 음향 홀로그래피 이론[7-10]을 적용하여 음장 방사 형태를 가시화하여 실제로 발생되는 물리 현상을 고찰하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

공동 내부 및 외부와의 상호 작용, 평판과의 연성 작용을 살펴 보기 위해서 Fig. 1 과 같은 평판-공동 연성계를 구성하였다. 공동의 크기는 가로($x$) 16.0cm, 세로($y$) 11.6cm, 높이($z$) 13.1cm 이다. 윗면은 0.3mm 두께의 함석판을 사용하여 $x$ 축 방향으로 일부분만 덮어 4cm($x$) x 11.6cm($y$)의 입구로 공기가 자유롭게 드나들 수 있도록 하였다. 나머지 면은 2cm 두께의 아크릴로 강체벽이 될 수 있도록 구성하였다. 음장의 가진은 지름 3.5cm 의 스피커(horn driver)로 하였으며 많은 모우드를 가진할 수 있도록 좌측면($x$=0)의 중심에서 $y$ 축과 $z$ 축 방향으로 1cm 벗어난 위치에 두었다. 내부 음장 측정을 위해서 아래면($z$=0)에 지름이 7.2cm 이고 가로, 세로 간격이 2cm 인 7x5 개의 구멍을 만들었으며 위상 보정을 위한 기준 음압 신호를 얻기 위해 한쪽 귀퉁이에 하나의 구멍을 추가하였다. 기준 마이크로폰(B&K type 4135)은 벽면에 설치(flush mounting)하였으며 내부 음압 측정은 3 개의 마이크로폰(B&K type 4135)을 옮겨 가면서 측정하였다. $z$ 축 방향으로의 간격은 2cm 로 하여 7 개의 위치에서 측정하여 총 245 개의 위치에서 음압을 측정하였다. 외부로 방사되는 음장은 12 개의 마이크로폰(PCB 130A) 어레이를 이용하여 2cm 간격으로 24x24 개의 위치에서 측정하였다(Fig. 2). 마이크로폰과 평판 사이의 간격은 2cm 이였으며 기준 신호는 내부 음장 측정에 사용되어진 것과 동일한 것을 사용하였다. 스피커 가진은 3.2 kHz 까지의 백색 잡음(random noise)으로 하였으며 데이터 입력

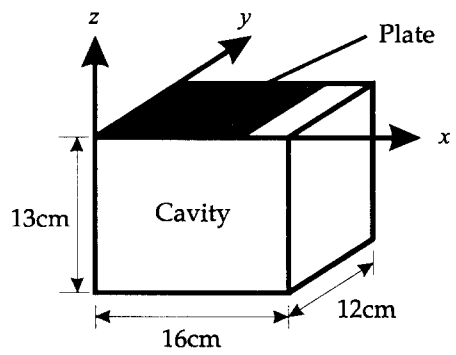



Fig. 1 Plate-Cavity System : Plate (12cm*12cm, galvanized iron sheet, 0.3mm thickness), Cavity (16cm*12cm*13cm, acryl wall)

은 동시 샘플링(sampling) 다채널 신호분석기 (HP3566A)를 이용하였다.

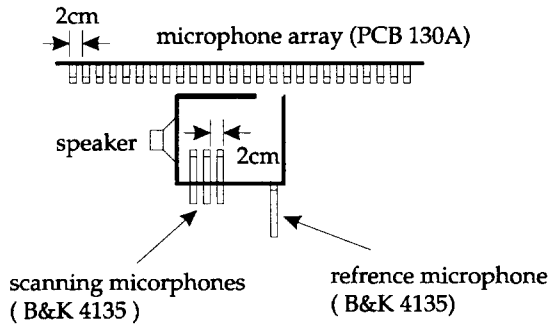



Fig. 2 Experimental Setup (Inside of the cavity : 2cm spacing, 7*5*7 pts, Outside of the cavity : 2cm spacing, 24*24 pts, Distance between the microphone array and the system : 2cm)

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3 은 기준 마이크로폰의 스펙트럼을 나타내고 있다. 3.2kHz 까지 10 여 개의 피크(peak)치를 가지며 외부로 방사되는 음장에 의해 감쇠가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

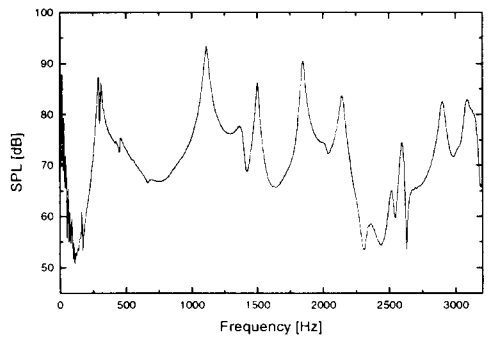



Fig. 3 Power Spectrum of the Pressure Signal at Reference Microphone

Table 1 은 상면이 강체벽(rigid)인 경우와 자유 음장(open)인 경우에 대한 이론적인 공진주파수와 평판 실험으로부터 얻은 공진주파수를 나타낸다. 평판의 임피던스(impedance)는 강체벽인 경우와 자유 음장인 경우의 중간으로 생각할 수 있으므로 이때의 공진주파수 역시 중간값을 가짐을 알 수 있다.

Table 1 Resonant Frequencies in Hz: Theoretical and experimental result ( *l,m,n*: 각각 *x,y,z* 방향으로의 절면(nodal surface)의 갯수)

| mode (*l,m,n*) | rigid case | open case | experiment (plate) |
|---|---|---|---|
| (0,0,0) | | 731 | 292, 312, 460 |
| (1,0,0) | 1064 | 1291 | 1112 |
| (0,0,1) | 1302 | 1493 | 1368 |
| (0,1,0) | 1462 | 2193 | 1500 |
| (1,0,1) | 1681 | 1833 | |
| (1,1,0) | 1808 | 2437 | 1848 |
| (2,0,0) | 2128 | 2250 | 2140 |
| (2,0,1) | 2494 | 2599 | 2360 |

Fig. 4 는 460Hz 및 1500Hz 에서 공동 내부 및 평판-공동 연성계의 바로 위에서 측정한 음압 분포를 나타내고 있다. 내부 음장 분포는 한쪽만이 막혀 있어 비대칭 현상이 보이고 있음을 알 수 있으며 상대적으로 입구 근방에 음압이 작게 나타난다. 이는 강체벽 주위에서 가장 큰 음압을 가지는 반면 열려있는 부분은 임피던스가 다른 부분에 비해서 작기 때문에 음압 하강이 생기기 때문이다. 외부 음장만을 살펴보면 입구 주위에서 가장 큰 음압 분포를 가지며 이는 공동의 음장 가진에 의해 외부에서는 마치 입구에 음원이 존재하는 것으로 생각되기 때문이다. 1500Hz 의 경우 $y$ 축 방향으로 모우드가 생성되어 마치 2 개의 음원이 있는 것처럼 나타난다.

Fig. 5 는 외부에서 측정한 음압 신호로부터 음향 홀로그래피 이론[7]을 이용하여 예측한 음압 분포를 나타낸다. 1500Hz 의 경우는 측정 음압 분포와 비슷한 경향을 보이고 있으나 460Hz 에서는 평판 위의 음압이 상대적으로 증가하여 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 6 은 평판에 수직한 방향으로의 속도 분포를 예측한 결과다. 1500Hz 의 경우 음압 분포와 속도 분포가 일치하고 있음을 알 수 있다. 460Hz 의 경우 평판에서의 속도가 입구에서의 값보다는 작게 나타나지만 무시할 수 없을 정도로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 평판과 공동간에 연성 효과가 크게 나타나고 있기 때문이며 이와 같은 경우에 평판을 강체로 모델링할 수 없음을 알 수 있다.

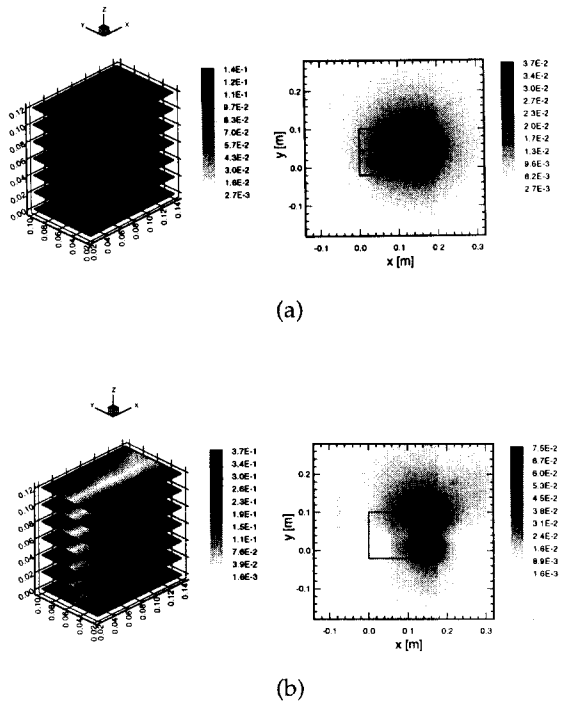



Fig. 4 Measured Pressure distributions in the cavity and on the surface above the system (a) 460Hz (b) 1500Hz

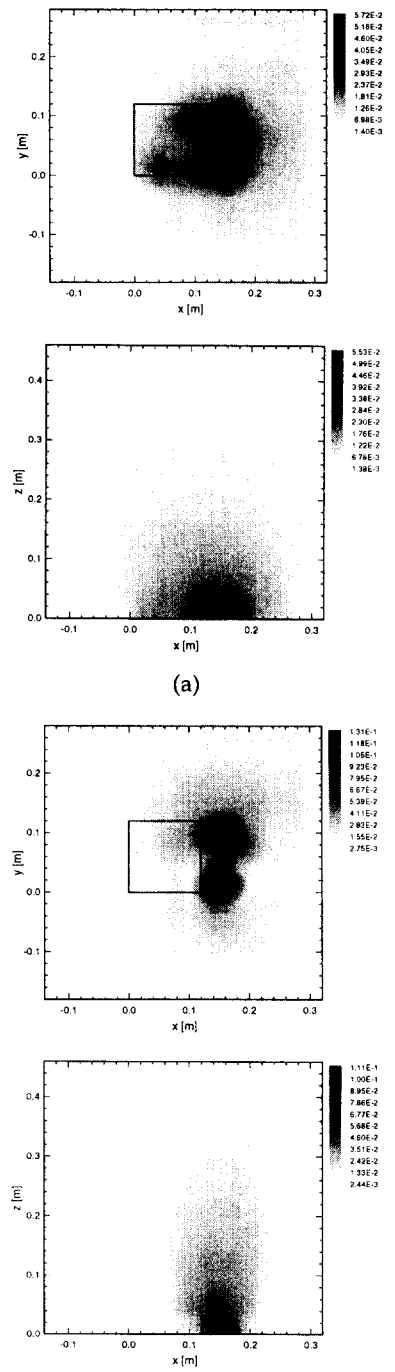
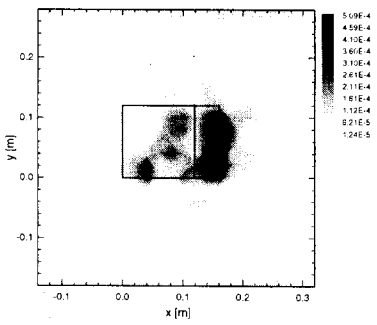
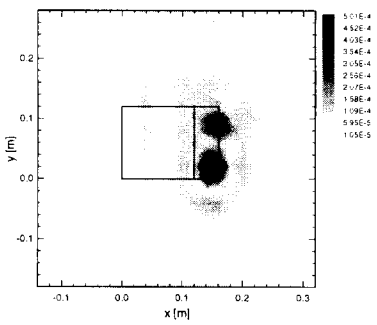



Fig. 5 Estimated pressure distributions (a) 460Hz (b) 1500Hz



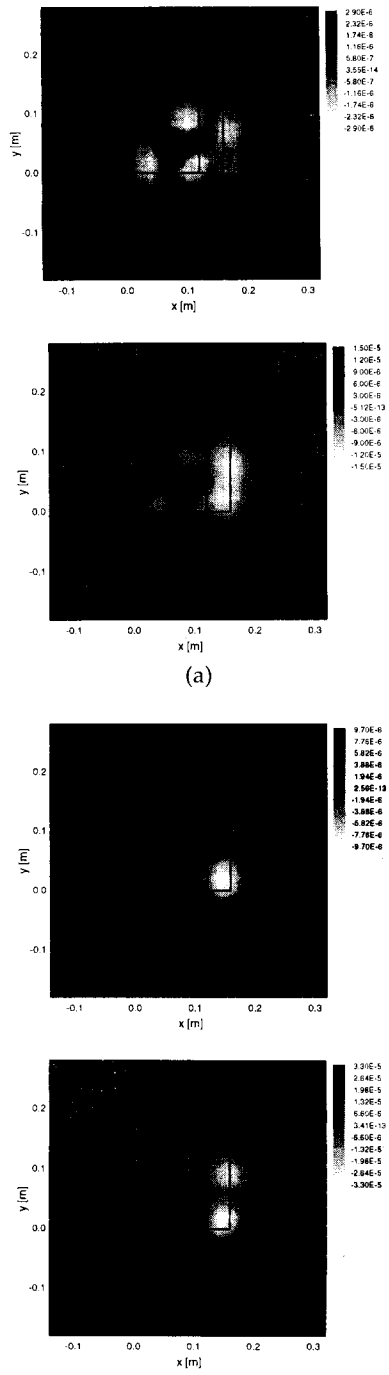

(a)




(b)

Fig. 6 Estimated $z$-directional components of the velocities (a) 460Hz (b) 1500Hz

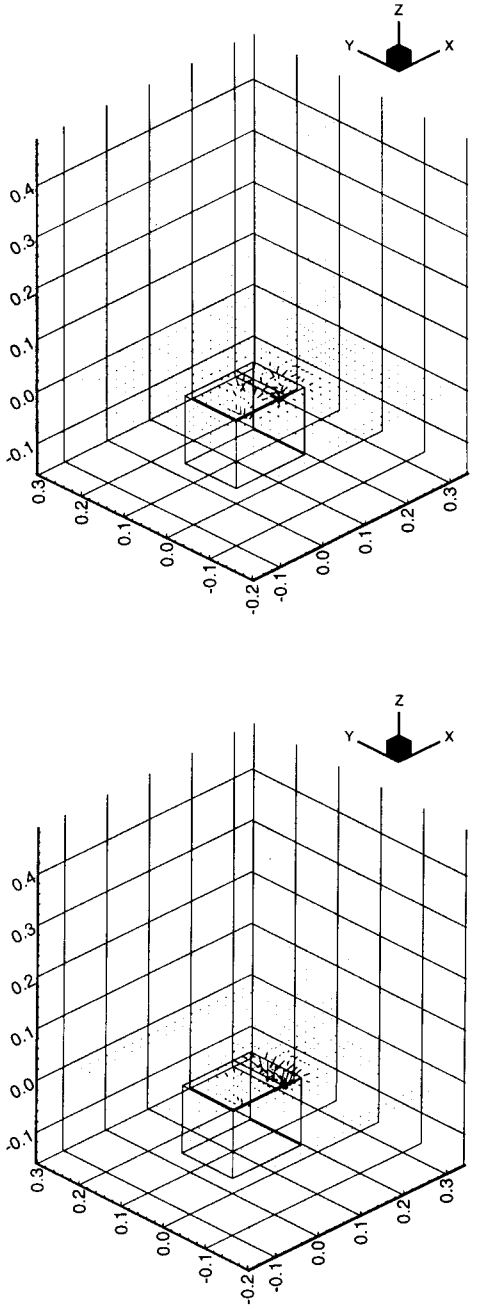
Fig. 7 과 Fig. 8 은 능동 인텐시티(active intensity) 및 반동 인텐시티(reactive intensity)를 예측한 결과이다. 물리적으로 능동 인텐시티는 평균 에너지 흐름을 나타내며 반동 인텐시티는 순간적인 에너지의 흐름의 변화를 나타내며 음원이 존재하는 영역에서는 반동 인텐시티가 크게 나타난다[11]. 음원의 위치는 460Hz 및 1500Hz 의 경우 모두 실제 음압의 크기가 입구에서 더 크게 나타나나 능동 인텐시티를 보면 460Hz 일 때 오히려 입구보다 평판에서 더 많은 에너지의 흐름이 있는 것을 관찰할 수 있다.



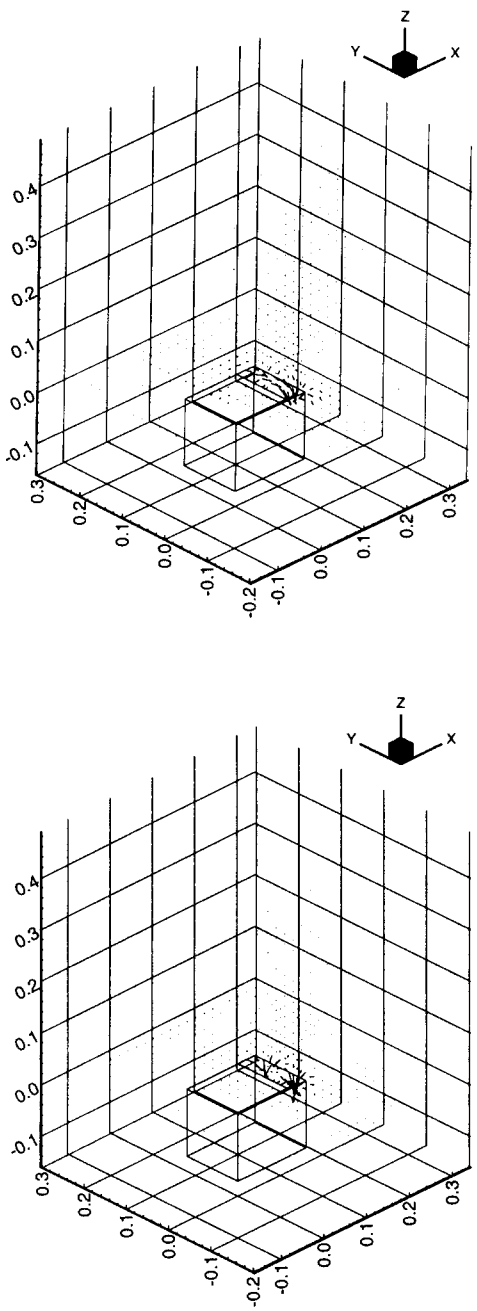

(a)

(b)

Fig. 7 Estimated $z$-directional components of active and reactive intensity (2-dimenstional plot) (a) 460Hz (b) 1500Hz




(a)




(b)

Fig. 8 Estimated active and reactive intensity (3-dimenstional plot) (a) 460Hz (b) 1500Hz

## 4. 결론

사각 형상을 가진 평판-공동 연성계에서 공동 내부 음장 및 외부로 방사되는 음장을 실험적으로 구하였다. 전체 시스템의 고유 진동수는 각각의 모우드에 대해 평판 대신 강체벽인 경우와 자유음장 조건인 경우와의 사이에 존재한다. 공동 내부의 모우드 형상은 강체벽인 경우와 비슷하나 전체적으로 입구쪽에서 작은 음압을 가진다. 외부로 방사되는 음장은 대부분이 입구쪽에서 큰 음압을 형성하고 있음을 알 수 있다. 속도 및 인텐시티 결과로부터 특정 주파수에서는 입구에서 보다 더 많은 양이 평판의 진동에 의한 음의 방사하는 것을 볼 수 있으며 이는 평판의 임피던스가 주파수에 따라 변화하기 때문이다. 평판의 임피던스가 공기에 가까운 즉 좀더 유연한 매질을 이용한다면 평판-공동과의 연성에 의한 음장 방사 형태를 쉽게 관찰할 수 있을 것으로 생각되며 입구의 크기에 따른 변화도 큰 영향을 미치리라 예상할 수 있다.

## 참고 문헌


(1) Fahy, F. J., 1985, Sound and Structural Vibration, Academic Press, London.

(2) Pretlove, A. J., 1965, "Free Vibration of a Rectangular Panel Backed by a Closed Rectangular Cavity," Journal of Sound and Vibration, Vol. 2, No. 3, pp. 197~209.

(3) Crighton, D. G., 1980, "Approximation to the Admittances and Free Wavenumbers of Fluid-Loaded Panels," Journal of Sound and Vibration, Vol. 68, No. 1, pp. 15~33.

(4) Hong, K. L. and Kim, J., 1995, "Analysis of Free Vibration of Structural-Acoustic Coupled System, Part II: Two- and Three-Dimensional Examples," Journal of Sound and Vibration, Vol. 188, No. 4, pp. 577~600.

(5) 최성훈, 김진오, 1996, "진동-음향 연성계의 구조-유체 상호작용," 소음진동공학회 1996 년도 추계학술대회논문집, pp. 135~141.

(6) 박수경, 김양한, 1996, "박막과의 연성에 의한 저주파 소음 저감," 소음진동공학회 1996 년도 추계학술대회논문집, pp. 148~152.

(7) Maynard, D., Williams, E. G. and Lee, Y., 1985, "Nearfield acoustic holography : I. Theory of generalized holography and development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, pp. 1395-1413.

(8) 김양한, 권휴상, 1992, "음향 홀로그래피를 이용한 방사 음장의 전방예측 방법에 관한 기본 이론 및 신호처리 방법," 대한기계학회논문집, 제 16 권, 제 9 호, pp. 1654~1668.

(9) 김시문, 김양한, 1995, "네 가지 음향 홀로그래피의 특성 및 오차," 대한기계학회논문집, 제 19 권 제 4 호, pp. 950~967.

(10) Kwon, Hyu-Sang and Kim, Yang-Hann, 1995, "Minimization of bias error due to windows in planar acoustic holography using a minimum error window," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 98, No. 4, pp. 2104~2111.

(11) Fahy, F. J., 1989, Sound Intensity, Elsevier Applied Science, New York.